

h

(1)

Was ist Relativitätstheorie? 4 für

Dem Ersuchen

der Aufforderung Ihres Mitarbeiters, für die

"Times" etwas über "Relativität" zu schreiben, komme ich gerne nach. Denn beide

Zusammenbruch der früheren  
Zusammenhänge der Gelehrten ist mehr als eine  
willkommenen. (Gleichheit)

**К.А. ТОМИЛИН**

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ В ИСТОРИЧЕСКОМ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКОМ АСПЕКТАХ

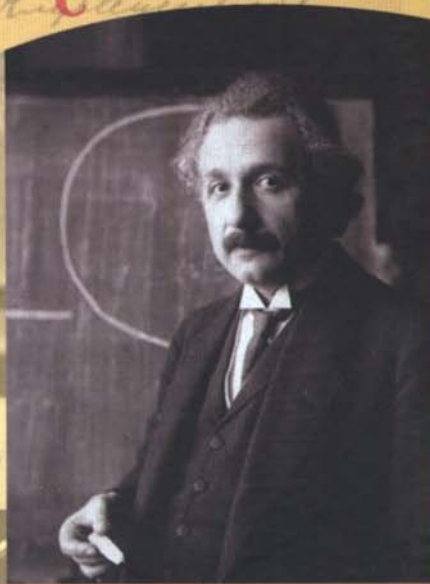
h

G

$$\alpha = \frac{1}{137}$$

e

k



Wie die Wissenschaften in der Geschichte...  
die Naturwissenschaften in der Relativitätstheorie...

Max Planck

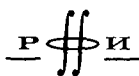
К.А. ТОМИЛИН

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ  
ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ  
В ИСТОРИЧЕСКОМ  
И МЕТОДОЛОГИЧЕСКОМ  
АСПЕКТАХ



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2006

УДК 22.3  
ББК 53.02  
Т 56



Издание осуществлено при поддержке  
Российского фонда фундаментальных  
исследований по проекту 05-06-87036д

Томилин К. А. **Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006 — 368 с. — ISBN 5-9221-0728-3.

Монография посвящена истории возникновения и развития концепции фундаментальных физических постоянных, играющей центральную роль в современной физике. В первой части представлена история появления в физике таких постоянных, как скорость света, постоянная Планка, элементарный заряд. Во второй части рассмотрена история констант взаимодействий — гравитационной постоянной, постоянной Ферми, постоянной тонкой структуры и постоянной сильного взаимодействия. В третьей части анализируются происхождение терминологии, основные свойства фундаментальных постоянных, модели эволюции физических теорий с точки зрения фундаментальных констант, естественные системы единиц, основанные на фундаментальных постоянных. Четвертая часть посвящена основным научно-исследовательским программам XX века с разными подходами к фундаментальным постоянным: попыткам введения новых фундаментальных постоянных, «пифагорейским» попыткам обоснования их численных значений, выявления возможной зависимости некоторых физических констант от космологического времени, антропной программе. Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся возникновением современной физической картины мира

---

Научное издание

*ТОМИЛИН Константин Александрович*

## **ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ В ИСТОРИЧЕСКОМ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКОМ АСПЕКТАХ**

Редактор *В.С. Ярунин*

Оригинал-макет. *Е.А. Королева*

Оформление переплета: *А.Ю. Алехина*

Подписано в печать 02.08.06. Формат 60х90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 23. Уч.-изд. л. 24,8. Тираж 400 экз. Заказ № 1184

Издательская фирма «Физико-математическая литература»

МАИК «Наука/Интерпериодика»

117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90

E-mail: [fizmat@maik.ru](mailto:fizmat@maik.ru), [fmlsale@maik.ru](mailto:fmlsale@maik.ru);

<http://www.fml.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в ООО «Чебоксарская типография № 1»  
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15

---

ISBN 5-9221-0728-3

© ФИЗМАТЛИТ, 2006

© К. А. Томилин, 2006

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> . . . . .	8
<b>Введение</b> . . . . .	11
1. Постоянные математические и физические, размерные и безразмерные . . . . .	11
2. Разные классы физических постоянных и способы их обоснования . . . . .	12
3. Какие физические постоянные являются фундаментальными и каково их число? . . . . .	15
4. Физические постоянные: количественные и силовые, специфические и универсальные . . . . .	20
5. История фундаментальных постоянных. от истории измерений к концептуальным вопросам. . . . .	21
6. Международные конференции по фундаментальным постоянным . . . . .	26
7. Фундаментальные физические постоянные в электронных средствах коммуникаций (интернет) . . . . .	27

### ЧАСТЬ I

#### **ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ В КВАНТОВО-РЕЛЯТИВИСТСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ: ПОЯВЛЕНИЕ АБСОЛЮТНЫХ МАСШТАБОВ ПРИРОДЫ**

<b>Глава 1.1. Скорость света</b> . . . . .	30
1.1.1. От абсолютной к относительной одновременности . . . . .	31
1.1.2. Открытие конечности скорости света . . . . .	36
1.1.3. Скорость света в волновой и корпускулярной теориях света . . . . .	50
1.1.4. Эвристическое значение совпадения констант . . . . .	52
1.1.5. Релятивистские преобразования . . . . .	58
1.1.6. Принцип относительности . . . . .	69
1.1.7. Эйнштейн и принцип постоянства скорости света . . . . .	73
1.1.8. Концепция 4-х мерного пространства-времени . . . . .	78
1.1.9. От измерения скорости света к измерению скоростью света . . . . .	80
<b>Глава 1.2. Постоянная Планка</b> . . . . .	81
1.2.1. Постоянные Стефана-Больцмана и Вина . . . . .	82
1.2.2. Постоянные Планка $a$ и $b$ . . . . .	85
1.2.3. Постоянные Планка $h$ и $k$ . . . . .	86

1.2.4	Соотношение между планковскими постоянными ( $b$ и $h$ ), ( $a$ и $h/k$ )	88
1.2.5	Кванты света Эйнштейна	92
1.2.6	Постоянная Планка и постулаты Бора	93
<b>Глава 1.3.</b>	<b>Элементарный заряд</b>	<b>96</b>
1.3.1.	Постоянная Фарадея	97
1.3.2.	Элементарный заряд	98

## ЧАСТЬ 2

### КОНСТАНТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

<b>Глава 2.1.</b>	<b>Константы гравитационного взаимодействия</b>	<b>106</b>
2.1.1.	Универсальная гравитационная постоянная	106
2.1.2.	Гелиоцентрическая, геоцентрическая, гауссова, эйнштейновская и др. гравитационные постоянные	108
2.1.3.	К истории гравитационной постоянной	109
2.1.4.	Вводил ли Ньютон гравитационную постоянную?	111
2.1.5.	К аналитической форме закона тяготения	115
2.1.6.	К единым мерам в теории тяготения	117
2.1.7.	Опыт Г. Кавендиша: проблемы восприятия и интерпретации	118
2.1.8.	О терминологии и символическом обозначении	123
2.1.9.	О статусе гравитационной постоянной $G$	126
<b>Глава 2.2.</b>	<b>Константы элементарных взаимодействий и их объединение</b>	<b>129</b>
2.2.1.	Константы электромагнитного взаимодействия	129
2.2.2.	Постоянная Ферми	140
2.2.3.	Константы сильного взаимодействия	142
2.2.4.	Объединение констант элементарных взаимодействий	145

## ЧАСТЬ 3

### ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ: ПОНЯТИЕ, СВОЙСТВА, ЗНАЧЕНИЕ

<b>Глава 3.1.</b>	<b>Формирование общей терминологии</b>	<b>157</b>
3.1.1.	Универсальные постоянные	157
3.1.2.	Мировые постоянные	161
3.1.3.	Фундаментальные постоянные	162
3.1.4.	Естественные постоянные	163
3.1.5.	Абсолютные постоянные	165
3.1.6.	Предельная, критическая, максимальная, стандартная, истинная, фундаментальная (скорость света)	165

3.1.7. “Квантовая” терминология . . . . .	166
3.1.8 Элементарный заряд, элементарный квант действия, элементарная длина . . . . .	168
3.1.9. Атомные постоянные. . . . .	169
3.1.10. “Особые точки” . . . . .	169
<b>Глава 3.2. Свойства фундаментальных постоянных и их роль в физической картине мира . . . . .</b>	<b>171</b>
3.2.1. Универсальность . . . . .	172
3.2.2. Свойства элементарных частиц . . . . .	172
3.2.3. Коэффициенты пропорциональности в фундаментальных законах . . . . .	174
3.2.4. Естественные масштабы . . . . .	176
3.2.5. Связь с физическими теориями . . . . .	176
3.2.6. Связь между физическими понятиями . . . . .	177
3.2.7. Взаимоотношение между физическими теориями . . . . .	178
<b>Глава 3.3. Модели развития физики с точки зрения роли фундаментальных постоянных . . . . .</b>	<b>179</b>
3.3.1. Принцип соответствия и предельный переход . . . . .	179
3.3.2. Модель Планка . . . . .	184
3.3.3. Модель Гамова–Иваненко–Ландау: куб физических теорий . . . . .	186
3.3.4. Модель Бронштейна: плоскостная развертка куба теорий . . . . .	188
3.3.5. “Логическая структура” физики Паули . . . . .	191
3.3.6. “Куб физических теорий” становится наглядным (Зельманов) . . . . .	194
3.3.7. Модель Штрауса . . . . .	200
3.3.8. “Древо взаимодействий” . . . . .	201
3.3.9. Модель истории физики первой трети XX в. как развитие глобальных исследовательских программ . . . . .	202
<b>Глава 3.4. От измерения фундаментальных постоянных к квантовой метрологии . . . . .</b>	<b>206</b>
3.4.1. Фундаментальные постоянные как абсолютные меры Природы . . . . .	206
3.4.2. Астрономическая система единиц ( $G = 1$ ) . . . . .	211
3.4.3. Абсолютная система К.Ф. Гаусса ( $G = 1, k_m = 1, k_e = 1$ ) . . . . .	211
3.4.4. Универсальные системы Дж.К. Максвелла ( $\lambda_{Na}, c, G$ ), ( $\lambda_{Na}, c, m_o$ ) . . . . .	212
3.4.5. Система Дж. Стони ( $c, G, e; k_m = 1$ ) . . . . .	214
3.4.6. “Естественные единицы измерения” М. Планка 1899 г. ( $a, b, c, f$ ) и 1906 г. ( $c, h, f, k$ ) . . . . .	215
3.4.7. Электронная система единиц ( $c, m_e, e; k_e = 1$ ) . . . . .	218
3.4.8. Атомная система Д. Хартри ( $\hbar, m_e, e, k_e = 1$ ) . . . . .	219
3.4.9. Квантово-релятивистская система ( $c, \hbar, m_p; k_e = 1$ ) . . . . .	219

3.4.10. Квантово-электродинамическая система ( $c, h, e, m_p, k$ ) . . . . .	220
3.4.11. Естественные системы единиц: от многообразия к единству . . . . .	221
3.4.12. Естественные системы единиц. pro et contra . . . . .	225

## Ч А С Т Ь 4

### ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ПРОГРАММАХ XX ВЕКА

<b>Глава 4.1. Программа фундаментальных постоянных.</b>	
<b>1. От попыток введения новых фундаментальных постоянных к переоткрытию планковских величин . . . . .</b>	<b>228</b>
4.1.1. Абсолютное поле (М. Борн, Л. Инфельд) . . . . .	228
4.1.2. Фундаментальная (элементарная) длина (В. Гейзенберг, Г. Снайдер, И.Е. Тамм и др.) . . . . .	232
4.1.3. Открытие планковских величин как границ применимости современных физических теорий . . . . .	239
4.1.4. Предельная масса элементарных частиц и черных дыр (М.А. Марков, С. Хокинг) . . . . .	240
4.1.5. Предельная плотность и кривизна (М.А. Марков) . . . . .	241
4.1.6. Максимальная температура (А.Д. Сахаров) . . . . .	242
<b>Глава 4.2. Программа фундаментальных постоянных.</b>	
<b>2. Постоянные <math>c, h</math> и <math>e</math> в макроскопических квантовых эффектах . . . . .</b>	<b>244</b>
4.2.1. Квант магнитного заряда (П.А.М. Дирак) . . . . .	244
4.2.2. Квант магнитного потока (Ф. Лондон) . . . . .	247
4.2.3. Постоянные $h$ и $e$ в эффекте Джозефсона . . . . .	251
4.2.4. Кванты проводимости и сопротивления (К. фон Клитцинг) . . . . .	251
4.2.5. Возможны ли другие макроскопические квантовые эффекты? . . . . .	253
<b>Глава 4.3. “Пифагорейская” программа обоснования численных значений фундаментальных постоянных . . . . .</b>	<b>258</b>
4.3.1. Генезис “пифагорейской” программы . . . . .	259
4.3.2. Теория Эддингтона . . . . .	261
4.3.3. Другие “пифагорейские” гипотезы . . . . .	267
<b>Глава 4.4. Программа переменных “констант” . . . . .</b>	<b>275</b>
4.4.1. “Большие числа” и соотношения между ними . . . . .	276
4.4.2. “Большие числа”: от открытия к совпадениям . . . . .	281
4.4.3. Генезис программы переменных “констант” . . . . .	285
4.4.4. Гипотеза больших чисел Дирака . . . . .	287
4.4.5. Постоянные изменяются? . . . . .	290

---

<b>Глава 4.5. Антропная программа</b> . . . . .	293
4 5.1. Генезис антропной программы . . . . .	294
4 5.2. Фундаментальные параметры и условия существования жизни .	298
4.5.3. Антропный принцип как методологический принцип физики . . .	302
<b>Заключение</b> . . . . .	309
<b>Библиография</b> . . . . .	314
<b>Именной указатель</b> . . . . .	356
<b>Приложение. Фундаментальные физические постоянные</b> . . . . .	366
Абсолютные меры (366). Константы взаимодействий (367). Основ- ные масштабы масс (энергий) (367). Дополнительные постоянные и соотношения между ними (368).	



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Фундаментальные физические постоянные — одни из важнейших элементов современной физической картины мира. Эволюция этого понятия непосредственно связана с эволюцией физики и отражает основную закономерность развития физического знания — переход от классической физики, не содержащей постоянных, которые имели фундаментальный статус, к современной физике, в которой центральную роль играют фундаментальные постоянные. В классической физике физические постоянные появились в связи с установлением специфических свойств материальных объектов (плотности тел, скорости звука, света и т.д.), а также с открытием законов сохранения (гелиоцентрическая и гауссова постоянные в небесной механике), но они не играли в структуре физической теории такой фундаментальной роли, какую они приобрели в XX в. В результате научной революции конца XIX — начала XX веков физика, которая считалась почти законченной теорией, вышла на качественно новый уровень своего развития, были развиты новые физические теории, в которых такие физические постоянные, как скорость света и постоянная Планка, приобрели фундаментальный статус, при этом классические теории сохранили свое значение лишь как предельные случаи этих новых теорий, когда характерные масштабы далеки от значений фундаментальных постоянных. Дальнейшее развитие физики также отражает развитие концепции фундаментальных постоянных, особенно в связи с открытием макроскопических квантовых эффектов, что привело к революции в метрологии и ее переходу в конце XX века в квантовую метрологию. Поэтому феноменологически всю историю физики можно рассматривать как закономерную эволюцию концепции фундаментальных физических постоянных (ФФП).

В данной монографии ставится задача исследования основных концептуальных аспектов, связанных с появлением и “фундаментализацией” физических постоянных в их историческом развитии. Сложность темы можно охарактеризовать как  $\infty^n$  — бесконечность по идеям, которые связаны с фундаментальными постоянными, бесконечность по первоисточникам, в которых разбросаны те или иные идеи, бесконечность по авторам, которые выдвигали эти идеи, бесконечность по охватываемому временному периоду и т.п. Работая по этой теме, автор неоднократно убеждался в справедливости известного изречения о том, что нельзя объять необъятное. В силу этого, а также в силу ограниченности человеческого ума, какие-то важные идеи неизбежно

остались в данной книге вне рассмотрения или оказались рассмотрены не во всей полноте, однако, автор надеется, что книга будет способствовать пониманию вектора развития физики, направление которого было задано открытием фундаментальных физических постоянных.

**Первая и вторая части** посвящены собственно истории фундаментальных постоянных. В первой главе рассматривается история постоянных, которые являются *естественными мерами* физических величин — скорости света  $c$ , постоянной Планка  $h$ , элементарного заряда  $e$ , постоянной Больцмана  $k$ . **Вторая часть** посвящена истории *силовых постоянных* — постоянных, характеризующих силы взаимодействий: гравитационной постоянной  $G$ , постоянной тонкой структуры, постоянной Ферми и др. Такое разделение постоянных продолжает линию Г. Ми и А. Зоммерфельда разделения экстенсивных и интенсивных величин в физике. Поэтому все фундаментальные постоянные, являющиеся силовыми характеристиками взаимодействий, отнесены ко второй главе. Длительное время история фундаментальных постоянных представлялась в основном как история опытов по их измерению. В данном исследовании акцент с “измерительного” направления перенесен на реконструкцию основных концептуальных моментов, связанных с появлением и “фундаментализацией” этих постоянных. Поэтому методика различных многочисленных опытов не рассматривается (что уже было основой отдельных специальных исследований Б.П. Вейнберга, Дж. Пойнтинга, М.У. Сагитова и др.), а сами опыты упоминаются лишь в той мере, в которой они меняли представление о физических постоянных на их пути к фундаментальному статусу. **Третья часть** посвящена происхождению и использованию терминологии (фундаментальные, универсальные, абсолютные, естественные, мировые постоянные), анализу основных свойств фундаментальных физических постоянных, которые фиксировались учеными как их *определения*, анализу роли фундаментальных постоянных во взаимоотношении между основными физическими теориями, которое регулируется принципом соответствия, и основанным на этом методологическом принципе моделям развития теоретической физики, а также роли фундаментальных постоянных в эволюции метрологии в направлении квантовой метрологии. **Четвертая часть** посвящена анализу различных исследовательских стратегий (программ) XX века — стратегии поиска других фундаментальных постоянных, равных по статусу таким постоянным, как скорость света  $c$  и постоянная Планка  $h$ , редукции одних размерных постоянных к другим, более фундаментальным, проблеме обоснования значений безразмерных фундаментальных постоянных и попыткам их редукции к математическим постоянным, проблеме “больших чисел” (т.е. мировых параметров, имеющих огромные значения  $10^{20}$ ,  $10^{40}$ ,  $10^{80}$ ) и различным подходам к ее решению, прежде всего — программе переменных (в зависимости от космологического времени) “констант”, а также антропной программе.

В монографии принята современная система ссылок, характерная для историко-научной литературы: в скобках указывается автор и год оригинальной публикации или доклада, а литература упорядочена по фамилиям авторов. При этом, если является существенным различие между годом доклада и его публикации, или временем подачи статьи и ее реальной публикации указываются обе даты, отделяемые чертой (например, *Stoney*, 1874/81 или *Poincaré*, 1905/06). В переводах на русский язык указывается год оригинальной публикации, а не год перевода, за исключением сборников переводов, где указывается год издания.

Решающая поддержка автору в работе по данной теме была оказана РФФИ, предоставившим в 1994 г. годичный грант на эту тему, а в дальнейшем — дирекцией и Отделом аспирантуры ИИЕТ РАН — В.М. Орлом, Н.И. Кузнецовой и И.В. Лапиной, а также Отделом истории физико-математических наук — Г.М. Идлсом и В.П. Визгиным, за что приношу им глубокую благодарность. Выражаю глубокую признательность всем сотрудникам Отдела истории физико-математических наук, а также ряду ученых ИИЕТ РАН, ФИАНа и других институтов, особенно В.В. Бабкову, В.М. Березанской, Б.М. Болотовскому, Л.И. Верховскому, Ю.С. Владимирову, Г.Е. Горелику, В.С. Кирсанову, В.И. Когану, В.Г. Нестеренко, Н.Ф. Овчинникову, Л.Б. Окуню, Д.И. Сергееву, А.С. Сонину, А.Д. Суханову за указание на важные первоисточники и ценное интеллектуальное сотрудничество, а также сотрудникам библиотек ИИЕТ РАН и ФИАНа за помощь в доступе к важным первоисточникам. Особую благодарность я хотел бы выразить Г.Л. Борисовой, И.А. Савину, А.Л. Усову и другим учителям школы № 1140, заложившим основы физико-математической и кибернетико-компьютерной культуры, а также — историку физики В.П. Визгину, общение с которым способствовало более широкому и глубокому пониманию самых различных аспектов эволюции физики. Исследование не могло бы состояться без моральной поддержки ряда близких людей, прежде всего, моих родителей — преподавателя русского языка и литературы Н.К. Томилиной и философа, доктора философских наук А.П. Огурцова, которым и посвящена эта книга.

К.А. Томилин

Шарапова Охота,

18 июля 2005 г.

## ВВЕДЕНИЕ

**1. Постоянные: математические и физические, размерные и безразмерные.** В математике термин “константа” имеет несколько значений. В общем смысле – это некая постоянная величина, в отличие от переменных величин; в узком смысле — это постоянная величина, имеющая конкретное значение. Математических постоянных такого рода открыто огромное количество, значения их представлены в специальных справочниках. Среди этих постоянных есть постоянные, имеющие более основополагающее значение, чем другие, например, число  $\pi = 3,14159265359\dots$ , открытое еще древнегреческими математиками и вычисленное ныне с помощью ЭВМ до 100 тыс. знаков. Другое такое число — основание натуральных логарифмов  $e = 2,718281828459\dots$  Первоначально открытие математических постоянных было тесно связано с развитием физики. Так, число  $\pi$  возникло при решении конкретных задач землемерия (как и вся геометрия), а  $e$  и число Эйлера  $\gamma$  — при решении проблем астрономии, соответственно в XVI и XVIII вв. (см.: Юшкевич, 1988, с. 327). В дальнейшем огромное количество математических постоянных было открыто вне каких-либо конкретных физических задач.

В астрономии и в физике также были открыты безразмерные постоянные, имеющие специфические для изучаемых объектов значения (отношения радиусов орбит планет, отношения масс тел, постоянная тонкой структуры и т.д.). Значения многих безразмерных физических постоянных в настоящее время определяются только экспериментально и до сих пор не ясно, являются ли они детерминированными или случайными, сводятся ли к комбинации математических постоянных или фиксируются случайным образом (например, в какой-то момент ранней Вселенной).

В отличие от математики, в современной физике термин “постоянные” применяется также и к физическим параметрам, которые в общем случае не являются постоянными, но значения которых можно считать постоянными в ряде конкретных задач. Например, безразмерная постоянная тонкой структуры  $\alpha$ , которая характеризует силу электромагнитного взаимодействия, на самом деле зависит от переданного импульса (или расстояния взаимодействия). Однако она сохранила исторически сложившуюся терминологию, так как в задачах атомной физики ее значение  $\alpha^{-1} = 137,03599911(46)$  можно считать постоянным с точностью, превышающей экспериментальные ошибки, а учитывать ее изменение нужно лишь в физике высоких энергий. Это же касается остальных безразмерных констант взаимодействий —

они имеют различные значения при обычных энергиях, но медленно меняются в зависимости от переданного импульса так, что при планковских масштабах они приобретают равные значения в соответствии с концепцией объединения взаимодействий.

Помимо безразмерных постоянных существуют размерные постоянные, численные значения которых зависят от выбранных единиц измерения — скорость света  $c$ , постоянная Планка  $h$ , элементарный заряд  $e$ , массы элементарных частиц и небесных тел и т.п. Среди размерных постоянных также есть постоянные, которые рассматриваются как фундаментальные, но которые при этом зависят от космологического времени и других факторов. Например, гелиоцентрическая постоянная  $GM$  уменьшается с космологическим временем из-за уменьшения массы Солнца вследствие излучения в 14 знака за год. Однако для всех задач небесной механики она может рассматриваться как постоянная, так как точность решаемых задач менее 10 знаков. Также постоянная Хаббла зависит от космологического времени, но в задачах, относящихся к современному космологическому времени ее можно считать постоянной, так как она меняется со скоростью  $10^{-10}$  год $^{-1}$ . Таким образом, термин “постоянная” в физике применяется в более широком смысле, чем в математике, и охватывает некоторые переменные величины, значения которых можно считать в ряде задач постоянными с большой точностью, превышающей потребности эксперимента.

**2. Разные классы физических постоянных и способы их обоснования.** Все физические постоянные можно разделить на три разных класса по способу обоснования их значений. Первый класс ( $A$ ) составляют *безразмерные постоянные* (постоянная тонкой структуры, отношения масс частиц и др.). Численные значения безразмерных постоянных не зависят от систем единиц и определяются самой Природой, они должны так или иначе следовать из всеобъемлющей физической теории. Как правило, безразмерные постоянные появляются в качестве эмпирических параметров, а затем находят свое объяснение при развитии физической теории. Любая теория, которая претендует на их объяснение, должна, очевидно, стремиться к минимизации числа такого рода параметров. Единая физическая теория должна стремиться к идеалу — полному объяснению всех безразмерных постоянных путем их редукции к математическим постоянным. Возможно, однако, что этот идеал окажется недостижим, например, потому что некоторые безразмерные постоянные могут оказаться чисто случайными параметрами и фиксироваться в какой-либо момент случайным образом, например, в начальный момент возникновения Вселенной. Однако в таком случае полная единая теория должна включать механизм реализации этой случайности (механизм “бросания кости”), т. е. при этом получают обоснование не сами конкретные значения такого рода постоянных, а принцип их появления.



Рис. 1. Разные классы физических постоянных

*Размерные постоянные* (скорость света, постоянная Планка, гравитационная постоянная, массы частиц и т. д.) по способу их обоснования также можно разделить на два класса *B* и *C* (см. рис. 1).

Класс *C* составляют метрологически независимые физические постоянные, число которых необходимо и достаточно для полного эталонирования единиц всех физических величин. Под метрологической независимостью понимается то, что из этих постоянных нельзя составить ни одну комбинацию, которая давала бы безразмерную постоянную (т. е. какую-либо постоянную класса *A*). Класс *B* составляют все оставшиеся размерные постоянные. Нетрудно понять, что обоснование численных значений постоянных класса *C* принципиально невозможно, так как эти значения в силу метрологической независимости этих постоянных *конвенциональны*, т. е. определяются не Природой, а выбором человеком основных единиц измерения. Очевидно, что сами постоянные этого класса или точные их части можно выбирать в качестве единиц измерения (см. главу 3.4). Именно такой шаг был сделан в 1983 г., когда в качестве меры скорости была выбрана некоторая определенная точная часть от скорости света в вакууме:

$1 \text{ м/с} = \frac{1}{299792458} \times \text{скорость света в вакууме}$ . Отметим, что постоянные класса *C* можно рассматривать как наиболее фундаментальные постоянные (или просто как *фундаментальные постоянные*). В дальнейшем мы будем подразумевать под фундаментальными размерными постоянными именно постоянные *C* класса. Таким образом, мы будем придерживаться следующего определения: *фундаментальные постоянные это метрологически независимые постоянные, число которых необходимо и достаточно для полного эталонирования единиц всех физических величин*. Ниже мы уточним это определение.

Число *n* постоянных класса *C* в силу определения этого класса, очевидно, равно числу основных единиц измерения. Таким образом, *число наиболее фундаментальных размерных постоянных равно числу основных единиц измерения*. Это равенство часто фигурирует

в научной литературе, однако оно никак не обсуждается. Оно выглядит, на первый взгляд, достаточно странно, так как считается, что количество основных единиц произвольно: мы можем с успехом применять системы единиц с разным числом основных единиц измерения (обычно с 3 или 4), а количество фундаментальных постоянных определяется самой Природой. Ясно, что равенство предполагает равный статус обеих сторон равенства. М. Дафф рассматривает левую и правую часть это равенства просто как синонимы, что в принципе оправданно (Duff, Okun, Veneziano, 2001, p. 22). Однако при этом следует учесть, что системы единиц с разным числом основных единиц не эквивалентны. Поэтому это равенство следует понимать так: в Природе существуют абсолютные меры (масштабы), которые формализуются в виде наиболее фундаментальных постоянных, и эти меры составляют предпочтительную естественную систему единиц, основанную на этих фундаментальных постоянных. При таком понимании число основных единиц является фундаментальным, а не конвенциональным фактором, в противном случае мы вынуждены были бы вслед за М. Даффом признать конвенциональность числа фундаментальных постоянных и, в конечном счете, их отсутствие в принципе (там же, p. 28). Развитие метрологии при фундаментальности числа основных единиц является раскрытием естественной системы единиц, переходом от произвольных случайных мер к фундаментальным постоянным как абсолютным эталонам.

Значения остальных размерных постоянных, т. е. постоянных класса  $B$ , автоматически обосновываются при выборе значений постоянных класса  $C$  (т. е. выборе основных единиц измерения) и обосновании постоянных класса  $A$ , т. е. безразмерных постоянных. В силу этого, вопрос об обосновании численных значений размерных постоянных, в отличие от безразмерных, фактически бессмыслен: значения постоянных класса  $C$  вообще не нуждаются в обосновании, а обоснование значений оставшихся размерных постоянных класса  $B$  сводится к обоснованию безразмерных постоянных. Тем не менее, формально можно говорить об обосновании значений постоянных класса  $B$ , если при этом подразумевать обоснование безразмерных постоянных. Например, иногда говорится о проблеме обоснования "спектра" масс частиц, при этом, естественно, подразумевается обоснование безразмерных соотношений между массами частиц и каким-либо фундаментальным масштабом массы.

Преимущество предложенной выше классификации физических постоянных заключается в том, что она, в отличие от всех других, является однозначной, т. е. она полностью охватывает всю совокупность физических постоянных и при этом каждая физическая постоянная входит только в один класс.

Отметим, что все физические постоянные класса  $B$  можно выразить как произведение безразмерной постоянной класса  $A$  и некоторой

комбинации постоянных класса  $C$ , размерность которой соответствует размерности постоянной класса  $B$ :

(*постоянная класса B*) = (*постоянная класса A*) × (*комбинация постоянных класса C*)

Для каждой постоянной класса  $B$  существует только одно такое равенство и его, очевидно, следует рассматривать просто как определение этой постоянной.

**3. Какие физические постоянные являются фундаментальными и каково их число?**  $C$ -класс (“ядро” современной физики) составляют наиболее фундаментальные постоянные, являющиеся абсолютными масштабами физических величин, такие как скорость света  $c$  и постоянная Планка  $h$  (“absoluten Kernpunkt”, как называл их Планк). Относительно фундаментального статуса этих двух постоянных уже давно сложилось единое мнение, основанное на роли этих постоянных, соответственно, в специальной теории относительности и квантовой механике. Правда, время от времени высказываются сомнения в их фундаментальном статусе даже со стороны выдающихся физиков (например, П.А.М. Дирак в 1963 г. предположил фундаментальность элементарного заряда  $e$  и нефундаментальность постоянной Планка  $h$ ; ныне распространились гипотезы об изменении скорости света в вакууме  $c$  в связи с предполагаемым изменением постоянной тонкой структуры  $s$  с космологическим временем), однако все такого рода заключения, как показывает анализ, поспешны, так как основываются на тех или иных ошибочных предпосылках.

Этих двух постоянных  $c$  и  $h$  *недостаточно* для эталонирования единиц физических величин. Даже для полного эталонирования единиц механических величин наряду с постоянными  $c$  и  $h$  необходима как минимум еще одна постоянная, не являющаяся их комбинацией. Однако относительно статуса других постоянных пока не существует единого мнения. Наиболее популярно добавление к этим двум постоянным гравитационной постоянной  $G$  в силу того, что она фигурирует в основном уравнении общей теории относительности. Однако другие ученые полагают, что  $G$  должна редуцироваться к другим более фундаментальным постоянным, а третьи — что она должна меняться с космологическим временем.

Еще одна постоянная (пока неоткрытая или известная, но чей статус еще недостаточно оценен) вместе с постоянными  $c$  и  $h$  позволит эталонировать все единицы механики. Распространено представление, что необходимо и достаточно трех основных единиц для эталонирования всех физических величин. На самом деле это так только для *механики*, а для эталонирования электромагнитных, гравитационных и термодинамических величин необходимо выбирать или три дополнительные основные единицы или коэффициенты (т. е. три размерные постоянные) в законах равными точно 1 или каким-либо математическим постоянным. Отметим, что все физические законы, в которых



проявляется механическое действие тяготения, электромагнетизма или термодинамики, экспериментально устанавливаются в виде пропорциональностей, но не равенств, а коэффициент пропорциональности можно выбирать произвольно. Например, закон Кулона устанавливается как пропорциональность  $F \sim \frac{q_1 q_2}{r^2}$ , это же касается принципа эквивалентности, который часто ошибочно трактуется как устанавливающий равенство инертной и гравитационной масс. На самом деле, все опыты типа опытов Этвеша утверждают лишь универсальность коэффициента пропорциональности между инертной и гравитационной массами, и он выбирается равным 1 для простоты, хотя иногда некоторыми учеными формально вводится коэффициент между ними, исходя из тех или иных соображений. В данной монографии мы будем следовать общепринятому выбору равенства инертной и гравитационной масс, а также общепринятому выбору единиц величин слабого и сильного взаимодействий, т.е. полагать достаточным для их описания трех единиц механики, хотя дальнейшее развитие физики может привести и к изменению такого подхода, т.е. к появлению новых размерных постоянных.

Таким образом, для полного эталонирования единиц всех физических величин, включая механику, теорию тяготения, термодинамику, электродинамику и остальные взаимодействия, необходимо и достаточно выбора *пяти* постоянных или в качестве единиц измерения или равными точно каким-либо математическим постоянным в тех законах, в которых проявляется механическое действие электромагнетизма или тепла. Это касается всех используемых систем единиц: все они основаны на пяти конвенциональных элементах, связанных с выбором единиц измерения. Например, выбор в качестве основных единиц сантиметра, грамма и секунды вовсе не определяет однозначно ни единиц термодинамических, ни электродинамических величин. И гауссова система, и система Лоренца-Хевисайда это обе системы СГС (сантиметр-грамм-секунда), но они различаются выбором единицы электрического заряда, и, следовательно, всех остальных электромагнитных величин. Чтобы выбрать единицы электромагнитных величин, мы должны либо выбрать в качестве еще одной основной единицы некоторую характерную электромагнитную величину, либо коэффициент в законе Кулона или Ампера (т.е. в законах, в которых проявляется механическое действие электричества) равным точно какому-либо числу, например, 1 (гауссова система) или  $1/4\pi$  (система Лоренца-Хевисайда). Таким образом, во всех существующих системах единиц выполняется следующее равенство:  $n + m = 5$ , где  $n$  — число основных единиц измерения, а  $m$  — количество коэффициентов в законах, выбранных равными точно 1 или той или иной математической постоянной. Поэтому число основных единиц и, следовательно, число фундаментальных размерных постоянных не превышает пяти.

Однако физические постоянные дают нам критерий точного числа основных единиц измерений и числа фундаментальных постоянных. В самом деле, почему считается, что для эталонирования единиц механики и теории тяготения необходимо и достаточно трех основных единиц? Предположим, что мы будем использовать только две основные единицы — длину и время, а массу и все остальные динамические величины измерять в кинематических единицах. Очевидно, что при этом кинематическая единица массы может определяться, например, из закона всемирного тяготения, как масса, которая создает на единичном расстоянии единичное ускорение. Однако возможны и равноценны и другие определения массы, например, как масса, гравитационный радиус которой равен единице длины и т. п. Если опираться не на массу, а на плотность, это даст другой спектр определений кинематических единиц динамических величин. Все эти определения будут приводить к тому, что кинематическая размерность массы будет равна  $L^3/T^2$ , а единица ее измерения —  $1 \text{ см}^3/\text{с}^2$ , однако при этом величине  $1 \text{ см}^3/\text{с}^2$  могут сопоставляться самые различные количества массы, в зависимости от принятых ее кинематических определений. Таким образом, выражение, допустим,  $100 \text{ см}^3/\text{с}^2$  ни в коей мере не фиксирует однозначно какое-либо количество массы, пока дополнительно не указано, какой способ определения массы выбран. Поэтому это приводит и к неоднозначности значений физических постоянных. Например, постоянная Планка, выраженная в кинематических единицах, будет иметь произвольное значение:  $h = \text{произвольное число} \times \text{см}^5/\text{с}^3$ , различающееся при разных кинематических определениях массы для одних и тех же единиц длины и времени. Однако все динамические постоянные приобретают однозначное значение при выборе еще одной, третьей основной единицы (например, единицы массы или силы). Аналогичная ситуация и при определении единиц электромагнитных величин. Если опираться только на три механические единицы (например, сантиметр, грамм и секунда), то это само по себе не определяет однозначно единицы электромагнитных величин. Например, единицу электрического заряда можно выбрать из закона Кулона как величину, которая на единичном расстоянии создает единичное ускорение. Другие определения возможны через закон Ампера или закон Фарадея. Все они будут приводить к разным количествам электрического заряда, которые сопоставляются соответствующей комбинации механических единиц, и, следовательно, к различным значениям электромагнитных физических постоянных в механических единицах. Например, в гауссовой системе единиц (коэффициент в законе Кулона  $k_e$  выбирается равным точно 1) элементарный электрический заряд  $e = 4,80320440(15) \cdot 10^{-10} \text{ г}^{1/2} \text{ см}^{3/2} \text{ с}^{-1}$ , а в системе Лоренца–Хевисайда (коэффициент в законе Кулона  $k_e$  выбирается равным  $1/4\pi$ , исходя из требования симметрии — так называемая рационализация единиц) тот же самый элементарный заряд  $e$  в  $\sqrt{4\pi}$  раз больше, чем в гауссовой

системе:  $e = 1,70269163(15) \cdot 10^{-9} \text{г}^{1/2} \text{см}^{3/2} \text{с}^{-1}$ , при том, что единицы длины, массы и времени в этих системах совпадают (сантиметр, грамм, секунда). Таким образом, значения элементарного заряда и других электромагнитных постоянных в механических единицах не имеют однозначных значений и им в принципе при желании можно приписать любые численные значения:  $e = \text{произвольное число} \times \text{г}^{1/2} \text{см}^{3/2} \text{с}^{-1}$ . Именно поэтому вместо механических размерностей при постоянных указывается способ выбора единиц, например, “электростатических единиц (esu)”. Однако, все электромагнитные постоянные (в том числе, элементарный заряд  $e$ ) приобретают однозначное значение при выборе еще одной, четвертой основной единицы (например, единицы заряда или тока). Аналогичное требование однозначности численных значений физических постоянных приводит к необходимости выбора пятой основной единицы в термодинамике. Таким образом, простое требование однозначности численных значений физических постоянных приводит к необходимости выбора пяти основных единиц измерения, и, следовательно, к *пяти размерным фундаментальным постоянным физики*.

Какие же постоянные следует относить к их числу? В силу вышеуказанной классификации постоянных, основанной на различии в их принципах обоснования, и соответствия между числом фундаментальных постоянных и числом основных единиц мы должны ориентироваться прежде всего на те постоянные, которые являются *естественными единицами каких-либо физических величин*. Поэтому уточним данное выше определение фундаментальных постоянных: *фундаментальные постоянные это метрологически независимые постоянные, являющиеся естественными единицами физических величин, число которых необходимо и достаточно для эталонирования единиц всех физических величин и однозначной фиксации численных значений всех остальных физических констант*. Другие определения фундаментальных постоянных, в которых отражаются их характерные свойства, рассматриваются в гл. 3.2. С этой точки зрения фундаментальными постоянными являются постоянные  $c$  и  $\hbar$ , но не гравитационная постоянная  $G$ , поскольку она не является естественной единицей никакой физической величины. Однако такие постоянные, как элементарный заряд  $e$ , естественная единица электрического заряда, а также постоянная Больцмана  $k$ , естественная единица энтропии и теплоемкости, вполне имеют шансы претендовать на роль фундаментальных постоянных. Отметим, что добавление этих двух постоянных к числу фундаментальных не нарушает метрологическую независимость набора  $c, \hbar, e, k$ , вопреки распространенному заблуждению. Хотя на протяжении всего XX века встречались утверждения со стороны ряда физиков (П. Бриджмен, Д. Хартри, П.А.М. Дирак и др.), что три постоянные  $c, \hbar$  и  $e$  не могут быть фундаментальными одновременно, так как их связывает соотношение  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$ , на самом деле эти утверждения изначально привязаны только к одному специфическому

выбору единицы электрического заряда (электростатическому). На самом деле сама эта формула верна только в гауссовой системе единиц, а в общем виде  $\alpha = k_e \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$ , где  $k_e$  — коэффициент в законе Кулона (см. п. 2.2.1). Поэтому метрологи не только никогда не утверждали невозможность систем единиц, основанных на постоянных  $c$ ,  $h$  и  $e$ , но даже неоднократно предлагали такого рода системы единиц (см. п. 3.4.10). Более того, открытия квантов магнитного потока, сопротивления и проводимости, являющихся комбинациями постоянных  $c$ ,  $h$  и  $e$  (с точностью до множителей типа  $\pi$  или  $2\pi$ ), как раз свидетельствует в пользу фундаментальности всех трех постоянных  $c$ ,  $h$  и  $e$ . Однако, очевидно, что этих четырех постоянных недостаточно для полного эталонирования физических величин, т.е. должна существовать еще одна фундаментальная постоянная, являющаяся естественной единицей какой-либо физической величины и метрологически независимая от постоянных  $c$ ,  $h$ ,  $e$  и  $k$ .

Поэтому в данной монографии мы будем рассматривать историю прежде всего таких постоянных, как скорость света  $c$ , постоянная Планка  $h$ , чей фундаментальный статус не вызывает сомнения, а также историю элементарного заряда  $e$ , постоянной Больцмана  $k$  (история ее появления тесно связана с историей появления постоянной Планка, поэтому рассматривается в этой связи). В дополнение к истории этих постоянных во второй части рассматривается история констант взаимодействия, в том числе — гравитационной постоянной  $G$ , постоянной Ферми  $G_F$ , постоянной тонкой структуры  $\alpha$ , размерной кулоновской постоянной  $k_e$ , постоянной сильного взаимодействия  $\alpha_s$ . Одна из размерных констант взаимодействия может оказаться той самой недостающей для полного набора фундаментальной постоянной. В первую очередь это касается гравитационной постоянной  $G$ , учитывая роль планковских величин как границ применимости современных теорий. Отметим, что все эти пять постоянных ( $c$ ,  $G$ ,  $h$ ,  $e$ ,  $k$ ) являются метрологически независимыми и их выбор достаточен для эталонирования единиц всех физических величин, т.е. они удовлетворяют критерию постоянных  $C$ -класса. Однако, не будет большой неожиданностью, если в будущем постоянная  $G$  уступит свое место в ряду фундаментальных постоянных какой-либо другой постоянной, являющейся естественной единицей какой-либо физической величины и метрологически независимой от четырех остальных постоянных (например, постоянной Ферми, определяющей через вакуумное среднее  $\eta$  массы частиц, или постоянной  $\Lambda$ , являющейся естественной единицей энергии в квантовой хромодинамике). В этом случае гравитационная постоянная будет относиться к классу  $B$  и выражаться в виде произведения некоторой безразмерной постоянной и комбинации фундаментальных постоянных (т.е. постоянных класса  $C$ ).

**4. Физические постоянные: количественные и силовые, специфические и универсальные.** Кроме вышеуказанной классификации физических постоянных на три класса *A*, *B* и *C* на основе принципа их обоснования, возможны и другие классификации постоянных на основе различных принципов. Однако, в отличие от нее, они не приводят к однозначному разделению физических постоянных.

Важным аспектом в отношении физических величин является различие экстенсивностных (количественных) и интенсивностных (силовых). Такой подход отстаивали Г. Ми и А. Зоммерфельд еще с начала XX века. Аналогично ему можно провести разделение физических постоянных на количественные и силовые. Такой подход положен в основу структуры первой и второй частей данной книги. Тем не менее, в физике существуют постоянные, которые одновременно являются и количественными и силовыми. Например, гелиоцентрическая постоянная  $GM$ , являющаяся произведением силовой постоянной  $G$  и количественной постоянной  $M$ . Также такие смешанные постоянные появляются при некотором специфическом выборе единиц. Например, в гауссовой системе единиц (коэффициент в законе Кулона выбирается равным единице) элементарный заряд оказывается одновременно и количественной и силовой постоянной, т. к. пропорционален  $\sqrt{\alpha}$ , где  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры, безразмерная силовая постоянная электромагнитного взаимодействия. Аналогичная ситуация возникает при выборе единицы массы, как массы, которая притягивает тело на единичном расстоянии с единичной силой (т.е. при выборе гравитационной постоянной равной единице). В этом случае сама масса тела  $M$  является одновременно и количественной и силовой постоянной. Отметим, что общее направление развития метрологии заключается в постепенном уходе от смешанных постоянных к отдельным классам силовых и количественных постоянных. Например, исторически в небесной механике применялись именно смешанные постоянные типа  $GM$ , но поскольку они носили специфический характер для разных тел, это привело к выделению универсальной постоянной тяготения  $G$ . В электродинамике, к сожалению, до сих пор распространен специфический выбор единиц, когда заряд сводится к механическим единицам; при этом элементарный заряд, как квант электрического заряда, одновременно функционирует и как силовая постоянная, характеризующая силу электромагнитного взаимодействия. Однако, поскольку сила электромагнитного взаимодействия меняется при увеличении переданного импульса (на малых расстояниях), т.е. изменяется постоянная тонкой структуры, то в такой системе единиц это одновременно выглядит и как изменение элементарного заряда. Отметим, что при этом речь идет лишь об изменении заряда, выраженного в механических единицах, однако принцип сохранения электрического заряда при этом не нарушается. Поэтому более целесообразно применять такие системы единиц, которые в принципе не создавали бы

иллюзию какого-либо изменения электрического заряда, а это прямо связано с разделением силовых и количественных постоянных.

**5. История фундаментальных физических постоянных: от истории измерений к концептуальным вопросам.** Физические постоянные появились как только человек начал количественно оценивать материальные объекты Природы и природные процессы. Прежде всего, это были специфические характеристики тел — плотности (удельные веса); скорости различных природных процессов типа распространения звука и т.д.

Первой статьёй, в которой были аккумулированы различные постоянные Природы, была статья известного английского математика, экономиста и изобретателя Чарльза Бэббеджа. В 1832 г. он опубликовал статью “Письмо Д. Брюстеру о пользе собирания естественных и искусственных постоянных (on the advantage of a collection of the constants of nature and art)” (*Babbage*, 1832; см. также *Хакинг*, 1983, с. 243). Ч. Бэббедж представил в этой статье большое количество различных констант, классифицировав их по 20 типам — астрономические (астрономические величины), физические (удельные веса и др.), биологические (средняя длина костей некоторых существ), географические (длины рек), антропометрические (количество дуба, которое человек может напилить за час), социальные (число студентов в разных университетах, число книг в библиотеках) и т.п. Ч. Бэббедж призвал собрать и аккумулировать все константы, как естественные, так и искусственные — фактически сформулировав *программу описания мира через определение его постоянных параметров*. Как видно теперь, эта идея Бэббеджа имела важное значение в свете последующего развития концепции фундаментальных физических постоянных, однако в то время она не оказала существенного влияния на развитие физики. Сам Ч. Бэббедж рассматривается ныне, как правило, только как изобретатель вычислительных аппаратов — действительно, важного научно-технического направления, получившего особенное развитие во второй половине XX в. (*Апокин и др.*, 1981).

В 1879 г. английский метролог Дж. Эверетт издал справочник “Единицы и физические постоянные” (*Everett*, 1879; рус. пер. *Эверетт*, 1888). Этот справочник представлял собой существенно дополненное издание его же книги “Пояснение к системе СГС”, опубликованной Лондонским физическим обществом в 1875 г., редакторами которой были Дж.К. Максвелл и Г. Фостер (*Everett*, 1875). Фактически эта книга стала первым справочником по значениям различных физических постоянных, в том числе — скорости света и гравитационной постоянной. В первых двух главах Эверетт рассматривал общую теорию единиц, основанную на трех основных единицах. Затем каждая последующая глава была посвящена какой-либо физической теории и, соответственно, тем константам, которые в ней присутствуют. Эверетт также обсуждал систему единиц, в которой гравитационная постоянная и скорость

света принимаются равными 1 (*Эверетт*, 1888, с. 94–95) (до Эверетта такую систему единиц в “Трактате по электричеству и магнетизму” (1873) обсуждал Дж.К. Максвелл <sup>1)</sup>). В течение нескольких лет книга Эверетта была переведена на несколько европейских языков, в том числе в 1888 г. в переработанном и дополненном издателями виде — на русский. Ныне ее современным аналогом можно рассматривать справочники типа “Физические величины” и др., в которых аккумулируются последние экспериментальные данные о тех или иных константах (Физические величины, 1991).

Основная литература, связанная с физическими постоянными, посвящена проблеме их измерения. Ныне вся научная литература, связанная с измерениями физических постоянных, аккумулируется в Комиссии по значениям постоянных CODATA (Fundamental Constants Data Center, Physics Laboratory, National Institute of Standards and Technology (Gaithersburg, MD, USA)). Во второй половине XX в. количество специальных статей по этой тематике составило ок. 4 тыс.: список статей представлен на интернетовском сервере Национального Института Стандартов и Технологии (США) (<http://www.physics.nist.gov>) и обновляется по мере публикации новых статей. Среди книг, прямо посвященных проблемам значений физических постоянных, следует отметить книгу Б. Тейлора, В. Паркера и Д. Лангенберга “Фундаментальные константы и квантовая электродинамика”, Ф.Д. Россини “Фундаментальные меры и константы науки и техники”, Б.В. Петли “Фундаментальные физические константы и предел измерения” и др. <sup>2)</sup>. Среди других книг, посвященных фундаментальным постоянным, следует отметить следующие. Специальное исследование, посвященное безразмерным физическим постоянным, было выполнено Г. Аракеляном (*Аракелян*, 1981). Физическим постоянным атомной физики посвящена книга Дж. Сандерса (*Sanders*, 1961/65). Фундаментальные (в смысле — основные) постоянные астрономии анализировались С. Ньюкомбом и др. специалистами по небесной механике <sup>3)</sup>.

Историко-научные аспекты, связанные с фундаментальными постоянными, первоначально стали развиваться прежде всего в направлении истории их экспериментального определения. Следует отметить, прежде всего, двухтомную монографию Б.П. Вейнберга “Вероятнейшее значение скорости распространения возмущений в эфире” (Ч. 1–2, Одесса, 1903), целиком посвященную анализу экспериментов по определению скорости света. Поставленная Вейнбергом цель — не только указать результаты тех или иных исследований, но и проанализировать их с точки зрения точности и вывести на их основе наиболее вероятнейшее

<sup>1)</sup> *Maxwell*, 1873, vol 1, p 3–4. *Максвелл*, 1873/91, т 1, с 30–31

<sup>2)</sup> *Taylor, Parker, Langenberg*, 1969, *Rossini*, 1974; *Petley*, 1985/88

<sup>3)</sup> *Newcomb*, 1895, *Куликов*, 1956, 1969; *Kulikov*, 1964; Фундаментальные постоянные астрономии, 1967.

значение скорости света (Вейнберг, 1903). Работа Вейнберга несомненно является важной научной работой, отражавшей основные тенденции развития физического знания, которые два года спустя воплотились в создание СТО. С точки зрения истории физики работа Б.П. Вейнберга являлась беспрецедентной для того времени и до сих пор является важнейшим источником информации по экспериментам по определению скорости света до начала XX в. Несмотря на фундаментальность этого труда, работа Вейнберга оказалась недостаточно оценена, по-видимому, из-за витиеватости названия и присутствия в нем термина “эфир” (“скорость распространения возмущений в эфире”, а не “скорость света”). Измерениям скорости света была также посвящена книга К. Фрума и Л. Эссена “Скорость света и радиоволн” (Froome, Essen, 1969).

Первой книгой, целиком посвященной фундаментальным физическим постоянным, была книга Э.Р. Козна, К. Кроу и Дж. Дюмонда “Фундаментальные константы физики” (Cohen, Crowe, Dumond, 1957). Эта книга открывала новую серию “Междисциплинарные монографии по физике и астрономии” (под ред. Р. Маршака) и была посвящена памяти проф. Раймонда Т. Бёрджа, внесшего вклад в создание методов согласования значений физических постоянных. В первую главу (введение) авторы включили важный параграф “Физические константы как единицы”, в котором они, в частности, отметили, что первоначально выбранные меры были произвольны, но “одним из важных результатов физического исследования было открытие того, что Природа сама имеет фундаментальные меры (fundamental units), такие как заряд электрона, масса покоя электрона, планковская постоянная действия, скорость света” (там же, р. 2). Переходу к эталонам, основанным на фундаментальных постоянных, препятствует, как отметили авторы, то, что стандарты на их основе дают меньшую точность, чем уже установленные эталоны. Другие главы были посвящены — основным единицам и стандартам, классическим измерениям констант, массам атомов и мезонов, истории атомных констант ( $c$ ,  $h$ ,  $e$ ,  $N_A$ ,  $m_e$  и др.), послевоенным прецизионным измерениям констант. Значительная часть книги, в том числе последние две главы посвящены методу наименьших квадратов и его применению к согласованному уточнению численных значений фундаментальных постоянных, что было впервые предложено В.Н. Бондом (Bond, 1930, 1931) и доведено до уровня эффективного метода Р.Т. Бёрджем (Birge, 1929, 1932) (т. н. диаграммы Бёрджа-Бонда). Таким образом, история фундаментальных постоянных была представлена авторами прежде всего как история их измерения. В книге приводится достаточно много результатов измерений практически всех наиболее значимых постоянных, особенно измерений масс частиц, а также подробно анализируется метод наименьших квадратов, применяемый с целью уточнения численных значений констант.

Среди монографий, посвященных физическим константам, следует отметить книги О.П. Спиридонова “Универсальные физические постоянные” (Спиридонов, 1984; Spiridonov, 1986) и “Фундаментальные фи-



зические постоянные” (Спиридонов, 1991). Целью автора было в популярной форме изложить историю (“биографию”) универсальных (фундаментальных) физических постоянных в связи с их ролью в развитии физического знания. Универсальные физические постоянные автор рассматривал как “вехи, своеобразные ориентиры, которые расставила природа на том бесконечно длинном и трудном пути, который называется познанием” (Спиридонов, 1984, с. 3). Книга “Универсальные физические постоянные” построена автором как история отдельных констант; ее главы посвящены гравитационной постоянной, постоянным Авогадро и Больцмана, заряду и массе электрона, скорости света, постоянной Планка, массам протона, нейтрона и др. элементарных частиц. Последующая книга “Фундаментальные физические постоянные” состоит из трех частей — в первой части “Постановка проблемы” автор анализирует различные определения понятия фундаментальных постоянных, взаимоотношение фундаментальных постоянных и понятия размерности физических величин. Во второй, центральной, главе “Константы и физика” автор излагает историю отдельных фундаментальных постоянных в связи с развитием соответствующих областей физики. Глава построена аналогично структуре предыдущей книги (к числу других постоянных также добавлены константы слабого и сильного взаимодействий). В третьей главе “Мировые постоянные” анализируются количество фундаментальных безразмерных постоянных, гипотеза переменности “констант”, антропный принцип и др. Книги имеют ряд достоинств — представлена история фундаментальных постоянных именно в связи с развитием соответствующих областей физики, анализируется их физический смысл и их роль в физических законах и принципах, представлены и некоторые открытия, гипотезы и концепции конца XX в. и т.д. Однако автор, стремясь популярно изложить историю физики, опирается не на первоисточники, а на вторичные источники, которые содержат многочисленные неточности, перешедшие, к сожалению, и в его книгу.

Среди источников по истории скорости света следует отметить книгу И.Б. Коэна о О. Рёмере (Cohen, 1944), книгу С.Р. Филоновича “Самая большая скорость” (Филонович, 1983). С.Р. Филонович также перевел на русский язык работы О. Ремера, Г. Кавендиша, Ш. Кулона и др. (Голин, Филонович, 1989). В книгах других ученых также имеются отдельные главы, посвященные истории скорости света.

Значительной историко-научной работой стала книга известного физика Дж. Пойнтинга, опубликованная в 1894 г. и посвященная опытам по определению средней плотности Земли и гравитационной постоянной (Pointing, 1894). Дж. Пойнтинг с 1878 г. сам ставил такого рода опыты, что, очевидно, и подвигло его к написанию обзора всех других опытов, поставленных его предшественниками. Книга Пойнтинга до сих пор является важнейшим трудом по истории опытов XIX в. по определению средней плотности Земли и гравитационной постоянной. В дальнейшем история опытов по определению плотности

Земли и гравитационной постоянной исследовалась М.У. Сагитовым, Р. МакКормаком, Б.Е. Клотфелтером, Г. Гиллесом, С.Р. Филоновичем и др. Важным источником также является научно-биографическая книга о Г. Кавендише К. Юнгникель и Р. МакКормака <sup>1)</sup>.

Хотя специальные книги по истории постоянной Планка отсутствуют, ее история достаточно полно представлена в работах по истории квантовой теории. Следует отметить прежде всего книги М. Джеммера "Эволюция понятий квантовой механики", Т. Куна "Теория черного тела и квантовая дискретность", Я. Мехры и Г. Рехенберга "Историческое развитие квантовой теории", Х.-Г.Шёпфа "От Кирхгофа до Планка" <sup>2)</sup>.

Несмотря на обилие литературы по фундаментальным постоянным, многие историко-научные, научно-методические и методологические вопросы, связанные с появлением фундаментальных постоянных в физической картине мира, оказались неисследованными, что привело к заполнению лакун неточными и даже ошибочными представлениями. Важные статьи по демифологизации истории фундаментальных постоянных опубликовали А. Вроблевски (о Рёмере) и Б.Е. Клотфелтер (об опыте Кавендиша) (*Wroblewski*, 1985; *Clotfelter*, 1987). На это же была направлена статья автора (*Томлин*, 1999).

В 1980-е гг. усиливается внимание к концептуальным проблемам, связанным с фундаментальными постоянными. На это была направлена конференция "The constants of physics", проведенная 25–26 мая 1983 г. Лондонским королевским обществом (*The constants of physics*, 1983), на которой было представлено 17 докладов, сделанных крупнейшими западными учеными. В двух первых докладах — К.Ф. Смита и Б.В. Петли, были представлены экспериментальные значения фундаментальных постоянных (*Smith*, 1983; *Petley*, 1983a). Три доклада — Р. Ризенберга, Дж. Ирвина и Б. Пейджела, были посвящены анализу экспериментальных ограничений гипотетической переменности гравитационной постоянной и других констант взаимодействий (*Reasenberg*, 1983; *Irvine*, 1983; *Pagel*, 1983). Сами "большие числа" (т.е. параметры Вселенной, имеющие колоссальные значения) анализировались в докладе М.Дж. Риса (*Rees*, 1983). Семь докладов сделали крупнейшие физики о современном состоянии и перспективах развития тех или иных физических областей. Доклад М. Гольдхабера был посвящен поиску распада протона, предсказываемого в рамках теории великого объединения (*Goldhaber*, 1983), доклад С. Вайнберга — перспективам теоретического вывода констант взаимодействий в рамках единой теории (*Weinberg*, 1983), также константы сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий анализировались в докладе С. Льюэллин Смита (*LLewellyn Smith*, 1983). Доклад Г. Нильсена был посвящен

<sup>1)</sup> *Сагитов*, 1969; *Gillies*, 1983, 1997; *McCormack*, 1968; *Clotfelter*, 1987; *Филонович*, 1988, 1989; *Jungnickel*, *McCormack*, 1996.

<sup>2)</sup> *Джеммер*, 1966; *Kuhn*, 1978; *Mehra*, *Rechenberg*, 1982/87; *Шёпф*, 1978.

теориям поля без калибровочной симметрии (Nielsen, 1983), С. Адлера — интерпретации эйнштейновской теории гравитации как предельного случая более общей “эффективной” теории поля (Adler, 1983), Дж. Эллиса — единой теории на основе суперсимметрии (Ellis, 1983), Т.В. Киббла — фазовым переходам в ранней Вселенной (Kibble, 1983). В докладе С. Хокинга анализировалась космологическая константа (Hawking, 1983), а в докладе Дж. Барроу — размерность пространства как одна из физических констант (Barrow, 1983b). В докладе В. Пресса и А. Лайтмана были обоснованы (с точностью до порядка) различные антропометрические параметры через значения фундаментальных постоянных (Press, Lightman, 1983). Заключительный доклад Б. Картера был посвящен антропному принципу (Carter, 1983).

Концептуальные вопросы, связанные с фундаментальными физическими постоянными затрагивались в статьях М. Планка “Взаимоотношение физических теорий”, Г.А. Гамова, Д.Д. Иваненко и Л.Д. Ландау “Мировые постоянные и предельный переход”, М.П. Бронштейна “К вопросу о возможной теории мира как целого” и его книге “Строение вещества”, в докладе В. Паули “Пространство, время и причинность в современной физике”, в книгах и статьях Г.А. Гамова, в статьях А.Л. Зельманова, М. Штрауса, Ж.-М. Леви-Леблона “О концептуальной природе физических констант”, в книгах и статьях Г.Е. Горелика, статья Л.Д. Фаддеева “Математический взгляд на эволюцию физики”, И.Л. Розенталя “Физические закономерности и численные значения фундаментальных постоянных”, М. Даффа, Л.Б. Окуня и Г. Венециано, монографиях О.П. Спиридонова, Дж. Барроу и В.В. Корухова, а также в статьях и докладах автора <sup>1)</sup>. Также отдельные важные концептуальные аспекты частично затрагивались в самых различных научных статьях и книгах различных ученых.

**6. Международные конференции по фундаментальным постоянным.** С середины 1950-х гг. начали проводиться международные конференции, посвященные определению различных физических постоянных. Первой такого рода конференцией была конференция по определению масс ядер, организованная Институтом Макса Планка с 10 по 12 июля 1956 г. В сентябре этого же года прошла конференция, посвященная фундаментальным постоянным, организованная Итальянским физическим обществом, на которой обсуждались как проблемы их измерения, так и концептуальные вопросы (Avogadro, 1956). В результате работы июльской конференции бы-

<sup>1)</sup> Планк, 1914, Гамов, Иваненко, Ландау, 1928; Бронштейн, 1933, 1934, 1935; Паули, 1934/36, Гатов, 1939/65, 1949, 1968, Зельманов, 1955/60, 1964, 1966/70, 1967, 1969, Штраус, 1966/70, Levy-Leblond, 1977; Горелик, 1983, 1988, 1989; Горелик, Френкель, 1990, Фаддеев, 1989; Окунь, 1991; Окуп, 1996, 2001, 2003; Розенталь, 1980, Duff, Oкуп, Veneziano, 2001; Duff, 2002, Barrow, Tipler, 1986/88; Barrow, 2002; Корухов, 2002; Tomilin, 1999a,b; Томилин, 1999, 2000a,b, 2001, 2003 и др.

ла организована Комиссия по атомным массам и связанным с ними константам (Commission on Atomic Masses and Related Constants) при Международном союзе теоретической и прикладной физики, под эгидой которой и стали периодически проводиться конференции. В 1960 г. была проведена конференция в Гамильтоне, Онтарио (12–16 сентября 1960 г.), получившая порядковый номер 1, затем — № 2 в Вене (15–19 июля 1963 г.), № 3 в Виннипеге (28 августа–1 сентября 1967 г.), № 4 в Теддингтоне, Англия (сентябрь 1971 г.), № 5 в Париже (июнь 1975), № 6 в Ист-Лансинг, Мичиган, США (1979), № 7 в Дармштадт-Зихайме, Германия (3–7 сентября 1984 г.), № 8 в Израиле (?), № 9 в Бернкастел-Кюесе, Германия (19–24 июля 1992 г.) и др. (см. International conferences).

Кроме этих конференций Национальное бюро стандартов США с 1970 г. начало проводить международные конференции по прецизионным измерениям и фундаментальным константам (Precision measurement and fundamental constants, 1970, 1981). Также в 1989 г. во Франции была проведена международная конференция “Поиск фундаментальных констант в космологии” (The Quest for the fundamental constants in cosmology, 1989). Проблемы фундаментальных констант также обсуждались и на других конференциях, в частности, на международных конференциях по гравитации (Gravitational measurements, fundamental metrology, and constants, 1987).

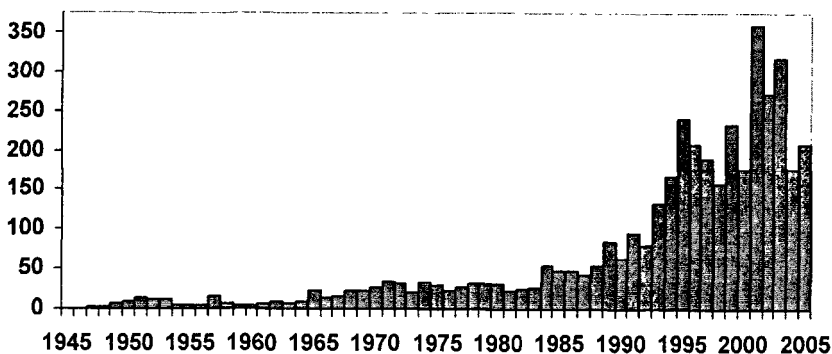
Переход от измерения фундаментальных постоянных к квантовой метрологии, осуществляющийся в современной физике, нашел свое отражение в сборнике (Квантовая метрология и фундаментальные константы, 1981), содержащим статьи (Андрюшин, Фаустов, Шелест, 1981; Кук, 1972; Козн, 1976; Козн, Тейлор, 1973; Киносита, 1978), а также на конференциях в Варенне (Италия, 12–24 июля 1976 г.) (Metrology and fundamental co[n]stants, 1976), в Эрике (Италия, 1981) (Quantum metrology and fundamental physical constants, 1981), в Браншвейге (Германия, 21–22 октября 1985 г.) (Fundamental constants in physics and metrology, 1985), в Лондоне 14–15 февраля 2005 г. (The fundamental constants of physics, precision measurements and SI base units, 2005) и др.

Наконец, в 1983 г., как указывалось выше, в Великобритании прошла конференция “The constants of physics”, направленная на комплексный анализ различных проблем, связанных с фундаментальными постоянными в современной физике, и путей их решения в физике будущего (The constants of physics, 1983).

**7. Фундаментальные физические постоянные в электронных средствах коммуникации (интернет).** Кроме традиционных форм представления информации (книги, статьи) в 1990-е гг. стала активно развиваться электронная форма с использованием сети Интернет. По проблемам, связанным с фундаментальными постоянными, наиболее существенные ресурсы предоставлены Рабочей группой по фундамен-

тальным постоянным (CODATA) — таблицы согласованных значений физических постоянных, а также наиболее полный библиографический указатель публикаций по проблемам измерения тех или иных физических постоянных (см.: <http://www.physics.nist.gov/cuu/>). Рабочая группа была создана в 1969 г. и в настоящее время в ней работает более ста человек. Целью группы является анализ результатов всех различных опытов по измерению физических постоянных и получение наиболее точных их значений. Уточненные таблицы публикуются раз в несколько лет (1986, 1998, 2002). Библиография NIST систематически собирается с середины 1980-х гг. и подключается ныне к интернет-сайту в реальном режиме времени. За предшествующий период (начиная с 1908 г.) в библиографию вошли лишь наиболее важные статьи. Указатель на данный момент (1 января 2006 г.) насчитывает более 4 тыс. статей, причем более 3 тыс. статей, опубликованных за последние 15 лет. Необходимость такого рода аккумуляции информации очевидна и работа, выполняемая CODATA, имеет огромное значение.

Динамика количества статей по фундаментальным постоянным по библиографии NIST представлена на диаграмме. Очевиден постоянный



■ количество статей

Количество статей по фундаментальным постоянным по библиографии NIST в период 1945–2005 гг.

рост количества статей по этой тематике, особенно в 1990-е годы. Причем в 2001 г. наблюдался абсолютный максимум — 358 статей.

Библиография NIST по измерению физических постоянных до 1945 г. пока далека от полноты (лишь 44 статьи), причем до 1925 г. — лишь 5 статей. Это объясняется направленностью сайта — аккумуляцию информации о всех современных публикациях результатов опытов по измерению констант и отразить наиболее точные их значения,

полученные группой CODATA на основе обобщения всей имеющейся информации.

Еще одним важным информационным источником является интернет-сайт Particle Data Group, на котором приводятся современные согласованные значения масс элементарных частиц (PDG, 2005).

Существуют и другие информационные ресурсы, посвященные фундаментальным физическим постоянным (как правило, интернет-страницы на университетских сайтах), однако они не обновляются, несмотря на принятие новых согласованных значений констант, в отличие от сайта NIST. Также некоторое заблуждение относительно современных значений констант привнесло репринтное переиздание в 2003 г. "Физического энциклопедического словаря" (1983) со значениями констант, которые были приняты в 1978–1986 годах.

# ЧАСТЬ 1

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ В КВАНТОВО-РЕЛЯТИВИСТСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ: ПОЯВЛЕНИЕ АБСОЛЮТНЫХ МАСШТАБОВ ПРИРОДЫ

Данная часть посвящена истории появления фундаментальных постоянных (т. е. постоянных  $C$ -класса) и осознания их фундаментального статуса в ходе квантово-релятивистской революции, прежде всего скорости света  $c$  и постоянной Планка  $h$ . Третья глава посвящена элементарному заряду  $e$ . Появление постоянной Больцмана частично рассматривается в связи с открытием закона теплового излучения и одновременным открытием постоянной Планка.

### Глава 1.1

#### Скорость света

История скорости света длительное время реконструировалась в основном как история опытов по ее измерению. Фундаментальный двухтомный обзор всех опытов по определению скорости света, проведенных до начала XX века, включая косвенные опыты, из которых можно было извлечь значение скорости света, опубликовал в 1903 г. Б.П. Вейнберг (*Вейнберг, 1903*). Целью Вейнберга было пересмотреть все результаты с точки зрения выявления систематических ошибок и вывести на основе этого анализа наиболее вероятное значение скорости света. Полученное им значение — 299857 км/с с возможным отклонением до 1/8000. К сожалению, это фундаментальнейшее исследование оказалось незаслуженно обойдено вниманием, возможно, из-за того, что в названии книги присутствовал термин “эфир”, выпавший из физики после статьи Эйнштейна 1905 г., а также из-за того, что оно было опубликовано только на русском языке. Измерениям скорости света была также посвящена книга К. Фрума и Л. Эссена “Скорость света и радиоволн” (*Фрум, Эссен, 1969*). Среди источников по истории скорости света выделяются статья и монография И.Б. Коэна о О. Рёмере и первом определении скорости света (*Cohen, 1944*), монография С.Р. Филоновича “Самая большая скорость” (*Филонович, 1983*), статья У.И. Франкфурта (*Франкфурт, 1960*).

Несколько раз к истории СТО обращались сами ее создатели — А. Эйнштейн, Г.А. Лоренц, Г. Минковский<sup>1)</sup>, стремясь показать объективный характер происшедшей релятивистской революции, а также такие ученые, как М. Борн, В. Паули, В.Л. Гинзбург<sup>2)</sup>. Книга Паули “Теория относительности” (1921) совмещала подробное изложение специальной теории относительности с кратким, но достаточно информативным историческим обзором. Фундаментальная монография по истории СТО, построенная как историческая реконструкция всех идей, вошедших в основополагающую статью А. Эйнштейна (*Einstein, 1905b*), опубликована А. Миллером (*Miller, 1981*). Среди других исторических исследований следует отметить двухтомную “Историю теорий эфира и электричества” Э. Уиттекера, монографии А. Пайса, У.И. Франкфурта, М.-А. Тоннеллы, С. Гольдберга и др., а также статьи Вс.К. Фредерикса и Д.Д. Иваненко, Д. Холтона, С. Гольдберга, М. Клейна и А. Нидела, Дж. Кесуани, А.А. Тяпкина, И.Ю. Кобзарева<sup>3)</sup> и др. Б.В. Булюباشем в рамках исследования различных теорий электромагнетизма XIX века были проанализированы постоянные размерности скорости, фигурировавшие в этих теориях (*Булюбаш, 1987*). Оригинальные статьи классиков релятивизма, а также некоторые историко-научные статьи вошли в сборники (Принцип относительности, 1935; 1973).

История скорости света может быть представлена различным образом: как история опытов по ее измерению, как хронологически упорядоченная совокупность открытий, связанных со скоростью света, как совокупность вкладов отдельных ученых и др. В данном исследовании избран подход к истории скорости света через историю открытия основных концептуальных аспектов, связанных со специальной теорией относительности.

**1.1.1. От абсолютной к относительной одновременности.** Становление классической физики связано прежде всего с утверждением понятий абсолютного времени и абсолютной одновременности, без опоры на которые не удалось бы формализовать наблюдаемые закономерности. До начала XVII в. господствовали представления о мгновенности света, а об одновременности пространственно разделенных событий судили по приему визуальной информации. Это же служило обратным аргументом в пользу мгновенности света — круг замыкался. Вот характерные “аргументы” мгновенности света, высказывавшихся до начала XVII в.: как только происходит выстрел из орудия — мы сразу видим вспышку, а лишь через некоторое время слышим звук; как

<sup>1)</sup> Эйнштейн, 1907b, 1910; Лоренц, 1906/09, 1914; Минковский, 1908b.

<sup>2)</sup> Паули, 1921; Борн, 1955; Гинзбург, 1974.

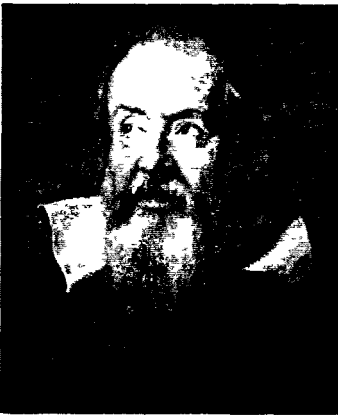
<sup>3)</sup> Уиттекер, 1910/53; Пайс, 1982, Франкфурт, 1968; Tonnelat, 1971, Goldberg, 1984; Фредерикс, Иваненко, 1935, с. 365–370; Holton, 1960, 1969a,b, 1988; Goldberg, 1970a,b, Klein, Needell, 1977; Keswani, 1965/66, Тяпкин, 1973, Кобзарев, 1974, 1975, 1991/97 и др.



только Солнце поднимается на горизонте — мы сразу видим его лучи и т. п. Таким образом, в то время понятие одновременности и скорости распространения света были тесно связанными друг с другом и система взглядов (абсолютная одновременность и мгновенность света) была самосогласованной. Критику подобных представлений дали Ф. Бэкон в “Новом Органоне” (1620) и Г. Галилей в “Беседах и математических доказательствах...” (1638).

Ф. Бэкон высказал в “Новом Органоне”, как он сам выразился, “чудовищное сомнение: различается ли поверхность ясного звездного неба в то самое время, когда она действительно существует, или же несколько позднее этого” и заключил, что из наблюдения выстрела из огнестрельного оружия следует лишь, что “движение света протекает быстрее, чем движение звука” (Бэкон, 1620, т. 2, с. 182–183).

Г. Галилей общепринятые суждения о связи одновременности событий и мгновенности света вкладывает в уста Симпличио (персонажа “Бесед...”, обобщенного образа *простака*): “Повседневный



Г. Галилей

опыт показывает, что распространение света совершается мгновенно. Если вы наблюдаете с большого расстояния действие артиллерии, то свет от пламени без всякой потери времени запечатлевается в нашем глазу в противоположность звуку, который доходит до уха через значительный промежуток времени”. Сагрето — оппонент Симпличио, опровергает его аргументы: “Ну, сеньор Симпличио, из этого общеизвестного опыта я не могу вывести никакого другого заключения, кроме того, что звук доходит до нашего слуха через большие промежутки времени, нежели свет; но это нисколько не убеждает меня в том, что распространение света

происходит мгновенно и не требует известного, хотя и малого времени” (Галилей, 1638, с. 149). Сагрето показывает далее, что и аналогичный аргумент — “как только Солнце поднимается на горизонте, блеск его тотчас же достигает наших очей”, также несостоятелен, так как суждение об одновременности событий основано именно на приеме светового сигнала: “Кто же может доказать мне, что лучи его не появились на горизонте ранее, нежели дошли до моих глаз?”. Именно после этих слов Галилей устами своего третьего персонажа Сальвиати предлагает опыт по измерению скорости света. Идея Г. Галилея постановки опыта по измерению скорости света явилась фактически воплощением бэконовской методологической программы освобождения сознания от “идолов” или “призраков”, обусловленных в том числе повседневным опытом, и постановки “решающих экспериментов”, хотя в точности не

установлено, знал ли Галилей об идеях Бэкона, изложенных в “Новом Органоне”.

В XVII в. представление об абсолютной одновременности легло в основание классической механики и физики, а свет уже не использовался для обоснования одновременности и перешел в разряд обычных явлений, подлежащих экспериментальному изучению.

И. Ньютон в “Поучении” в самом начале “Математических начал натуральной философии” после “Определений” пояснил, что он понимает под пространством, временем, местом и движением. Он подчеркнул, что эти понятия “необходимо разделять на абсолютные и относительные, истинные и кажущиеся, математические и обыденные” (Ньютон, 1687/1725, с. 30). Под абсолютным временем он понимал время, которое “само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно”. Под относительным временем он понимал интервалы времени, постигаемые чувствами и связанные с какими-либо движениями — час, день, месяц, год, и потому неравномерные и требующие введения поправок. Ньютон отметил: “Возможно, что не существует (в природе) такого равномерного движения, которым время могло бы измеряться с совершенною точностью” (там же, с. 32). В “Поучении” в конце первого тома Ньютон отметил факт постепенности распространения света, доказанный “наблюдениями многих астрономов” (там же, с. 284).

В ходе переосмысления пространственно-временных понятий на рубеже XIX–XX в., понятие одновременности и скорости света вновь оказываются тесно связанными, как и до XVII в., но уже на совершенно ином уровне. Происходит отказ от абсолютности пространства, времени и одновременности, сыгравших важную роль в становлении классической физики, и утверждается концепция *локального времени* и *относительной одновременности*, устанавливаемой посредством передачи сигнала со скоростью света.

Это преобразование основ физики было предвосхищено концептуальной критикой А. Пуанкаре основополагающих понятий классической физики — абсолютного пространства, абсолютного времени и абсолютной одновременности, данной им в статье “Измерение времени” (Poincaré, 1898) и в книге “Наука и гипотеза” (Poincaré, 1902). В статье “Измерение времени” Пуанкаре отметил конвенциональность принятых понятий времени и одновременности, порочность круга обоснования одновременности через причинность, отсутствие естественной меры времени (“мы можем знать, что некоторый факт предшествует другому, но не знаем *насколько*”: Пуанкаре, 1898, с. 13), а также невозможность “определить непосредственно на основе интуиции равенство двух интервалов времени” (там же). В этой же статье Пуанкаре говорил о неявно принятом всеми “постулате” постоянства скорости света и отметил, что этот постулат “дал нам новое правило для поисков одновременности” (там же, с. 19). Эту статью Пуанкаре завершил следующим утверждением: “Одновременность двух событий или порядок

их следования, равенство двух длительностей должны определяться таким образом, чтобы формулировка естественных законов была бы настолько простой, насколько это возможно. Другими словами, все эти правила, все эти определения являются лишь плодом неосознанного соглашения” (там же, с. 21).

В книге “Наука и гипотеза” в главе “О принципе относительности пространства и движения” он писал: “1. Абсолютного пространства не существует, мы знаем только относительные движения. Между тем чаще всего выражают механические факты так, как если бы существовало абсолютное пространство, к которому их можно было бы отнести. 2. Не существует абсолютного времени. Утверждение, что два промежутка равны, само по себе не имеет смысла, и можно применять его только условно. 3. Мы не способны к непосредственному восприятию не только равенства двух промежутков времени, но и не можем быть уверенными в одновременности двух событий, происходящих в различных местах. (Я пояснил это в статье “La mesure du temps”). 4. Наконец, сама наша евклидова геометрия — лишь своего рода условный язык. Мы могли бы изложить факты механики, относя их к пространству неевклидову, которое было бы основой менее удобной, но столь же законной, как и наше обыкновенное пространство. <...> Таким образом, абсолютное пространство, абсолютное время, даже сама геометрия не имеют характера вещей, обуславливающих собой механику” (Пуанкаре, 1902, с. 23). Далее Пуанкаре отмечает: “Можно было бы попытаться изложить основные законы механики на языке, независимом от всех этих условий” (там же). Однако изменение “языка”, приводит по его мнению, к усложнению описания реальности.

В. Фогтом в статье 1887 г., затем Г.А. Лоренцем в статье 1892 г. и в книге 1895 г., Дж. Лармором в книге “Эфир и материя”<sup>1)</sup> использовалось преобразование временной координаты получившее название *местного (локального) времени*. Это был лишь вспомогательный прием, позволяющий восстанавливать инвариантность уравнений Максвелла. В докладе в Сент-Луисе в сентябре 1904 г. “Настоящее и будущее математической физики” А. Пуанкаре отметил, что “у нас нет средств заметить” отличие локального времени  $t'$  от “истинного”  $t$  (Пуанкаре, 1904, с. 34). Смысл того, что сделал А. Эйнштейн, как позже отметил Г. Минковский, заключается в том, что он показал равнозначность  $t$  и  $t'$  (Минковский, 1908b, с. 173). В этом же докладе в Сент-Луисе Пуанкаре обсуждал синхронизацию двух пунктов  $A$  и  $B$  с помощью световых сигналов (Пуанкаре, 1904, с. 34), но допускал возможность сообщения сигналами, превышающими скорость света, ссылаясь на гипотезу Лапласа о распространении тяготения со скоростью “в миллион раз быстрее света”, и, следовательно, возможность обнаружения абсолютного движения (там же, с. 35).

<sup>1)</sup> Voigt, 1887/1915; Lorentz, 1892, 1895; Лармор, 1900, с. 54.

Критика А. Пуанкаре понятия абсолютной одновременности, высказанная им в книге “Наука и гипотеза”, несомненно оказала направляющее влияние на создание специальной теории относительности. Именно эту книгу Пуанкаре Эйнштейн вместе с друзьями штудировал будучи студентом Цюрихского политехникума. Также сам термин “принцип относительности” был, очевидно, воспринят Эйнштейном именно от Пуанкаре. В 1905 г. Эйнштейн провозгласил отказ от априорного понятия “абсолютной одновременности” и перешел к установлению относительной одновременности операциональным образом через передачу светового сигнала (*Einstein, 1905b*; рус. пер: *Эйнштейн, 1905b*). Считается, что со статьей 1904 г. А. Пуанкаре Эйнштейн не был знаком, однако важное место в статье Эйнштейна приобрела именно синхронизация времени в двух пунктах  $A$  и  $B$ .

Свою статью Эйнштейн начинает с отрицания на основе обобщения данных опытов понятия “абсолютного покоя” и в первом параграфе дает “определение одновременности”. “Мы должны обратить внимание на то, что все наши суждения, в которых время играет какую-либо роль, всегда являются суждениями об *одновременных событиях*,” — отметил Эйнштейн (там же, с. 8). Далее Эйнштейн указывает, что “общее” время для двух пространственно разделенных точек  $A$  и  $B$  можно установить, “*вводя определение*, что «время», необходимое для прохождения света из  $B$  в  $A$ ” (там же, с. 9). Условие синхронизации часов по Эйнштейну:  $t_B - t_A = t'_A - t_B$ , где  $t_A$  — время выхода сигнала из точки  $A$  (по часам  $A$ ),  $t_B$  — время прихода сигнала в точку  $B$  (по

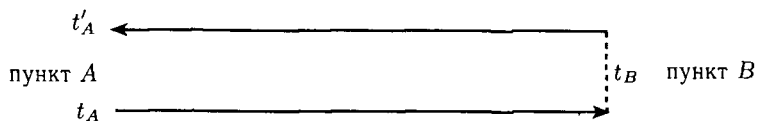


Рис. 1.1.1. Синхронизация часов в пунктах  $A$  и  $B$  по Эйнштейну

часам  $B$ ),  $t'_A$  — время возвращения сигнала обратно в точку  $A$  после отражения в точке  $B$  (по часам  $A$ ), т.е.  $t_B = \frac{t_A + t'_A}{2}$  (см. рис. 1.1.1).

Учитывая постулат Эйнштейна об универсальности скорости  $\frac{2|AB|}{t'_A - t_A} = V$  (там же, с. 10), условие эйнштейновской синхронизации

можно записать так:  $t_B = t_A + \frac{|AB|}{V}$  или  $t'_A = t_B + \frac{|AB|}{V}$ . Отметим, что в переводе этой же статьи Эйнштейна в сборнике “Принцип относительности” условие синхронизации Эйнштейна содержит неточность:  $t_B - t_A = t'_A - t'_B$  (Принцип относительности, 1973, с. 99). На самом деле Эйнштейн вообще не вводил время  $t'_B$ , связанное вновь с возвращением сигнала в точку  $B$ . Такая синхронизация очевидно приводит к неравноправию точек  $A$  и  $B$ , а также путей  $AB$  и  $BA$ :

$t_B = t_A$  и  $t'_A = t_B + \frac{2|AB|}{V}$ , а формальное равноправие достигается только при мгновенном распространении света.

Далее Эйнштейн показывает, что часы, синхронизированные в покоящейся системе, кажутся идущими несинхронно в движущейся системе (это же было отмечено и в докладе Пуанкаре 1904 г.). “Итак, — сделал вывод Эйнштейн, — мы видим, что не следует придавать *абсолютного* значения понятию одновременности. Два события, одновременные при наблюдении из одной координатной системы, уже не воспринимаются как одновременные при рассмотрении из системы, движущейся относительно данной системы” (*Эйнштейн*, 1905b, с. 13).

Таким образом, одновременность спустя почти триста лет вновь оказалась связанной со светом, но уже распространяющемся с конечной постоянной скоростью. Однако значение такого подхода, оказавшегося необычайно продуктивным, выходило за рамки конкретно светового явления. Фактически речь шла о синхронизации часов с помощью процесса, распространяющегося с фундаментальной скоростью, *совпадающей* со скоростью света в вакууме. Эти вопросы рассматривались в статье Н.Д. Мермина, который “выключил свет” из обоснования СТО и показал, что релятивистский закон сложения скоростей можно получить из принципа относительности, расширенного с учетом существования инвариантной скорости (*Mermin*, 1984).

**1.1.2. Открытие конечности скорости света.** Для открытия конечности скорости света существовали как научные, так социокультурные предпосылки. Основными научными предпосылками этого открытия были: 1) осознание, что все наблюдаемые явления отнюдь не свидетельствуют в пользу мгновенности света (Ф. Бэкон, Г. Галилей); 2) идея опытного определения скорости света (П. Сарпи, Г. Галилей; Г. Галилею принадлежит, по-видимому, первое использование в печати термина “скорость света” — “*velocita de lume*”); 3) оценки нижней границы скорости света (Р. Декарт, Х. Гюйгенс, И. Ньютон, О. Рёмер) — подход, аналогичный современным оценкам границ тех или иных физических параметров (массы фотона, пропорциональности между инертной и гравитационной массами и т. д.); 4) модели света: все модели, предлагаемые в XVII в. были основаны на аналогии с естественными процессами (т.е. процессами, протекающими с конечной скоростью), в т.ч. корпускулярная (Р. Декарт, И. Ньютон) и волновая модели света (Х. Гюйгенс); 5) объяснение преломления света на основе той или иной модели света фактически предполагало *изменение* скорости света в среде (Р. Декарт, П. Ферма, Х. Гюйгенс, И. Ньютон). Таким образом к 1660–70-м годам, несмотря на общепринятые представления о мгновенности света, наиболее крупные ученые, такие как Х. Гюйгенс, И. Ньютон, фактически перешли к представлениям о конечности скорости света, что видно из их оценки работы О.Рёмера, которую они

рассматривали как экспериментальное доказательство конечности скорости света.

Основной социокультурной предпосылкой открытия конечности скорости света стала проблема получения надежного метода определения долготы на море — проблема, исключительно важная для мореплавания, решения которой стремились достичь в течение всего XVII века. Эту проблему (фактически проблему определения *времени*) можно было решить двумя способами: или создать часы, которые поддерживали бы точный ход независимо от движения или найти естественные “часы” на небе (т. е. периодические процессы, которые можно было бы использовать как часы). Г. Галилей, открывший первые четыре спутника Юпитера, сам же и предложил использовать их затмения для определения долготы на море; в связи с этим он вел переписку с политическими деятелями Испании и Голландии. Фактически именно его программа — составления точных таблиц затмений спутников Юпитера, — и реализовывалась в Парижской обсерватории в 1660–70-е гг. Практическим итогом выполнения этой программы стало уточнение координат французских городов. Для целей навигации на море этот метод оказался малопригодным, однако в результате попыток его реализации были открыты периодические колебания периода обращения первого спутника Юпитера Ио, которые были интерпретированы Рёмером как *кажущиеся* вследствие конечной скорости распространения света. Таким образом результатом прикладных исследований стало фундаментальное открытие конечности скорости распространения света.

Идеи опытного определения скорости света высказывали П. Сарпи, Г. Галилей и др. В конце XVI в. итальянский теолог и ученый П. Сарпи предположил, что “если показать и спрятать источник света, то было бы как со звуком: сначала его перестал бы видеть ближний сосед, тогда как дальний начинал бы видеть свет, однако разность была бы здесь меньшей, потому что скорость света больше” (*Льоцци*, 1965, с. 78). Это рассуждение было найдено в бумагах Сарпи только в конце XIX века итальянским историком П. Кассани (*Cassani*, 1882). Для современников Сарпи оно оставалось, по-видимому, неизвестным, хотя М. Льоцци полагает, что возможно были беседы между П. Сарпи и Г. Галилеем, которые и “вдохновили” Галилея. Против этой точки зрения — то, что Галилей оставался сторонником мгновенности скорости света и после смерти Сарпи в 1623 г., а перешел к идее конечности скорости света только в середине 1630-х гг. (хотя влияние идей, конечно, не носит мгновенного характера). Кроме этого, абстрактное рассуждение Сарпи далеко от плана конкретного опыта. Схема Сарпи основана на идее абсолютного времени. Она требует наличия у экспериментаторов абсолютно точно согласованных часов, не меняющих ход при перенесении их в другую точку пространства. Неизвестно, знал ли Галилей об идеях Сарпи, но схема опыта Галилея выглядит развитием и завершением с точки зрения экспериментальной целесообразности схемы Сарпи —

в “Беседах...” он предлагает определять разницу во времени возврата света в ту же точку, откуда он и был испущен.

Суть предложенного Галилеем (устаами Сальвиати) опыта — два человека становятся друг против друга на расстоянии несколько локтей с фонарями в руках. Один из них открывает заслонку фонаря, другой делает то же в тот момент, когда увидит свет от первого фонаря. После определенной тренировки тот же опыт повторяется на расстоянии двух-трех миль. Участники опыта “начинают внимательно наблюдать, получается ли ответ на открытие и закрытие огня с тою же быстротою, что и на близком расстоянии; если это так, то можно с достоверностью заключить, что распространение света происходит мгновенно; если бы для этого требовалось время, то расстояние в три мили, пробегаемое светом от одного источника до глаза другого участника и обратно, было бы достаточным, чтобы обнаружить известное запоздание” (*Галилей*, 1638, с. 149).

Анализ текста “Бесед...” позволяет сделать вывод, что Галилей отождествил разряд молнии с распространением света, оценил скорость света и именно на основе своей оценки и предложил этот опыт. На это указывает прежде всего то, что Галилей, описывая схему опыта, формулирует свой опыт, как *качественный* опыт, своего рода *experimentum crucis*, позволяющий “с достоверностью” выяснить — распространяется ли свет мгновенно или для этого требуется время. Совершенно очевидно, что Галилей, понимая, что это — чисто количественный опыт, но представляя его как качественный, абсолютно уверен в *положительном* результате, т. е. в том, что его опыт, поставленный на расстоянии в 3 мили, докажет конечность скорости света, ибо отрицательный результат не доказывает мгновенности света. Поставленный опыт, по словам Сальвиати, дал отрицательный результат. Сальвиати рассказывает, что он осуществил этот опыт на расстоянии менее 1 мили, “но не смог убедиться, действительно ли появление противоположного света совершается внезапно”. Примечательно, что Галилей отсюда не делает вывода о мгновенности распространения света: “Но если оно происходит и не внезапно, то во всяком случае с чрезвычайной быстротой, почти мгновенно”. Таким образом, Галилей-Сальвиати прекрасно понимает, что отрицательный результат опыта на 1 миле пока очерчивает лишь нижнюю границу скорости света. Наряду с указанием о неудаче эксперимента на расстоянии “менее 1 мили”, Галилей высказывает уверенность в успехе опыта на расстоянии в 3 мили (“расстояния в 3 мили было бы достаточным, чтобы обнаружить запаздывание”). Это говорит об ожидании им некоторого значения запаздывания света. Таким образом, его опыту, очевидно, предшествовала оценка запаздывания света и сама идея опыта была им предложена именно на основе ожидания некоторого конкретного значения запаздывания. Из текста “Бесед” явствует, что Галилей надеялся обнаружить конечность скорости света на расстоянии в 1–3 мили, в крайнем случае — 8–10 миль. Очевидно, Галилей был уверен, что

скорость света превышает скорость звука лишь в несколько раз! Это как раз то значение, которое он мог извлечь из оценки скорости разряда молнии. На то, что Галилей отождествлял электромагнитный разряд молнии с распространением света, обратил внимание еще С.И. Вавилов (Вавилов, 1943; 1956, т. 3, с. 272). Имей свет такую же скорость, ее, действительно, можно было бы измерить в опыте с фонарями. Интересно, что А. Эйнштейн и Л. Инфельд в книге “Эволюция физики”, объясняя для читателя этот опыт Галилея, в качестве педагогического приема “уменьшают” скорость света до 1 км/с — только при таких скоростях опыт был бы успешным на расстоянии 1 км (Эйнштейн, 1965/67, т. 4, с. 415). Позже Э. Мах назвал спутники Юпитера, затмения которых доказали конечность скорости света, “фонарем Галилея” (Мах, 1866, с. 47).

Другое направление, которое начало развиваться начиная с Декарта — попытки оценки нижней границы скорости света. Усилия в этом направлении прикладывали Р. Декарт, Х. Гюйгенс, И. Ньютон и О. Рёмер. Декарт в письме Бекману предложил метод оценки скорости света исходя из лунных затмений. Если бы свет распространялся достаточно медленно, то удавалось бы наблюдать одновременно Солнце и затемненный диск Луны. Поскольку такое явление не наблюдается, свет должен тратить на путь от Земли до Луны и обратно не более 5 тыс. ударов пульса, т. е. не более часа. Это служило аргументом для Декарта в пользу мгновенности света, что было краеугольным камнем его воззрений на мир. Сам метод Декарта позже использовал Х. Гюйгенс при оценке скорости света в ответном письме О. Рёмеру от 18 ноября 1677 г. (фрагмент этого письма переведен И.Н. Веселовским в книге о Х. Гюйгенсе (Веселовский, 1959, с. 97–98)). Гюйгенс определил, что запаздывание света от Луны к Земле не может превышать 10 секунд. В начале своего доказательства конечности скорости света Рёмер сделал оценку верхней границы запаздывания света (т. е. нижней границы скорости света) другим методом. Он показывает, что свет проходит диаметр Земли быстрее, чем за 1 секунду, ибо такое запаздывание давало бы задержку в появлении Ио за 1 оборот около 3,5 мин, “в то время как никакой ощутимой разницы не отмечается”. Рёмер понимает, что “из этого не вытекает, что свету совсем не требуется времени” (Рёмер, 1676, с. 119). Таким образом, из астрономических явлений были получены оценки скорости света  $> 10^{-1}c$ , где  $c$  — современное значение скорости света.

Третье направление, подводившее к конечности скорости света, было связано с обоснованием природы света. Это обоснование велось в направлении поиска аналогов света среди других естественных явлений — движения твердых тел, движения воздуха (звук), движения жидкости. Поскольку все природные явления — явления, совершающиеся с конечной скоростью — это было еще одним аргументом в пользу конечности скорости света. Неслучайно поэтому сторонники двух совершенно противоположных моделей света — И. Ньютон



и Х. Гюйгенс, были сторонниками именно конечности скорости света. Ньютон в “Началах” моделировал свет движением корпускул, а Гюйгенс в “Трактате о свете” опирался на опто-акустическую аналогию, которая применялась с давних времен. Еще в античности ее применял Аристотель при объяснении эха (он отмечал аналогичность отражения звука (эхо) и отражения света). Г. Галилей использовал аргумент аналогий в “Беседах...”, вложив его в уста Сагрето: “Должны ли мы считать его (свет) мгновенным или же *совершающимся во времени, как другие движения?* (выделено — К.Т.)” (Галилей, 1638, с. 149).

Наконец, еще одно направление было связано с обоснованием эмпирического закона преломления. Оказалось, что обосновать закон преломления (закон синусов углов), предложенный Р. Декартом и независимо В. Снеллиусом, можно легко, если пользоваться гипотезой изменения скорости света при прохождении поверхности раздела двух сред (Р. Декарт, П. Ферма, Х. Гюйгенс, И. Ньютон). Доказательство Р. Декарта, связанное с тем, что движение света происходит легче в более плотной среде, фактически предполагало увеличение скорости света при переходе из одной среды в другую (хотя формально он избежал этого предположения, оставаясь приверженцем мгновенности света). В 1657 г. в письме де ля Шамбру, который был сторонником мгновенности света, Ферма указал, что “движение света без всякой последовательности во времени может быть оспариваемо”, но обосновывал закон преломления не через изменение скорости, а через изменение “сопротивления” среды (Ферма, 1657). В 1662 г. П. Ферма в мемуаре “Синтез для рефракции” обосновал закон преломления с помощью постулата, что “природа действует наиболее легкими и доступными путями” (принцип наименьшего времени) и его доказательство уже прямо опиралось на уменьшение скорости света в более плотной среде (Ферма, 1662). В “Трактате о свете” (1678, опублик. в 1690) Х. Гюйгенс при объяснении закона преломления отмечает, что отношение синусов углов равно отношению скоростей волн двух сред, а затем упрощает доказательство Ферма на основе прямого использования изменения скорости света при пересечении границы двух сред (Гюйгенс, 1678/90, с. 60–62). И. Ньютон удивительным образом “обосновал” закон синусов в последнем параграфе первого тома “Математических начал” на основе своего закона тяготения. Оказалось, что в разных моделях света — корпускулярной и волновой — свет в отношении изменения скорости вел себя по-разному. В волновой модели свет уменьшал свою скорость в оптически более плотных средах, а в корпускулярной — увеличивал. На самом деле никакого противоречия между этими двумя моделями не было. Просто *понятия скорости* в этих моделях были различны, но это было осознано лишь несколько столетий спустя.

В начале сентября 1676 г. на заседании Парижской Академии наук Рёмер выступил с сообщением о наблюдениях затмений спутников Юпитера и предсказал, что затмение 9 ноября будет наблюдаться на

10 мин. позже, чем это следовало бы из расчета, основанного на наблюдениях в конце августа. Затмение 9 ноября 1676 г., как отмечается в последующих журнальных публикациях, действительно наступает в указанный Рёмером момент времени. На заседании 21 ноября 1676 г. Рёмер выступает и выдвигает объяснение задержек и опережений затмений Ио запаздыванием света, однако поддержки такое объяснение среди академиков не находит. 7 декабря 1676 г. краткое изложение сообщения Рёмера под названием “Доказательство, касающееся движения света” публикуется во французском “*Journal de Sçavans*” (Römer, 1676) и спустя полгода 25 июня 1677 г. в английском переводе в “*Philosophical Transactions*” (Roemer, 1677). Английский текст идентичен французскому оригиналу. Журнальное сообщение представляет собой не сам доклад Рёмера, а лишь его сжатое изложение, причем методика расчета запаздывания света там опущена. Перевод на русский язык был опубликован в 1989 г. С.Р. Филоновичем (из этой публикации по каким-то причинам выпала половина последнего абзаца, где обсуждаются и отвергаются три возможные гравитационные причины наблюдаемых задержек и опережений затмений) (Голин, Филонович, 1989, с. 119–120).

Судя по тексту публикации, Рёмер не использует термин “скорость света”. Вместо этого он применяет термин “запаздывание света” на некотором интервале (“*retardement de la lumiere*” — во французском оригинале статьи, “*retardment of Light*” — в английском переводе, “*de mora luminis*” — в письмах Рёмера Гюйгенсу, написанных на латыни). Происхождение этого термина, очевидно, связано с концепцией абсолютного времени и вполне закономерно в работах конца XVII в. По сути, это понятие представляет собой обратное по отношению к понятию скорости света. Х. Гюйгенс в “Трактате о свете”, напротив, в основном применял термин “скорость света”, а не “запаздывание” (по аналогии со скоростью звука), что связано, очевидно, с применяемой им опто-акустической аналогией, на основе которой он строит теорию света.

Среди историко-научных исследований, целиком посвященных О. Рёмеру, следует выделить книгу И.Б. Коэна, написанную к 300-летию ученого и посвященную освобождению его родины — Дании от оккупации (Cohen, 1944). Во Франции к 300-летию открытия конечности скорости света под редакцией Р. Татона вышел сборник статей, посвященный этому открытию (Roemer et la vitesse de la lumière, 1978). В работах К. Мейера, И.Б. Коэна и в сборнике “Рёмер и скорость света” воспроизводится факсимиле публикаций О. Рёмера, а также факсимиле некоторых черновых расчетов и сводный лист наблюдений затмений спутника Юпитера Ио с 1668 г. по 1678 г., составленный рукой Рёмера.

Принципиально важным моментом в правильной интерпретации обнаруженного “неравенства” движения первого спутника Юпитера, стало открытие корреляции этого “неравенства” с движением Земли

от и к Юпитеру, т. е. его зависимость от относительного движения Земли и Юпитера и независимость от положения самого Юпитера. Этот эффект, замеченный парижскими астрономами в 1670-х гг. и ставший обоснованием конечности скорости света, представляет собой не что иное как своеобразный эффект Доплера. В самом деле, спутник Ио, совершая периодическое обращение вокруг Юпитера, как бы посылает периодические сигналы, когда выходит или входит в тень Юпитера. Когда Земля удаляется от Юпитера, *измеряемая* на Земле частота этих сигналов (т. е. частота оборотов Ио) уменьшается, когда приближается — возрастает. Поэтому наблюдаемый период обращения Ио то увеличивается, то уменьшается в соответствии с удалением или приближением Земли к Юпитеру. Именно 100% корреляция между запаздыванием или опережением затмений и движением *от* и *к* Юпитеру и стала для Рёмера основным аргументом в пользу “запаздывания света” (т. е. конечности скорости света), что было выражено им в таблице, приведенной в письме Х. Гюйгенсу от 30 сентября 1677 г. (*Huygens*, 1677, p. 33–34).

Наблюдение одного оборота не выявляло заметных отличий. Однако, “после более тщательного изучения вещей он [Рёмер] обнаружил, что незаметное для двух обращений становится весьма значительным для многих [обращений], взятых вместе”. 40 оборотов спутника Ио, наблюдаемые когда Земля приближается к Юпитеру (отрезок *FG*), кажутся, как отметил Рёмер, “заметно короче” 40 оборотов, когда Земля удаляется от Юпитера (отрезок *LK*) (см. ниже схему). Следовательно, делает вывод Рёмер, свету “необходимо 22 [минуты] для [прохождения] интервала, который является удвоенным расстоянием от нас до Солнца” (Рёмер, 1676, с. 120). Запаздывание света составляет, согласно Рёмеру, 22 минуты за диаметр земной орбиты *D*. Таким образом, Рёмер получил по сути обратное значение скорости света и в современных обозначениях его результат можно представить в виде:  $c^{-1} = 22 \text{ мин}/D$ . (Современное значение  $c^{-1} = 16'41,6'' D^{-1} = 1001,6 c/D$ ).

Согласно ряду авторов, “Рёмер получил” самые различные значения скорости света, причем выраженные в современных практических единицах:

3,2·10<sup>5</sup> км/с  
(312 220 км/с) 41965 нем. миль/с  
3,1·10<sup>5</sup> км/с  
300 870 км/с  
3·10<sup>5</sup> км/с  
(297 600 км/с) 40000 нем. миль/с  
(225 000 км/с) 140000 англ. миль/с  
215 000 км/с  
214 000 км/с  
  
2,1222·10<sup>5</sup> км/с  
135 000 км/с

*Липсон*, 1968, с. 84  
*Кудрявцев, Конфедератов*, 1965, с. 146  
*Мандельштам*, 1972, с. 87  
*Спасский*, 1977, ч. 1, с. 124  
*Лауэ*, 1950, с. 44  
*Розенбергер*, 1882/90, ч. 2, с. 212  
*Корал*, 1975, p. 526  
*Ландсберг*, 1973, с. 393  
*Храмов*, 1983, с. 356  
*Фрум, Эссен*, 1969, с. 11  
*Дорфман*, 1974, с. 199  
*Van Helden*, 1983, p. 140

Как справедливо отметил С.Р. Филонович, приписываемое Рёмеру значение 214000 км/с является современной оценкой (Филонович, 1983, с. 30). То же самое можно сказать и о всех других вышеприведенных значениях скорости света. В самом деле, значение скорости света, выраженное в километрах в секунду, Рёмер никак не мог определить, т. к. “метр” и производная от него величина “километр” были введены на столетие позже. Что касается немецкой мили (7,44 км), которую использовали Розенбергер, Кудрявцев и Конфедератов, то во Франции она, как известно, не применялась. Среди вышеприведенных авторов лишь двое — А. Ван Хелден и З. Копал, не приписывали приводимые ими значения Рёмеру, и лишь А. Ван Хелден обосновал методику своей оценки. Как видим, стремление перевести результат Рёмера в современные практические единицы приводит к неоднозначности его результата (различные значения скорости света, которые соответствуют, по мнению авторов, результату Рёмера, отличаются в 2,5 раза — своего рода “дисперсия” научных результатов, если воспользоваться научной метафорой).

Высказывалось и обратное мнение, что Рёмер не привел значения скорости света. При этом подразумевается, что Рёмер не привел значения скорости *в практической системе единиц*. Так, С.Р. Филонович пишет: “Рёмер был осторожен. В первом сообщении о своем открытии он вообще не привел конкретного значения скорости света. Эта осторожность была вполне оправдана, поскольку в то время диаметр земной орбиты был определен лишь приближенно” (Филонович, 1983, с. 30). Такая же точка зрения проводится автором и в примечаниях к переводу работы Рёмера: “Причина, по которой Рёмер указывает не саму скорость света, а время, за которое свет проходит диаметр земной орбиты, состоит в том, что во второй половине XVII в. этот диаметр не был еще определен с необходимой точностью” (Голин, Филонович, 1989, с. 120).

То, что Рёмер не привел значения скорости света в практической системе единиц, вовсе не означает, что он не получил значения скорости света. По сути Рёмер привел обратное значение скорости света в астрономической системе единиц, которая не только ничуть не хуже, чем система практических мер, но для астрономии она и до сих пор является даже более целесообразной и широко применяемой (см.: Фундаментальные постоянные астрономии, 1967, с. 127). Можно даже сказать, что для небесной механики — это наиболее естественная система единиц. Это, в частности, выразил еще И. Кеплер, когда прямо провозгласил радиус земной орбиты мерой всех расстояний.

Другая причина, по которой Рёмер не перевел свой результат в практическую систему единиц, заключается скорее не в том, что он не знал диаметра земной орбиты в практических единицах, а в том, что он применяет понятие “запаздывание света”, а не “скорость света”. Возможно, что он даже и оценил значение запаздывания в практических единицах, но это значение, как известно, столь мало, что

практически не воспринимаемо: запаздывание света на 1 лье (4445 м) всего лишь  $1/67400$  секунды ( $1,48 \cdot 10^{-5}$  с). Значение же запаздывания 22 минуты за диаметр земной орбиты удобно для восприятия (числа от 1 до 100, как известно, лучше воспринимаются, чем остальные). Для восприятия больших и малых чисел лишь с конца XVIII в. стали применяться нормальная форма (через мантиссу и степень 10), а также кратные и дольные единицы (кило-, микро- и т. п.). Таким образом, непредставление Рёмером результата в практической системе единиц связано просто с удобством работы в астрономической системе единиц и неудобством практической системы мер. Неслучайно, когда мы говорим о запаздывании света, мы и ныне выражаем расстояния в астрономических масштабах.

Значение скорости света, выраженное в общепринятых практических единицах, встречается вероятно впервые в известном “Трактате о свете” Х. Гюйгенса, написанном в 1678 г.), т. е. непосредственно после исследований Рёмера. Обсуждение работы Рёмера Гюйгенс поместил в самом начале своего трактата, что скорее всего неслучайно. Повидимому, Гюйгенс рассматривает доказательство конечности скорости света как важный эмпирический аргумент в пользу опто-акустической аналогии, на основе которой он строит теорию света. По аналогии с конечной скоростью звука следовало ожидать, что и скорость света конечна. Очевидно это стало основным фактором признания Гюйгенсом гипотезы конечной скорости света, как правдоподобной гипотезы. Из текста трактата ясно, что Гюйгенс пришел к гипотезе конечности скорости света независимо и еще до работы Рёмера, которую он описывает как подтверждение его собственных воззрений на свет: “Мысль, которой я пользовался когда-то как гипотезой, получила недавно благодаря остроумному доказательству Рёмера, по всей видимости, значение прочной истины” (Гюйгенс, 1678/90, с. 17).

Описывая исследование Рёмера, Гюйгенс целиком опирается на ремеровское значение запаздывания света 22 мин/D. Это свидетельствует о том, что он не был знаком с деталями расчета Рёмера, а только с самим результатом. Поскольку для Гюйгенса была важна акустическая аналогия, он переходит от ремеровского термина “запаздывание света” к термину “скорость света”, причем всю цепочку перевода значения скорости света из одних мер в другие он ведет к сравнению ее со скоростью звука, которая выступает у него в качестве естественного масштаба скорости. Перевод скорости света Гюйгенс осуществляет через практические единицы: “1000 диаметров (Земли) в 1 мин,  $16 \frac{2}{3}$  диаметров (Земли) в 1 сек <..>; это равняется 1100 раз 100 000 туазов <..> скорость света более чем в 600 000 раз больше скорости звука” (там же, с. 19), т. е. на современном языке:  $c = 1000 \text{ д/мин} = 11000000 \text{ туаз/с} = 600000 v_{\text{зв}}$ . Таким образом, Гюйгенс ошибается в 1,5 раза (скорость света в 900 тыс. раз больше скорости звука) из-за того, что использует завышенное на  $1/3$  значение запаздывания

света Рёмера и завышенное значение скорости звука в практических единицах.

Почему значение запаздывания, рассчитанное Рёмером, столь сильно (32%) отличалось от истинного? К сожалению, Рёмер не привел методики своего расчета. Существующие объяснения фактически неявно предполагают, что основная неточность была связана с наблюдением. В противоположность этой “измерительной” версии можно выдвинуть другую — “вычислительную” версию, основываясь на предположении, что измерения были достаточно точными, но что Рёмер совершал систематическую ошибку в своих расчетах.

Основную часть доклада Рёмера занимает оценка верхней границы запаздывания света, на анализ которой историки вообще не обращали никакого внимания. Для оценки верхней границы запаздывания Рёмер составляет пропорцию, которую в современных обозначениях можно выразить так:

$$1 d : 210 d = 1 \text{ сек} : \Delta t.$$

Суть этой пропорции в следующем. Пусть свет запаздывает на 1 сек на расстоянии равном диаметру Земли  $d$ , тогда за один оборот Ио ( $\Delta t = 42,5$  часа) Земля переместится на расстояние 210 диаметров Земли и запаздывание на этом расстоянии должно составить  $\Delta \tau = 210 \text{ сек} = 3,5 \text{ мин}$ . Однако такого запаздывания за 1 оборот Ио не наблюдается. Следовательно, делает вывод Рёмер, запаздывание света больше, чем 1 сек на диаметр Земли. В этом рассуждении Рёмер применяет заниженную в 1,5 раза скорость движения Земли  $210 d / \Delta t$ . На самом деле она составляет  $350 d / \Delta t$ .

Вполне логично предположить следующее: во-первых, Рёмер в основном использовал систему единиц (мин,  $d$ ), где  $d$  — диаметр Земли, во-вторых, Рёмер при получении результата воспользовался *той же пропорцией*, которую использовал и для оценки верхней границы запаздывания света. В этом случае он должен был получить примерно следующее:

$$\frac{1 d}{210 d} \cdot \frac{1}{N} = \frac{\Delta t}{10 \text{ мин}},$$

где  $N$  — число оборотов спутника. Откуда для  $N = 44$  получаем  $\Delta t = 1/924 \text{ мин} = 1/15,4 \text{ сек}$  на диаметре Земли.

Наконец, в-третьих, упростить восприятие этого результата Рёмер мог двумя способами — или перейти от понятия запаздывания к понятию скорости света или увеличить единицу расстояния. В первом случае Рёмеру пришлось бы переходить к новому понятию — “скорость света”, т. е. подходить к свету уже просто как к обычному явлению; в этом случае скорость света оказывалась бы равной по Рёмеру примерно  $15 d/\text{сек}$ , т. е. 15 диаметров Земли в секунду. Во втором случае, который очевидно и реализовался, он должен был воспользоваться значением диаметра земной орбиты, выраженного в единицах диаметра Земли, или синусом параллакса. Солнечный параллакс в 1672 г. был определен Ж. Рише, Ж. Пикаром и Дж.Д. Кассини как

$9,5 \div 10''$  (современное значение —  $8,790''$ ), что приводит к результату  $22,323 \div 22,498 \approx 22$  мин/ $D$ . Рёмер также принимал участие в этих измерениях. Однако результат был опубликован Кассини позже выступления Рёмера. Тем не менее, уже был известен результат Флемстида —  $10''$ . С учетом значения Флемстида  $10''$  Рёмер мог бы получить:

$$\Delta t = \frac{1}{924} \cdot \frac{1}{\sin 10''} \text{ мин}/D = 22,3 \text{ мин}/D \approx 22 \text{ мин}/D,$$

т. е. именно то значение, которое он и привел. Кроме того, Рёмер мог вполне заменить синус угла на сам угол — для таких малых углов это эквивалентно с точностью до 10-го знака:

$$\Delta t = 360^2/924/2\pi \text{ мин}/D = 22,3 \text{ мин}/D \approx 22 \text{ мин}/D.$$

Окончательно, формула, по которой, возможно, вычислял Рёмер имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta t &= 10/(210 \times 44 \times \sin 10'') \text{ мин}/D = 10 \times 360^2/(210 \times 44 \times 2\pi) = \\ &= 22,3 \text{ мин}/D \approx 22 \text{ мин}/D. \end{aligned}$$

Достоинство предлагаемой версии заключается в том, что она основывается на *методе и данных*, приведенных самим Рёмером в его публикации, за исключением значения параллакса, которое в публикации он не приводит, но которое он должен был, несомненно, знать. Однако такая версия фактически предполагает, что Рёмер использовал для расчетов несогласованные данные: скорость  $210 d/\Delta t$  соответствует параллаксу  $15''$ , который применялся до середины 1670-х годов вплоть до публикаций Флемстида в Англии и Дж.Д. Кассини во Франции (это отмечал, например, А. Ван Хелден). Поэтому такой вариант мог реализоваться только в том случае, если Рёмер в своем расчете опирался на данные о скорости Земли, которые были приняты до середины 1670-х гг., использовал ту же пропорцию, которую он применил при оценке верхней границы запаздывания света, а затем при пересчете запаздывания к диаметру земной орбиты воспользовался новыми данными параллакса, опубликованными Флемстидом в 1675 г., не заметив, что следует пересчитать и значение скорости движения Земли по орбите. Отметим, что если бы Рёмер воспользовался *соответствующими* друг другу значениями скорости движения Земли и параллакса (как старыми, так и новыми), то в единицах мин/(диаметр земной орбиты) величина параллакса (диаметра земной орбиты) компенсируется и Рёмер в этом случае должен был получить результат, близкий к современному. Пересчет значения запаздывания в 10 мин за период с 23 августа по 9 ноября к диаметру земной орбиты приводит к правильному значению 16,1 мин/ $D$ , так как диаметр земной орбиты больше хорды между положениями Земли 23 августа и 9 ноября в 1,61 раз.

Делая оценку верхней границы запаздывания в начале своего доклада, Рёмер по сути сам указывает путь, по которому получил

и окончательный результат — с использованием именно этой же самой пропорции. Косвенно на применение пропорции указывает и ремеровская терминология. Во французском оригинале изложения доклада в “*Journal des sçavans*” перед приведением результата 22 мин за удвоенное расстояние от Земли до Солнца используется слово “*raison*”, одним из значений которого является “пропорция”: “*ce à raison de 22 pour tout l’intervalle HE*”. В русском переводе “*raison*” была переведена как “причина” в соответствии с наиболее распространенным значением: “По этой причине необходимо 22 (минуты) для (прохождения) интервала *HE*”. Однако в английском переводе, опубликованном в 1677 г. в “*Philosophical Transactions*”, слово “*raison*” было переведено именно как “*proportion*”, т. е. пропорция: “*and that in proportion of twenty two for the whole interval of HE, which is the double of the interval that is from hence to the Sun*”. Учитывая это, в русском переводе также следовало опираться на термин “пропорция”: “что пропорционально 22 (минутам) для интервала *HE*, который равен удвоенному расстоянию от нас до Солнца”.

Работа Рёмера еще при жизни получила полное признание со стороны двух крупнейших ученых XVII в. Х. Гюйгенса и И. Ньютона. Ей дается позитивная оценка Х. Гюйгенсом в “Трактате о свете”. И. Ньютон, хотя не упоминает имя Рёмера, считает сам метод Рёмера правильным и подтверждающим постепенность распространения света, об этом он прямо пишет и в “Математических началах натуральной философии” и в “Оптике”. Также важной является переписка Рёмера с Гюйгенсом в 1677–78 гг. (Гюйгенс, возвратившийся на родину в Голландию, стремился узнать подробности исследования Рёмера, а Рёмер хотел выяснить оценку Гюйгенсом нижней границы скорости света). В “Трактате о свете” Гюйгенс на основе волновой модели света объяснил отражение, преломление, полное отражение и двойное лучепреломление в исландском шпате; краеугольным камнем волновой модели света Гюйгенса являлась конечность скорости света. Двойное лучепреломление Гюйгенс объясняет на основе идеи о существовании двух сферических волновых процессов, распространяющихся с разными скоростями.

Таковы основные обстоятельства появления в XVII в. скорости света как элемента физической картины мира. Однако длительное время многие ученые еще не признавали конечность скорости света и окончательно это представление победило, как считается, лишь полвека спустя — после открытия абберации английским астрономом Дж. Брадлеем и ее объяснения с помощью предположения о конечности скорости света (см. статью Дж. Сартона: *Sarton*, 1931, в приложении к которой факсимильно переиздана статья Дж. Брадлея: *Bradley*, 1729). На основе измерения абберации света от  $\gamma$  Дракона Баддлей определил, что скорость света превышает скорость движения Земли по орбите в 10210 раз и свет тратит 8 мин 12 с, чтобы пройти расстояние



от Солнца до Земли (*Bradley*, p. 653) (окончательный результат, учитывая aberrацию от разных звезд 8 мин 13 с). Существующие к этому времени оценки времени распространения света на этом расстоянии: 11 мин (Рёмер), 7 мин (Флемстид). Таким образом, Брэдлею удалось существенно улучшить значение “запаздывания света”: его значение отличалось от реального  $c^{-1} = 8'20,8''R^{-1} = 500,8c/R$  на 1,5%. Исследуя aberrацию от разных звезд, Брэдлей пришел к выводу, что “скорость света от всех звезд равна и что свет движется или распространяется на равные расстояния в равное время на любой дальности от них” (там же, p. 653), что было важным шагом в утверждении постоянства скорости света. Сам термин “aberrация” отсутствовал в публикации Брэдлея, и появился в 1730-е годы (первым его ввел Манфреди, затем его использовал Клеро (1737) и Мопертюи в письме Брэдлею, см.: *Sarton*, 1931, p. 236). К. Фрум и Л. Эссен приводят значение 301 тыс. км/с, но это значение рассчитано по данным Брэдлея. Если соотносить определенное Брэдлеем запаздывание света и реальное, то его результат соответствует 304,5 тыс. км/с.

Открытие и объяснение aberrации являлось независимым подтверждением конечности скорости света, так как в рамках классической физики эффект Доплера и aberrации являются независимыми явлениями. Лишь с созданием специальной теории относительности оказалось, что и эффект Доплера (который наблюдал Рёмером) и aberrации являются на самом деле следствием сохранения 4-х волнового вектора при переходе в движущуюся систему отсчета (см. схему).

Правильные формулы для эффекта Доплера и aberrации были выведены Эйнштейном в статье 1905 г. (отличие от приведенных на схеме формул заключается лишь в том, что Эйнштейн рассматривал эффект Доплера в результате движения наблюдателя от бесконечно удаленного источника, сейчас обычно рассматривается эффект Доплера от движущегося источника, т.е. формула для эффекта Доплера у Эйнштейна была обратной по отношению к  $\omega$  и  $\omega_0$ ). В статье 1907 г., являвшейся откликом на эксперименты И. Штарка по измерению доплеровского смещения второго порядка ( $\sim v^2/c^2$ ), Эйнштейн вывел формулу поперечного эффекта Доплера и предложил экспериментаторам ее проверить (*Эйнштейн*, 1907а). Однако этот чисто релятивистский эффект был подтвержден только в 1938 г. Г. Айвсом и Д. Стилуэллом (*Ives*, *Stilwell*, 1938, 1941), и в 1939 г. Г. Оттингом (*Otting*, 1939).

То, что явление периодического колебания периодов спутников Юпитера является эффектом Доплера, отметил первым, по-видимому, Э. Мах. Эффект Доплера — зависимости частоты сигнала от движения наблюдателя и источника — был теоретически обоснован Доплером в 1842 г. применительно к наблюдению двойных звезд, а затем подтвержден и для звуковых волн и для света. В 1842 г. этот же эффект был переоткрыт И. Физо. В лекции “О скорости света” в Граце в 1866 г. Э. Мах, рассказывая об открытии Рёмера и приводя поясняющие примеры, по сути показал, что это есть эффект Доплера, хотя формально

Обоснование эффектов Доплера и аберрации в СТО

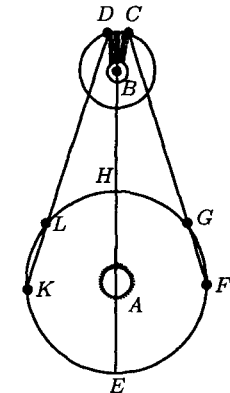
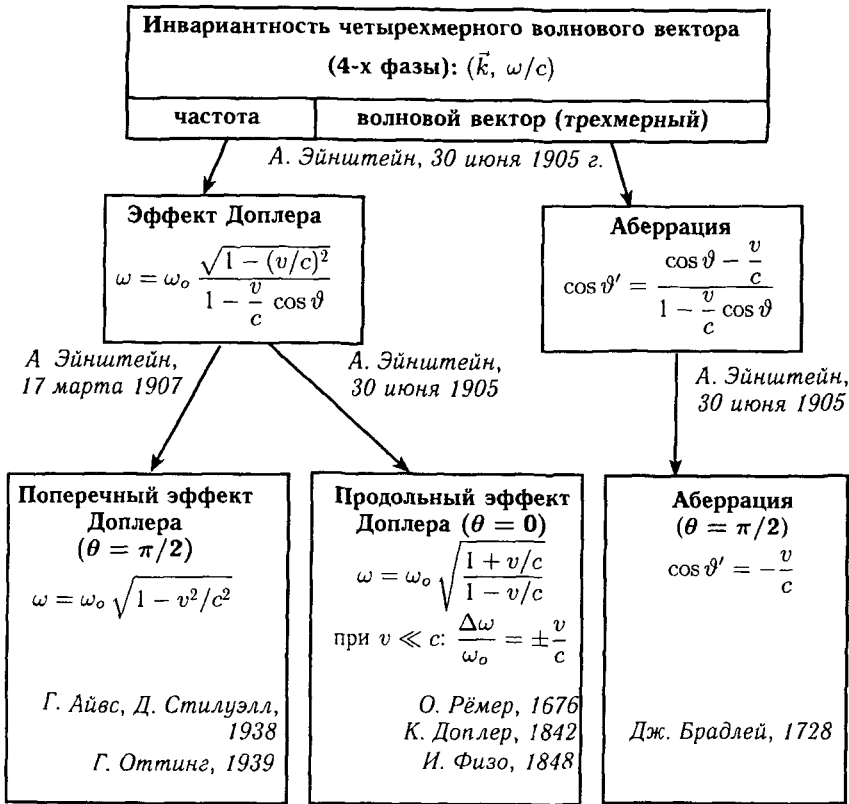


Схема измерений частоты затмений (рисунок из публикации О Ремера)

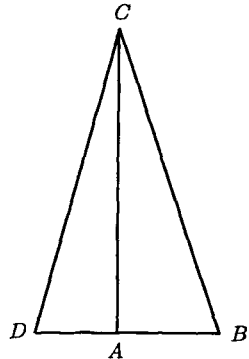


Схема измерений смещения звезды (рисунок из публикации Дж. Брадлея)

имя Доплера в лекции он и не назвал (*Мах*, 1866, с. 46). Э. Мах видит также нечто аналогичное в методе Рёмера и методе Галилея определения скорости света: “Этот метод сходен с методом Галилея. Здесь только лучше выбраны средства. Вместо того небольшого расстояния мы здесь пользуемся диаметром земной орбиты (41 миллионов миль); роль фонаря, который то закрывается, то открывается, играет спутник Юпитера, который то затмевается, то снова показывается. Таким образом Галилею не удалось выполнить своего измерения, но фонарь, при помощи которого оно было выполнено, открыт им” (там же, с. 47). Мах неоднократно повторяет эту метафору — сравнения затмений спутника Ио и фонаря Галилея. В “Оптике” (1913 г.) Мах, рассказывая о явлении, которое наблюдал Рёмер, уже прямо связывает его с именем Доплера (*Mach*, 1913, р. 35). Вслед за Махом также рассматривал наблюдаемые особенности движения спутников Юпитера, как эффект Доплера, А. Зоммерфельд в “Оптике” (*Зоммерфельд*, 1950, с. 86–90).

**1.1.3. Скорость света в волновой и корпускулярной теориях света.** Начиная с XVII в. в физике конкурировали две различные модели света — корпускулярная и волновая. Скорость световых корпускул могла быть произвольной, кроме этого корпускулярная модель предсказывала *увеличение* скорости в более плотной среде. Волновая модель, напротив, предсказывала постоянную скорость распространения света в эфире — среде, обладающей специфическими свойствами, а также *уменьшение* скорости света в более плотной среде пропорционально коэффициенту преломления. Обычно корпускулярные воззрения связываются с именем И.Ньютона, а волновые — Х.Гюйгенса. На самом деле, концепция Ньютона совмещала корпускулярные и волновые представления. Ньютон даже оценил механические параметры светоносного эфира — его плотность и упругость: основываясь на оценке, что скорость света превышает скорость звука в 700 000 раз, Ньютон предположил, что эфир является в 700 000 раз более упругим, чем воздух и в 700 000 раз более разреженным <sup>1)</sup>. Однако в XVIII в. властвовали корпускулярные воззрения на природу света, ньютонианцы предпочитали не замечать волновых гипотез Ньютона, а среди сторонников волновой модели были лишь Л. Эйлер и М.В. Ломоносов. Ньютоновские волновые гипотезы стали важными направляющими идеями для формирования волновых принципов оптики Т. Юнга; известно, что Юнг был также знаком и с работами Ломоносова.

На рубеже XVIII–XIX вв. появились новые аргументы в пользу волновой теории света. Целый ряд программных идей и принципов был предложен английским естествоиспытателем Т. Юнгом, а доведен до конкретных физических формул французским оптиком О. Френелем. В научном труде, опубликованном в 1800 г., Т. Юнг отметил, что

<sup>1)</sup> *Ньютон*, 1704/30, с. 274; об оптике И. Ньютона см. *Погребысская*, 1981.

корпускулярная теория света сталкивается с проблемой объяснения одинаковой скорости света от источников разной мощности — от искр до Солнца. Волновая же теория автоматически объясняет это, так как скорость распространения возмущений в упругой жидкости одинакова. Далее Юнг предположил эквивалентность электрического и светового эфира: “Быстрая передача электрического удара показывает, что электрическая среда обладает упругостью настолько большой, что можно предположить, что она распространяет свет. Следует ли считать, что электрический эфир — это то же самое, что и световой эфир, если такая жидкость существует, возможно, когда-нибудь откроют экспериментально <...>” (цит. по: *Уиттекер*, 1910/53, с. 128). Фактически эта идея Юнга стала одной из руководящих идей для развития теории электромагнетизма. В 1804 г. Юнгу удалось объяснить аберрацию на основе волновой модели. Дальнейшее развитие волновой теории связано с именем О. Френеля. В 1810 г. Ф. Араго поставил опыт на основе интерференционной методики по обнаружению влияния движения Земли на показатель преломления призмы и получил отрицательный результат. В письме Ф. Араго в 1818 г. Френель высказал свои представления об эфире (опубликовано в сентябре 1818 г.). Из анализа объяснения аберрации в рамках волновой модели Френель оценил верхнюю границу для увлечения эфира: меньше 1/100 от скорости Земли (эта же оценка фигурирует и в письме Френеля своему брату). Затем, используя идею Юнга об увеличении плотности эфира пропорционально плотностям тел без влияния на упругие свойства эфира, Френель вывел свою известную формулу частичного увлечения эфира:  $v' = \frac{c}{n} \pm V \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$ , где  $V$  — скорость тела.

В 1846 г. Г. Стоксом была высказана идея полного увлечения эфира движущимися телами. Модель Стокса была внутренне противоречивой, за что ее подвергал критике Г. Лоренц, предложивший собственную модель эфира.

Формула Френеля была успешно подтверждена в 1851 г. в экспериментах И. Физо по изучению распространения световых лучей в движущейся воде. Измерение смещения интерференционных полос подтвердило формулу Френеля с точностью до 14 %, причем отклонение было связано, как показал Физо, с различием средней скорости воды и скорости воды в центре трубок, вдоль которых как раз и распространялись световые лучи (Творцы физической оптики, 1973, с. 218). Физо также поставил свой опыт для движущегося воздуха и “нашел, что движение воздуха не вызывает никакого заметного смещения полос”, что отвергает гипотезу увлекаемого эфира и свидетельствует в пользу его неподвижности, но также и не противоречит гипотезе Френеля (из-за показателя преломления воздуха близкого 1) (там же). “Мне кажется, — сделал вывод Физо, — что успех этого опыта должен привести к принятию гипотезы Френеля или по крайней мере закона, который был им найден для выражения изменения скорости

света вследствие движения тел” (там же, с. 219). Формула Френеля получила правильное обоснование только в 1907 г. в работе М. Лауэ в рамках специальной теории относительности как приближительная формула для первого порядка по  $V/c$ , следующая из релятивистской формулы сложения скоростей (Laue, 1907).

Таким образом, переход от корпускулярной модели света, которой в принципе не требовалась среда распространения, к волновой модели привел к формированию представлений об эфире как специфической среде распространения электрических, магнитных и световых колебаний.

Дальнейшее развитие “физики эфира” привело к постановкам наземных интерференционных опытов Майкельсона (1881 г.) и Майкельсона–Морли (1887 г.) по обнаружению абсолютного движения Земли относительно эфира. Ожидалось подтверждение теории Френеля. Отрицательный результат заставил Майкельсона высказаться против теории частичного увлечения эфира Френеля в пользу теории полного увлечения Стокса. Таким образом, в физике наступил кризис, связанный с противоречием в объяснении явлений аберрации (на основе *не увлечения* Землей эфира), опыта Физо (на основе гипотезы *частичного увлечения* эфира) и опыта Майкельсона (на основе *полного увлечения* Землей эфира), выход из которого был найден не в некоторой специфической модели эфира, а в пересмотре пространственно-временных представлений.

В 1850 г. Л. Фуко показал на опыте, что скорость света в воде уменьшается пропорционально показателю преломления:  $u = c/n$  в соответствии с предсказанием волновой теории. Этот опыт стал рассматриваться как “решающий опыт” в пользу волновой теории света. На самом деле, как впоследствии оказалось, понятия скорости в волновой и корпускулярной теориях света различны. Соответствие между ними устанавливается следующим образом:  $u = c^2/v$ . Таким образом, опыт Фуко вовсе не свидетельствовал против корпускулярной теории, как тогда считалось. Тем не менее “победа” волновых представлений дала импульс для создания Максвеллом волновой электромагнитной теории света.

**1.1.4. Эвристическое значение совпадения констант.** В середине XIX в. французским ученым И. Физо и Л. Фуко впервые удалось поставить опыты по определению скорости света в земных условиях с помощью методов зубчатого колеса и вращающегося зеркала, осуществлявших периодическое прерывание светового сигнала. Обычно как результат опыта Физо (1849) приводится значение 313–315 тыс. км/с. Например, Б. П. Вейнберг считает, что результат Физо соответствует 315324 тыс. км/с или с учетом различных поправок 315282 км/с, С. Филонович — 314858 тыс. км/с, а М. Льюис приводит другое значение скорости света с необоснованно большой точностью: 313274304 м/с. На самом деле, Физо не привел значения

скорости света и все эти значения являются расчетными. Значение 313274 км/с получается (это отмечал, например, Б.П. Вейнберг), если воспользоваться данными самого Физо: расстояние  $l = 8633$  м, число зубцов  $n = 720$  и наблюдение первого максимума примерно при  $\nu = 12,6$  оборотов в секунду ( $c = 4nl\nu = 313274304$  м/с  $\approx 313$  тыс. км/с).

В дальнейшем метод Физо был усовершенствован Корню, который в 1873 г. получил на основе 675 наблюдений значение скорости света 298,4–298,5 тыс. км/с. Вейнберг, анализируя данные Корню, получает 298453 км/с и, вводя поправки, — 298581 км/с, а по данным опытов Корню 1874 г. — 300010 км/с. В 1900 г. Перротен также в опытах с вращающимся зубчатым колесом получил 299900 км/с, а по данным опытов 1902 г. — 299860 км/с.

В 1862 г. Л. Фуко удалось более точно определить скорость света с помощью метода вращающихся зеркал (идея опыта принадлежала Ф. Араго (1838)): 298 тыс. км/с (298374 км/с с поправкой Вейнберга). В 1878 г. и в 1879 г. А. Майкельсон на основе усовершенствованного метода Фуко получил соответственно 300140 км/с и 299910 км/с (299836 км/с по Вейнбергу). Этот же метод использовал в 1880–81 гг. С. Ньюкомб (опубл. в 1891 г.) и получил значение 299860 км/с (299753 км/с по Вейнбергу), а в 1891 г. А. Майкельсон — 299853 км/с.

Совпадение физических констант, характерных для различных физических явлений, показывает связь этих явлений, и, следовательно, направление пути, ведущего к созданию теории, описывающей эти явления на единой основе. В середине XIX века такого рода совпадение физических констант, имеющих размерность скорости, стало важным элементом в конструировании единой теории электричества, магнетизма и оптики.

В середине XIX в. появилось несколько теорий, построенных на основе дальнего действия (мгновенной передачи воздействия), в которых обычная сила Кулона модернизировалась путем введения добавочных слагаемых, пропорциональных квадрату скорости и ускорению — теории В. Вебера, Р. Клаузиуса, К. Неймана и др. <sup>1)</sup> В качестве коэффициентов при вторых слагаемых в этих теориях фигурировали константы, имеющие размерность квадрата скорости.

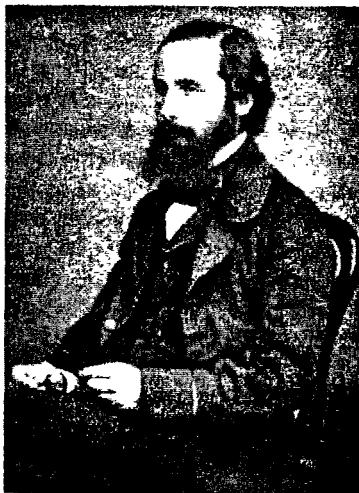
В 1856 г. В. Вебер и Р. Кольрауш поставили опыт с целью сопоставления электромагнитных и механических единиц путем измерения механического действия электричества. Им удалось определить соотношения между этими единицами. “Наиболее важным из применений, которые может найти себе приведение обычных мер силы тока к механической мере, является определение константы, входящей в основной закон электричества, которым охватываются одновременно электростатика, электродинамика и индукция.” — отметили авторы (Вебер, Кольрауш, 1856, с. 215). Таким образом, в качестве побочного результата они смогли определить коэффициент размерности скорости

<sup>1)</sup> см.: Уиттекер, 1910/53; Булюбаш, 1987, 1995 и др

в законе Вебера:  $c = 439450 \cdot 10^6$  мм/с = 593320 миль/с. Константа Вебера была больше скорости света в  $\sqrt{2}$  раз. Поэтому из опыта Вебера-Кольрауша следовало значение скорости света 310740 км/с.

В 1858 г. Б. Риман представил Геттингенскому научному обществу мемуар “Тяжесть, электричество и магнетизм”, в котором вывел обобщенное волновое уравнение для света, теплового излучения, электричества и магнетизма. В этом уравнении фигурировала константа  $\alpha$ , имеющая физический смысл скорости распространения потенциала. Сам Риман связал ее с константой Вебера через соотношение:  $\alpha^2 = \frac{c_w^2}{2}$ . Учитывая, что веберовская константа была  $c_w = c\sqrt{2}$ , постоянная Римана должна была прямо равняться скорости света. Действительно, соответствие оказалось хорошим: из данных опыта Вебера и Кольрауша Риман получил значение своей постоянной: 41949 *геогр. миль/сек* и сопоставил его со значением скорости света, полученным из наблюдений аберрации Брадлеем и Бушем (41994 *геогр. миль/сек*) и прямых наблюдений Физо (41882 *геогр. миль/сек*) (см.: Риман, 1948). Однако эта работа Римана была опубликована уже после его смерти и была неизвестна Максвеллу, по крайней мере на момент создания им электромагнитной теории.

В 1857 г. Г. Кирхгоф первым заметил совпадение констант, характерных для электричества и оптики (*Уиттекер*, т. 1, с. 378). Для Максвелла это стало важнейшим аргументом электромагнитной природы света. Так, в письме Фарадею 19 октября 1861 г. Максвелл писал:



Дж.К. Максвелл

“Из определенного Кольраушем и Вебером численного отношения между статическим и магнитным действием электричества я определил упругость среды в воздухе и, считая, что она тождественна с упругостью светового эфира, определил скорость распространения поперечных колебаний. Результат — 193088 миль в секунду. Физо определил скорость света в 193118 миль в секунду прямым опытом”<sup>1)</sup>. Это сопоставление Максвелл опубликовал в работе “О физических силовых линиях” (1861–1862 гг.) (Часть 3, предл. 16). Максвелл определяет скорость распространения поперечных колебаний через упругую среду и, используя результат Вебера и Кольрауша, получает

<sup>1)</sup> Цит. по прим. П.С. Кудрявцева к кн.: Максвелл, 1952, с. 657.

$V = 310740000000$  мм/сек = 193088 англ. миль в сек. Скорость света в воздухе по определению Физо равна 70843 лигам в сек =  $= 314858000000$  мм/сек = 195647 англ. миль/сек. По другому источнику, на который ссылается Максвелл (руководство по астрономии Гэлбрейта и Хоутона), значение Физо соответствует 169944 геогр. милям/сек = 193118 англ. миль/сек, что оказывается еще ближе к значению Вебера и Кольрауша (Максвелл, 1952, с. 174). “Скорость поперечных колебаний в нашей гипотетической среде, вычисленная из электромагнитных опытов Кольрауша и Вебера, столь точно совпадает со скоростью света, вычисленной из оптических опытов Физо, что мы едва ли можем отказаться от вывода, что *свет состоит из поперечных колебаний той же самой среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений*”, — сделал вывод Максвелл (там же, с. 175).

Вторым важным аргументом в пользу электромагнитной природы света стало выведенное Максвеллом соотношение между оптическими и электромагнитными константами. В той же работе “О физических силовых линиях” вслед за сопоставлением скоростей, Максвелл выводит соотношение между диэлектрической постоянной, магнитной проницаемостью и показателем преломления среды:  $D = \frac{i^2}{\mu}$  (в современных обозначениях:  $\epsilon = \frac{n^2}{\mu}$ ) (там же, с. 176).

Эти два соотношения между константами разных явлений стали для Максвелла двумя опорными точками в построении им теории электромагнетизма, а для физиков-экспериментаторов — целью опытов по проверке максвелловской теории.

В работе “Динамическая теория поля” (1864), в которой Максвелл впервые сформулировал полную систему 20 уравнений для электромагнитного поля (он записывал отдельное уравнение для каждой компоненты векторов), в качестве следствия он вывел формулу, связывающую скорость света и коэффициент в законе Кулона  $k$ :  $V =$

$$= \pm \sqrt{\frac{k}{4\pi\mu}}. \text{ В принятой Максвеллом системе единиц } k = 4\pi v, \text{ где } v -$$

переводной коэффициент между электромагнитными и электростатическими единицами, следовательно, по максвелловской теории  $V = v$ . Согласно измерениям Вебера и Кольрауша, постоянная  $v$  была равна:  $v = 310740000$  м/с, а значение скорости света —  $V = 314858000$  (из опыта Физо),  $V = 298000000$  (из опыта Фуко),  $V = 308000000$  (из коэффициента аберрации и радиуса земной орбиты). Приведя эти данные (см. п. 96), Максвелл делает следующий вывод: “Следовательно, скорость света, определенная экспериментально, достаточно хорошо совпадает с величиной  $v$ , выведенной из единственного ряда экспериментов, которыми мы до сих пор располагаем. Значение  $\bar{v}$  было определено путем измерения электродвижущей силы, при помощи которой заряжается конденсатор известной емкости, разряжая конденсатор через гальванометр, чтобы измерить количество электричества



в нем в электромагнитных единицах. Единственным применением света в этих опытах было использование его для того, чтобы видеть инструменты. Значение  $V$ , найденное Фуко, было получено путем определения угла, на который поворачивается вращающееся зеркало, пока отраженный им свет прошел туда и обратно вдоль измеренного пути. При этом не пользовались каким-либо образом электричеством и магнетизмом. Совпадение результатов, по-видимому, показывает, что свет и магнетизм являются проявлениями свойств одной и той же субстанции и что свет является электромагнитным возмущением, распространяющимся через поле в соответствии с законами электромагнетизма” (там же, с. 321).

Далее в п. 101 “Отношение между показателем преломления и электромагнитной природой материи” Максвелл выводит соотношение  $D = \frac{i^2}{\mu}$  (“удельная индуктивная емкость среды равна квадрату ее показателя преломления, деленному на коэффициент магнитной индукции”) (там же, с. 324).

В последующие несколько лет ряд ученых, в том числе сам Максвелл, В. Томсон и др., разрабатывают способы определения соотношения между электромагнитными и электростатическими единицами. Также в этот период ставятся разные опыты, из которых также можно извлечь это соотношение. Сводку шести различных способов определения этой постоянной Максвелл привел во втором томе “Трактата по электричеству и магнетизму”, опубликованном им в 1873 г. (п. 771–780). Полученное самим Максвеллом в 1868 г. значение — 288 000 000 м/с. Год спустя В. Томсон получил значение 282 000 000 м/с. В п. 787 Максвелл привел таблицу, в которой сопоставил значения скорости света и отношений электрических величин:

Скорость света (в метрах в секунду)	Отношение электрических единиц (в метрах в секунду)
Физо 314 000 000	Вебер 310 740 000
Аберрация и т. п., параллакс Солнца 308 000 000	Максвелл 288 000 000
Фуко 298 360 000	Томсон 282 000 000

Максвелл сделал осторожный вывод: “Очевидно, что скорость и отношение единиц являются величинами одного и того же порядка. Ни об одной из них нельзя сказать, что она до сих пор определена с такой степенью точности, которая позволила бы нам утверждать, что одна величина больше или меньше другой. Следует надеяться, что в результате дальнейших опытов отношение между размерами этих двух величин будет установлено точно. Наша теория, утверждающая, что эти две величины равны, и выдвигающая физические основания этого равенства, безусловно не опровергается сравнением имеющихся результатов” (Максвелл, 1873/91, т. 2, с. 338).

В результате работ, с одной стороны, А.Г. Столетова, Химстедта, В. Томсона, Э.Б. Роза, Дж.Дж. Томсона и Дж. Сирла и др. по определению электрических единиц, и, с другой стороны, работ М.А. Корню, А. Майкельсона, С. Ньюкомба различие между этими постоянными перешло к концу 1880-х гг. лишь в четвертый знак, что свидетельствовало в пользу максвелловской теории и укрепляло позиции универсальности скорости света.

В следующих параграфах (788 и 789) Максвелл обсуждает соотношение между электромагнитными и оптическими константами. Он отмечает, что для прозрачных тел магнитная проницаемость близка к единице, поэтому соотношение между показателем преломления и диэлектрической и магнитной проницаемостью  $D = \frac{i^2}{\mu}$  сводится к соотношению  $D = i^2$ , т.е. диэлектрическая постоянная среды равна квадрату ее показателя преломления. К моменту написания “Трактата” было лишь одно вещество, для которого были известны и показатель преломления и диэлектрическая постоянная — парафин. Максвелл ссылается на эксперименты Гибсона и Баркляя, согласно измерениям которых диэлектрическая постоянная парафина была равна  $K = 1,975$ . Квадратный корень из нее равен 1,405, а показатель преломления для волн бесконечной длины Максвелл выводит из данных Глэдстоуна: 1,422. “Разница между этими числами больше, чем ее можно было бы отнести за счет ошибок наблюдения; — делает вывод Максвелл, — она показывает, что наши теории структуры тел должны быть значительно улучшены, прежде чем мы сможем выводить оптические свойства тел из их электрических свойств. В то же самое время я думаю, что совпадение чисел таково, что если не будет найдено больших расхождений между числами, выведенными из оптических и электрических свойств значительного количества веществ, мы могли бы обоснованно заключить, что квадратный корень из  $K$ , хотя он, может быть, и не является полным выражением показателя преломления, по меньшей мере является наиболее важным членом в нем” (там же, с. 339).

Среди отечественных ученых оба соотношения экспериментально исследовал А.Г. Столетов: в 1880 г. для отношения электрических величин он получил значение 299 000 м/с. Соотношение между показателем преломления и электромагнитными константами веществ проверялось Л. Больцманом (1872), А.Г. Столетовым, Н.И. Шиллером (1874), П.А. Зиловым (1875) и др.

Таким образом, совпадение констант, полученных в результате экспериментального изучения явлений различной (как первоначально считалось) природы, имело эвристическое значение для создания электромагнитной теории света. Совпадение констант имеет общее значение: в этом проявляется единство физики. В дальнейшем эвристическое значение имело открытие одной и той же постоянной  $h$  в теории теплового излучения, в законе фотоэффекта, в теории атома Бора и др.

**1.1.5. Релятивистские преобразования.** В основе релятивистской революции, происшедшей в начале XX в., лежит открытие и переход к релятивистским преобразованиям (преобразованиям Лоренца) в механике и во всей физике.

Сейчас уже ясно, что релятивистские преобразования могли быть получены чисто математически без влияния каких-либо экспериментов даже еще в начале XIX в. при исследовании на инвариантность волнового уравнения типа  $\Delta U = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$ . По сути дела, еще в самом начале XIX в. при переходе от корпускулярной к волновой модели света произошел скрытый переход от галилеевской инвариантности, присущей классической корпускулярной модели, к релятивистской инвариантности, имманентно присущей волновой модели света. В 1860-е годы Дж.К. Максвеллу удалось создать классическую электродинамику, объединив электричество, магнетизм и оптику; при этом свет стал рассматриваться как электромагнитные колебания. Тем самым волновая модель охватила еще более широкий круг явлений. Однако при этом движение массивных тел продолжало описываться на основе классической механики. Это расхождение во внутренних принципах организации двух теорий — механики и электродинамики, приводило к многочисленным попыткам обнаружения абсолютного движения относительно “светоносного эфира”, которые неизменно давали отрицательный результат. Таким образом, противоречия между двумя теориями привели к концептуальному кризису, который стал очевиден к концу XIX в. и который был преодолен в 1905 г. путем перехода к новым представлениям о пространстве и времени. В центре этого процесса лежало открытие релятивистских преобразований, оставляющих инвариантными максвелловские уравнения, и которые ныне называются “преобразованиями Лоренца”.

Истории специальной теории относительности посвящено довольно большое количество литературы и основные моменты в принципе ясны. Широкое распространение получила формально-историческая реконструкция создания специальной теории относительности как ответ теоретиков на вызов отрицательного результата опыта Майкельсона–Морли. Однако сейчас уже ясно, что релятивистское обобщение механики (и физики в целом) было абсолютно неизбежным этапом ее развития и произошло бы вне зависимости от каких-либо опытов, а сами опыты могли играть лишь *проверочную роль теории*. Точно такое же обобщение испытала в 1820–30-е годы классическая евклидова геометрия, а в ее обобщении — геометрии Лобачевского — появился выделенный масштаб размерности кривизны. При этом евклидова геометрия сохранила свое значение как предельный случай геометрии Лобачевского при стремлении радиуса кривизны к бесконечности.

Данный параграф направлен на рассмотрение истории открытия релятивистских преобразований. Поскольку сам Лоренц использовал

самые разные преобразования и перешел к современным “преобразованиям Лоренца” лишь после того, как они появились в работах Пуанкаре и Эйнштейна, то, чтобы не запутать читателя, мы будем использовать здесь вместо общепринятого термина “преобразования Лоренца” термин “релятивистские преобразования”. Отметим, что этим же термином пользовался и сам Лоренц.

Впервые преобразования движения, оставляющие инвариантными волновое уравнение, были предложены В. Фогтом в 1887 г. в статье, посвященной выводу формулы эффекта Доплера (Voigt, 1887/1915). Фогт рассматривал свет как волновой процесс, распространяющийся в упругой несжимаемой среде (эфире). В статье В. Фогт, в частности, показал, что волновое уравнение типа  $\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \omega^2 \Delta U$  сохраняет форму при переходе к новым пространственно-временным переменным ( $\xi = x - kt$ ,  $\eta = yq$ ,  $\zeta = zq$ ,  $\tau = t - \frac{\kappa x}{\omega^2}$ )<sup>1)</sup>. Эти преобразования с точ-

ностью до масштабного множителя  $q = \sqrt{1 - \frac{\kappa^2}{\omega^2}}$  (при современной записи —  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ ) соответствуют современным релятивистским преобразованиям (этот множитель  $q$  у Фогта был перенесен в преобразования поперечных координат). Фогту удалось вывести как следствие классический эффект Доплера. Преобразования Фогта с современной точки зрения имели только один недостаток: хотя они и приводили к инвариантности волнового уравнения, они не образовывали группу. На самом деле, к инвариантности данного волнового уравнения приводит и любое другое преобразование, которое отличается от преобразования Фогта на произвольный множитель, зависящий от  $v/c$ . Но требование, чтобы данное преобразование еще и образовывало группу (что, в частности, приводит к тому, что при переходе от неподвижной системы отсчета к движущейся и обратно, картина не меняется) однозначно фиксирует этот множитель и приводит к правильным релятивистским преобразованиям.

Статья Фогта, к сожалению, не получила должного внимания. Интересно, что около 1887 г. между Фогтом и Лоренцем была переписка в связи с опытом Майкельсона–Морли, однако, по-видимому, они не затрагивали вопрос преобразований движения (Пайс, 1982, с. 118). Сам Фогт, вероятно, недооценил универсальное значение своего преобразования. Значение этой статьи Фогта было оценено, к сожалению, лишь после создания специальной теории относительности. Так, в 1908 г. Г. Минковский на заседании, на котором присутствовал сам Фогт, отметил значение его результата. На что Фогт ответил, что “еще тогда был получен ряд результатов, к которым позднее удалось прийти на основе теории электромагнетизма” (цит. по: Пайс, 1982, с. 119).

<sup>1)</sup> Voigt, 1887/1915, S. 383; указание страниц дается на репринтное переиздание этой статьи в 1915 г. к юбилею СТО.

В книге “Теория электронов” (1909), написанной на основе лекций, прочитанных в Колумбийском университете в 1906 г., Г.А. Лоренц также признал важность результата В. Фогта, и выразил сожаление, что не знал об этой статье: “В статье <...> опубликованной в 1887 г., и, к большому сожалению, не попавшей в поле моего зрения за все эти годы, Фогт применил к (волновым — К.Т.) уравнениям <...> преобразования, эквивалентные ... (релятивистским преобразованиям — К.Т.). Идея преобразований <...> может, таким образом, быть заимствована из работы Фогта, равно как и доказательство того, что они не изменяют вида уравнений при наличии *свободного эфира*” (Лоренц, 1906/09, с. 287–288). Позже в статье 1914 г., посвященной работам А. Пуанкаре, Лоренц отметил: “Подобное преобразование имелось уже в одной статье Фогта, опубликованной в 1887 г., из которой я не извлек все возможное” (Лоренц, 1914, с. 191). Высказывалась и другая точка зрения. По мнению историка А. Миллера, знакомство со статьей Фогта лишь затруднило бы путь Лоренца к его гипотезе продольного сокращения движущихся тел.

Путь Г.А. Лоренца к релятивистским преобразованиям был более извилист, чем мог бы быть, если бы была сформулирована прямая задача открытия преобразований, сохраняющих инвариантным вид волновых уравнений, и пролегал через гипотезу сокращения линейных размеров тел (сокращение Лоренца–Фицджеральда), теорему соответственных состояний и идею местного времени.

В 1889 г. в американском журнале “Science” была опубликована небольшая заметка Дж. Фицджеральда “Эфир и атмосфера Земли”, в которой он выдвигал идею сокращения линейных размеров тел при движении для объяснения опытов Майкельсона. Заметка содержала только эту качественную идею без каких-либо формул. Сам Фицджеральд не знал об этой публикации, она уже в наше время была выявлена историками науки и приводится, в частности, в книге А. Пайса (Пайс, 1982, с. 119–120). Идея Фицджеральда стала известной благодаря тому, что он излагал ее в своих лекциях. Как следует со слов самого Лоренца, он узнал об идее Фицджеральда из статьи О. Лоджа 1893 г. в “Philosophical Transactions”. Однако за год до этого в 1892 г. сам Г.А. Лоренц независимо выдвинул аналогичную гипотезу (Lorentz, 1892, p. 119). Осенью 1894 г. между Лоренцем и Фицджеральдом возникла переписка по этому вопросу и в дальнейшем, начиная с книги 1895 г., Лоренц всегда упоминал в связи с этой идеей имя Фицджеральда.

Г.А. Лоренц, в отличие от Майкельсона, вовсе не собирался на основе одного опыта принять теорию Стокса полного увлечения эфира, прежде всего из-за противоречивого объяснения ею аберрации и стремился найти объяснение опыта Майкельсона в рамках теории Френеля. Это и стало причиной, почему Лоренц придумал дополнительное “ухищрение” (coup de pouce, по выражению Пуанкаре) — он показал, что “разности фаз могут быть скомпенсированы обратными

изменениями размеров" (Lorentz, 1892; Лоренц, 1895, с. 10). Изменения параллельных и перпендикулярных движению осей должны быть согласованы и их отличие должно быть равно  $v^2/c^2$  (фактически, это второй член разложения  $\sqrt{1 - v^2/c^2} \approx 1 - \frac{v^2}{2c^2}$ ). Затем Лоренц обосновывает (на основе рассмотрения равновесия сил между молекулами) сокращение линейных размеров в направлении движения  $1 : \sqrt{1 - v^2/c^2}$ , что согласуется с полученной им ранее формулой.

Параллельно Лоренцу к идее изменения линейных размеров движущихся заряженных тел пришел независимо О. Хевисайд (см.: Болотовский, 1985, с. 69). Он рассматривал движение заряженной сферы и, основываясь на уравнениях Максвелла, показал, что эта сфера при движении превращается в эллипсоид со сжатой осью в направлении движения в соотношении  $1 : \sqrt{1 - v^2/c^2}$  (опубл. в 1892 г.). В дальнейшем Г.А. Лоренц обосновывал сокращение тел при движении как динамический эффект, связанный с электромагнитной природой массы электрона на основе аналогичной модели сжатого эллипсоида. Как считается, результат Хевисайда был получен независимо от идеи Фицджеральда, хотя то, что они состояли в дружеских отношениях и переписывались, оставляет возможность для взаимного влияния. Отметим, что гипотеза Лоренца-Фицджеральда появилась в результате интерпретации эксперимента, ограниченного по точности, как и любой другой опыт, а результат Хевисайда был получен исходя из максвелловской теории, и, следовательно, имел большую основательность.

В 1895 г. Г.А. Лоренц опубликовал книгу по проблемам влияния движения тел на оптические и электрические явления (Lorentz, 1895). Эта книга стала базовой для всех последующих исследователей, в том числе для Дж. Лармора и А. Эйнштейна. Лоренц после применения галилеевских преобразований использовал следующие преобразования

координат:  $x = x' \sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}$ ,  $y = y'$ ,  $z = z'$  (Lorentz, 1895, vol. 5, p. 37)

(продольное сокращение тел) и затем преобразование времени:  $t' = t - \frac{v_x}{V^2} x - \frac{v_y}{V^2} y - \frac{v_z}{V^2} z$  (там же, p. 49). Время  $t'$  он назвал местным временем ("Ortzeit") и рассматривал как вспомогательную величину. Эти преобразования обеспечивали инвариантность максвелловских уравнений для степеней  $v^2/c^2$ . (У Лоренца  $V$  — скорость света.)

В статье 1899 г. Лоренц использовал аналогичное преобразование с некоторой модернизацией преобразования времени:  $x' = \frac{V}{\sqrt{V^2 - v_x^2}} x$ ,

$y' = y$ ,  $z' = z$ ,  $t' = t - \frac{v_x}{V^2 - v_x^2} x$  (Lorentz, 1899, p. 141).

Концептуальную критику гипотезы Лоренца-Фицджеральда дал А. Пуанкаре в курсе лекций по электродинамике, прочитанном в Сорбонне в 1899 г. (опубл. в 1901 г.), и на Международном конгрессе по физике 1900 г. Он высказался в пользу принципа относительности

для оптических явлений для любых порядков по  $v/c$  (см.: Пуанкаре, 1899/1901), а подход Лоренца назвал "нагромождением гипотез" (Пуанкаре, 1904, с. 565).

Именно в этом же 1900 г. вышла книга Дж. Лармора "Эфир и материя" (Larmor, 1900) (написанная в 1898 г.), в которой Лармор применил в рамках своей теории эфира цепочку преобразований движения, которая приводила к полной инвариантности уравнений Максвелла.

Дж. Лармор, так же, как и Лоренц, использовал галилеевские преобразования для перехода к движущейся системе координат:  $(x', y', z') = (x - vt, y, z)$ ,  $t' = t$  (Лармор, 1900, с. 53). Однако он ясно понимал необходимость выяснения таких преобразований, которые оставляют инвариантными максвелловские уравнения и двигался шаг за шагом к этой цели. Поскольку галилеевские преобразования приводили к появлению лишних членов в уравнениях Максвелла, Лармор догадался убрать их путем замены времени  $t'$  на  $t'' = t' - (v/c^2)\varepsilon x'$ , где  $\varepsilon = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ . "Благодаря этому, — отметил Лармор, — уравнения принимают вид, который они имели в покоящейся системе отсчета, если не обращать внимания на множители  $\varepsilon$  в их левых частях. Следует заметить, что множитель  $\varepsilon$  отличается от единицы только на  $v^2/c^2$ , т.е. на бесконечно малую второго порядка" (там же, с. 54). Это преобразование времени еще ранее вводили В. Фогт (1887) и Г.А. Лоренц (1895), поэтому эта идея, очевидно, прямо восходит к работам этих ученых, по крайней мере, к работе Лоренца 1895 г., которую он хорошо знал. Далее Лармор показывает, что при таком преобразовании поле, характеризуемое тремя компонентами  $(f, g, h)$ , переходит в поле  $(f', \varepsilon g', \varepsilon h')$ , т.е. идентичное с точностью до приближения второго порядка по  $v/c$ . Однако в следующей главе XI Лармор делает еще один шаг: "Но мы можем пойти дальше и с помощью полного преобразования установить соответствие, которое будет верным и во втором порядке" (там же, с. 57). Для этого Лармор вводит еще одно преобразование:  $(x_1, y_1, z_1) = (\varepsilon^{1/2}x', y', z')$ ,  $t_1 = \varepsilon^{-1/2}t'' = \varepsilon^{-1/2}(t' - (v/c^2)\varepsilon x')$ . Преобразование времени, как видим, и стало его важной новацией по сравнению с преобразованиями, которые до этого использовал Лоренц. Более того, Лармор убирает скобки и, таким образом, впервые уравнивает в правах три пространственные и временную переменные: он указывает, что компоненты полей заданы "как функции переменных  $x_1, y_1, z_1, t_1$ " и "как функции переменных  $\varepsilon^{1/2}x', y', z', \varepsilon^{-1/2}t' - (v/c^2)\varepsilon^{1/2}x'$ " (там же, с. 58). "Будет видно, что множитель  $\varepsilon$  сокращается, так что система уравнений, отнесенная к движущимся осям, которая объединяет новые переменные с нижними индексами, по форме идентична максвелловской системе уравнений эфира, отнесенной к неподвижным осям, — отмечает Лармор. — Такое функциональное преобразование  $(x', y', z')$  в  $(x_1, y_1, z_1)$  имеет смысл (применительно к данной проблеме) удлинения пространства в отношении  $\varepsilon^{1/2}$  вдоль

направления движения системы координат” (там же). В конце этого же параграфа Лармор указывает, что “изменение временной переменной при сравнении излучений в неподвижной и движущихся системах является причиной эффекта Доплера” (там же, с. 60).

Таким образом, Лармор применил, как и Лоренц, двухступенчатую схему: при переходе к движущейся системе координат он сначала использовал галилеевские преобразования, а затем с помощью дополнительного кинематического преобразования восстановил инвариантность максвелловских уравнений. Это второе преобразование Лармор объяснял динамическими причинами: “Размеры движущейся электродинамической системы сокращаются вдоль направления ее движения по сравнению с неподвижной системой в отношении  $\epsilon^{-1/2}$ ” (там же, с. 58–59). Если объединить оба преобразования, то мы получим то, что ныне называется релятивистским преобразованием, однако этот шаг был сделан только Пуанкаре и Эйнштейном в 1905 г.

В докладе, сделанном на заседании Амстердамской академии наук 23 апреля 1904 г. (Lorentz, 1904), Г.А. Лоренц также на основе двухступенчатой схемы, математически эквивалентной схеме Лармора, добился инвариантности уравнений Максвелла. Так же, как и он сам ранее, и как ранее Лармор, Лоренц применил первоначально к максвелловским уравнениям галилеевские преобразования, а затем предложил перейти к следующим новым переменным:  $x' = klx$ ,  $y' = ly$ ,  $z' = lz$ ,  $t' = \frac{l}{k}t - kl\frac{w}{c^2}x$ , где  $k^2 = \frac{c^2}{c^2 - w^2}$  (Lorentz, 1904, p. 175; рус. пер.: Лоренц, 1904, с. 70). Эту статью Лоренц рассматривал как ответ на вызов А. Пуанкаре, сделанный им на конгрессе 1900 г. Лоренц указывал, что в данной статье он надеется “с большим успехом” “с помощью определенных основных допущений показать, что многие электродинамические явления строго, т. е. без какого-либо пренебрежения членами высших порядков, не зависят от движения системы” (там же, с. 68).

В отличие от Лармора, рассматривавшего максвелловские уравнения для “свободного эфира”, Лоренц поставил более сложную задачу — найти формулы преобразования и при наличии источников. Однако Лоренц получил формулы преобразования плотности заряда и скорости электрона, которые не приводили к полной инвариантности уравнений Максвелла — в преобразованных уравнениях остались некоторые лишние члены, но которые при больших скоростях были пренебрежимо малы. Позже Лоренц прокомментировал это так: “Эти члены были слишком малы, чтобы оказать заметное влияние на явления, и этим я мог объяснить обнаруженную наблюдениями независимость их от движения Земли, но я не установил принципа относительности как строгую и универсальную истину” (Лоренц, 1914, с. 193).

Нетрудно понять, что это использованное Лоренцем преобразование с точностью до обозначений (множитель  $k^2$  равен ларморской  $\epsilon$ ) было эквивалентно преобразованию Лармора, но содержало дополнительный неопределенный множитель  $l$ , который Лоренц определил лишь



в самом конце своей статьи исходя из динамических соображений (он пришел к выводу, что  $l = 1$ ). Точно так же, как и Лармор, Лоренц интерпретировал дополнительное преобразование *динамически*: сжатием шарообразного электрона в эллипсоид по направлению движения — “поступательное движение *производит* деформацию ( $1/kl, 1/l, 1/l$ )” (Лоренц, 1904, с. 77). Такое же сжатие, как показал Лоренц, испытывает и движущееся тело в целом: “Влияние поступательного движения (как для отдельного электрона, так и для весомого тела в целом) простирается только на размеры в направлении движения, а именно: последние делаются в  $k$  раз меньше по сравнению с состоянием покоя” (там же, с. 80–81). По ходу своего вывода Лоренц, опираясь на динамическую интерпретацию дополнительного преобразования, вынужден был также прийти к необходимости различения массы тела по разным осям по отношению к направлению движения.

Возникает закономерный вопрос: знал ли Лоренц о преобразованиях Лармора, которые приводили к полной инвариантности максвелловских уравнений в случае отсутствия источников? В своей статье 1904 г. Лоренц не ссылался на Лармора, однако Лоренц хорошо знал его книгу. Это следует из статьи Лоренца 1902 г., являвшейся ответом на критические замечания Лармора, упрекнувшего Лоренца на страницах своей книги в ошибке в связи с формулой вращения плоскости поляризации в движущейся среде (Lorentz, 1902, p. 157).

А. Пуанкаре, ознакомившись со статьей Лоренца (1904), оказался неудовлетворенным динамическим способом доказательства того, что множитель  $l=1$ . Это послужило причиной его собственных размышлений на эту тему и привело к трем письмам к Лоренцу, написанным в период с конца 1904 г. до середины 1905 г. (к сожалению, на самих письмах Пуанкаре не указал точной датировки). Эти письма Пуанкаре Лоренцу были выявлены историком науки А. Миллером (см.: Miller, 1981, p. 80–81). Во втором коротком письме Пуанкаре предложил свое доказательство, которое выгодно отличалось от лоренцевского своей математической простотой и изяществом. Смысл доказательства сводился к требованию, что преобразования образуют группу. В этом письме Лоренцу Пуанкаре впервые приводит релятивистские преобразования *в виде единого преобразования*  $x' = kl(x + \varepsilon t)$ ,  $y' = ly$ ,  $z' = lz$ ,  $t' = kl(t + \varepsilon x)$ , при этом он скорость  $\varepsilon$  мерил в долях от скорости света, которую для простоты выбрал равной единице:  $c = 1$  (это эквивалентно выбору  $\varepsilon = v/c$  и обозначением  $t$  произведения  $ct$ ). По ходу доказательства Пуанкаре получает и правильную формулу для сложения скоростей. Как видим, Пуанкаре вовсе исключил галилеевские преобразования, сразу объединив их с дополнительными преобразованиями Лармора–Лоренца. При этом в формулы преобразований пространственной координаты  $x$  и времени  $t$  обе эти координаты вошли у Пуанкаре симметричным образом.

Полученные Пуанкаре единые преобразования были опубликованы им в краткой статье “О динамике электрона” в докладах Французской

академии наук от 5 июня 1905 г. и более развернутой статье, посланной им в журнал полтора месяца спустя, но опубликованной только в 1906 г. (Пуанкаре, 1905, 1905/06). Даты представления первой статьи, так же, как и даты писем Лоренцу, Пуанкаре, к сожалению, не привел.

Преобразования, приведенные Пуанкаре, были *математически эквивалентными* двухступенчатым преобразованиям (галилеевские + дополнительные), которые применяли Лармор и Лоренц. Возможно поэтому Пуанкаре недооценил полученный им результат, считая его эквивалентным лоренцевскому, а также не смог понять, к каким радикальным физическим следствиям он приводит. По-видимому, как физик Пуанкаре остался в рамках двухступенчатой схемы Лоренца–Лармора. В начале своей статьи Пуанкаре пишет: “Результаты, полученные мною, согласуются во всех наиболее важных пунктах с теми, которые получил Лоренц; я стремился только несколько видоизменить и дополнить их [в другом переводе: “дополнить и видоизменить их в некоторых деталях” — К.Т.]. Идея Лоренца состоит в том, что уравнения электромагнитного поля не изменятся в результате некоторого преобразования (которое я назову именем Лоренца) следующего вида:  $x' = kl(x + \epsilon t)$ ,  $y' = ly$ ,  $z' = lz$ ,  $t' = kl(t + \epsilon x)$ , где  $x, y, z$  — координаты и  $t$  — время до преобразования, а  $x', y', z'$  и  $t'$  — после преобразования, величина  $\epsilon$  — константа, которая определяет преобразование  $k = 1/\sqrt{1 - \epsilon^2}$ , а  $l$  — некоторая функция от  $\epsilon$ ” (Пуанкаре, 1905, с. 429–430). Далее Пуанкаре прямо указывает: “Все эти преобразования вместе со всеми пространственными вращениями должны образовывать группу; но для этого нужно, чтобы  $l = 1$ ”. Вслед за этим Пуанкаре получает преобразования плотности заряда и отмечает их некоторое отличие от формул, полученных Лоренцем. Таким образом, Пуанкаре впервые совместил в едином преобразовании два преобразования, которые фигурировали у Лоренца по отдельности и имели различную природу, упростил способ их получения, используя групповые соображения, а также исправил небольшую неточность в преобразовании плотности заряда и скорости электрона, которая была у Лоренца.

Пуанкаре понимал необходимость модернизации ньютоновской теории тяготения за счет перехода от концепции мгновенного распространения тяготения к конечной скорости его распространения равной скорости света. Здесь же Пуанкаре, по-видимому, первым вводит понятие “гравитационная волна”, прямо указывает, что законы тяготения должны оставаться инвариантными при “преобразовании Лоренца”, подчеркивает, что “обычный закон тяготения” должен являться справедливым при скоростях малых по сравнению со скоростью света (т.е. должен выполняться, говоря современным языком, принцип соответствия). Пуанкаре указывает, что уже получил релятивистски инвариантный закон тяготения как сумму двух сил, одна из которых имеет ньютоновский вид, а вторая — параллельна скорости движения.

Тем не менее, подход Пуанкаре остался двойственным: достигнув единых преобразований, он остался верен их динамической интерпре-

тации, рассматривая сжатие движущихся тел как реальное явление. Это нашло отражение, в частности, в термине “деформация”, который он использовал, и в численном расчете сжатия Земли в направлении ее движения. В статье Пуанкаре от 23 июля 1905 г. фигурировали единые преобразования в той же самой форме, что и в предыдущей статье и в письме Пуанкаре Лоренцу. Эти преобразования Пуанкаре по-прежнему называл “преобразованиями Лоренца”; здесь же он ввел термин и “группа Лоренца”, что и зафиксировалось, в конце концов, в научной терминологии. Интересно, что сам Лоренц даже в 1909 г. в книге “Теория электронов” по-прежнему сохранял верность двухступенчатой схеме преобразований, лишь отметив, что их можно выразить и в виде единого преобразования.

Молодой А. Эйнштейн испытал сильное влияние книг А. Пуанкаре и ранних работ Г. Лоренца, особенно книги Пуанкаре “Наука и гипотеза” (1902) и обширнейшего исследования Лоренца по световым явлениям, опубликованного в 1895 г., однако последних статей Лоренца и Пуанкаре он не знал и самостоятельно вывел релятивистские преобразования в своей статье “К электродинамике движущихся тел”, представленной в печать 30 июня 1905 г. в журнал “Annalen der Physik” и опубликованной 26 сентября того же года (Einstein, 1905b, рус. пер.: Эйнштейн, 1905b).



А. Эйнштейн

Эйнштейн не ссылается на предшественников, а выводу преобразований движения посвящает отдельный параграф 3 “Теория преобразования координат и времени от покоящейся системы, к системе, находящейся в равномерном поступательном движении относительно первой”, причем этот вывод отличается от вывода Г.А. Лоренца (Пуанкаре не привел вывода преобразований, а представил лишь результат, связав его с именем Лоренца). Для вывода преобразований Эйнштейн использует принцип постоянства скорости света в равномерно движущихся системах отсчета (Эйнштейн, 1905b, с. 15). В результате он получает:

$$t' = \beta(t - \frac{v}{V^2}x), \quad x' = \beta(x - vt), \quad y' = y, \quad z' = z, \quad \text{где } \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/V)^2}},$$

$V$  — скорость света в вакууме. Как следствие таких преобразований Эйнштейн в следующем параграфе выводит то самое сокращение линейных размеров движущихся тел при наблюдении из неподвижной системы отсчета, которое вводилось Лоренцем и Фицджеральдом как реальный динамический эффект; дополнительно Эйнштейн получает соответствующий эффект отставания движущихся часов (там же,

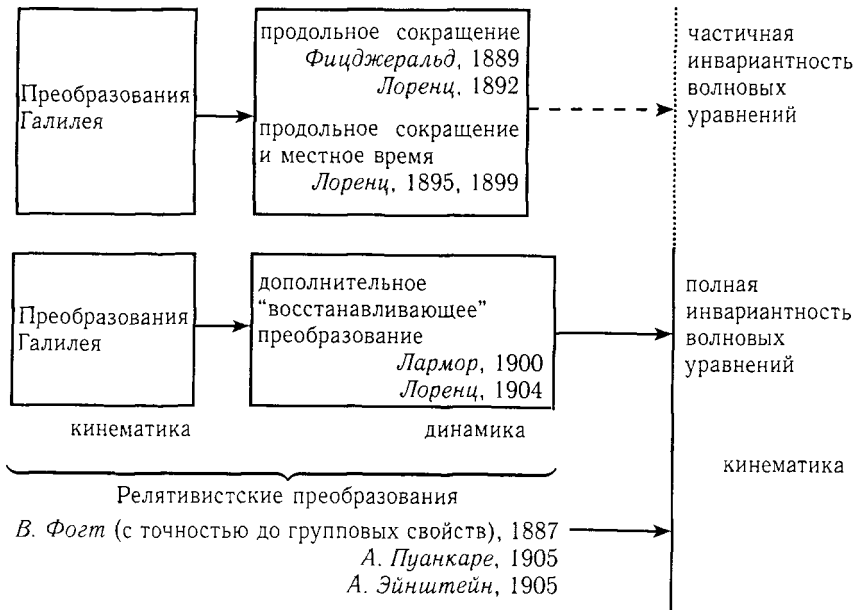
с. 18–19). В последующих параграфах Эйнштейн получает релятивистскую формулу сложения скоростей, формулы преобразования полей, выводит как следствие релятивистские формулы эффектов Доплера и аберрации, переходящие при малых скоростях в хорошо известные формулы.

Несмотря на то, что многие идеи высказывались еще до Эйнштейна, именно в этой статье была изложена целостная концепция, основанная на фундаментальных принципах (принципах относительности и постоянства скорости света), от которых автором была проведена прямая логическая цепочка к релятивистским преобразованиям, а от них — к экспериментально наблюдаемым следствиям. Поэтому именно эта публикация стала основополагающей и заложившей новые представления о пространстве и времени. Статья Эйнштейна содержала некоторые неизбежные недостатки — формулы для продольных и поперечных масс выглядели явным динамическим рудиментом в мире новой кинематики. Также уже в первой же публикации можно было бы получить формулу для энергии покоя  $E_0 = mc^2$ , ставшую впоследствии символом теории относительности, а также формулу Френеля.

Временной лаг между публикацией статьи Пуанкаре и представлением в печать основополагающей статьи Эйнштейна позволяет строить гипотезы о возможном влиянии статьи Пуанкаре на Эйнштейна. На это может указывать, в частности, то, что Эйнштейн, как и Пуанкаре, прибег при выводе релятивистских преобразований к требованию, чтобы эти преобразования образовывали группу. Некоторая косвенная аргументация была выдвинута также историками М. Клейном и А. Ниделом в 1977 г., установившими, что Эйнштейн реферировал две статьи по физике других авторов именно из 140-го тома докладов Французской академии, в котором и была помещена статья А. Пуанкаре. Однако прямых доказательств знакомства Эйнштейна со статьей Пуанкаре нет. Кроме того, 25 дней было явно недостаточно для развития такой масштабной и концептуальной работы. С другой стороны, сейчас совершенно очевидно, что открытие правильных релятивистских преобразований могло и обязано было состояться значительно ранее и, кроме того, даже без влияния опытов Майкельсона–Морли; прямой путь к ним лежал просто в исследовании математических (групповых) свойств волновых уравнений вообще и максвелловских уравнений в частности. Следовательно, у нас нет серьезных оснований не верить Эйнштейну, утверждавшему, что он не знал последние статьи Пуанкаре и Лоренца, предшествовавшие его статье. (Эйнштейн в 1950-е гг. даже заявлял, что не помнит, знал ли он результаты опытов Майкельсона–Морли, однако это утверждение носило скорее эпатарующий характер, так как отрицательные результаты этих опытов были широко известны и, в частности, обсуждались Лоренцем в книге 1895 г., которую Эйнштейн изучал). Независимость пути Эйнштейна от статьи Лоренца 1904 г. была доказана Дж. Холтоном (1969а, б).

В 1910 г. В. Варичак после открытия А. Пуанкаре и Г. Минковским сущности специальной теории относительности как четырехмерного пространства-времени, упростил формулы СТО переписав их в виде формул гиперболической геометрии (геометрии Лобачевского) для пространства скоростей:  $l' = -x \operatorname{sh} u + l \operatorname{ch} u$ ,  $x' = x \operatorname{ch} u - l \operatorname{sh} u$ ,  $y' = y$ ,  $z' = z$ , где  $l = ct$  (Varičak, 1910a, S. 93). Варичак в своих статьях называл релятивистские преобразования преобразованиями Лоренца-Эйнштейна (Varičak, 1910a, S. 93; 1910b, S. 289, 290)

Переход от классических (галилеевских) преобразований к релятивистским, осуществленный усилиями В. Фогта, Г.А. Лоренца, Дж. Лармора, А. Пуанкаре, А. Эйнштейна можно выразить следующей схемой:



Ныне принцип релятивистской инвариантности — краеугольный камень современной физики. Можно говорить, что теория не верна (или не точна), если она не соответствует этому принципу. Таким образом, принцип релятивистской инвариантности играет фундаментальную методологическую роль в современной физической картине мира. Характерно, что осознание этого последовало немедленно после его открытия и стало основной предпосылкой для релятивизации всех физических теорий

Несмотря на очевидную теоретическую состоятельность и огромную практическую значимость СТО время от времени появляются антирелятивистские работы, которые, как кажется авторам, ее "опровергают". В качестве примера можно указать на брошюру (Греча-

ный, Попов, 2003). Авторы, следуя за логикой вывода релятивистских преобразований Эйнштейном, затем просто *отбрасывают* множитель  $a$  (там же, с. 9), который на самом деле зависит от отношения  $v/c$ , и который Эйнштейн определял из групповых соображений:  $a = \sqrt{1 - v^2/c^2}$  (Эйнштейн, 1905b, с. 15). В результате, естественно, они не получают релятивистских преобразований. На самом деле, все такого рода работы содержат те или иные ошибки авторов и здесь нет необходимости их разбирать. Логическая состоятельность специальной теории относительности устанавливается ее математическим содержанием как геометрии Лобачевского для пространства скоростей.

**1.1.6. Принцип относительности.** Принцип относительности утверждает, что все физические явления (механические, оптические, электромагнитные и любые другие) при одинаковых начальных условиях протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета, т.е. системах отсчета, движущихся с постоянной скоростью. С математической точки зрения принцип относительности означает инвариантность физических уравнений (сохранение формы) при преобразовании движения, т.е. при преобразовании координат  $\vec{r}$  и времени  $t$ , соответствующем переходу от одной инерциальной системе отсчета к другой.

Первоначально принцип относительности применительно к механическим явлениям был установлен Г. Галилеем (термин принцип у него отсутствовал). Идея этого открытия, по-видимому, пришла к Галилею в ходе анализа аргументации противников учения Коперника о движении Земли вокруг Солнца и о ее суточном вращении. Противники коперниканства указывали на отсутствие каких-либо ощутимых эффектов движения и вращения Земли. Галилей осознал, что на самом деле все явления в равномерно движущихся системах отсчета протекают одинаково. В “Диалоге о двух системах мира — птолемеевой и коперниковой” (1632 г.) Галилей, анализируя суточное вращение Земли, отмечал устами Сальвиати равноправие земной и звездной систем отсчета: “Это движение, по крайней мере на первый взгляд, может быть приписано одной лишь Земле так же, как оно может быть приписано и всему остальному миру, за исключением Земли, ибо одни и те же явления наблюдались бы как в первом случае, так и во втором” (Галилей, 1632, с. 212). Далее Сальвиати еще раз подчеркивает: “Для порождения решительно одинаковых явлений безразлично, движется ли одна Земля и остается неподвижным весь остальной мир или же Земля стоит неподвижно, а весь остальной мир движется тем же самым движением” (там же, с. 215).

Далее Галилей отмечает, что “все опыты, могущие быть произведенными на Земле, не дают достаточных доказательств ее подвижности, что все явления могут происходить совершенно одинаково как при подвижности Земли, так и в случае пребывания ее в покое”. Затем

Сальвиати описывает мысленный опыт, в котором участники сначала находятся в покоящемся корабле и наблюдают за насекомыми и рыбами, падением капель воды в сосуд с узким горлышком, а также сами бросают предметы и прыгают в разные направления, а затем повторяют то же самое в движущемся корабле: “Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если движение будет только равномерным и без качки в ту и другую стороны) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и не по одному из них не сможете установить, движется корабль или стоит неподвижно” (там же, с 285–286). Сагредо подтверждает это своими наблюдениями: “Сотни раз, сидя в своей каюте, я спрашивал себя, движется корабль или стоит неподвижно?”.

Также Галилей, опровергает аргументы противников движения Земли, в т.ч. мысленный эксперимент о смещении камня при падении в сторону, противоположную движению Земли, на основе других мысленных экспериментов: падения камней с башни и с мачты движущегося корабля. Галилей прямо утверждает: “Камень, падающий с корабельной мачты, всегда попадает в одно и то же место, движется ли корабль или стоит на месте” (там же, с. 243).

На самом деле аргументация Галилея не совсем точна, так как движение Земли ускоренно (изменяется направление скорости движения) и это проявляется в некоторых явлениях (маятник Фуко, эффект Саньяка). Также тела, на самом деле, смещаются при падении из-за вращения Земли и это обсуждалось Ньютоном и др. Таким образом, защищая коперниканскую программу, Галилей по сути понял справедливость принципа относительности, и привлек его в качестве аргумента, ссылаясь на практический опыт (хотя формально термина “принцип относительности” у него и Ньютона еще не было)

Ныне классический принцип относительности, на который опирался Галилей, называется *принципом относительности Галилея*. Математически он соответствует преобразованию движения — *преобразованию Галилея*:  $\vec{r}' = \vec{r} + \vec{V}t$ ;  $t' = t$ , где  $\vec{V}$  — относительная скорость двух инерциальных систем отсчета. Этот принцип и соответствующие преобразования легли в основу классической механики. Истории галилеевского принципа относительности посвящена статья В.П. Визгина (Визгин, 1983).

Трудно сказать, насколько принцип относительности Галилея помог Ньютону сформулировать три закона механики. В “Началах” Ньютон сформулировал этот принцип как *следствие* из основных законов механики: “Движение тел, заключенных в данном пространстве, друг относительно друга одни и те же (iidem), покоится ли это пространство или движется равномерно и прямолинейно без вращения. <...> Это

подтверждается обильно опытами. Все движения на корабле совершаются одинаково, находится ли он в покое, или движется равномерно и прямолинейно” (Ньютон, 1687/1725, с. 49; перевод уточнен В.Г. Фридманом: Фридман, 1957, с. 426). В.Г. Фридман считает, что Ньютон выдвинул даже два принципа относительности: один для равномерного и прямолинейного движения (следствие V, см. выше), другой — для ускоренного (следствие VI): “Если тела, движущиеся как бы то ни было друг относительно друга, будут подвержены действию равных ускоряющих сил, направленных по параллельным между собою прямым, то эти тела будут продолжать двигаться друг относительно друга так же, как если бы сказанные силы на них не действовали” (Ньютон, 1687/1725, с. 49–50). Этот второй принцип, по мнению Фридмана, соответствует общему принципу относительности Эйнштейна (Фридман, 1957, с. 429).

После утверждения волновой теории света принцип относительности уже не рассматривался как справедливый для оптических явлений. Это привело к постановке известных опытов по обнаружению абсолютного движения, оказавшихся безуспешными.

В 1895 г. А. Пуанкаре на основе анализа опытов Майкельсона вновь утвердил принцип относительности как фундаментальный принцип Природы. В статье “К теории Лармора” он писал: “Опыт дал множество фактов, которые допускают следующее обобщение: невозможно обнаружить абсолютное движение материи, или, точнее, относительное движение материи и эфира. Все, что можно сделать, — это выявить движение весомой материи относительно весомой материи. <...> Невозможность выявить движение материи относительно эфира, а также равенство, которое, несомненно имеет место между действием и противодействием без учета действия материи на эфир, представляют собой два факта, связь которых кажется очевидной. Может быть, оба пробела будут заполнены одновременно” (Пуанкаре, 1895, с. 7–8).

В лекции “Оптические явления в движущихся телах” из цикла лекций “Электричество и оптика” 1899 г. А. Пуанкаре, анализируя теорию Г.Лоренца и эксперименты А. Майкельсона, прямо утвердил принцип относительности и для оптических явлений: “Оптические явления не могут быть изменены движением Земли” (Пуанкаре, 1899/1901, с. 21). “Такое странное свойство кажется настоящим *coeur de pouce* самой природы, чтобы избежать обнаружения абсолютного движения Земли с помощью оптических явлений, — писал А. Пуанкаре. — Это не может меня удовлетворить, и я должен высказать здесь свое отношение: я считаю очень вероятным тот факт, что оптические явления зависят только от относительного движения присутствующих материальных тел, источников света или оптических приборов и не с точностью до величин порядка квадрата или куба абберрации, а строго. По мере того как измерения станут точнее, этот принцип будет выверен с еще



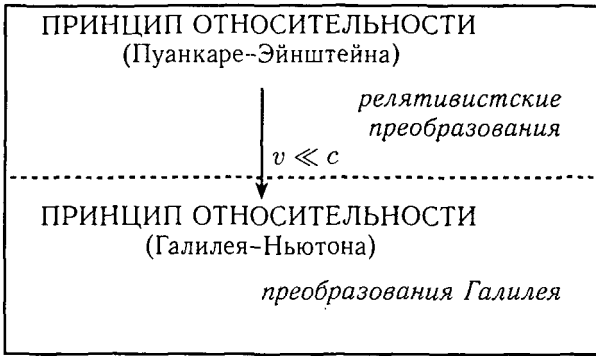
большей точностью. Нужно ли будет новое *coup de pouce*, новая гипотеза для каждого приближения? Очевидно нет: хорошо сформулированная теория должна позволять доказывать принцип сразу со всей строгостью. Теория Лоренца пока этого не позволяет. Но из всех предложенных теорий именно она ближе всего к тому, чтобы это осуществить. Можно, следовательно, надеяться сделать ее вполне достаточной в этом отношении, не внося в нее слишком глубоких изменений” (там же, с. 22)

В 1902 г. была издана книга А. Пуанкаре “Наука и гипотеза”, в которой один из параграфов он прямо назвал “О принципе относительности пространства и движения” (*Poincaré*, 1902). В сентябре 1904 г. А. Пуанкаре выступил на Конгрессе науки и искусства в Сент-Луисе с докладом “Настоящее и будущее математической физики”. В нем он выдвинул концепцию физических принципов, как основ знания о природе. Пуанкаре перечислил 6 таких принципов: 1) принцип сохранения энергии, или принцип Майера, 2) принцип Карно, или принцип деградации энергии, 3) принцип Ньютона, или принцип равенства действия противодействию, 4) “принцип относительности, согласно которому законы физических явлений должны быть одинаковыми для неподвижного наблюдателя и для наблюдателя, совершающего равномерное поступательное движение, так что мы не имеем и не можем иметь никакого способа определять, находимся ли мы в подобном движении или нет”, 5) принцип сохранения массы, или принцип Лавуазье, 6) принцип наименьшего действия. “Применения этих пяти или шести общих принципов к различным физическим явлениям достаточно для того, чтобы узнать все то, что вообще можно, в разумных пределах, надеяться познать”, — подчеркнул Пуанкаре (*Пуанкаре*, 1904, с. 30).

Опираясь на идеи А. Пуанкаре, в 1905 г. А. Эйнштейн постулировал этот принцип вместе с принципом постоянства скорости света и вывел из них наблюдаемые следствия.

Таким образом, принцип относительности претерпел эволюцию, которую кратко можно выразить так: начиная с 1630-х гг. принцип относительности был утвержден Г. Галилеем по отношению ко всем механическим явлениям (1 период), после создания Френелем волновой теории света справедливость принципа относительности отрицалась по отношению к оптическим явлениям, что привело к постановке опытов, давших отрицательный результат (2 период), начиная с 1890-х гг. в результате осмысления отрицательного результата опыта Майкельсона принцип относительности был утвержден А. Пуанкаре в 1899 г. как всеобщий принцип (3 период), последовательное проведение этого принципа (обобщение и вывод на его основе наблюдаемых явлений) связано с именем А. Эйнштейна (1905), после чего принцип относительности (релятивистской инвариантности) стал важнейшим методологическим принципом физики (4 период).

Соотношение между принципами относительности Галилея и Пуанкаре–Эйнштейна подчиняется принципу соответствия:



С математической точки зрения это соответствует предельному переходу релятивистских преобразований в преобразования Галилея.

Таким образом, релятивистскую революцию можно рассматривать как обобщение принципа относительности с учетом фундаментального характера скорости света в вакууме.

#### 1.1.7. Эйнштейн и принцип постоянства скорости света.

С проблемами, связанными с обнаружением эфира, А.Эйнштейн познакомился когда прочел книгу Г.А. Лоренца (*Lorentz, 1895*). По крайней мере до 1901 г. А. Эйнштейн верил в существование эфира и придумывал различные опыты для его обнаружения (*Пайс, 1982, с. 131*). В начальный период обучения в Цюрихском Политехникуме Эйнштейн активно интересовался экспериментальной физикой и часто работал в физической лаборатории. Однако опыты по обнаружению эфира ему провести не удалось, сначала из-за отсутствия разрешения на эти опыты от своего научного руководителя Г.Ф. Вебера, затем из-за смещения его интересов от экспериментальной к теоретической физике.

Основные положения, легшие в основу специальной теории относительности, сформировались, как вспоминал Эйнштейн, примерно за 5-6 недель до окончания работы над статьей "К электродинамике движущихся тел". Этому предшествовал год размышлений над противоречием электродинамики и механики в законе сложения скоростей, причем Эйнштейн первоначально пытался пойти именно по пути динамической интерпретации, развиваемой Лоренцем. Об этом периоде А. Эйнштейн кратко рассказал в лекции в Киото в декабре 1922 г. вскоре после получения известия о присуждении ему Нобелевской премии по физике: "В то время я был уверен в справедливости уравнений электродинамики Максвелла–Лоренца. Более того, из них вытекали соотношения так называемой инвариантности скорости света, вследствие чего эти уравнения должны быть справедливыми и для

движущихся систем отсчета. Однако инвариантность скорости света противоречила известному из механики правилу сложения скоростей. Пытаясь разрешить это противоречие, я столкнулся с огромными трудностями. Я потратил впустую почти год, пытаясь несколько видоизменить идеи Лоренца, и пришел к выводу, что загадка совсем не проста". Далее Эйнштейн рассказывает, в какой момент у него родилась идея именно кинематической интерпретации. "В один поистине прекрасный день" в конце мая 1905 г. Эйнштейн пришел к своему другу М. Бессо и стал обсуждать с ним эти проблемы. Именно в ходе обсуждения Эйнштейн нашел решение этой задачи: "Мы с ним рассматривали ее со всех сторон, пока я не понял в чем дело. На следующий день я вновь пришел к нему и, не здороваясь, сказал: "Спасибо! Я, наконец, решил эту задачу". Решение заключалось в пересмотре понятия времени, т.е. оказалось, что время не может определяться абсолютно – имеется неразрывная связь между временем и скоростью распространения сигналов. На основе такого представления можно преодолеть все огромные трудности. Через пять недель с того момента, как я это осознал, специальная теория относительности была готова". В своей статье, поступившей в "Annalen der Physik" 30 июня 1905 г., А. Эйнштейн не сделал ни одной ссылки на работы предшественников, но выразил благодарность М. Бессо как "верному помощнику при разработке изложенных здесь проблем", которому автор "обязан за ряд ценных указаний". Таким образом, дискуссия с М. Бессо возможно помогла Эйнштейну осознать относительность одновременности и прийти к понятию времени как локального времени, которое фигурировало в работах предшественников лишь как вспомогательная величина.

Одной из наиболее важных историко-научных проблем, связанных с созданием СТО, является выяснение влияния работ предшественников – прежде всего, Г.А. Лоренца и А. Пуанкаре. Несомненно, что на создание СТО Эйнштейном повлияла критика А. Пуанкаре понятия абсолютной одновременности, высказанная им, в частности, в книге "Наука и гипотеза" (1902). Также сам термин "принцип относительности" был, очевидно, воспринят Эйнштейном именно от Пуанкаре.

Считается, что Эйнштейн не был знаком с докладом А. Пуанкаре на конгрессе в сентябре 1904 г. в Сент-Луисе, в котором Пуанкаре высказал важнейшую идею о скорости света как верхнем пределе скоростей и необходимости пересмотра в связи с этим механики. Однако относительно этого можно высказать предположение, что этот доклад мог знать М. Бессо, через которого некоторые идеи Пуанкаре могли повлиять и на Эйнштейна.

Основополагающая статья Эйнштейна "К электродинамике движущихся тел" (предст. 30 июня 1905 г.) начинается с вводных замечаний, в которых автор высказывает "предположение, что для всех координатных систем, для которых справедливы уравнения механики, имеют место те же самые электродинамические и оптические законы, как это уже доказано для величин первого порядка", т.е. на современном

языке — во всех инерциальных системах отсчета уравнения механики и электродинамики не меняются. Далее Эйнштейн превращает это предположение в постулат и вводит еще один постулат об универсальности скорости света в вакууме: “Мы намерены это предположение (содержание которого в дальнейшем будем называть принципом относительности) превратить в предпосылку и сделать, кроме того, добавочное допущение, находящееся с первым лишь в кажущемся противоречии, а именно: что свет в пустоте всегда распространяется с определенной скоростью  $V$ , не зависящей от состояния движения излучающего тела. Эти две предпосылки достаточны для того, чтобы, положив в основу теорию Максвелла для покоящихся тел, построить простую, свободную от противоречий электродинамику движущихся тел. Тогда введение «светоносного эфира» окажется излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится «абсолютно покоящееся пространство», наделенное особыми свойствами, а также ни одной точке пустого пространства, в которой протекают электромагнитные процессы, не приписывается какой-нибудь вектор скорости”.

Статья Эйнштейна состояла из двух частей — кинематической и электродинамической, каждая из которых включала пять параграфов. В первом параграфе Эйнштейн определяет “время исключительно для того места, в котором часы как раз находятся”, т.е. устанавливает понятие местного времени, а затем дает операциональное определение понятия одновременности — через синхронизацию часов с помощью светового сигнала (см. выше). Важнейшим пунктом такого определения является универсальность скорости света в вакууме. “Согласно опыту, — пишет Эйнштейн, — мы полагаем также, что величина  $\frac{2AB}{t'_A - t_A} = V$  есть универсальная константа (скорость света в пустоте)” (Эйнштейн, 1905b, с. 10).

Во втором параграфе А. Эйнштейн дает более четкое определение “принципу относительности и принципу постоянства скорости света”: “1) Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к какой из двух координатных систем, находящихся относительно друг друга в равномерном поступательном движении, эти изменения состояния относятся. 2) Каждый луч света движется в покоящейся системе координат с определенной скоростью  $V$  независимо от того, испускается ли этот луч света покоящимся или движущимся телом. При этом скорость = путь луча света/промежуток времени, причем “промежуток времени” следует понимать в смысле определения в § 1”. Опираясь на эти принципы, Эйнштейн показывает ошибочность представлений об абсолютном значении понятия одновременности: “Два события, одновременные при наблюдении из одной координатной системы, не воспринимаются более как одновременные при рассмотрении из системы, движущейся относительно данной системы”.

В третьем параграфе Эйнштейн выводит релятивистские преобразования движения и отмечает, что они образуют группу. В четвертом параграфе Эйнштейн анализирует физический смысл преобразований движения для движущихся твердых тел и часов и выводит формулу продольного сокращения тел (сокращение Лоренца–Фидджеральда). Пятый параграф посвящен выводу и анализу релятивистской формулы сложения скоростей.

Далее Эйнштейн переходит к электродинамической части. В шестом параграфе Эйнштейн показывает инвариантность уравнений Максвелла (в его терминологии — уравнений Максвелла–Герца) относительно преобразований движения, выведенных им в третьем параграфе. Седьмой параграф посвящен выводу релятивистских формул аберрации и эффекта Доплера. Важность этого вывода заключалась в том, что в классической физике эти два кинематических эффекта никак не связаны. Теория относительности связала их — они стали интерпретироваться как следствие изменения 4-х волнового вектора при преобразовании движения, т.е. как две стороны одного и того же явления (см. п. 1.1.2). В восьмом параграфе Эйнштейн выводит преобразование энергии лучей света при преобразовании движения. В девятом параграфе Эйнштейн рассматривает преобразование уравнений Максвелла с учетом существования конвекционных токов и показывает, что уравнения движения заряженных частиц (электронов) остаются инвариантными при преобразовании движения, т.е. подчиняются принципу относительности (при этом он использует полученную в пятом параграфе формулу сложения скоростей). Как следствие он также получает, что заряд остается инвариантным в инерциальных системах. В последнем, десятом параграфе Эйнштейн рассматривает динамику медленно ускоренного электрона и, сохраняя уравнение классической механики  $F = m\dot{v}$ , выводит формулы “продольной” и “поперечной” масс, несколько отличающиеся от найденных ранее Г.А. Лоренцем. Как видим, у Эйнштейна еще сохранялись динамические “леса”, которые в дальнейшем полностью исчезли. Эйнштейн также получает правильную релятивистскую формулу для кинетической энергии электрона. В заключении Эйнштейн приводит три поддающихся опытной проверке свойства движения электрона в электромагнитном поле.

А Эйнштейн в своей статье не показывает, что формулы его релятивистской кинематики (например, формула сложения скоростей, формула эффекта Доплера, формула кинетической энергии электрона и др.) переходят в формулы классической механики при скоростях много меньших скорости света  $c$ . Те он не проверяет выполнение принципа соответствия (который был сформулирован позже, но предвосхищен Больцманом и Пуанкаре). Также он не указывает на существование новых чисто релятивистских эффектов, поддающихся опытной проверке (например, поперечного эффекта Доплера; это он сделал только два года спустя в статье. *Эйнштейн, 1907а*).

В следующей статье “Зависит ли инерция тела от содержащейся в ней энергии”, поступившей в “Annalen der Physik” 27 сентября 1905 г. Эйнштейн так формулирует принцип относительности: “Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к которой из двух координатных систем, находящихся в равномерном параллельно-поступательном движении относительно друг друга, отнесены эти изменения состояния (принцип относительности)”. Далее Эйнштейн указывает на результаты, которые получил в предшествующей статье на основе этого принципа, отмечая в сноске, что “примененный там принцип постоянства скорости света содержится, конечно, в уравнениях Максвелла”.

Г.А. Лоренц, прекрасно понимая математический аппарат специальной теории относительности, тем не менее не смог принять кинематическую интерпретацию Эйнштейна. В лекции 1913 г. в Гарлеме Г.А. Лоренц прямо высказался против основных представлений СТО — прежде всего, понятия относительности одновременности. Лоренц подчеркнул, что он является сторонником “старой концепции, соответствия с которой эфир имеет хотя бы минимальную материальность, между пространством и временем можно провести четкую границу, а об одновременности можно говорить без дополнительных уточнений”. Далее Лоренц привел аргументы в пользу существования скоростей, больших скорости света в вакууме: “В подтверждение последнего тезиса можно напомнить о присущей нам способности представлять себе произвольно большие скорости. При этом мы максимально приближаемся к концепции абсолютной одновременности. Наконец, смелое предположение о невозможности наблюдать скорости, большие скорости света, содержит гипотетическое ограничение, накладываемое на нашу способность к восприятию, которое не может быть принято безоговорочно” (Lorentz, 1920, S. 23; цит. по Пайс, 1982, с. 161). Таким образом, Лоренц выдвинул чисто психологическую аргументацию человеческой способности представлять любые сколь угодно большие скорости. В дальнейшем эта аргументация неоднократно выдвигалась против СТО. В 1949 г. В.А. Фок провел аналогию между такого рода аргументацией и стремлением создать вечный двигатель. Если такой авторитетный ученый как Лоренц не смог найти аргументацию, кроме чисто психологической, это уже само по себе показывало неспособность интерпретации наблюдаемых явлений на основе классической картины мира. Следует отметить, что любое утверждение о “сколь угодно больших скоростях” не имеет физического смысла до тех пор, пока не установлен масштаб измерения скорости. Классическая физика не вводила никаких абсолютных масштабов. Смысл СТО заключается в том, что именно эта теория впервые установила абсолютный масштаб, масштаб измерения скорости — скорость света в вакууме. Только в сравнении с этим масштабом мы можем говорить о “малых” или “больших” скоростях.

**1.1.8. Концепция 4-х мерного пространства-времени.** Ключевая роль в понимании математических основ специальной теории относительности принадлежит А. Пуанкаре, Г. Минковскому и В. Варичаку. Пуанкаре первым указал на четырехмерность пространства-времени и дал правильную интерпретацию релятивистским преобразованиям как поворота в этом пространстве (Пуанкаре, 1905/06, с. 478). В дальнейшем это развил Г. Минковский. В докладе “Пространство и время”, сделанном 21 сентября 1908 г. на 80-м собрании немецких естествоиспытателей и врачей в Кельне, Минковский отметил: “Отныне пространство само по себе и время само по себе должны обратиться в фикции и лишь некоторый вид соединения обоих должен еще сохранить самостоятельность” (Минковский, 1908а, с. 167). Г. Минковский предложил рассматривать мир как единое пространство-время, а все события в нем характеризовать не 3-х, а 4-х радиус-вектором, где три пространственные координаты образовывали действительную часть, а время — мнимую часть комплексного 4-х радиус вектора ( $\vec{r}, ict$ ). Также он указал на четырехмерность вектора энергии-импульса.

Минковский рассмотрел геометрическую фигуру, определяемую уравнением  $c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 1$ , где  $c$  — некоторый положительный параметр, с которой связана группа преобразований  $G_c$ . Затем Минковский показывает, что “из группы  $G_c$  в пределе при  $c = \infty$ , получается как раз та полная группа  $G_\infty$ , которая относится к ньютоновской механике” (там же, с. 169). Более того, он отмечает большую математическую привлекательность именно группы  $G_c$  по сравнению с  $G_\infty$ : “При таком положении вещей и имея в виду, что  $G_c$  математически понятнее, чем  $G_\infty$ , математик в свободном полете фантазии мог бы прийти к мысли, что явления природы в конце концов действительно инвариантны не относительно группы  $G_\infty$ , но скорее относительно группы  $G_c$  с определенным конечным  $c$ , которое в обычных единицах измерения чрезвычайно велико. Такое предвосхищение было бы необыкновенным триумфом чистой математики. Математика в этом вопросе не оказалась находчива. Однако у нее остается удовлетворение от того, что благодаря своим более ранним счастливым предшественникам, с их дальновидным и острым умом, она в состоянии теперь сразу же охватить глубоко идущие следствия подобной перестройки нашего миропонимания” (там же, с. 169–170).

Далее Минковский отождествляет математический параметр  $c$  с физической константой  $c$ : “Я хочу теперь же указать, о каком значении  $c$  будет в итоге идти речь;  $c$  будет иметь значение *скорости распространения света в пустоте*. Для того чтобы не говорить ни о пространстве, ни о пустоте, мы можем опять охарактеризовать эту величину как отношение электромагнитной и электростатической единиц количества электричества” (там же).

Минковский излагает новый взгляд на релятивистскую революцию с точки зрения теории групп: “Толчком и истинным поводом к при-

нению группы послужило то обстоятельство, что дифференциальное уравнение для распространения световых волн в пустоте обладает этой группой  $G_c$ . С другой стороны, понятие твердого тела имеет смысл только лишь в механике с группой  $G_\infty$ . Если имеется оптика с  $G_c$ , а с другой стороны, имелись бы твердые тела, то легко усмотреть, что двумя относящимися к  $G_c$  и  $G_\infty$  гиперболоидными полостями выделялось бы *одно-единственное направление  $t$* . Это обстоятельство повлекло бы за собой возможность, пользуясь надлежащими твердыми оптическими инструментами, заметить в лаборатории изменение явлений при различной ориентации приборов относительно направления движения Земли. Все направленные к этой цели усилия, особенно знаменитый интерференционный опыт Майкельсона, дали все же отрицательный результат. Для того чтобы объяснить это, Лоренц предложил гипотезу, успех которой как раз связан с инвариантностью оптики по отношению к группе  $G_c$ ” (там же, с. 171–172).

Минковский предложил отказаться от термина “принцип относительности” в пользу термина “постулат абсолютного мира” (“мировой постулат”), который выражает равноправие координат и времени. Сущность своего “мирового постулата” Минковский выразил в следующей “мистической формуле”:

$$3 \cdot 10^5 \text{ км} = \sqrt{-1} \text{ сек.}$$

Эта формула выражает то, что если в качестве единицы длины использовать световой отрезок или в качестве времени использовать время прохождения светом данного единичного отрезка, а время заменить на комплексную величину  $\sqrt{-1} t$ , то устанавливается полная симметрия между координатами и временем. Эту формулу можно записать так:  $3 \cdot 10^5 \text{ км/сек} = \sqrt{-1}$ , т. е. фактически Минковский выбирает  $c = \sqrt{-1}$ . При этом достигается симметрия инварианта:  $\tau^2 + x^2 + y^2 + z^2$ . На самом деле это эквивалентно переходу к новому понятию времени как комплексной длине  $\tau = ct\sqrt{-1}$ . Это вполне соответствовало уже сложившейся математической традиции: ранее математики О. Коши, С. Ковалевская, А. Пуанкаре уже использовали время как комплексную переменную. В докладе “Теория относительности” (1911) А. Эйнштейн также выбирал такое комплексное время (*Эйнштейн*, 1911, с. 186). Сейчас принято выбирать  $c = 1$ , сохраняя асимметрию времени и пространственных координат.

Развитие 4-х мерного подхода оказалось необычайно продуктивным, позволив существенно упростить уравнения. При этом часть физических величин осталась скалярами (масса, заряд), часть стала компонентами 4-х векторов (4-х-скорость, 4-х-вектор энергии-импульса и т. д.) или тензоров (тензор электромагнитного поля). Оказалось также, что пространство скоростей СТО представляет собой не что иное с математической точки зрения как геометрию Лобачевского (*Varičak*, 1910a,b). В обеих теориях — геометрии Лобачевского и релятивистской



механике — существуют естественные масштабы: соответственно, кривизна и скорость света, а взаимоотношение между геометрией Лобачевского и геометрией Евклида такое же, как и взаимоотношение между релятивистской и классической механикой. Геометрия Лобачевского переходит в евклидову при стремлении кривизны к нулю (радиуса кривизны к бесконечности), а релятивистская механика переходит в классическую при скоростях существенно меньших скорости света  $v/c \rightarrow 0$ .

Есть и различия: неевклидова геометрия выросла сама при исследовании аксиом евклидовой геометрии, релятивистская механика — в результате согласования основ механики с основами максвелловской электродинамики при направляющей роли эксперимента. Отсюда напрашивается вывод: релятивистская механика неизбежно была бы создана и без электродинамики в результате аксиоматизации классической механики и отказа от постулата, соответствующего пятому постулату евклидовой геометрии — мгновенности взаимодействия в классической механике. По крайней мере весь математический аппарат для этого был уже создан Н.И. Лобачевским, Я. Больями и др. еще в 1820–30-е гг. А какая механика соответствовала бы реальным процессам — решал бы опыт.

**1.1.9. От измерения скорости света к измерению скоростью света.** После опытов Физо и Фуко последовало большое количество различных опытов по измерению скорости света. Особенно большой вклад в измерение скорости света внес А. Майкельсон, удостоенный за это в 1907 г. Нобелевской премии.

Отметим, что большинство методов измерения скорости света имеют “генетическую связь” и являются по сути развитием метода Галилея. Это уже ранее отмечали историки Ольшки (метод Галилея — метод зубчатого колеса Физо и метод вращающегося зеркала Фуко), М. Льюцци (метод Галилея — метод Физо — метод ячейки Керра) и др. Развитие этих методов фактически связано с появлением новых и более совершенных способов прерывания сигнала: у Галилея это было механическое прерывание сигнала (открытие человеком заслонки фонаря), у И. Физо, Л. Фуко, С. Ньюкомба, А. Майкельсона и др. — оптомеханическое, а у А. Карольюса, О. Миттельштадта, Э. Бергштранда и др. (опыты с ячейкой Керра) — электрооптическое. Карольюс и Миттельштадт получили в 1928 г. 299778 км/с (с поправкой 299784 км/с). В дальнейшем этот метод применяли В.Андерсон (1937, 1941), А. Хюттель (1940) и др.

Еще один метод уточнения значений фундаментальных постоянных связан с анализом и сопоставлением точности и результатов различных проведенных опытов. На этом направлении также удалось последовательно уточнять значения скорости света: 299920 км/с (Тодд, 1880), 299860 км/с (С. Ньюкомб, 1891), 299890 км/с (А. Майкельсон, 1902), 299857 км/с (Б.П. Вейнберг, 1903) и др. Отметим, что результат

Б.П.Вейнберга 1903 г. был основан на оценке результатов *всех* опытов по измерению скорости света и даже опытов, из которых можно было извлечь значение скорости света, проведенных до 1903 г. Как видим, огромная работа, выполненная Б.П.Вейнбергом не была напрасной: если результат Тодда (1880) отличался от реального на 0,04 %, результат Майкельсона (1902) на 0,03 %, то Вейнбергу удалось еще больше улучшить результат по сравнению с предшественниками (отличие 0,02 % от действительного значения скорости света).

С 1940-х годов для измерения скорости света стали применять новые высокочастотные радиометры, что привело к “революции в измерении расстояний” (Фрум, Эссен, 1969, с. 9). Пионерами этого направления были Л.И. Мандельштам, Н.Д. Папалекси, А.А. Лебедев и др. (см. *Жаботинский*, 1983). К 1970-м годам все расстояния более 1 км мерили в астрономии и геодезии с помощью светового сигнала (Фрум, Эссен, 1969, с. 49). В результате с конца 1960-х годов метрологи стали предлагать выбрать скорость света в качестве единицы измерения <sup>1)</sup>. 20 октября 1983 года Международным комитетом по весам и мерам значение скорости света 299792458 м/с было принято *точным*, а метр стал определяться как точная часть светового отрезка (см.: *Bates*, 1988). Т.е. практическая единица скорости определяется как *точная* часть от скорости света в вакууме:

$$1 \frac{\text{метр}}{\text{сек}} = \frac{c}{299792458}.$$

Таким образом, проблема “измерения скорости света” формально перестала существовать с 1983 г. и соответствующие опыты стали рассматриваться как опыты по воспроизводству эталона длины через скорость света и выбранный эталон времени:  $1 \text{ метр} = \frac{c}{299792458} \times$  × секунда.

## Глава 1.2

### Постоянная Планка

Постоянная Планка  $h$  — одна из наиболее фундаментальных постоянных физики. Ее современное значение, принятое с 2002 года (NIST, 2005):

$$h = 6,6260693(11) \times 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с (СГС)} \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с (СИ)},$$

$$\hbar = h/2\pi = 1,05457168(18) \times 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с (СГС)} \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с (СИ)}.$$

История постоянной Планка  $h$  неразрывно связана с возникновением и развитием квантовой теории. Она была открыта вместе с открытием и обоснованием закона теплового излучения (В. Вин, М. Планк, 1896–1900). Осознание ее универсального статуса связано с представлением об универсальности закона теплового излучения (М. Планк,

<sup>1)</sup> Фрум, Эссен, 1969, с. 7, 179; Bay, White, 1972; Bay, Luther, White, 1972.

1899). Дальнейшее развитие квантовой теории — обоснование фотоэффекта с помощью гипотезы световых квантов (А. Эйнштейн, 1905), постулат в теории атома Бора квантования момента импульса электрона в атоме (Н. Бор, 1913), открытие соотношения де Бройля между массой частицы и ее длиной волны (Л. де Бройль, 1921), а затем создание квантовой механики (1925–26 гг.) и установление фундаментальных соотношений неопределенности между импульсом и координатой и между энергией и временем (В. Гейзенберг, 1927) — привело к установлению фундаментального статуса этой постоянной в физике.

История  $h$  была достаточно хорошо исследована в связи с историей развития квантовой теории. Следует отметить прежде всего монографии М. Джеммера, Ф. Хунда, А. Херманна, Т. Куна, Я. Мехры и Г. Рехенберга, посвященные истории квантовой теории в целом <sup>1)</sup>. История открытия планковского закона излучения представлена в монографиях Х.-Г. Шёпфа, Г. Кангро, Н.В. Вдовиченко, статьях И.С.Алексеева <sup>2)</sup> и др., создание квантовой механики — в монографии Б.Л. ван дер Вардена (*Waerden*, 1967) и др. Методология обоснования квантовой теории была реконструирована в монографии И.С. Алексеева, Н.Ф. Овчинникова и А.А. Печенкина (1984). Вместе с тем оказалось, что предыстория постоянных  $h$  и  $k$ , особенно в части соотношений между постоянными в законах теплового излучения, предлагавшихся в 1890-е годы, и постоянными  $h$  и  $k$ , исследована недостаточно. Например, сложилось убеждение о тождественности постоянных Планка  $b$  (1899) и  $h$  (1900), подкрепленное принципом соответствия и первоначальным мнением самого Планка. Впервые различие между  $b$  и  $h$  было выяснено Г. Кангро (1970). Соотношения между этими и другими постоянными исследуются ниже.

**1.2.1. Постоянные Стефана–Больцмана и Вина.** В 1860 г. Г. Кирхгоф сформулировал основную проблему теории теплового излучения, которая решалась в течение последующих 40 лет, — нахождение лучеиспускательной способности тел как универсальной функции от длины волны (частоты) и температуры: “Величина, обозначенная через  $I$ , как замечено в § 5, есть функция длины волны и температуры. Нахождение этой функции представляет задачу огромной важности. На пути экспериментального определения функции  $I$  стоят большие трудности. Несмотря на это, существует надежда определить ее опытным путем, так как она, без сомнения, имеет простую форму, как и все полученные до настоящего времени функции, не зависящие от свойств отдельных тел” (*Kirchhoff*, 1860). Таким образом, Г. Кирхгоф подчеркнул универсальность этой функции в смысле ее независимости от свойств различных тел. Следовательно, и те размерные постоянные, которые неизбежно должны были появиться в этом законе в силу

<sup>1)</sup> Jammer, 1966; Hund, 1967; Hermann, 1969; Kuhn, 1978; Mehra, *Rechenberg*, 1982/87.

<sup>2)</sup> Шёпф, 1978; Кангро, 1970; Вдовиченко, 1986; Алексеев, 1981, 1984

размерности физических величин, должны были иметь универсальный характер. Причем в размерность одной из универсальных постоянных должна была обязательно входить температура. Однако открыть этот закон излучения и универсальные постоянные (постоянные Планка и Больцмана) удалось лишь 40 лет спустя М. Планку.

Первым существенным шагом к открытию общего закона теплового излучения стало открытие двух эмпирических законов, являющихся его следствием — законов Стефана–Больцмана и смещения Вина, и соответственно открытие двух эмпирических постоянных, которые фигурируют в этих законах.

Закон Стефана–Больцмана утверждает пропорциональность полной испускательной способности абсолютно черного тела четвертой степени температуры:  $u = \sigma T^4$ , а также пропорциональность полной объемной плотности равновесного излучения также четвертой степени температуры:  $\rho = aT^4$ , где постоянная Стефана–Больцмана  $\sigma = ac/4 = 5,670400(40) \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K}^4)$ .

Этот закон был сформулирован австрийским физиком Й. Стефаном в 1879 г. на основе экспериментальных данных Дюлонга и Пти, Де ля Провосте и Десэна. Стефан установил, что полное излучение с единицы поверхности  $H = \alpha T^4$  (Stefan, 1879, S. 423). Справедливость закона Стефана для излучения абсолютно черных тел была окончательно подтверждена в 1897–99 гг. работами Ф. Пашена, О. Луммера и Э. Прингсгейма, К. Менденхолла и Ф. Саундерса <sup>1)</sup>. Таким образом, закон Стефана имел первоначально только эмпирическое обоснование.

Теоретическое обоснование этого закона было дано с помощью мысленных экспериментов. Важный шаг в этом направлении сделал А. Бартоли, который впервые указал на связь давления излучения со вторым началом термодинамики. С другой стороны существование давления излучения предсказывалось максвелловской электродинамикой. Опираясь на это, Л. Больцман в 1884 г. для плотности энергии вывел формулу  $\psi = ct^4$  (Boltzmann, 1884). Тем не менее, численное значение коэффициента пропорциональности  $c$  не имело теоретического обоснования и оставалось известным только из экспериментов. Поэтому после работы Больцмана оставалась задача теоретического обоснования численного значения эмпирической постоянной  $c$  в рамках более общей теории.

С конца 1880-х гг. ученые начали предлагать различные законы теплового излучения. В 1887 г. отечественный физик В.А. Михельсон предложил формулу излучения  $I = B\lambda^{-6}T^{3/2}e^{-C/\lambda^2T}$ . В 1888 г. Г.Ф. Вебер, подвергнув критическому пересмотру идеи Михельсона, а также с учетом экспериментальных данных, представил свой закон излучения, включавший три постоянные  $a$  (“температурный коэффициент”),  $b$  (“световую способность”) и  $c$  (“постоянную излучения”):

<sup>1)</sup> Paschen, 1897, Lummer, Pringsheim, 1897, 1899a,b; Mendenhall, Saunders, 1898a,b.

$s = c\pi\lambda^{-2}e^{aT - \frac{1}{b^2T^2\lambda^2}}$  (статья представлена Г. Гельмгольцем) (Weber, 1888). Вебер считал постоянной  $a = 0,0043 \text{ град}^{-1}$  общей постоянной (gemeinsame Constant) для всех тел, а постоянные  $b$  и  $c$ , напротив — специфическими для разных тел. Закон излучения Вебера не удовлетворял закону Стефана, о чем Вебер знал, однако он больше доверял формуле, предложенной на основе экспериментальных данных в 1887 г. Фиолле:  $S = CT e^{aT}$ , где  $C$  — специфическая постоянная для разных веществ. У Вебера  $C = cb \frac{\pi\sqrt{\pi}}{2}$ . Вебер исследовал на экстремум свой закон и получил условие максимума  $\lambda = \frac{1}{bT}$ . Таким образом,

закон для смещения максимума излучения появился первоначально как следствие теоретического закона, оказавшегося ошибочным, а постоянная имела специфический характер. Анализируя экспериментальные данные для разных веществ, Вебер пришел к выводу, что постоянная  $b$  незначительно отличается для разных веществ (даже для угля и платины) и примерно равна  $b = 4,5 \text{ см}^{-1}\text{град}^{-1}$ . Фактически это было сигналом, что  $b$  — универсальная постоянная.

Аналогичный закон смещения следовал также из экзотического закона излучения, предложенного в 1890 г. Р. Ковеслигети  $cT^4 \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 T^2 + a)^2}$  (Köveslighety, 1890), в то время, как из закона Михельсона следовал другой закон смещения  $\lambda_m^2 T = \text{const}$ .

Все это ставило задачу нахождения подлинного закона смещения. Эта задача была решена В. Вином в 1893 г. также на основе мысленного эксперимента. Изучая статью Больцмана, Вин догадался, что использование принципа Доплера для адиабатического процесса позволяет получить дополнительную информацию о функции распределения. Результатом этого исследования стало обоснование закона смещения максимума излучения  $\vartheta\lambda = \vartheta_0\lambda_0$  (закона смещения Вина), который сам Вин прокомментировал так: “В нормальном спектре испускания черного тела при изменении температуры каждая длина волны смещается таким образом, что произведение температуры на длину волны остается постоянным” (Вин, 1893, с. 156). В конце статьи Вин отметил согласие этого закона с законом смещения максимума, выведенным Вебером из своего закона излучения. Таким образом, результат Вина в то время можно было рассматривать как аргумент в пользу закона излучения Вебера. Однако значение статьи Вина выходило за рамки данного закона, так как закон смещения максимума излучения был обоснован им на основе фундаментальных принципов термодинамики и электродинамики с привлечением мысленных экспериментов. Поэтому в итоге закон смещения Вина оказался столь же универсальным законом теплового излучения как и закон Стефана-Больцмана. В этой статье, а также в статье 1896 г., Вин использовал термин “квант энергии” (Energiequantum) в смысле “количество энергии”. Ныне постоянная в законе смещения Вина обозначается символом  $b$ . Ее современ-

ное значение:  $2,8977685(51) \cdot 10^{-3}$  мК. Постольку этот символ Вебер, Планк и др. использовали для обозначения других постоянных, то, чтобы их различать, будем обозначать постоянную в законе смещения Вина  $c_m$  (в то время обозначение для нее вообще еще не вводилось).

В мае 1896 г. Ф. Пашен проанализировал предлагавшиеся до него законы излучения и предложил собственный  $c_1 \lambda^{-\alpha} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$ , рассчитав постоянные  $c_1$  и  $c_2$  (Paschen, 1896, с. 491). Постоянная  $\alpha$  вошла в закон полного излучения, который Пашен рассматривал в общем виде:  $J = c'T^\alpha$ . Из экспериментальных данных следовало среднее значение  $\alpha = 5,66$ .

В июне 1896 г. В. Вин, используя “счастливую идею” (den glücklichen Gedanken) Михельсона применения статистического закона распределения молекул по скоростям к анализу закономерностей теплового излучения, а также с учетом закона Стефана–Больцмана, обосновал закон излучения  $\varphi_\lambda = \frac{C}{\lambda^5} e^{-\frac{c}{\lambda \theta}}$  (закон излучения Вина) (Wien, 1896, с. 667). Вин отметил, что этот закон соответствует формуле Пашена при  $\alpha=5$ . Коэффициенты  $c$  и  $C$  Вин выразил через постоянные в законе Стефана–Больцмана и смещения, однако Вин не довел расчет до численных значений. Постепенно закон излучения Вина утвердился как правильный закон излучения и задача заключалась лишь в его более фундаментальном обосновании, а также в обосновании двух эмпирических постоянных в этом законе.

**1.2.2. Постоянные Планка  $a$  и  $b$ .** До октября 1900 г. М. Планк был уверен в справедливости закона излучения Вина и занимался проблемой его обоснования. В феврале 1897 – мае 1899 гг. М. Планк прочитал в Прусской Академии наук в Берлине пять докладов о необратимых процессах излучения. В последнем докладе, сделанном 18 мая 1899 г. (представлен в печать 1 июня 1899 г.) Планку удалось обосновать закон излучения Вина на основе второго начала термодинамики — принципа возрастания энтропии, и модели вещества как системы резонаторов. М. Планк предложил следующую логарифмическую формулу для энтропии отдельного резонатора:

$$S = -\frac{U}{av} \left( \ln \frac{U}{bv} - 1 \right) = -\frac{U}{av} \ln \frac{U}{ebv},$$

где  $e$  — основание натуральных логарифмов.

В этой формуле фигурировали две постоянные  $a$  и  $b$ , как коэффициенты перед и внутри логарифмической функции. Планк сразу



М. Планк

охарактеризовал эти две постоянные как “универсальные”, так как рассматривал этот закон энтропии как универсальный. Из этого закона энтропии выводился закон излучения Вина, а из него следовали законы смещения и Стефана–Больцмана. Таким образом, эмпирические постоянные в этих законах  $\sigma$  и  $c_m$  получали свое обоснование через универсальные планковские постоянные  $a$  и  $b$  (хотя численный расчет постоянных  $a$  и  $b$ , естественно, проводился в обратном направлении — через эмпирические постоянные  $\sigma$  и  $c_m$ ) Постоянную в экспоненте закона излучения Вина  $a$  Планк уточнил, сопоставляя с экспериментальными данными Пашена:  $ac = 1,4455$  (ед. СГС). Основываясь на экспериментальных данных Ф. Курльбаума по проверке закона Стефана–Больцмана, Планк определил, что комбинация постоянных  $\frac{b}{a^4} = 1,278 \cdot 10^{15}$  (ед. СГС). Отсюда М. Планк получил и численные значения постоянных  $a$  и  $b$ :

$$a = 0,4818 \cdot 10^{-10} \text{ с} \cdot ^\circ\text{С}, \quad b = 6,885 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с}.$$

В заключительном параграфе “Естественные единицы измерения” Планк предложил естественную систему единиц, основанную на четырех “универсальных константах”  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $f$  ( $c$  – скорость света,  $f$  – гравитационная постоянная  $G$ ) и определил единицы длины, времени, массы и температуры (*Planck*, 1899, S. 600) (см. п. 3.4.6).

Вскоре М. Планк опубликовал подробное изложение своих исследований по теории теплового излучения в “*Annalen der Physik*” (*Planck*, 1900a; рус. пер.: *Планк*, 1900a) (статья представлена в печать 7 ноября 1899 г.). Текст статьи был написан на основе пятого доклада 18 мая 1899 г. В статье сохранились обозначения и численные значения постоянных  $a$  и  $b$ , а также характеристика постоянных  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $f$  как “универсальных постоянных” и заключительный параграф о естественных системах единиц без каких-либо изменений.

**1.2.3. Постоянные Планка  $h$  и  $k$ .** В 1900 г. появились экспериментальные данные, свидетельствующие об отклонении закона излучения черного тела в области больших температур и длин волн от закона Вина (или “закона Вина–Планка”, как называли его О. Луммер и Э. Прингсгейм). В результате О. Луммером и Э. Прингсгеймом, О. Луммером и Э. Янке были предложены другие формулы закона теплового излучения, отличные от закона Вина. Еще до публикации данных об отклонении от закона Вина свой закон также предложил М. Тизен. А летом 1900 г. модифицированный закон Вина представил в короткой заметке также Рэлей (*Rayleigh*, 1900). Рэлей исходил из закона равномерного распределения энергии по степеням свободы и получил в качестве промежуточного результата закон  $T\lambda^{-4}d\lambda$ , который с точностью до безразмерного множителя соответствует современному закону Рэлей–Джинса. В этот период Рэлей находился ближе всех других к открытию *общего* закона излучения, ему надо было лишь объединить свой закон и закон Вина. Почему же этого не случилось

и почему закон Рэлея–Джинса пришлось переоткрывать заново другим ученым? Дело в том, что Рэлей, понимая, что в области малых длин волн хорошо проверен закон излучения Вина, просто добавил к своему закону экспоненциальный множитель:  $c_1 T \lambda^{-4} e^{-c_2/\lambda T} d\lambda$ . Этот закон с экспоненциальным множителем и стал окончательным результатом его статьи, проверялся экспериментаторами и был отвергнут, однако лишь в 1902 г. (Лоренц) и 1905 г. (Эйнштейн, Джинс, Рэлей) выяснилось, что именно промежуточный результат Рэлея имеет физический смысл как предельный случай закона Планка.

Первоначально М. Планк игнорировал эти эксперименты и новые теоретические формулы, но в октябре 1900 г. после беседы с Г. Рубенсом за несколько дней до доклада Г. Рубенса и Ф. Курльбаума на заседании Немецкого физического общества 19 октября, Планк понял необходимость модификации закона Вина и вывел “новый закон” (закон излучения Планка, по современной терминологии). Свое короткое сообщение “Об одном улучшении закона излучения Вина” М. Планк сделал на том же заседании Немецкого физического общества сразу после доклада Ф. Курльбаума. Сам “новый закон” излучения Планк представил в общем виде с коэффициентами пропорциональности  $s$  и  $S$  без их численного расчета:  $E = \frac{C\lambda^{-5}}{e^{c/\lambda T} - 1}$  (Планк, 1900c). В конце сообщения Планк предложил экспериментаторам проверить правильность этого закона. Уже на следующий день Г. Рубенс, а через некоторое время О. Луммер и Э. Прингсгейм, подтвердили соответствие закона Планка экспериментальным данным.

14 декабря 1900 г. М. Планк представил новый доклад в Немецком физическом обществе, в котором обосновал свой закон теплового излучения в форме для частоты:  $u_\nu d\nu = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \frac{d\nu}{e^{h\nu/k\vartheta} - 1}$ , и отметил его соответствие формуле для длины волны, опубликованной им ранее:

$$E_\lambda d\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda\vartheta} - 1} d\lambda. \text{ В этом докладе впервые появились постоянные } h$$

и  $k$ . Они вводились М. Планком с самого начала в связи с постулатами (квантование энергии осцилляторов и пропорциональность энтропии логарифму от вероятности) как “постоянные Природы” (Naturkonstanten) уже с рассчитанными конкретными численными значениями:  $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$  эрг · с,  $k = 1,346 \cdot 10^{-16}$  эрг/град (Планк, 1900d, с. 253, с. 254). Здесь же Планком был рассчитан “элементарный квант электричества”  $e = 4,69 \cdot 10^{-10}$  ед. СГС (там же, с. 257). Расчет постоянных  $h$  и  $k$  через эмпирические постоянные в законах смещения Вина и Стефана-Больцмана был представлен Планком в последующих публикациях. Постоянная  $h$  позже получила название постоянной Планка, а  $k$  — постоянной Больцмана, хотя сам Больцман ее формально не вводил (он измерял температуру в энергетических единицах, что по сути соответствует выбору  $k = 1$ ). Их современные зна-



чения:  $h = 6,626\,0693(11) \times 10^{-27}$  эрг · с (СГС) и  $k = 1,380\,6505(24) \times 10^{-16}$  (эрг/К). В настоящее время фундаментальный статус постоянной Планка не вызывает сомнения. Постоянная Планка–Больцмана  $k$  рассматривается одними учеными как переводной коэффициент между энергетическими и температурными единицами (Окунь, 2002; Varrow, 2002, p. 299), другими (Голубева, Суханов, 2005; Суханов, 2005, с. 1294) — как фундаментальная постоянная, такого же ранга, как  $c$  и  $h$ . В пользу последнего говорит то, что эта постоянная относится к классу  $C$  (метрологически независимых фундаментальных постоянных) и также как и постоянные  $c$  и  $h$  является естественной мерой некоторой физической величины (энтропии).

**1.2.4. Соотношение между планковскими постоянными ( $b$  и  $h$ ), ( $a$  и  $h/k$ ).** Важным для правильного понимания эволюции физики является выяснение соотношения между постоянными  $h$  и  $b$ , постоянными  $a$  и  $h/k$ . На первый взгляд кажется очевидной эквивалентность постоянных  $h$  и  $b$ , а также  $a$  и  $h/k$ . В самом деле, постоянные  $h$  и  $k$  — постоянные в законе излучения Планка  $E_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{ch/k\lambda\vartheta} - 1}$ , который в пределе для малых длин волн и температур переходит в закон Вина  $E_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} e^{-ch/k\lambda\vartheta}$ . В работах (Planck, 1899, 1900a) закон Вина записывался Планком в форме  $E_\lambda = \frac{2bc^2}{\lambda^5} e^{-ac/\lambda\vartheta}$ . Из сопоставления этих законов ясно, что с современной физической точки зрения  $h = b$ ,  $k = b/a$ . Таким образом, оказывалось, что если постоянная  $h$  эквивалентна  $b$ , то постоянная Планка была введена еще Вином или теми учеными, которые экспериментально проверяли этот закон. Отталкиваясь от этой точки зрения, автор данной книги исследовал статьи по теории теплового излучению 1896–1900 годов, численно рассчитывая вслед за авторами те постоянные, которые фигурировали в законах. Однако расчеты постоянных в законе Вина и Планка, как оказалось, носили *математически качественное отличие* (брались разные интегралы, причем в случае закона Планка довольно сложный, к тому же возникала необходимость решать и трансцендентное уравнение), что наглядно свидетельствовало, что  $h \neq b$ ,  $k \neq b/a$  в принципе. Впервые принципиальное отличие этих постоянных было выявлено еще в 1970 г. немецким историком физики Г. Кангро и опубликовано в ссылке к своей книге (Kangro, 1970, S. 145–147). Дело в том, что постоянные  $a$  и  $b$  рассчитывались Планком исходя из представления о законе Вина как универсальном законе излучения, а постоянные  $h$  и  $k$  исходя из универсальности *другого* закона излучения — Планка. В результате выражения постоянных  $b$  и  $h$  через эмпирические постоянные Стефана–Больцмана  $\sigma$  и смещения Вина  $c_m$  содержали *разные коэффициенты пропорциональности*. Это же касается и постоянных  $b/a$  и  $k$ . Нетрудно выразить в обоих случаях расчетные формулы для  $b$

и  $h$ :  $b = \frac{\sigma}{12\pi c^2} c_m^4 5^4$  и  $h = \frac{\sigma}{12\pi c^2 \varepsilon} c_m^4 \beta^4$ , где  $\varepsilon = \frac{\pi^4}{90} = 1,0823$ ,  $\beta = 4,9651$ . Следовательно, соотношение между постоянными:  $b = \varepsilon(5/\beta)^4 h = 1,113h$ . Аналогично, получаются и следующие соотношения:  $a = (5/\beta)h/k = 1,007h/k$ ,  $b/a = \varepsilon(5/\beta)^3 k = 1,105k$ . Таким образом, постоянные  $b$  и  $h$  даже теоретически различаются на 11,3%, постоянные  $a$  и  $k/h$  — на 0,7%, постоянные  $b/a$  и  $k$  на 10,5%.

Кроме этого при расчетах своих постоянных  $h$  и  $k$  в октябре-декабре 1900 г. М. Планк использовал другие численные значения эмпирических постоянных  $\sigma$  и  $c_m$ , чем при расчетах постоянных  $a$  и  $b$  в 1899 г. Это частично компенсировало теоретическое отличие численных значений постоянных  $b$  и  $h$ ,  $a$  и  $h/k$ . Различие в экспериментальных данных приводило к увеличению значения постоянной Планка  $h$  в  $\frac{\sigma'}{\sigma} \left(\frac{c'_m}{c_m}\right)^4 = \frac{0,0731}{4,19 \cdot 0,01763} \left(\frac{0,2940}{0,2891}\right)^4 = 1,058$  раз. Таким образом, реальное 5% различие значений постоянных Планка  $b = 6,885 \cdot 10^{-27}$  эрг · с (май 1899 г.) и  $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$  эрг · с (декабрь 1900 г.) связано, во-первых, с различными законами излучения (уменьшение на 11%), и, во-вторых, с различными экспериментальными значениями постоянных  $\sigma$  и  $c_m$  (увеличение на 6%).

Окончательно, соотношение между планковскими постоянными 1899 г. и 1900 г. выглядит так:

$$b = \underbrace{\frac{\pi^4}{90} \cdot \frac{5^4}{\beta^4}}_{\text{теоретический множитель}} \times \underbrace{\frac{4,19 \cdot 0,01763}{0,0731} \left(\frac{0,2891}{0,2940}\right)^4}_{\text{экспериментальный множитель}} h = 1,113 \times 0,945 \cdot h = 1,052 \cdot h.$$

теоретический множитель      экспериментальный множитель

Как видим, в соотношение между  $b$  и  $h$  входит не только экспериментальный множитель, но и теоретический.

В историко-научной литературе постоянные  $b$  и  $h$  обычно просто отождествляются (например, это делает М. Джеммер в фундаментальном исследовании “Эволюция понятий квантовой механики”). Удивительно то, что первым начал отождествлять эти постоянные не кто иной, как сам М. Планк. В октябре 1901 г. М. Планк публикует в “Annalen der Physik” “Дополнение” к статье 1900 г. “О необратимых процессах излучения” в связи с изменением закона излучения. Он приводит свой новый закон излучения и соответствующий новый закон для энтропии. Затем он показывает, что при предельном переходе этот новый закон для энтропии переходит в закон для энтропии, соответствующий закону излучения Вина, отсюда “путем сравнения

обоих последних выражений для  $S$  получается  $h = b$  и  $k = b/a$ . Следовательно, делает вывод Планк, поскольку  $b = 6,885 \cdot 10^{-27}$  эрг · с, то  $h = 6,885 \cdot 10^{-27}$  эрг · с. Но, отмечает Планк, рассчитанное ранее им значение  $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$  эрг · с. Планк видит объяснение различия между численными значениями этих постоянных только в различиях в экспериментальных данных: “Расхождение между числами, — считает Планк, — соответствует разбросу между измерениями различных наблюдателей и приблизительно отображает имеющуюся еще к настоящему времени неопределенность” (Планк, 1901с, с. 274). Этот вывод Планка представляется парадоксальным, учитывая что вся квантовая революция в 1899–1901 гг. происходила, главным образом, благодаря его же собственным усилиям. Этот вывод Планка демонстрирует, что год спустя он уже модернизировал реальную историю науки на основе логической конструкции новой физической картины мира, основанной на универсальности нового закона излучения.

Таким образом, хотя по сути история постоянной Планка начинается с доклада Планка 18 мая 1899 г., с формально-исторической точки зрения только в декабре 1900 г. появилась постоянная, которая эквивалентна современной постоянной Планка. Численные значения первоначально предложенных Планком постоянных  $a$  и  $b$  формально отличаются от постоянных  $h/k$  и  $h$  на безразмерные математические множители из-за различия законов излучения Вина и Планка. Таким образом, с физической точки зрения  $h = b$ ,  $a = hc/k$ , а с историко-физической  $b = \varepsilon(5/\beta)^4 h$ ,  $a = (5/\beta)hc/k$ ,  $b/a = \varepsilon(5/\beta)^3 k/c$ .

Соотношение между теориями и постоянными, как элементами этих теорий, можно выразить в виде следующей схемы:

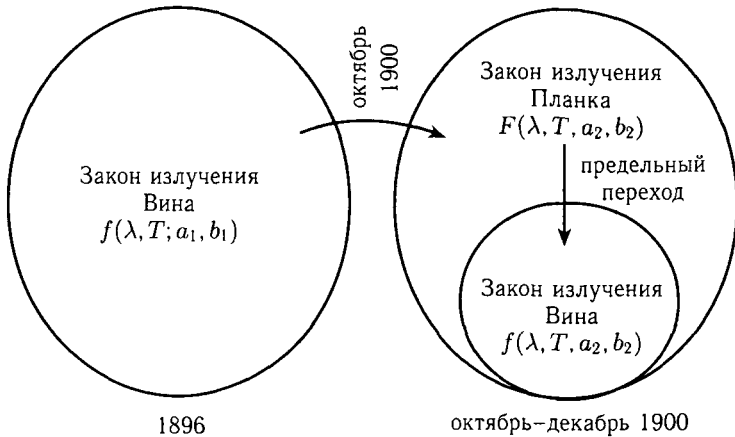


Рис 1.2.4. Соотношение между элементами двух теорий при переходе от закона излучения Вина к закону Планка

Значение этого выходит за рамки данного случая. Во-первых, это приводит к пониманию отличия закона Вина, который рассматривался как универсальный (1896–1900), и закона Вина, являющегося предельным случаем закона Планка (функциональная зависимость та же, но постоянные имеют другие численные значения, отличающиеся не только экспериментально, но и теоретически). Отсюда вытекает необходимость переосмысления принципа соответствия, который опирался на эквивалентность закона излучения Вина до его обобщения и закона Вина как предельного случая закона Планка. При предельном переходе элементы теории  $a_2, b_2, \dots$  сохраняются (что и было отмечено Планком) (правая часть схемы). Однако, совершенно очевидно, что теория с законом излучения Вина, понимаемым как универсальный закон (левая часть схемы), и теория с законом Вина, как частным случаем другого универсального закона (закона Планка) (правая нижняя часть схемы) *не эквивалентны*, поскольку не эквивалентны элементы этих теорий:  $a_1 \neq a_2, b_1 \neq b_2, \dots$ . Это явление несомненно имеет общий характер при обобщении тех или иных теорий, если в них фигурируют физические постоянные. Кратко это можно выразить так: при обобщении теории она не просто включается в более общую теорию без всяких изменений, на самом деле, она несколько деформируется. При этом более “живучими” оказываются эмпирические элементы (в данном случае постоянные в законе Стефана-Больцмана и законе смещения Вина) и, следовательно, в данном аспекте они оказываются более универсальными, чем элементы теоретических законов, которые при обобщении теории изменяются. С точки зрения обоснования ситуация обратная — именно более общие теоретические законы являются настоящим обоснованием частных эмпирических законов и, следовательно, эмпирические постоянные, которые в них фигурируют, получают свое обоснование через постоянные более общих законов.

Во-вторых, это открывает возможность сопоставления постоянных в любых законах излучения, предлагавшихся в 1890-е гг., с постоянными  $h, k$  и  $c$  (если эти законы удовлетворяют законам Стефана-Больцмана и смещения Вина). Таким образом, у нас возникает возможность частичного сравнения различных теорий, которые включают функционально различные законы, по крайней мере, через постоянные, которые в них фигурируют.

В-третьих, мы можем столкнуться с аналогичными случаями и при дальнейшем прогрессе физики. Если бы закон теплового излучения Планка был открыт уже после появления постоянной  $h$  (например, из обоснования закона фотоэффекта или теории атома), то возникла бы ситуация, что постоянные  $h$  и  $k$  появились в законе излучения Вина вместе с двумя эмпирическими множителями, происхождение которых было бы неясно. Однако эти эмпирические множители автоматически исчезли бы при переходе от закона Вина к закону Планка. С такой ситуацией мы можем столкнуться и в дальнейшем в других областях физики. Следовательно, поскольку постоянные  $h$  и  $k$  уже достаточно

хорошо обоснованы, то появление в тех или иных физических законах наряду с ними неких эмпирических безразмерных постоянных может свидетельствовать о том, что эти законы должны быть несколько изменены, чтобы безразмерные эмпирические коэффициенты исчезли или оказались комбинациями математических постоянных.

Пользуясь методикой Кангро, примененной им к анализу соотношения между постоянными  $b$  и  $h$ , можно получить теоретические соотношения между постоянными различных законов теплового излучения, предлагавшихся в 1890-е гг. (см.: *Томилин*, 2003а). Однако поскольку это имеет лишь формально-историческое значение, мы не будем здесь приводить эти соотношения. Отметим лишь, что в законах общего вида

$K_\lambda = c_1 \lambda^{-\gamma} T^\delta \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda^\alpha T^\mu}}$ , в которых показатель  $\gamma=5$  (Пашена, Вина, Луммера-Янке) коэффициент  $c_1$  в законе излучения пропорционален постоянной Планка  $h$ , а в законах с  $\gamma=4$  (Луммера-Прингсгейма, Рэлея) этот коэффициент пропорционален постоянной Больцмана  $k$ . В законе, предложенном Тизеном, который является средним геометрическим закона Вина и Рэлея-Джинса, этот коэффициент пропорционален  $\sqrt{hk}$ .

**1.2.5. Кванты света Эйнштейна.** Выражение для “элемента энергии”  $\varepsilon = h\nu$  использовалось М. Планком в 1901 г. в работах по теории теплового излучения (*Планк*, 1901а, с. 265).

В марте 1905 г. А. Эйнштейн опубликовал статью “Об одной эвристической точке зрения (heuristischen Gesichtspunkt), касающейся возникновения и превращения света”, в которой дал объяснение фотоэффекта с помощью гипотезы “квантов света” (*Эйнштейн*, 1905а). Фактически Эйнштейн развивал квантовый подход, предложенный Планком, однако Эйнштейн ни разу не использовал в явном виде постоянную Планка, выражая ее через три другие постоянные — газовую постоянную  $R$ , постоянную Авогадро  $N$  и постоянную в законе излучения  $\beta$ . Энергию квантов света, которую сейчас, следуя Планку, мы выражаем в виде  $h\nu$ , Эйнштейн записывал в виде  $\frac{R}{N} \beta \nu$ . В этом отразилось, очевидно, некоторое недоверие к постоянной Планка, характерное не только для Эйнштейна, но для многих ученых того времени. В следующей статье 1906 г. Эйнштейн по-прежнему использовал вместо постоянной Планка комбинацию  $\frac{R}{N} \beta$  (*Эйнштейн*, 1906). Впервые постоянная Планка  $h$  появилась у Эйнштейна лишь в статье 1909 г., причем в этой статье Эйнштейн предположил, что она должна сводиться к комбинации  $e^2/c$  (о других попытках редукции этих постоянных друг к другу см.: *Томилин*, 2001). Тем не менее, несмотря на все эти нюансы (игнорирование постоянной Планка и т. п.) сама идея Эйнштейна, идущая в развитие квантовой программы, была настолько ценной, что Эйнштейну вполне заслуженно была присуждена Нобелевская премия именно за работы по объяснению фотоэффекта.

Эйнштейн также отметил, что “теория Планка в действительности неявно использует упомянутую выше гипотезу световых квантов” и “Планк в своей теории излучения ввел в физику новый гипотетический элемент — гипотезу световых квантов”.

В 1926 г. американский физик Г.Н. Льюис ввел термин “фотон” для обозначения возбужденного излучением атома (*Lewis, 1926; Джеммер, 1966, с. 41*). Новый термин с подачи А. Комптона удивительно быстро получил признание вместо термина “квант света”: уже год спустя очередной пятый Сольвеевский конгресс вошел в историю под названием “Электроны и фотоны” (*Electrons et photons, 1927*). Очевидно, что ученые нуждались в простом термине для обозначения кванта электромагнитного излучения, поэтому “фотон” и утвердился в научной терминологии, как видно из хода дискуссии на этом конгрессе.

**1.2.6. Постоянная Планка и постулаты Бора.** Решающий шаг в направлении от попыток редукции постоянной Планка  $h$  к признанию ее фундаментального статуса связан с выяснением роли этой постоянной в строении атомов, прежде всего с теорией атома Бора, предложенной в 1913 г.

В 1911 г. в результате опытов Э. Резерфорда стало ясно внутреннее строение атома, в центре которого находится положительно заряженное ядро, а отрицательно заряженные электроны располагаются на периферии (на “орбитах”) (*Резерфорд, 1972, с. 238*). До этого считалась общепринятой модель В. Томсона (Кельвина) и Дж.Дж. Томсона, согласно которой атом представлял собой положительно заряженную сферу, внутри которой были заперты электроны (*Thomson W., 1902; Thomson J., 1903*). Модель Резерфорда, предложенная в мае 1911 г., получила название “планетарной”, так как напоминала строение планетной системы. До Резерфорда такого рода планетарные модели предлагали Б.Н. Чичерин, на основе анализа периодической системы элементов Менделеева (1888/89 и 1892), Дж. Стони, Ж. Перрен (1901), Х. Нагаока (дек. 1903), Дж. Никольсон (1912)<sup>1)</sup>, но модель Э. Резерфорда получила наибольшую известность, так как прямо основывалась на опытах по рассеянию атомами  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц. Теоретическое обоснование планетарной модели привело к созданию теории атома Бора, а затем в середине 1920-х гг. к развитию квантовой механики, в которой ключевую роль играет постоянная Планка.

Модель атома Резерфорда очевидно противоречила двум важнейшим теориям – механике и электродинамике: согласно им не может существовать стационарных орбит, так как электрон должен непрерывно излучать энергию и в течение краткого времени “упасть” на ядро. Выход из этого противоречия был найден Н. Бором, перешедшим в лабораторию Э. Резерфорда в 1912 г. Бор добавил к законам классической механики и электродинамики пять дополнительных предположений

<sup>1)</sup> см.: *Спасский, 1977, ч. 2, с. 228; Джеммер, 1966, с. 72–82*

(постулатов), основанных на внедрении в теорию атома дискретных элементов, связанных с фундаментальной ролью постоянной Планка: 1) энергия испускается (или поглощается) не непрерывным образом, а дискретно и лишь при переходе из одного “стационарного” состояния в другое; 2) законы механики справедливы только в “стационарных” состояниях и несправедливы для переходов между ними; 3) излучение, испускаемое во время перехода системы между двумя стационарными состояниями, монохроматично, а соотношение между энергией и частотой имеет вид  $E = h\nu$ , где  $h$  — постоянная Планка; 4) стационарные состояния простой системы с одним электроном определяются условием, согласно которому отношение полной энергии, испущенной при образовании конфигурации, к частоте обращения электрона является целым кратным величины  $h/2$ , при круговой орбите это “эквивалентно предположению, что момент импульса электрона, обращающегося вокруг ядра, равен целому кратному величины  $h/2\pi$ ”; 5) состояние любой атомной системы, “в котором испущенная энергия максимальна, определяется из условия, что момент импульса каждого электрона относительно центра его орбиты равен  $h/2\pi$ ” (Бор, 1913, с. 147–148).

Ключом для создания теории атома Бора стали спектроскопические формулы Ридберга и Ритца. Первоначально Бор недооценивал значимость спектроскопических исследований для строения атома. Лишь после того, как спектроскопист Г.М. Хансен в феврале 1913 г. поставил перед ним задачу объяснения спектральных закономерностей, обнаруженных Ридбергом и Ритцем, Бор обратил свое внимание на их работы “Как только я увидел формулу Бальмера, — отметил впоследствии Бор, — для меня сразу все стало ясно” (Джеммер, 1966, с. 86). “На этой основе, — писал Н. Бор, — сама собой напрашивалась идея о том, что при любом изменении энергии атома мы сталкиваемся с процессом перехода между двумя стационарными квантовыми состояниями и что любое излучение, участвующее в таком процессе перехода, проявляется в форме фотона. В самом деле, так называемые квантовые постулаты сразу же позволяли дать интерпретацию комбинационного принципа, отождествив численные значения каждого спектрального терма, умноженные на  $hc$ , с энергией возможного стационарного состояния атома” (Бор, 1970/71, т. 2, с. 474–475).

В своей статье, которую М.Джеммер называет “эпохальной”, Бор вывел формулу Бальмера тремя способами, а также получил важнейшие атомные постоянные, такие как потенциал ионизации, оптические частоты, линейные размеры атома водорода и постоянную Ридберга как комбинацию постоянных  $h$ ,  $m_e$  и  $e$ . В истории физики теория атома Бора оказалась одной из наиболее продуктивных концепций, приведшей к редукции всех эмпирических атомных постоянных к нескольким более фундаментальным, таким как  $h$ ,  $m_e$ ,  $m_p$  и  $e$ . Именно обоснование эмпирических постоянных стало наиболее убедительным аргументом в пользу принятия теории атома Бора. Например, Эйнштейн на одном из физических коллоквиумов в 1913 г. в ответ на возражения Лауэ

против теории Бора отметил: “Я не думаю, чтобы абсолютную величину константы Ридберга можно получить чисто случайным образом” (Джеммер, 1966, с. 93).

Постулаты Бора были предвосхищены Дж. Никольсоном, который в июне 1912 г. предположил связь спектральных серий с постоянной Планка, причем он предполагал дискретность моментов импульса (там же, с. 81). С идеями Никольсона Бор познакомился к концу 1912 г. Также постулаты Бора были предвосхищены П. Ланжевенем в теории магнетизма в 1904 г. В 1913 г. квантование момента импульса использовал П. Эренфест в теории теплоемкости (там же, с. 89).

Осенью 1913 г. на страницах “Nature” развернулась дискуссия между Эвансом, Фаулером и Бором в связи с отождествлением Бором линий Пикеринга как линий гелия; в ответ на замечания Фаулера о некотором расхождении теории и эксперимента, Бор уточнил формулу для постоянной Ридберга с учетом конечного отношения массы электрона и массы ядра, что привело к очень точному соответствию.

Бор понимал, насколько его постулаты противоречили классической физике, представлявшей собой “целостную совокупность концепций”, и видел дальнейшее развитие не в классическом истолковании квантовых эффектов, не в некоторой модернизации классической физики с учетом квантовых элементов, а в создании новой целостной концепции. “Со временем мы сможем отыскать некую целостность и в новых идеях”, — отмечал Н. Бор (там же, с. 95). Анализ соотношения между этими целостными концепциями и привел к утверждению принципа соответствия, согласно которому классическая физика сохраняет свое значение как предельный случай современной физики.

\* \* \*

В дальнейшем фундаментальное значение постоянной Планка прояснилось в связи с открытием дуализма волна–частица, перестановочного соотношения Борна–Йордана, соотношений неопределенностей Гейзенберга и создания волновой и матричной механики.

В 1924 г. Луи де Бройль высказал предположение, что с каждой частицей связано волновое движение с длиной волны  $\lambda = h/mv$ . Ранее корпускулярно-волновой дуализм усилиями А. Эйнштейна и И. Штарка был установлен для фотонов. Экспериментальное подтверждение идеи де Бройля было получено К. Дэвиссоном и Л. Джермером в 1927 г.

В 1925 г., развивая идеи В. Гейзенберга, М. Борн совместно с П. Йорданом получил соотношение:  $pq - qp = \frac{h}{2\pi i} \mathbf{1}$ , где  $\mathbf{1}$  — единичная матрица. Множитель  $h/2\pi i$  был получен Борном с использованием принципа соответствия. Это уравнение, как выяснил Борн, является единственным фундаментальным уравнением, в которое входит постоянная Планка  $h$ . “Я никогда не забуду того глубокого волнения, которое я пережил, когда мне удалось сконцентрировать



идеи Гейзенберга о квантовых условиях в виде таинственного условия  $pq - qp = h/2\pi i$ , — вспоминал М. Борн (Джеммер, 1966, с. 209).

Продолжение этой статьи было написано совместно с В. Гейзенбергом (“О квантовой механике. II”, 16 нояб. 1925) и стало первым подробным изложением основ квантовой механики. Перестановочное соотношение (“Vertauschungsrelation”)  $pq - qp = \frac{h}{2\pi i} 1$  было ими постулировано и охарактеризовано как “фундаментальное квантовомеханическое соотношение” (“Fundamentale quantenmechanische Relation”).

В статье В. Гейзенберга “О наглядном содержании квантотеоретической кинематики и механики” (23 марта 1927 г.) были обоснованы соотношения неопределенностей для координаты и импульса  $p_1 q_1 \sim \sim h$ , а также для энергии и времени  $E_1 t_1 \sim h$  (Гейзенберг, 1927). Оказалось, что классические понятия могут быть определены точно и для объектов микромира, однако одновременное точное определение двух канонически сопряженных величин  $p$  и  $q$  (координата и импульс, энергия и время) невозможно, поскольку существует принципиальная неопределенность  $\Delta p \Delta q \geq \hbar/2$ .

Таким образом, в ходе череды фундаментальных открытий начала XX в., выяснения роли  $h$  в структуре излучения (Эйнштейн, 1905а), структуре вещества (Бор, 1913), корпускулярно-волновом дуализме (Эйнштейн, Л. де Бройль, А. Комптон), и последовавшем за этим создании волновой и квантовой механики и выяснении важнейших принципов, на которых она основана, постоянная Планка окончательно заняла фундаментальное место, наряду со скоростью света, в физической картине мира. Позже было открыто и термодинамическое соотношение неопределенностей между энергией и обратной температурой:  $\Delta E \cdot \Delta\left(\frac{1}{T}\right) \geq k$ , что прямо свидетельствует в пользу фундаментальной роли постоянной Больцмана  $k$  (см.: Суханов, 2005, с. 1331).

## Глава 1.3

### Элементарный заряд

Основная парадигма, на которую опиралось исследование в XVIII–XIX вв. электрических явлений, заключалась в подходе к электричеству как к некой непрерывной субстанции. Наибольшее предпочтение в конце XVIII в. получила гидродинамическая аналогия и многие ученые рассматривали модель двух “электрических жидкостей” (соответствующих положительным и отрицательным зарядам) как реальность. Именно на этом пути удалось достичь наибольшего прогресса, вершиной которого стало установление законов классической электродинамики Дж.К. Максвеллом в 60-е гг. XIX в.

Дискретная парадигма начала активно внедряться в естествознание с концепцией атомарного строения материи, оказавшейся продуктивной

и приведшей к революции в химии. Открытие в конце XVIII в. химического действия электричества оказалось важным методом исследования структуры вещества. Исследование электрохимических явлений И. Берцеллиусом, Т. Гротгусом, Х. Дэви, де ля Ривом, М. Фарадеем и др. — явлений, в которых проявлялись и химические, и физические закономерности, привело к тому, что это направление оказалось точкой внедрения дискретной парадигмы и в физику. Законы электролиза, установленные М. Фарадеем в 1832–34 гг., в сочетании с концепцией атомного строения вещества неизбежно вели к выводу о дискретной структуре электричества.

**1.3.1. Постоянная Фарадея.** Суть основного закона электролиза заключается в том, что *количество вещества, выделившееся на одном из электродов в результате разложения электролита в процессе электролиза, пропорционально электрическому заряду, прошедшему через электролит.* Коэффициент пропорциональности зависит от выбора единиц измерения количества вещества и количества электричества (заряда). Если измерять количество вещества количеством структурных элементов (ионов)  $n$ , то  $n$  точно равно электрическому заряду в единицах элементарного заряда:  $n = Q/e$  независимо от того, ионы каких химических элементов участвовали в процессе электролиза. Если количество вещества измерять в молях (1 моль определяется как число атомов в 12 г углерода  $C^{12}$ , т. е. как  $N_A$  атомов, где  $N_A$  — число Авогадро,  $N_A = 6,0221415(10) \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ ), то число молей  $n_\mu$  пропорционально заряду:  $n_\mu = Q/F$ , коэффициент пропорциональности  $F$  универсален для всех веществ и носит название постоянной Фарадея  $F = e \cdot N_A = 6,0221415(10) \cdot 10^{23}$  ( $e \cdot$  моль $^{-1}$ ) = = 96485,3383(83) Кл · моль $^{-1}$  (сам Фарадей ее не вводил). Если количество вещества, измерять в единицах массы, то масса вещества, выделившегося на одном из электродов, также пропорциональна заряду:  $m = k_i \cdot Q$  (первый закон Фарадея), но коэффициенты  $k_i$  — т. н. электрохимические эквиваленты, являются специфическими характеристиками отдельных химических элементов. Вторым законом Фарадея называется пропорциональность электрохимических и химических эквивалентов вещества:  $k_i = A_i/F$ , где  $A_i$  — химический эквивалент вещества  $A_i = \mu/n_e$ ,  $\mu$  — молярная масса,  $n_e$  — заряд иона.

В июне — декабре 1833 г. М. Фарадей исследовал явление электролиза разных веществ (пятая и седьмая серии “Экспериментальных исследований по электричеству”). Последняя седьмая серия была доложена М. Фарадеем в конце января — начале февраля 1834 г. Анализируя результаты опытов Т. Гротгуса, И. Берцеллиуса и др. ученых, а также на основе собственных опытов, М. Фарадей пришел к выводу: “Что бы собой ни представляло разлагаемое вещество: воду, растворы солей, кислоты, расплавленные тела и т. д., — для одного и того же количества электричества сумма электрохимических действий есть также величина постоянная, т. е. она всегда эквивалентна стандарт-

ному химическому действию, основанному на обычном химическом средстве” (п. 505) (Фарадей, 1947, т. 1, с. 201).

М. Фарадей также отмечал прямое соответствие между количеством электричества (зарядом) и количеством вещества: “<...> Количество электричества, которое будучи естественным образом связано с частицами вещества, сообщает им их способность к соединению — это количество, проявляясь в виде тока, может разделять соответствующие частицы, выводя их из состояния соединения; иными словами, *электричество, которое разлагает определенное количество вещества, равно тому, которое выделяется при разложении того же количества*” (п. 868) (там же, с. 343).

Обобщая наблюдения явления электролиза разных веществ, Фарадей пришел к соответствию между химическим средством атомов и электрическим действием: “Если принять атомную теорию и соответствующие ей выражения, то атомы тел, эквивалентные друг другу в отношении их обычного химического действия, должны содержать равные количества электричества, естественно связанного с ними” (п. 868) (там же, с. 344).

Поскольку единицы количества электричества в то время не существовало, Фарадей предложил ее определить именно *по электрохимическому действию тока*.

**1.3.2. Элементарный заряд.** В 1870–80 гг. ряд ученых на основе анализа явления электролиза пришли к выводу о квантовании электрического заряда. Так, в 1871 г. В. Вебер отмечал, что “При всеобщем распространении электричества допустимо принять, что с каждым атомом вещества связан электрический атом” (Weber, 1871).

В 1873 г. Дж.К. Максвелл опубликовал свой знаменитый “Трактат об электричестве и магнетизме”, в котором все известные электромагнитные явления ему удалось успешно описать дифференциальными уравнениями с частными производными. Все понятия максвелловской электродинамики, как и понятия в других областях классической физики, рассматривались как математически непрерывные величины. Единственное явление, которое Максвеллу не удалось описать на основе такого подхода, был электролиз. Для объяснения установленного эмпирически закона электролиза ему пришлось ввести понятие “молекулы электричества”, т. е. предположить дискретную структуру электрического заряда. Электролизу Максвелл посвятил 4-ю главу и несколько параграфов 2-й части трактата. Максвелл отмечает, что теория Фарадея, основанная на том, что электрический ток является потоком “составляющих электролит материальных компонент” (“молекул”), действительно, объясняет появление электролитической проводимости при переходе твердых тел в жидкое состояние (растворы или расплавы). Тем не менее, Максвелл отмечает, что сама “природа электрического тока нам непонятна” и если предположить, что ток в электролите есть просто “ток переноса” электрического заряда молекулами ионов, “заря-

женными некоторыми определенными количествами электричества”, то “это заманчивое предположение ставит нас на очень скользкую почву”. Максвелл делает вывод, что тогда мы должны принять, что заряды всех катионов одинаковы и заряды анионов численно равны зарядам катионов, но противоположны по знаку.

Далее Максвелл формулирует закон электролиза и предполагает существование *естественной единицы электричества*: “Мы до сих пор не знаем, сколько молекул содержит электрохимический эквивалент любого вещества, но молекулярная теория, существующая в химии и подкрепляемая многими физическими соображениями, предполагает, что число молекул в электрохимическом эквиваленте есть одна и та же величина для всех веществ. Мы можем поэтому в духе спекуляций молекулярной теории предположить, что число молекул в одном электрохимическом эквиваленте равно неизвестному в настоящее время числу  $N$ , способ определения которого мы, возможно, найдем. Тогда каждая молекула, будучи освобождена из соединения, растает с зарядом, величина которого равна  $1/N$  и который положителен для катиона и отрицателен для аниона. Это определенное количество мы будем называть молекулярным зарядом. Если бы величина его была известна, это была бы наиболее естественная единица электричества”<sup>1)</sup>. (По сути Максвелл здесь словесно описывает известный закон электролиза  $F = eN_A$ .)

Далее Максвелл анализирует электрохимические закономерности действия тока: “...Мы должны ответить на вопрос, почему заряд, созданный таким образом на каждой молекуле, имеет фиксированную величину, и почему при соединении молекулы хлора с молекулой цинка молекулярные заряды оказываются такими же, как и при соединении молекулы хлора с молекулой меди, хотя электродвижущая сила между хлором и цинком много больше, чем между хлором и медью. Если заряд молекул объясняется действием контактной электродвижущей силы, почему тогда разные значения электродвижущей силы дают в точности равные заряды?”

Чтобы объяснить эту закономерность Максвелл постулирует существование “молекулы электричества”: “Предположим, однако, что мы перескочили через эту трудность, просто провозгласив факт постоянства молекулярного заряда. Для удобства описания мы назовем этот постоянный молекулярный заряд *одной молекулой электричества*. Эта фраза, хотя она сама по себе и груба и не гармонирует с остальным содержанием этого трактата, позволит нам по крайней мере четко установить то, что известно об электролизе, и осознать предстоящие трудности” (*Ibid*, p. 312).

Несмотря на продуктивность введения дискретности электрического заряда, для Максвелла это остается лишь удобным приемом для описания законов электролиза: “Эта теория молекулярных зарядов

<sup>1)</sup> *Maxwell*, 1873, vol. 1, p. 311; *Максвелл*, 1873/91, т. 1, с. 307–308.

может рассматриваться как некоторый метод, помогающий нам запомнить множество фактов, относящихся к электролизу. Однако кажется крайне невероятным, что мы сохраним в какой-либо форме теорию молекулярных зарядов после того, как придем к пониманию истинной природы электролиза, ибо тогда у нас будут надежные основания, на которых можно построить верную теорию электрических токов и тем самым избавиться от этих предварительных теорий” (там же, с. 309).

Таким образом, Максвелл для описания эмпирически установленных закономерностей химического действия электрического тока временно отступает от основной парадигмальной установки классической физики, на которой был основан и его собственный трактат, — применении физических понятий, являющихся математически непрерывными величинами. В дальнейшем, в 1899 г. М. Планк аналогично временно отступает от той же основной парадигмальной установки классической физики, введя “квант энергии” с целью обоснования эмпирически установленного закона теплового излучения. Однако со временем эти временные гипотезы не исчезли, а нашли свое физическое обоснование и, как оказалось, определили основное направление развития физики.

Гипотеза Максвелла о наиболее естественной единице электричества оказалась провидческой — дальнейшее развитие физики привело к утверждению квантованности электрического заряда. В 1874 г. ирландский физик Дж. Стони (Стоней) в специальном докладе, посвященном выбору наиболее естественной системы единиц (см. п. 3.4.5), предложил выбрать эту величину как единицу электрического заряда и впервые численно рассчитал ее значение. Учитывая временную близость идей Максвелла и Стони, а также их тесную коммуникацию в комиссии по мерам, их обоих можно рассматривать соавторами этой идеи; последовательно же отстаивал ее Дж. Стони.

Идея квантованности заряда была изложена Стони в 1874 г. в докладе на заседании секции Британской Ассоциации по развитию науки в Белфасте в рамках более глобальной идеи естественной системы единиц. Текст доклада “О физических единицах Природы” был опубликован лишь 16 февраля 1881 г. в “Scientific Proceedings” Королевского Дублинского общества и переопубликован в том же году в “Philosophical Magazine” (Stoney, 1874/81). Смысл статьи заключался в предложении первой *естественной системы единиц* (т. е. основанной только на фундаментальных физических постоянных, выбранных в качестве единиц измерения). В качестве таких естественных единиц он предложил выбрать отношение между электромагнитными и электростатическими единицами электричества  $V$  (т. е. скорость света  $c$ ), гравитационную константу  $G$  и количество электричества, приходящееся на одну разорванную химическую связь в явлении электролиза — т. е. элементарный заряд  $e$  (см. подробнее п. 3.4.5). Ценность доклада Стони заключалась также и в том, что в нем была впервые вычислена величина элементарного электрического заряда. Для расчета Стони фактически использовал соотношение  $F = eN_A$ , которое он называет “законом

Фарадея” (ныне оно иногда называется соотношением Гельмгольца). Дж. Стони получил значение  $10^{-20}$  “ампер”. Историки расходились во мнении какому современному значению соответствует значение заряда Стони ( $10^{-19}$  или  $10^{-20}$  Кулон). Так, Е.А. Будрейко считал, что применявшаяся в то время единица измерения заряда ныне соответствует единице 10 “Кулон”, т.е. полученное Стони значение соответствует  $10^{-19}$  Кл (современное значение элементарного заряда  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл) (Будрейко, 1957). То же считал и Б.И. Спасский (по его мнению, Стони получил значение  $10^{-20}$  СГСМ, а современное значение элементарного заряда в системе единиц Стони  $1,6 \cdot 10^{-20}$  СГСМ) (Спасский, 1977, ч. 2, с. 124). Другой историк науки А.Н. Вальцев, специалист по истории открытия элементарных частиц, полагал, что величина элементарного заряда, определенная Стони, соответствует  $10^{-20}$  Кл. Этого же мнения придерживается большинство историков. На это же указывают следующие факторы:

1) последующая работа Стони, где он приводит то же самое значение  $10^{-20}$  ед. системы Ома, а затем переводит его в систему СГС и получает значение  $0,3 \cdot 10^{-10}$  эл.-ст. ед., отличающееся в 16 раз от современного значения заряда в системе СГСЭ  $4,8 \cdot 10^{-10}$  эл. ед. (Stoney, 1891).

2) в статье 1894 г. Стони сам указывает соответствие его “ампера” современным единицам *ампер × секунда* (Stoney, 1894, p. 419).

3) если мы проанализируем расчет Стони, то можно заключить следующее: Стони завысил число частиц в единице объема (число Лошмидта) в 37,2 раза, эта неточность перешла в определенную им массу молекулы водорода  $10^{-25}$  г (т.е. в 32 раза меньше реального), затем в результате округления ошибка уменьшилась в 2 раза, поэтому окончательный результат Стони и оказался отличающимся в 16 раз от истинного.

Последнее несколько не умаляет значения его работы, так как это была пионерская работа, направленная на внедрение идеи метрологии, основанной на константах природы, с первой оценкой элементарного заряда с точностью до порядка. Таким образом, Стони впервые оценил величину элементарного электрического заряда и получил значение в 16 раз меньшее истинного. Идеи Стони были оценены значительно позже, с развитием квантовой метрологии.

Значительно более широкое распространение получила идея квантования электрического заряда, высказанная в 1881 г. Г. Гельмгольцем на основе аналогичных соображений в речи посвященной памяти Фарадея: “Если применить эту гипотезу к электрическим процессам, то она в соединении с законом Фарадея, приводит к поразительным следствиям. Если мы допускаем существование химических атомов, то мы принуждены заключить отсюда далее, что также и электричество, как положительное, так и отрицательное, разделяется на определенные элементарные количества, которые играют роль *атомов электричества* (выделено мной — К.Т.)” (Гельмгольц, 1881, с. 124).

В 1891 г. Дж. Стони предложил термин “электрон” для обозначения минимального электрического заряда (Stoney, 1891; рус. пер. см.: Будрейко, 1957). Е.А. Будрейко считает, что термин “электрон” был предложен Стони ранее, в статье 1881 г., однако в этой статье Стони использовал термин “electrine” и лишь в статье 1891 г. “electron”. В 1894 г. Дж. Стони впервые использовал термин “электрон” прямо в названии статьи (Stoney, 1894). А.Н. Вьяльцев отмечает различие в использовании термина “электрон” в конце XIX в. (Вьяльцев, 1981, с. 47). Так, следуя Дж. Стони, В.Вин понимал под “электроном” именно квант электрического заряда (элементарный заряд). Дж. Лармор и Г. Лоренц “электронами” называли материальные носители квантов заряда, которые были тогда известны — ионы. В. Томсон использовал для обозначения ионов близкий термин “электроионы”.

В 1897 г. Э. Вихертом (Wiechert, 1897) и Дж.Дж. Томсоном (Thomson, 1897a,b) независимо была открыта частица, носитель элементарного электрического заряда, и название “электрон” было закреплено спустя некоторое время именно за частицей. Наибольшую известность получила работа Дж.Дж. Томсона, которая стала прямо ассоциироваться с “открытием электрона”. В 1906 г. Дж.Дж. Томсон получил за эти исследования Нобелевскую премию. Ч. Янг впоследствии назвал Томсона “человеком, который первым открыл дверь в физику элементарных частиц” (Янг, 1961, с. 5). Открытие электрона (как частицы) подробно исследовалось Р. Милликеном, С.И. Вавиловым, Д. Андерсоном, В.М. Дуковым, А.Н. Вьяльцевым, П. Дейлом и др. <sup>1)</sup>. К 100-летию открытия электрона были опубликованы сборник статей, посвященный этому событию (Electron, 1997), включавший, в частности, статью А. Пиппарда (Pippard, 1997); несколько юбилейных статей в журнале “European J. of Physics” (The electron, 1997), в том числе Н. Роботти, Л. Кокса и Г. Рехенберга <sup>2)</sup>; и др. статьи <sup>3)</sup>.

Еще в своем основополагающем докладе 14 декабря 1900 г. М.Планк, основываясь на связи между энтропией и вероятностью состояния одноатомного газа, установленной Больцманом, получил соотношение, связывающее постоянную Больцмана, постоянную Авогадро (в современных терминах) и газовую постоянную, откуда рассчитал постоянную Авогадро и, основываясь на законе Фарадея, рассчитал значение “элементарного кванта электричества”:  $4,69 \cdot 10^{-10}$  электростатических единиц, причем это значение оказалось, как выяснилось позже, существенно ближе к истинному  $4,8 \cdot 10^{-10}$  эл. ед., чем значения, найденные к тому времени экспериментаторами:  $1,29 \cdot 10^{-10}$  эл. ед. (Ф. Рихарц),  $6,5 \cdot 10^{-10}$  эл. ед. (Дж.Дж. Томсон)

<sup>1)</sup> Милликен, 1935; Вавилов, 1928а; Андерсон, 1964, Дуков, 1966; Вьяльцев, 1981, Dahl, 1997

<sup>2)</sup> Robotti, 1997; Cox, 1997; Rechenberg, 1997a.

<sup>3)</sup> Rechenberg, 1997b, Squires, 1997; Gerwar, Cousins, 1997; Falconer, 1997, Pais, 1997.

(Планк, 1900d, с. 257). В 1901 г. М.Планк опубликовал небольшую заметку “Об элементарном кванте материи и электричества”, в которой рассчитал массу атома водорода и также привел то же значение элементарного заряда:  $4,69 \cdot 10^{-10}$  эл.ст. единиц (Планк, 1901b, с. 270).

Приближение в дальнейшем экспериментальных значений к значению  $e$ , рассчитанному Планком, способствовало утверждению теории излучения Планка. Особенный вклад в измерение элементарного электрического заряда внес Р. Милликен, разработавший в 1906 г. метод масляных капель. В 1910 г. Милликен получил значение  $4,891 \cdot 10^{-10}$  эл. ед., а в 1913 г. —  $4,774 \cdot 10^{-10}$  эл. ед. (Millikan, 1913). Кроме этого, в 1911 г. Р. Миллиkenом в опытах с масляными каплями была доказана квантованность и положительного заряда. За измерение элементарного заряда и постоянной Планка при фотоэффекте Милликен получил Нобелевскую премию 1923 г. Современное значение элементарного электрического заряда (NIST, 2005):  $e = 4,80320440(15) \cdot 10^{-10}$  электростат. ед. (esu) в системе СИ:  $e = 1,60217653(14) \cdot 10^{-19}$  Кл. Подробный обзор различных опытов по определению элементарного заряда представлен в монографии А.Н. Вяльцева (Вяльцев, 1981).

Кратко укажем основные идеи, появившиеся в XX в. в связи с элементарным электрическим зарядом.

В 1905–1913 гг. появились гипотезы о редукции постоянной Планка к квадрату элементарного электрического заряда (М. Планк, Дж. Джинс, А. Эйнштейн, Г. Лоренц и др., в 1960-е гг. — П.А.М. Дирак). В 1909 г. А. Эйнштейн, в частности, полагал возможным модификацию максвелловской электродинамики за счет включения в нее элементарного кванта электрического заряда, надеясь вывести отсюда постоянную Планка и квантовые эффекты. Впоследствии, после создания квантовой механики, появились обратные идеи о редукции элементарного электрического заряда к комбинации постоянной Планка и скорости света (А. Зоммерфельд, М. Борн, М.П. Бронштейн и др.). Эти гипотезы оказались непродуктивными, поскольку были основаны на ошибочном анализе размерности, исключавшим заранее из анализа размерностей постоянную в законе Кулона (подробнее см.: Томилин, 2001, а также п. 2.2.1).

В 1910 г. венский физик Эренгафт, используя методику Милликена, но с частицами распыленного металла, меньшими по размеру, чем масляные капли в опыте Милликена, получил меньшие значения электрического заряда, чем заряд электрона. Это было объяснено Миллиkenом ошибкой в определении плотности металлов из-за их загрязнения. Но в 1914-15 годах Эренгафт опубликовал результаты экспериментов, которые говорили в пользу существования субэлектронов, имевших заряд меньше заряда электрона. Однако в результате опытов, поставленных Миллиkenом и др. учеными, результаты Эренгафта были полностью опровергнуты (Миллиken, 1935, с. 118–133). “С полной уверенностью можно утверждать, что в опытах Эренгафта нет ни малейшего указания на существование зарядов, меньших, чем электрон”, — сделал



вывод Р. Милликен (там же, с. 132). В 1913 г. опыты с измерением заряда металлических пылинок ставил А.Ф. Иоффе. Его вывод. “Металлы под влиянием света теряют отрицательный заряд не непрерывно, а скачками, отделенными друг от друга значительными промежутками времени. Величины зарядов, теряемых одной и той же частичкой, точно равны между собой” (Иоффе, 1913, с. 58).

Окончательно прояснили ситуацию с ролью электрического заряда в структуре вещества утверждение в физике планетарной модели атома, особенно в результате опытов Э. Резерфорда в 1911 г., приведших к теории атома Н. Бора (1913), а также доказательство учеником Э. Резерфорда Г. Мозли предположения А. Ван ден Брука о равенстве заряда ядра атома порядковому номеру элемента (1913–14), придавшее ясный физический смысл периодической системе элементов Д. И. Менделеева.

Концепцию дискретности и квантованности электрического заряда еще более укрепило открытие огромного количества элементарных частиц во второй половине XX века: заряды всех частиц оказались в точности целыми кратными элементарного электрического заряда (как правило, равны  $\pm e$ ). Закон квантованности электрического заряда является одним из наиболее фундаментальных законов Природы. Длительное время он имел только эмпирическое обоснование, но был теоретически обоснован Попытку его обоснования предпринял в 1931 г. П. А. М. Дирак в рамках своей идеи существования кванта магнитного заряда (магнитного монополя)<sup>1)</sup>. В 1933 году М. Борн пытался вывести этот закон в рамках своей нелинейной электродинамики (Born, 1933/34, p. 437). Однако, начиная с 1960-х гг. в физику вошли и стали общепризнанными составные модели элементарных частиц: кварковая модель М. Гелл-Манна (Ноб. премия, 1969) и эквивалентная ей “эй-совая модель” Дж. Цвейга строения барионов и мезонов, предполагающая дробные заряды кварков (u-, c-, t-кварки  $+2/3$ ; d-, s-, b-кварки  $-1/3$ ). Согласно этой модели барионы состоят из трех кварков, а мезоны — из кварка и антикварка: заряд частицы складывается из зарядов составляющих ее кварков так, что он может принимать только целые значения (в свободном виде кварки не наблюдаются). Таким образом, кварковая модель автоматически объясняет целочисленность зарядов составных элементарных частиц, т.е. барионов и мезонов. Однако почему лептоны имеют целые заряды? Или почему заряд электрона равен по абсолютной величине заряду протона? Этот вопрос полностью разъяснился при создании стандартной модели объединения элементарных взаимодействий. Дело в том, что кварки, лептоны и нейтрино входят в одни мультиплеты. Однако из условия объединения в рамках простой группы вытекает, что след генератора группы равен нулю, а поскольку генератором выступает электрический заряд, то отсюда

<sup>1)</sup> См. Dirac, 1931, Монополь Дирака, 1970; Коулмен, 1981, в связи с этим см. п. 4 2 1

следует, что сумма электрических зарядов, например, трех  $d$ -кварков с тремя разными цветами, позитрона и антинейтрино должна равняться нулю. Отсюда прямо вытекает, что заряд  $d$ -кварка равен  $-1/3$  (см. Матинян, 1980, с 15, Окунь, 1990, с 245–246). В общем случае коэффициент 3 связан с цветовой симметрией и для  $SU(n)_c$  равен  $n$ . Таким образом, удалось связать заряды лептонов и кварков через количество их разновидностей (“цветов”). В результате проблема квантования электрического заряда оказалось полностью объясненной без каких-либо экзотических гипотез типа магнитного монополя.

Однако помимо этого в физике конденсированного состояния появилась и модель квантовой жидкости квазичастиц, основанная на появлении в специфических условиях при низких температурах дробных зарядов у квазичастиц (Р Лафлин, Х Штермер, Д Цуи — Ноб премия 1998). Оказалось, что “много электронов, действуя сообща, могут создать новую частицу, заряд которой меньше, чем заряд отдельно взятого электрона” (Штермер, 1998, с 304).

Наряду с понятием обычного электрического заряда в физике высоких энергий существует понятие  $t$  и “эффективного заряда” наблюдаемый с ростом импульса рост константы  $\alpha$ , характеризующей силу электромагнитного взаимодействия, интерпретируется как изменение этого “эффективного заряда”. На самом деле, это понятие является столь же лишним в физике, как и понятие “релятивистской массы” в реальности не происходит никакого изменения электрического заряда, так как закон сохранения заряда не нарушается, а изменяется сила электромагнитного взаимодействия. Кажущийся же рост электрического заряда связан с выбором специфической системы единиц, в которой коэффициент в законе Кулона выбирается равным единице, а константа  $\alpha$ , следовательно, включается в масштаб заряда, тока и других электромагнитных величин (при этом  $e^2 \sim \alpha$ ,  $t$   $e$  выбирается “плавающий” масштаб заряда и все изменение заряда, на самом деле, связано не с реальным изменением заряда, а именно с изменением масштаба измерения электрического заряда в механических единицах). При явном выделении константы  $\alpha$  в законах электродинамики никакого “роста” электрического заряда, естественно, не происходит.

Таким образом, постоянная  $e$  является естественным масштабом электрического заряда и в этом отношении стоит в одном ряду с постоянными  $c$  и  $\hbar$ , однако в отличие от них  $e$  не связана (по крайней мере, до сих пор) с какими-либо основополагающими физическими принципами.

## ЧАСТЬ 2

# КОНСТАНТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

В данной главе представлена история констант, которые характеризуют “силы” основных физических взаимодействий — гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного: гравитационной постоянной  $G$ , постоянной тонкой структуры  $\alpha$ , постоянной Кулона  $k_e$ , постоянной Ферми  $G_F$  и постоянной сильного взаимодействия  $\alpha_s$ . Все эти постоянные являются *силовыми*, т. е. отвечают на вопрос “как сильно” то или иное взаимодействие.

### Глава 2.1

#### Константы гравитационного взаимодействия

История гравитационной постоянной  $G$  в отличие от других постоянных исследована совершенно недостаточно. Это связано с тем, что появление гравитационной постоянной в классической физике произошло совершенно незаметно, поскольку не нарушало никаких классических принципов и не вызвало никакой “революции”, подобной квантово-релятивистской революции, связанной с включением в физическую картину мира постоянных  $c$  и  $\hbar$  как фундаментальных элементов. Поэтому история гравитационной постоянной и не была своевременно отрефлексирована научным сообществом. Известно, что у Ньютона ее не было, поэтому ньютоноведы вопрос о появлении  $G$  и не обсуждают. С другой стороны, в конце XIX в. гравитационная постоянная  $G$  фигурировала как универсальная постоянная в ньютоновском законе тяготения. В XX в. возникла концепция  $c\hbar$ -физики, т. е. представление о физическом устройстве мира, в котором все три постоянные —  $c$ ,  $G$  и  $\hbar$  играют фундаментальную роль. Поэтому актуальной историко-научной задачей является реконструкция истории и предыстории появления гравитационной постоянной в физике, а также анализ ее места в структуре физики.

**2.1.1. Универсальная гравитационная постоянная.** Гравитационная постоянная  $G$  — коэффициент пропорциональности в ньютоновском законе всемирного тяготения, который гласит: все тела притягиваются друг к другу с силами, пропорциональными их массам и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.1.1)$$

где  $F$  — сила притяжения между двумя телами массой  $m_1$  и  $m_2$ , расположенными на расстоянии  $r$  друг от друга. Физический смысл гравитационной постоянной  $G$  вытекает из закона всемирного тяготения:  $G$  — сила тяготения двух тел единичной массы, находящихся на единичном расстоянии. Таким образом, гравитационная постоянная  $G$  является силовой характеристикой притяжения тел.

Коэффициент пропорциональности  $G$  не зависит от свойств конкретных тел, т.е. является универсальной величиной для всех тел. В то же время, поскольку  $G$  размерная постоянная, то ее численное значение зависит от выбора единиц измерения — длины, времени и массы. В общепринятых системах единиц, основанных на трех основных единицах — длине  $L$ , времени  $T$  и массе  $M$ , гравитационная постоянная  $G$  имеет размерность  $L^3/MT^2$ .

Гравитационная постоянная  $G$  является одной из наименее точно известных постоянной в *практических* системах единиц. Численное значение  $G$ , принятое в 2002 г. равно, согласно группе CODATA (см.: NIST, 2005), соответственно  $6,6742(10) \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{с}^2$  (СГС) и  $6,6742(10) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$  (СИ). Однако, скорее всего, указанная точность  $G$  сильно завышена, а ее значение будет еще не раз уточняться в 4-м знаке. Дело в том, что к началу 1940-х гг. удалось выйти на надежное значение  $G$  в третьем знаке:  $6,670(5) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$  (Birge, 1941), и с тех пор все уточнения  $G$  касались только 4-го знака. Так, в 1973 году было принято значение  $6,6720(41) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$ . В 1986 г. казалось, что удалось уточнить 4-й знак:  $G = 6,67259(85) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$ , однако разбросы результатов различных опытов были столь велики, что в 1998 г. доверительный интервал по  $G$  был увеличен более чем на порядок:  $6,673(10) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$ . В 2002 г. само численное значение  $G$  было вновь увеличено, а доверительный интервал на порядок сужен:  $6,6742(10) \times 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$ . Однако ряд опытов дает более высокие значения  $G$ :  $6,6873(94) \times 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$  (Swarz et al., 1999),  $6,683(11) \times 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$  (Richman et al., 1999),  $6,67556(27) \times 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$  (Quinn et al., 2001). С другой стороны было получено и меньшее значение  $6,6699(7) \times 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$  (Luo et al., 1999). Как видим, в отличие от других универсальных постоянных, значение гравитационной постоянной до сих пор известно в *практических системах единиц* с точностью всего лишь до трех знаков, причем принятое в 2002 г. уточнение вышло в 2 раза за пределы доверительного интервала, объявленного в 1986 г.

Однако, если мы выберем в качестве меры массы не килограмм, а массу Солнца или массу Земли, то в этих *астрономических* системах единиц значение  $G$  оказывается известным с точностью 10-11 знаков:  $G = 1,32712440018(8) \cdot 10^{20} \text{ м}^3/(M_{\odot} \cdot \text{с}^2) = 3986004418(8) \cdot 10^5 \text{ м}^3/(M_{\oplus} \cdot \text{с}^2)$ , где  $M_{\odot}$  — масса Солнца,  $M_{\oplus}$  — масса Земли (эти значения следуют из экспериментальных данных гелиоцентрической и геоцентрических постоянных). Именно поэтому в небесной механике

такого рода системы единиц оказываются более фундаментальными, чем СГС или СИ (естественно, что в такой системе единиц  $G$  меняется с уменьшением массы Солнца вследствие излучения, однако это изменение касается лишь 14-го знака в год, т. е. не оказывает влияния на расчеты по небесной механике). Именно выбор в качестве меры масс звезд массы Солнца широко применяется в современной астрофизике. Таким образом, точность с которой  $G$  известна в практических системах единиц соответствует точности, с которой известна масса Солнца и планет в практических единицах массы (граммах или килограммах) — всего 3 знака.

**2.1.2. Гелиоцентрическая, геоцентрическая, гауссова, эйнштейновская и др. гравитационные постоянные.** Наряду с гравитационной постоянной  $G$  — основной универсальной постоянной классической теории тяготения, в небесной механике применяется ряд других специфических “гравитационных постоянных”, характеризующих тяготение конкретных физических тел — геоцентрическая  $GM_Z = 3986004418(8) \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{с}^2$ , гелиоцентрическая  $GM_S = 1,32712440018(8) \cdot 10^{20} \text{ м}^3/\text{с}^2$ , селеноцентрическая  $GM_L = 4902,7993 \text{ км}^3/\text{с}^2$ , и т. п. (где  $M_Z$ ,  $M_S$  и  $M_L$  — массы Земли, Солнца и Луны)<sup>1)</sup>. В дальнейшем будем называть эти постоянные гравитационными. Эти постоянные имеют кинематическую размерность  $L^3/T^2$  и поэтому известны с большой точностью, как при использовании практических, так и астрономических масштабов длины и времени. В отличие от универсальной гравитационной постоянной  $G$ , которая характеризует силу тяготения как таковую, гравитационные постоянные характеризуют специфические гравитационные свойства отдельных конкретных тел, их способность изменять движение других тел.

Следует отметить, что универсальная гравитационная постоянная  $G$  не фигурирует в физической теории сама по себе, а лишь в качестве фактора вместе с массой:  $GM$ , плотностью:  $G\rho$ , или тензором энергии-импульса (в общей теории относительности). П.А.М. Дирак предлагал назвать величину  $GM$  гравитационной способностью (gravitational ability) тела (Dirac, 1937a; рус. пер.: Дирак, 1937a, с. 336). В теории тяготения важное значение имеет гравитационный радиус, определяемый как  $r_g = 2GM/c^2$ .

Мы можем выбрать систему единиц, в которой масса того или иного небесного тела принимается в качестве меры масс других тел, например в небесной механике удобно принимать в качестве такого масштаба массу Солнца или Земли. В этих системах единиц значение гравитационной постоянной численно совпадает с гелиоцентрической и геоцентрической постоянными, отличаясь только размерностью:  $G = 6,6742(10) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2) = 1,32712440018(8) \cdot$

<sup>1)</sup> [http://ssd.jpl.nasa.gov/astro\\_constants.html](http://ssd.jpl.nasa.gov/astro_constants.html).

$\cdot 10^{20} \text{ м}^3 / (\text{М}_\text{С} \cdot \text{с}^2) = 3986004418(8) \cdot 10^5 \text{ м}^3 / (\text{М}_\text{З} \cdot \text{с}^2)$ . Таким образом, различие между универсальной гравитационной постоянной  $G$  и гелиоцентрической постоянной при выборе в качестве меры массы массы Солнца проявляется лишь *в размерностях* этих постоянных. Если далее мы перейдем к чисто кинематической системе единиц путем выбора  $M_\text{С} = 1$ , то различие между универсальной гравитационной постоянной  $G$  и гелиоцентрической постоянной вообще исчезнет. Трудность исторического описания использования тех или иных постоянных заключается в том, что ученые исторически изначально применяли системы единиц, в которых эти постоянные вообще не вводились (что эквивалентно их выбору равными 1). Например, в небесной механике именно масса Солнца выбиралась в качестве меры других масс и в такой системе универсальная гравитационная постоянная  $G$  и гелиоцентрическая постоянная эквивалентны. Аналогично можно выбирать в качестве меры массы и другие массы (например, массу Земли  $M_\text{З} = 1$ ), при таком выборе также универсальная гравитационная и соответствующая гравитационная (например, геоцентрическая) постоянные становятся формально эквивалентными.

Еще большую сложность для анализа исторических текстов представляет гауссова постоянная, чье определение менялось. Помимо этого, различные ученые отстаивали разные позиции даже по поводу ее размерности. Гауссова постоянная  $k$  изначально вводилась как эмпирическая постоянная, характеризующая гравитационное взаимодействие Солнца и системы Земли и Луны. Первоначально она определялась формулой  $k^2 = \frac{4\pi^2 a_0^3}{T^2(1 + (M_\text{З} + M_\text{Л})/M_\text{С})}$ , где  $a_0$  — астрономическая единица длины,  $T$  — период обращения Земли вокруг Солнца. Ныне она определяется как  $k^2 = \frac{4\pi^2 a_0^3}{T^2(1 + M_\text{З}/M_\text{С})}$ , причем значение гауссовой постоянной  $k = 0,01720209895$  ныне выбирается как *точное*, а по этой формуле рассчитывается величина астрономической единицы  $a_0$ .

В ходе создания общей теории относительности ( $cG$ -теория) также появилась универсальная постоянная релятивистской теории тяготения — эйнштейновская гравитационная постоянная  $\kappa = 8\pi G/c^4$ .

**2.1.3. К истории гравитационной постоянной.** В историко-научной литературе достаточно подробно исследовались различные аспекты создания классической теории тяготения. Прежде всего следует отметить работы отечественных историков науки: А.Н. Крылова, который перевел и прокомментировал “Математические начала натуральной философии” И. Ньютона (*Ньютон*, 1687/1725), С.И. Вавилова, Н.И. Идельсона, В.С. Кирсанова, коллективный сборник “Исаак Ньютон”, вышедший в годы войны как своеобразное противостояние представителей отечественной культуры

фашизму<sup>1)</sup> и др. Среди исследований западных историков следует отметить фундаментальный аннотированный указатель всех книг и статей от Ньютона до Лапласа, в которых затрагивались те или иные аспекты теории тяготения, изданный И. Тодхантером, монографии Дж. Херивела, И.Б. Коэна, К. Трусделла, М. Роуз-Болл, Р. Вестфолла<sup>2)</sup>. Отдельные важные аспекты истории теории тяготения исследовались в статьях Д.Т. Уайтсайда, А.Р. Холл и М. Боас Холл, Р. Вейнстока, Д.В. Аносова<sup>3)</sup> и др. Опыты XIX и XX вв. по определению средней плотности Земли и гравитационной постоянной исследовались в работах Дж. Пойнтинга, Р. МакКормака, К. Юнгникель, М.У. Сагитова, В.К. Милюкова, Б.Е. Клотфелтера, С.Р. Филоновича, Г. Гиллеса<sup>4)</sup> и др.

Тем не менее, обстоятельства появления в физической картине мира гравитационной постоянной  $G$  остались невыясненными. Это связано с тем, что ни Ньютон, ни ученые, развивавшие ньютоновскую теорию тяготения в XVIII в., не вводили универсальную гравитационную постоянную. Поэтому для историков, которые исследовали оригинальные тексты Ньютона, просто не существовало данного предмета исследования. Значение гравитационной постоянной стало ясно только в XX веке. Таким образом, развитие современной картины мира поставило перед историками новые задачи, в том числе — задачу выяснения обстоятельств появления в физике гравитационной постоянной. Однако историки физики и механики задержались с исследованиями по истории  $G$ , в результате историко-научный “вакуум” по данной проблеме стал заполняться во второй половине XX в. (особенно в физической, научно-популярной, педагогической и даже энциклопедической литературе) мифологической историей, согласно которой гравитационную постоянную ввел И. Ньютон, а измерил — Г. Кавендиш.

Среди исследований, посвященных непосредственно истории гравитационной постоянной  $G$ , следует отметить вышеуказанные монографии и статьи М.У. Сагитова, В.К. Милюкова, Б.Е. Клотфелтера и Г. Гиллеса, направленные на всестороннее отражение экспериментальных аспектов, включая методику различных опытов по измерению  $G$ . Подход М.У. Сагитова, крупного гравитациониста-экспериментатора, к истории науки, основан на ее модернизации с точки зрения современной физической картины мира. Так, М.У. Сагитов прямо указывает, что в своей монографии он не различает опыты по измерению гравитационной постоянной и опыты

<sup>1)</sup> Вавилов, 1943/89, Идельсон, 1975, Кирсанов, 1987, 1993, 1996, 1999, Исаак Ньютон, 1943

<sup>2)</sup> Todhunter, 1873, Herivel, 1965, Cohen, 1965, Truesdell, 1968, Ball Rouse, 1893/1972, Westfall, 1983

<sup>3)</sup> Hall, Hall Boas, 1978, Weinstock, 1982, Аносов, 2000

<sup>4)</sup> Pointing, 1894, McCormack, 1968, 1969, 1971, Jungnickel, McCormack, 1996; Сагитов, 1969; Сагитов, Милюков, 1981, Милюков, Сагитов, 1985, Clotfelter, 1987, Филонович, 1981, 1988/1989, Gillies, 1983, 1997

по измерению средней плотности Земли, которые с физической точки зрения эквивалентны. Это — чисто физический подход, который, несомненно, имеет право на существование в физической, например, экспериментально-методической литературе, однако с исторической точки зрения важно адекватно отражать историческую реальность, в данном случае — задачи, которые ученые ставили *в действительности* — измерения средней плотности Земли или (и) измерения гравитационной постоянной. Сагитов также полностью отождествляет *все* гравитационные постоянные, как универсальные, так и специфические. Г. Гиллес в своем обзоре приводит не только различные опыты по измерению гравитационной постоянной  $G$ , но и затрагивает некоторые теоретические аспекты: попытки теоретического обоснования значения гравитационной постоянной различными учеными, проблему возможного ее пространственно-временного изменения и др. Относительно истории появления гравитационной постоянной Г. Гиллес справедливо отмечает, что опыты, которые в начале XIX века ставились с целью измерения средней плотности Земли, позже были *переинтерпретированы* как опыты по измерению гравитационной постоянной (Gilles, 1997, p. 153). Демифологизации истории  $G$  была посвящена статья Б.Е. Клотфелтера, в которой он показал, что Ньютон не вводил универсальную гравитационную постоянную, а Кавендиш измерял не гравитационную постоянную, а среднюю плотность Земли (Clotfelter, 1987).

#### 2.1.4. Вводил ли Ньютон гравитационную постоянную?

И. Ньютон выражал основные физические закономерности не в виде равенств, как это принято сейчас, а в виде пропорций, что фактически не оставляло места для появления тех или иных постоянных в законах. Термины “пропорционально(а)”, “пропорция” — возможно, самые употребляемые термины в “Математических началах натуральной философии”. Это отражает общее представление того времени о законах как *пропорциональностях* (а не *равенствах*) между физическими величинами. Даже в математике, как отмечает в примечании к первому же определению Ньютона (определение массы) А.Н. Крылов, площадь прямоугольника определялась не как *равная* произведению основания на высоту, а как *пропорциональная* основанию и высоте (см. прим. А.Н. Крылова к кн.: Ньютон, 1687/1725, с. 23). Это связано с тем, что площадь в геометрии все еще рассматривалась тогда как *размерная* величина по исторически сложившейся традиции, хотя формально размерности из математики были уже изгнаны. Поэтому под пропорциональностью двух величин понималось то, что между ними есть еще коэффициент, зависящий от единиц измерения.

Именно через пропорциональность, а не через равенство, Ньютон дал определения массы (как пропорциональной плотности и объему) и количества движения (как пропорционального массе и скорости),





И. Ньютон

также через пропорциональность был им выражен второй закон механики: “Изменение количества движения *пропорционально* приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует” (там же, с. 40). Закон всемирного тяготения Ньютон выразил также не в едином виде типа (2.1.1), а в виде двух пропорциональностей, которые в аналитическом виде и современных обозначениях можно кратко записать  $F \sim r^{-2}$  и  $F \sim mM$ .

Равенства также фигурировали у Ньютона, прежде всего там, где устанавливались соотношения между однородными величинами: например, в третьем законе механики (действие равно противодействию), а также в геометрических соотношениях, которые Ньютон использовал в доказательствах.

Основная идея Ньютона восходила еще к Галилею, который предполагал, что тяготение уравнивается центробежной силой и сравнивал их для тел, находящихся на поверхности Земли, с тем, чтобы показать, почему тела не отбрасываются от поверхности Земли (Галилей, 1632, с. 230–231, 289–290). В первой книге “Начал” (всего “Начала” состоят из трех книг) Ньютон обосновал существование центростремительной силы, которую он отождествил с силой тяготения (с. 80), и ее обратную пропорциональность квадрату расстояния. Это Ньютон вывел несколькими способами: 1) из 3-го закона Кеплера (что до него уже было выведено, как отмечает сам Ньютон, Реном, Гуком и Галлеем), 2) для эллиптических, параболических и гиперболических траекторий (т. е. из первого закона Кеплера) (Ньютон, 1687/1725, с. 91–97); 3) исходя из неподвижности линии апсид <sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> После прямого доказательства, что из движения тела по коническому сечению следует, что центростремительная сила обратно пропорциональна квадрату расстояния, Ньютон указывает как *следствие* этого на справедливость обратного вывода: если на тело действует сила обратно пропорциональная квадрату расстояния, то тело движется по коническому сечению (там же, с. 98). Само доказательство у Ньютона формально отсутствует, хотя именно эта задача и стояла перед ним как основная при написании “Начал”. Вейнсток, первым обративший внимание на это, считает, что Ньютон вообще не вывел первый закон Кеплера (движение по коническим сечениям) из закона тяготения, так как не смог взять сложный интеграл (Вейнсток, 1982). Однако, возможно, геометрический способ доказательства, избранный Ньютоном, эквивалентен для прямой и обратной задач. По крайней мере, Ньютон уверенно указывает, что его геометрическое доказательство прямой задачи означает и доказательство обратной задачи.

В конце первой книги Ньютон рассмотрел, как изменится движение тел, имеющих массу: будет происходить вращение вокруг общего центра масс. В конце отдела 1–11 Ньютон обосновывает “пропорциональность между центростремительными силами и массами центральных тел, к которым они направляются” (см. Поучение: *Ньютон*, там же, с. 243). В следующем отделе Ньютон исследует притяжение шара и приходит к важному для небесной механики выводу, что притяжение двух однородных шаров правильной формы эквивалентно притяжению двух масс, находящихся в центрах шаров. Это доказательство открыло путь для описания небесной механики реальных тел на основе динамики точки.

Пропорциональность силы тяготения массам тел Ньютон наиболее четко формулирует в только 3-й книге “Начал” “О системе мира”: “Тяготение существует ко всем телам вообще и пропорционально массе каждого из них. Выше доказано, что все планеты тяготеют друг к другу, а также, что тяготение к каждой из них в отдельности обратно пропорционально квадратам расстояний места до центра этой планеты” (предл. 7, теорема 7). Распространяя свое утверждение на все тела, Ньютон фактически тем самым провозглашает универсальность закона тяготения.

Ньютон также указывает, что для однородных тел тяготение внутри тел убывает пропорционально расстояниям до центра (предл. 1–73, теорема 1–33 (там же, с. 248); а также предл. 3–9, теорема 3–9 (там же, с. 523)).

Таким образом, Ньютон не применял аналитическую запись закона тяготения, не представил закон тяготения в едином виде и использовал пропорциональности, что заранее исключало какие-либо специальные коэффициенты пропорциональности. Это и привело к тому, что никакой универсальной гравитационной постоянной у Ньютона не было. Это отмечал, в частности, Б.Е. Клофелтер (*Clotfelter*, 1987, с. 210). Следует отметить, что факт отсутствия гравитационной постоянной в “Началах” является не просто проявлением особенностей стиля “Начал”, а на самом деле имеет объективные причины и обусловлен прежде всего тем, что вся небесная механика сводится к чисто кинематическим закономерностям с учетом кинематических постоянных и безразмерных отношений масс небесных тел. Не случайно многие специалисты по небесной механике и до сих пор записывают закон всемирного тяготения *без гравитационной постоянной* — она не нужна в реальных расчетах. Вместо нее используются гелиоцентрические, геоцентрические, гауссова и т. п. постоянные, имеющие кинематические размерности. С другой стороны, очевидно, универсальную гравитационную постоянную формально можно использовать для расчетов, если выражать ее в системе, в которой в качестве единицы массы выбрана масса Солнца или Земли.

В некоторых источниках, однако, утверждается, что “гравитационная постоянная была исторически первой”, что ввел ее Ньютон

и даже обсуждается как он ее назвал (*Спиридонов*, 1991, с. 46). Ньютону, который все доказательства и выводы сводил к кинематическим закономерностям, а по возможности и просто к геометрии, не было никакой необходимости введения каких-либо *динамических постоянных*. Более сложным вопросом является вопрос, вводил ли Ньютон какие-либо кинематические постоянные. В одном из мест в самом конце 3-й книги, Ньютон, рассчитывая скорость движения комет, использовал величину средней скорости движения Земли по орбите 1720212 частей в сутки (при выборе большой полуоси эллипса, по которому обращается Земля, за 100000000 частей), т. е.  $0,01720212a_0/\text{сут}$  (*Ньютон*, 1687/1725, с. 608). Эта величина очень близка к гауссовой постоянной  $k=0,01720209895$ , что дало основание А.Н. Крылову и М.У. Сагитову утверждать, что Ньютон использовал постоянную, которая была позже введена Гауссом. На самом деле эти величины имеют разную размерность и некоторое, хотя и небольшое, отличие в численном значении, обусловленное учетом отношения масс Земли и Солнца. Как следует из анализа текста Ньютона, он использовал величину *размерности скорости*  $k_N$ , которая получается из соотношения  $k_N = \frac{2\pi a_0}{T} = \frac{2\pi a_0}{365,2565 \text{ сут}} = 0,01720212a_0/\text{сут}$  (здесь учитывается равенство времени обращения тела по эллипсу и по окружности радиуса, равного большой полуоси эллипса  $a_0$ , доказанное самим же Ньютоном). Гауссова постоянная определяется из формулы с учетом соотношения масс тел:  $k = \frac{2\pi a_0^{3/2}}{T(1 + M_3/M_c)^{1/2}}$ . Таким образом, соотношение между гауссовой постоянной и “ньютоновской”:  $k = k_N \frac{a_0^{1/2}}{(1 + M_3/M_c)^{1/2}}$ , т. е. различие между этими постоянными помимо разной размерности связано также с учетом отношения масс небесных тел.

“Ньютоновская” постоянная была хорошо знакомой астрономам еще задолго до Ньютона, так как она представляет собой среднюю угловую скорости Земли по орбите  $0,01720212 \text{ рад/сут}$ . Она фигурировала в работах К. Птолемея, Н. Коперника, отличие лишь в том, что они выражали ее в единицах градус в сутки:  $\frac{360^\circ}{T}$ . Кроме этого, Птолемей в рамках своей концепции, согласно которой Солнце вращалось вокруг Земли, рассматривал эту постоянную как среднее суточное перемещение Солнца:  $0;59,8,17,13,12,31$  (*Птолемей*, с. 82). Коперник же связывал ее уже с движением Земли вокруг Солнца:  $59$  дугowych минут  $8$  секунд  $11$  терций и  $22$  кварта (*Коперник*, 1543, с. 191). Позже эта же постоянная фигурировала, в частности, в работах Л. Эйлера ( $n = 0,0172028$ ) и К.Ф. Гаусса ( $k = 0,0172021$ ) (см. следующий параграф). Таким образом эта кинематическая постоянная, действительно, использовалась Ньютоном по крайней мере один раз при расчете движения комет, так же как она использовалась раньше и позже него,

однако она отличается от постоянной, именуемой ныне *гауссовой*, по размерности и учету отношения масс Земли и Солнца. (Соотношение между этой ньютоновской постоянной и гауссовой в астрономической системе  $a_0 = 1$  напоминает соотношение между двумя постоянными Ридберга, которое определяется предельным переходом по отношению масс  $m/M \rightarrow 0$ ).

**2.1.5. К аналитической форме закона тяготения.** В течение XVIII в. механика и теория тяготения, изложенная в “Началах” геометрическим способом, И. Бернулли, Л. Эйлером, Ж. Лагранжем и др. была переведена в аналитическую форму. Это не привело, однако, к форме закона тяготения с гравитационной постоянной. Часто он формулировался словесно, а для расчетов использовались формулы, следовавшие из закона всемирного тяготения. Например, А. Клеро, рассматривая фигуру Земли, словесно формулирует закон всемирного тяготения (Клеро, 1743, с. 14). Для реального расчета фигуры Земли Клеро использует принцип гидростатики: для равновесия поверхность жидкости должна быть поверхностью уровня, т. е. быть везде перпендикулярной силе тяжести. Далее Клеро сводит все к чистой математике — решению некоторого аналитического уравнения.

Даламбер в работах по теории фигуры Земли использует естественную систему единиц, в которой плотность однородного тела выбрана равной 1, а притяжение точки на ее поверхности он фактически определяет как  $M/r^2$  (т.е. использует систему единиц, в которой гравитационная постоянная равна 1) (там же, с. 201).

Ж. Лагранж записывал закон всемирного тяготения в приложении к планетам солнечной системы в форме  $R = \frac{g}{r^2}$ , где  $R$  — сила притяжения, отнесенная к массе (так называемая ускорительная сила, по сути — поле тяготения Солнца), а  $g$  — та же сила притяжения к Солнцу на расстоянии  $r = 1$  (Лагранж, 1788, т. 2, с. 25). Фактически  $g$  представляла собой не что иное как гелиоцентрическую постоянную  $GM_{\odot}$ . Кроме этого, Лагранж так выбирал единицы, что  $g = 1$  (там же, с. 29).

В работе, опубликованной в 1744 г. и посвященной методу нахождения орбит комет, Л. Эйлер в приближенной формуле также использовал постоянную, по размерности соответствующую современной гауссовой постоянной (см.: Субботин, 1958, с. 287–288). Однако неясно, соответствует ли численное значение этой “эйлеровской” постоянной в точности гауссовой постоянной, или их связывает какая-то математическая постоянная. Как раз при точном решении этой задачи Гаусс и использовал постоянную  $k$ , получившую позже наименование “гауссовой”. В другой работе, также посвященной движению комет, но опубликованной уже после смерти автора, Эйлер получил уравнение, в котором фигурировала постоянная  $0,012163763303$  размерности  $L^{3/2}/T$  (сам Эйлер размерности опускал) (там же, с. 285). По размерности эта постоянная соответствовала гауссовой постоянной, но отличалась от

нее в  $\sqrt{2}$  раз. Также остается неясным, была ли она вычислена Эйлером с учетом отношения масс Земли и Солнца или без учета. Судя по ее численной величине, она ближе к постоянной, получаемой без учета отношения масс. При расчетах движения Луны в 1766 г. Л. Эйлер использовал постоянную  $n = 0,0172028$  — среднесуточное движение Солнца в рад/сут, эквивалентную “ньютоновской” постоянной (там же, с. 355).

П.С. Лаплас в “Изложении системы мира” словесно формулирует закон всемирного тяготения по отношению ко всем “молекулам материи” (Лаплас, 1796, с. 140). Для реальных расчетов в 5-томной “Небесной механике” П.С. Лаплас применял кинематические законы, вытекающие из закона всемирного тяготения, прежде всего — третий закон Кеплера, модифицированный с учетом отношения масс.

И. Зольднер в своей статье по расчету отклонения света массивным телом также не вводил гравитационную постоянную, а пользовался кинематической постоянной  $g$  — ускорением свободного падения на поверхности тела (Soldner, 1801/04).

При исследовании движения комет Гаусс ввел постоянную, которая получила его имя и которая стала *основной постоянной небесной механики*. В “Теории движения небесных тел” (1809) Гаусс приводит словесное (неаналитическое) определение закона всемирного тяготения, а затем вводит и рассчитывает постоянную  $k = \frac{2\pi}{t\sqrt{1+\mu}} = 0,01720209895$ , получившую впоследствии название “гауссовой постоянной” (использованные им значения:  $t = 365,2563835$  сут.,  $\mu^{-1} = 354710$ ) (Gauss, 1809, S. 2). Интересно, что именно это численное значение  $k$  принято ныне как *точное*, однако по размерности современная гауссова постоянная  $k = \frac{2\pi a_o^{3/2}}{t\sqrt{1+\mu}} = 0,01720209895 a_o^{3/2}/\text{сут}$  отличается от введенной Гауссом и используется ныне для определения астрономической единицы  $a_o$ . В лекциях по теоретической астрономии, прочитанных в Геттингене в 1820–21 гг. (они были записаны Купфером и опубликованы только в XX в.), Гаусс не формулирует закон всемирного тяготения ни в аналитическом, ни даже в словесном виде, а использует лишь законы Кеплера. В конце лекций он вычисляет постоянную  $k$  без учета отношения масс:  $k = \frac{2\pi}{\text{звездный год}} = 0,0172021$ , поясняя ее смысл:  $k$  — “удвоенное отношение описываемой площади к соответствующему времени”, “постоянное для всех планет и комет” (Gauss, 1820/21; рус. пер. с. 448). Как видим, появление гауссовой постоянной фактически связано с практическим использованием закона сохранения секториальной скорости, открытого еще И. Кеплером (фактически — закона сохранения момента импульса), при сравнении движения комет и планет.

Таким образом, для расчетов в небесной механике и теории фигуры Земли и др. приложениях теории тяготения можно формально

обходиться без универсальной гравитационной постоянной, а достаточно использовать кинематические гравитационные постоянные. Что же привело к появлению постоянной  $G$ , имеющей динамический характер? Вероятно, основным фактором, приведшим к появлению в законе всемирного тяготения гравитационной постоянной был переход к единой системе мер в физике, осуществленный в конце XVIII в. французскими учеными.

**2.1.6. К единым мерам в теории тяготения.** В 1780-х гг. во Франции возникла острая потребность создания единой для Франции системы мер. К этому моменту в каждом кантоне Франции существовали свои меры, что являлось дополнительным фактором спекуляции хлебом и другими продовольственными товарами. Задача создания единой системы мер была поставлена перед учеными Парижской Академии наук. Ученые решили эту задачу, имевшую в то время большое социальное значение, но своеобразным образом, исходя из собственно научных интересов. Как теперь ясно, для решения этой задачи было достаточно принять абсолютно любой эталон в качестве меры для всей Франции и наладить его воспроизводство. Однако, поскольку перед учеными существовала проблема измерения Земли, а финансирования в условиях революции и гражданской войны на это получить было невозможно, французские астрономы (П.С. Лаплас и др.) увязали чисто научную задачу измерения Земли с социальной задачей создания единой системы мер для Франции с помощью *идеи выбора меры длины как части земного меридиана*. Тем самым формально решалась задача выбора универсальных мер, а фактически ученые измеряли Землю (т.е. устанавливали соотношение между параметрами Земли и выбранным эталоном). Для решения этой задачи были организованы экспедиции, которые в течение нескольких лет измеряли расстояние между Дюнкерком и Барселоной. Задача была решена, но ученые заплатили большую цену: в результате социальных потрясений Академия наук была разогнана (вместо нее был позже организован Национальный институт Франции, в состав которого был включен Наполеон). Наряду с асоциальной идеей связи практических мер с параметрами Земли, в реформе мер существовали и здравые идеи: введение кратных и дольных величин, выбрав в качестве единицы плотности плотность воды. В то же время абсолютизация десятичной системы мер привела к осуществлению реформы календаря с внедрением вместо недель декад, сутки стали разбивать на 10 “часов”, 1 “час” — на 100 “минут”, 1 “минуту” на 100 секунд, что не прижилось.

Реформа системы мер вела к единой практической системе мер, в которой измерялись бы все величины. Это неизбежно приводило к измерению всех физических величин в практических единицах, в том числе и массы Земли и планет, и, следовательно, к появлению размерного коэффициента в законе всемирного тяготения. Этот коэффициент, по-видимому, впервые появился только в 1811 г.

de l'autre, égale à l'unité linéaire; soit  $f$  la force attractive de l'un de ces deux corps sur l'autre, c'est-à-dire le rapport numérique de son intensité à celle de la force prise pour unité; soient aussi  $M$  et  $m$ , les masses du soleil et de la planète, et  $r$ , leur distance mutuelle: la force motrice de la planète sera exprimée par  $Mmf$ , à l'unité de distance, et elle deviendra  $\frac{Mmf}{r^2}$ , à la distance quelconque  $r$ . La grandeur de la quantité que nous désignons par  $f$ , dépend du pouvoir attractif dont la matière a été douée; ce pouvoir est le même, à égalité de masse et de distance, pour tous les corps de la nature; rien, jusqu'à

в “Трактате по механике” С.Д. Пуассона. Пуассон записал закон всемирного тяготения в таком виде:  $\frac{Mmf}{r^2}$

(см. рис. 2.1.6) (*Poisson*, 1811, т. 2, р. 16). Несколькими страницами дальше Пуассон поясняет физический смысл этой величины: “ $f$  — сила притяжения на единичном расстоянии единичных масс” (от *force* (фр.) — сила) (там же, р. 38), а это и есть физический смысл

Рис. 2.1.6. Первое появление гравитационной постоянной в трактате С.Д. Пуассона

гравитационной постоянной ( $G$ ). На данный момент это самое раннее известное появление гравитационной постоянной в законе всемирного тяготения. Интересно, что в первом томе Пуассона, где он в частности рассматривал законы небесной механики, гравитационная постоянная не фигурировала, а появилась лишь во втором томе. Характерно, что Пуассон и в последующих своих работах по небесной механике не вводил гравитационную постоянную. Это еще раз демонстрирует то, что гравитационная постоянная не была необходима для расчетов в небесной механике.

Второе издание трактата было Пуассоном значительно переработано, все о всемирном тяготении было перенесено в первый том. При этом гравитационная постоянная переместилась вперед и в законе всемирного тяготения:  $\frac{fMm}{r^2}$  (*Poisson*, 1833, т. 1, р. 170, 419, 431, 465). “Трактат по механике” Пуассона стал образцом и для последующих авторов. В “Курсе механики” М. Дюамеля закон всемирного тяготения записывался в аналогичном виде:  $f\frac{Mm}{r^2}$  (*Duhamel*, 1862, т. 1, р. 285; т. 2, р. 30). Численного значения  $f$  Дюамель также как и Пуассон не приводит. Пуассон лишь отмечает, что эту неизвестную постоянную можно исключить из расчетов.

Реформа системы мер во Франции являлась фактически реализацией программы измерения Земли (ее геометрических размеров). Неслучайно как раз в те же годы состоялись опыты Кавендиша по измерению средней плотности Земли, которые можно также рассматривать как “взвешивание Земли”.

**2.1.7. Опыт Г. Кавендиша: проблемы восприятия и интерпретации.** В 1797–1798 гг. английский физик и химик Г. Кавендиш выполнил опыт по определению средней плотности Земли (*Cavendish*, 1798) (основная часть статьи Кавендиша “Опыты по определению плотности Земли” переведена на русский язык С.Филоновичем (*Кавендиш*, 1798). Основываясь на методе измерения колебаний крутильных весов вблизи

тела известной массы, Г. Кавендиш определил, что плотность Земли равна 5,48 плотности воды ( $5,48 \text{ г/см}^3$ ), что очень близко к современному значению  $5,52 \text{ г/см}^3$  (отличие менее 1%). Опыт Кавендиша, его предыстория и последующие опыты по определению средней плотности Земли были детально исследованы Дж. Пойнтингом, Р. Мак-Кормаком, К. Юнгникель, Б.Е. Клотфелтером, С. Филоновичем и др.<sup>1)</sup> Вместе с тем существует ряд аспектов, которые историками науки, за исключением статьи Б.Е. Клотфелтера, не затрагивались. Речь идет прежде всего о принципиальном расхождении в оценке *результата* этого опыта между физиками и историками физики.

В научной и научно-популярной литературе XX в. получила необычайно широкое распространение версия, что Кавендиш измерял и измерил *гравитационную постоянную*  $G$  — коэффициент пропорциональности в законе тяготения Ньютона. Версия о том, что Кавендиш измерил гравитационную постоянную, ныне присутствует практически во всех энциклопедических изданиях, таких как “Британника”, “Larousse”, “Физическая энциклопедия” и т.д., а также школьных учебниках и пособиях. Ряд авторов даже приписывает ему те или иные значения гравитационной постоянной, которые он якобы получил. Так, в “Британнике” утверждается, что Г. Кавендиш получил значение  $G = 6,754 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$  (Nordtvedt, Faller, Beams, 1976, p. 294). Это же значение приводят Э.Р. Коэн, К. Кроу и Дж. Дюмонд даже с указанием погрешности:  $G = (6,754 \pm 0,041) \cdot 10^{-8} \text{ дин} \cdot \text{см}^2/\text{г}^2$  (Cohen, Crowe, Dumond, 1957, p.16), а также А. Кук (Cook, 1987, с. 74) и др. Л. Купер в своем 2-х томном учебнике физики приводит другое значение —  $6,71 \cdot 10^{-8} \text{ дин} \cdot \text{см}^2/\text{г}^2$  (Купер, 1968, т. 1, с. 79), а О.П. Спиридонов третье —  $(6,6 \pm 0,04) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$  (Спиридонов, 1991, с. 51). На самом деле все эти значения гравитационной постоянной были вычислены позднее по полученному Кавендишем значению средней плотности Земли. Другие авторы утверждают, что первым гравитационную постоянную определил Н. Маскелайн еще в 1774–75 гг.<sup>2)</sup>



Г. Кавендиш

<sup>1)</sup> Pointing, 1894; McCormach, 1968, 1971; Clotfelter, 1987; Филонович, 1988, 1989; Jungnickel, McCormach, 1996.

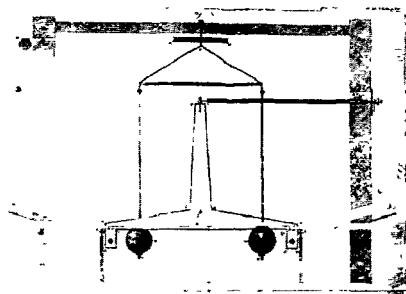
<sup>2)</sup> Danby, 1983, p 400; Бронштейн, 1930, с. 11.



Историки физики, в отличие от самих физиков, говорят об изменении Кавендишем *средней плотности Земли*, что и было в действительности успешно осуществлено Кавендишем. Это касается как специальных работ, указанных выше, так и общих исторических курсов В. Уэвелля, Ф. Араго, Ф. Розенбергера, И.К. Поггендорфа, Э. Хоппе, П. Лакура и Я. Аппеля. Неточность содержится лишь в учебнике П.С. Кудрявцева, где утверждается, что Кавендиш измерил и среднюю плотность Земли, и гравитационную постоянную. Б.И. Спасский и Я.Г. Дорфман вообще не включили опыт Кавендиша в свои курсы по истории физики (очевидно полагая, что измерение средней плотности Земли не выглядит фундаментальной проблемой после эпохальных открытий начала XX в.). М. Льюцци лишь упомянул о нем, отметив, что “метод Кавендиша, впоследствии усовершенствованный, позволил в прошлом веке произвести численное определение гравитационной постоянной” (Льюцци, 1965, с. 139). Расхождение в современной интерпретации опыта Кавендиша (как опыта по измерению гравитационной постоянной) и реальной цели опыта, поставленного Кавендишем, который был лишь одним из многих различных опытов по определению средней плотности Земли, первым отметил Б.Е. Клотфелтер в подробной статье, специально посвященной этому вопросу (Clotfelter, 1987).

Идея опыта, который поставил Кавендиш, принадлежала Н. Маскелайну, от которого после его смерти и отошла Кавендишу сама установка. Смысл опыта заключался в сравнении колебаний тела вблизи тела известной массы и Земли.

Ряд историков науки утверждает, что Кавендиш ошибся в вычислении среднего арифметического при вычислении окончательного



Прибор Кавендиша в разрезе (рисунок из статьи Г.Кавендиша)

результата. Впервые этот упрек в адрес Кавендиша был высказан в 1821 г. Ч. Хаттоном, который вообще стремился дезавуировать результат Кавендиша, так как он сильно расходился с результатами других ученых, полученными из измерения отклонения отвеса вблизи горы. Хаттон, в частности, заметил, что среднее арифметическое результатов 6 опытов с первой проволокой равно 5,31 плотностей воды, но приведенное Кавендишем значение (5,48) по-

лучается, если третий результат исправить ровно на 1 (5,88 вместо 4,48) (Hutton, 1821, p. 289). В дальнейшем, поскольку Кавендиш результаты всех 29 опытов (6-ти предварительных опытов с одной проволокой и 23-х основных опытов со второй проволокой) свел в одну таблицу, то это стало основанием для его “обвинения” в арифметической ошибке в целом. Так, в 1843 г. это было высказано Ф. Бейли, который

отметил, что среднее арифметическое 29 опытов —  $5,448 \text{ г/см}^3$ , и принималось затем Дж. Пойнтингом, Дж. Краузером, А. Берри и др. Однако комментарий самого Кавендиша к полученным им результатам позволяет снять с него “обвинение” в арифметической ошибке или опiske, по крайней мере по отношению к результату *основных опытов*. Кавендиш не утверждает, что вычисляет среднее всех проведенных им 29 опытов, — на самом деле он вычисляет *по отдельности* среднее значение для отладочных и для основных опытов, оба из которых согласно Кавендишу оказываются равными  $5,48$  пл. воды.

Среднее арифметическое первых 6-ти отладочных опытов, проведенных с 5 по 7 августа 1797 г., действительно, дают результат ровно на  $1/6$  меньший, чем указанный Кавендишем. Т.е. сумма этих шести значений ровно на единицу больше значения, соответствующего опубликованному Кавендишем значению среднего арифметического, что наводит на простую мысль — либо произошла описка или опечатка ровно на единицу при публикации работы Г. Кавендиша, либо Г. Кавендиш, действительно, ошибся на единицу при подсчитывании среднего значения отладочных опытов.

После замены проволоки, которая не устраивала Кавендиша из-за недостаточной жесткости (грузы в крайних положениях касались корпуса), Кавендиш провел в период с 12 августа 1797 г. по 30 мая 1798 г. 23 основных опыта. Относительно них Кавендиш пишет, что среднее арифметическое результатов этих 23-х опытов также дают значение  $5,48$  пл. воды. Действительно, среднее арифметическое этих 23-х основных опытов —  $5,4835 \approx 5,48$  пл. воды, что в точности соответствует значению  $5,48$  пл. воды, приведенному Кавендишем. Поэтому, независимо от причин описки или ошибки в вычислении результата отладочных опытов, результат основных опытов —  $5,48$  пл. воды и таковым должен приниматься историками как результат опыта Кавендиша и не подвергаться исправлению.

Фундаментальное различие между физиками и историками физики в понимании цели и результата опыта Кавендиша связано прежде всего с различием понятий “опыт Кавендиша” в современной физической картине мира и исторической картине развития физики. В истории физики “опыт Кавендиша” — это опыт, поставленный Г.Кавендишем в 1797–98 гг. с целью определения средней плотности Земли и таким же достигнутым результатом. В современной физической картине мира “опыт Кавендиша” — понятие, обозначающее не собственно опыт, поставленный Г. Кавендишем, а некий элемент конструкции современной физической картины мира, а в ее рамках это есть опыт по определению гравитационной постоянной. Это различие связано с эволюцией физических понятий; когда-то “опыт Кавендиша” и в физике обозначал опыт, поставленный Кавендишем, а ныне этим термином обозначается современный опыт с использованием современной техники (например, лазерных измерений и персональных компьютеров), но сохраняющий суть — измерение колебаний крутильных весов, независимо от того,

что он ставится с другой целью – определения гравитационной постоянной

Проблема заключается в том, что из-за различного смысла этих терминов происходит модернизация реальной истории, в основе которой — различное понимание *исторической реальности* у естествоиспытателей и историков естествознания. Если историки стремятся рационально реконструировать реальные события, то физики, наоборот, стремятся свою современную научную картину мира “опрокинуть” в прошлое, наделив ее соответствующей “реальной” историей. Собственно история физики носит для современной физической картины мира вторичный и вспомогательный характер, это элемент, работающий на укрепление существующей картины мира. Для физиков реальна лишь та история, которая соответствует современной физической картине мира. В результате “опыт Кавендиша”, как опыт по определению гравитационной постоянной в рамках современной картины мира, превращается в реальный “опыт, проведенный Кавендишем”, что неизбежно приводит к утверждениям, что Кавендиш измерил гравитационную постоянную и даже получил ее некое конкретное значение. Вместе с тем было бы неправильным абсолютизировать и чисто “исторический” подход, игнорируя современную физическую картину мира, так как это ведет к непониманию эволюции физики. Например, исследование истории гравитационной постоянной не имело бы смысла, если бы она не играла важную роль в современной физике. Поэтому реальная история может быть понята лишь в рамках дополнительности этих двух противоположных подходов. С этой точки зрения можно сказать, что с появлением гравитационной постоянной в физике опыт Кавендиша приобрел новый смысл.

В течение всего XIX в. ставились различные опыты по определению средней плотности Земли. И только опыты А. Кенига и Ф. Рихарца уже были прямо направлены на измерение гравитационной постоянной (Gravitations-Constant), что было прямо зафиксировано в названии их статьи (Konig, Richarz, 1884/85).

Безусловно, что гравитационную постоянную можно выразить через измеряемые геофизические постоянные — среднюю плотность Земли  $\rho$  (которую и определил Кавендиш с большой точностью), радиус Земли  $R$  и ускорение свободного падения на поверхности Земли  $g$  — и Кавендиш мог бы получить значение гравитационной постоянной, если бы тогда была поставлена такая задача, однако понятия гравитационной постоянной, как следует из анализа текстов книг и статей по приложениям ньютоновской теории тяготения, еще не существовало в физической теории того времени.

Тем не менее, в связи с важностью гравитационной постоянной в современной физической картине мира возникает вопрос: какое значение гравитационной постоянной мог бы получить Г. Кавендиш? Как правило, невозможно установить однозначное соответствие между результатами, полученными тем или иным

ученым в прошлом и современными данными. Однако в случае опыта Кавендиша это оказывается возможным, поскольку в его статье имеются для этого все необходимые сведения. Кавендиш использует в расчетах следующие данные: средний диаметр Земли  $D = 41800000$  футов и длина секундного маятника  $l = 39,14$  дюйма (т.е. маятника, полупериод колебаний которого  $\tau = 1$  с). Поэтому расчет гравитационной постоянной Кавендиш мог бы осуществить по следующей формуле:  $G = \frac{3g}{2\pi\rho D} = \frac{3\pi l}{2\rho D\tau}$ , что привело бы к результату

$$G = \frac{3\pi \cdot 39,14}{2 \cdot 5,4835 \cdot 12 \cdot 4,18 \cdot 10^7} \text{с}^{-2} (\text{пл. воды})^{-1} = 6,7057 \cdot 10^{-8} \text{с}^{-2} (\text{пл. воды})^{-1}.$$

Современное значение  $G = 6,6742(10) \cdot 10^{-8} \text{с}^{-2} (\text{пл. воды})^{-1}$ . Таким образом, значение, которое приводит Л. Купер, наиболее точно соответствует значению, которое мог бы получить Кавендиш. Значение  $G = 6,754 \cdot 10^{-8} \text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$  получается если пользоваться в расчетах "исправленным" историками результатом Кавендиша, что неправомерно, как было показано выше.

Интересно, что И. Ньютон в "Математических началах натуральной философии" из соотношения плотностей поверхностных и глубинных слоев Земли и соотношения плотности Земли и Юпитера довольно точно оценил среднюю плотность Земли как 5-6 плотностей воды: "<...> правдоподобно, что все количество вещества Земли приблизительно в 5 или в 6 раз больше того, как если бы оно все состояло из воды" (Ньютон, 1687/1725, с. 525). Плотность Земли оказалась 5,52 плотности воды. Следовательно Ньютон мог бы с точностью 10% оценить значение гравитационной постоянной в практических единицах, если бы такая задача перед ним стояла.

**2.1.8. О терминологии и символьном обозначении.**  $G$  — современное обозначение гравитационной постоянной согласно международным соглашениям. Однако в научной литературе использовались различные символы для обозначения гравитационной постоянной, особенно в XIX и первой половине XX в.:  $f$ ,  $C$ ,  $k$ ,  $K$ ,  $k_g$ ,  $\kappa$  (каппа),  $\gamma$ ,  $g$ ,  $G$ ,  $G_N$ . Символ  $G$  стал использоваться, начиная с работы (König, Richarz, 1884/85)

Причины выбора этих буквенных обозначений очевидны:  $f$  — начальная буква *force* (сила, фр. и англ.),  $c$  — *constant* (константа, англ.), а также *coefficient* (коэффициент, англ.),  $k$  — *konstant* (константа, нем.), а также *koeffizient* (коэффициент, нем.),  $G$  — *Gravitation* (гравитация, нем.) Выбор прописной буквы  $G$ , в отличие от всех остальных физических постоянных —  $c$ ,  $h$ ,  $e$ ,  $k$  и др., связан, по-видимому, именно с символьной редуциацией от немецкоязычного термина *Gravitation*, в отличие от *gravitation* (англ., фр.) и отражает ведущее положение немецкой науки в конце XIX в. В этот же период применялась также прописная буква  $V$  для обозначения скорости света (Эйнштейн, Майкельсон и др.), но это не привилось, в отличие от  $G$ .

Применение индексов связано с унификацией обозначений констант связи различных взаимодействий, а также с отличием “ньютоновской” гравитационной постоянной от “эйнштейновской”. Иногда применяется чисто словесное описание, без использования символического обозначения, а также запись закона всемирного тяготения с конкретным численным значением гравитационной постоянной. Например, историк науки М. Льюцци записывает закон всемирного тяготения в виде  $f = 6,67 \cdot 10^{-8} \frac{mm'}{r^2}$  (Льюцци, 1965, с. 139). Естественно, что такая запись не универсальна, а связана только с системой (*метр, килограмм, секунда*)

Наряду с термином “гравитационная постоянная” (“gravitational constant”) и “постоянная тяготения” (“constant of attraction”) в XX в. широкое распространение получил термин “ньютоновская (ньютонова) постоянная” (“newtonian constant”). Впервые он появился еще в конце прошлого века, например, его использовал К. Бойс (*Boys*, 1894; 1895). Причина появления термина “ньютоновская постоянная” очевидно связана с утверждением в физике XIX в. новой формы ньютоновского закона всемирного тяготения — с гравитационной постоянной. В XX в. этот термин нашел широкое распространение в работах по общей теории относительности, его применяли А. Эйнштейн, В.А. Фок, М.-А. Тонелла, С. Хокинг, С. Вайнберг, Д. Сиамма, Ч. Мизнер, К. Торн, Дж. Уилер, Д.Д. Иваненко, Л.Б. Окунь и многие другие ученые, как физики, так и методологи науки, например, Т. Кун. В работах по общей теории относительности (ОТО) термин “ньютоновская постоянная” служит, очевидно, для отличия ее от другой постоянной, впервые появившейся в ОТО, — *эйнштейновской постоянной*  $\kappa = 8\pi G/c^4$ , и выглядит в данном контексте приемлемым, отражая на уровне терминологии переход от классической теории тяготения к релятивистской.

Очевидно, что с историко-научной точки зрения, учитывая основополагающий вклад И Ньютона в открытие закона всемирного тяготения, а также сложившуюся традицию связывать название постоянной в законе с именем ученого, открывшего этот закон, хотя формально и не введившего постоянную (постоянная Фарадея, постоянная Больцмана) допустимо называть гравитационную постоянную “ньютоновской”, однако при этом необходимо понимать, что Ньютон ее не вводил. Поэтому в книгах, направленных в той или иной степени на историко-научное описание, например, в книге Э.Р. Коэна, К. Кроу и Дж. Дюмонда (*Cohen, Crowe, Dumond*, 1957), где этот термин присутствует даже в названии раздела “Ньютоновская универсальная постоянная тяготения” и в работах Г. Гиллеса (*Gillies*, 1983; 1997), где он фигурирует в самом названии, применение этого термина представляется уже не вполне уместным, так как создает иллюзию, что гравитационную постоянную ввел Ньютон. Перекочевывая в научно-популярные издания, авторы которых не обращаются ни к первоисточникам, ни к специальным книгам по истории тяготения,

термин “ньютоновская постоянная” в конечном счете способствует распространению мифа о введении Ньютоном гравитационной постоянной. Так уже сам термин становится генератором мифа о введении Ньютоном гравитационной постоянной. Характерно, что если физикам-теоретикам более по душе термин “ньютоновская постоянная”, то физики-экспериментаторы предпочитают термин “кавендишева постоянная” (В.Б. Брагинский, В.К. Милюков, М.У. Сагитов и др.) и “постоянная Ньютона-Кавендиша” (В.К. Абалакин и др.), хотя Кавендиш, как уже указывалось, ее не вводил и не определял.

Отсутствие у Ньютона и Кавендиша гравитационной постоянной вовсе не умаляет значения ни “Начал”, ни опыта Кавендиша. Необходимо понимать, что начальная форма любой теории похожа на молодой саженец и ее не следует отождествлять с современной формой разившегося из него плодоносного дерева. Ньютон решал и успешно решил сложную триединую задачу, создавая одновременно дифференциальное и интегральное исчисление, механику и теорию тяготения. Именно усилиями Ньютона было создано “поле деятельности” для других ученых, которые довели его идеи до совершенной формы. Значение же опыта Кавендиша заключается в том, что он доказал применимость закона всемирного тяготения для тел малых масс и на малых расстояниях (в возможности экспериментального доказательства чего сомневался даже сам Ньютон), определил с удивительной точностью для того времени среднюю плотность Земли, что открыло возможность определения массы Земли, Солнца и других планет в практических единицах, а также формальному переходу к единой практической системе мер во всей физике, включая небесную механику, и, как следствие, к введению универсальной гравитационной постоянной в закон всемирного тяготения.

Другие опыты по измерению средней плотности Земли и гравитационной постоянной достаточно полно изложены в обзорах Дж. Пойнтинга, М.У. Сагитова и Г. Гиллеса. Следует отметить, что точность определения  $G$  в практических единицах (килограмм) в XIX в. составляла 1-2%, с 1890-х годов по 1970-е годы — ок. 0,1%, с 1970-х гг. — ок. 0,05%. И до сих пор  $G$  является одной из наименее точно определяемых в современной практической системе мер универсальных постоянных. Отметим, что во всех необходимых случаях в небесной механике и теории фигуры Земли вместо  $G$  в расчетах используется фактор  $GM$ , который имеет кинематическую размерность и известен с точностью 10-11 знаков. Таковую же точность имеет гравитационная постоянная в астрономической системе мер (см. выше). Для чего же нам необходимо значение  $G$  в практической системе мер? Прежде всего для единства физики. Во-первых, это необходимо для единства системы единиц. Однако, несмотря на все усилия метрологов, в разных областях физики используются разные системы единиц — не только СИ (в которой принято выражать все согласованные значения фундаментальных постоянных),

но и гауссова, система Лоренца–Хевисайда, а также естественные системы единиц. Во-вторых, для вычисления планковских масштабов, которые выступают в качестве границ применимости современных физических теорий, т.е. важно для объединения современных физических теорий.

**2.1.9. О статусе гравитационной постоянной  $G$ .** Значение гравитационной постоянной в физике стало осознаваться лишь в конце XIX в. в связи с универсальностью ньютоновского закона тяготения. Так, например, Дж.К. Максвелл (1873), Дж. Стони (1874/81) и М. Планк (1899) включили ее наряду со скоростью света в свои естественные системы единиц. Еще большее значение гравитационная постоянная приобрела в связи с созданием общей теории относительности (ОТО), построенной на интерпретации гравитации как искривления пространства-времени. История создания ОТО реконструировалась А. Пайсом, У.И. Франкфуртом, Дж. Нортоном, Дж. Стэйчелом, В.П. Визгиным и др.<sup>1)</sup> В этой теории появилась эйнштейновская гравитационная постоянная, являющаяся комбинацией универсальной гравитационной постоянной  $G$  и скорости света:  $\kappa = \frac{8\pi G}{c^4}$ . Эта постоянная выступает в эйнштейновском законе тяготения как коэффициент пропорциональности между тензорами энергии-импульса и кривизны пространства-времени:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \kappa T_{ik}.$$

Отметим, что эйнштейновская гравитационная постоянная предстает как отношение планковских величин — длины и энергии (массы):  $\kappa = 8\pi \ell_{пл} / E_{пл}$  (причем множитель  $8\pi$  или  $4\pi$  можно включить в определение планковских величин). Де Витт, например, использовал “абсолютные единицы” ( $c=1$ ,  $\hbar=1$ ,  $16\pi G=1$ ), что приводило к тому, что  $\kappa = 1/2$  (DeWitt, 1964). Это показывает естественный характер планковских мер для величин, входящих в уравнение тяготения Эйнштейна — компонент тензора кривизны и энергии-импульса.

В 1930-е годы высказывались аргументы в пользу нефундаментальности  $G$ . Космология Э. Милна (1933–35) строилась как космология с изменяющейся  $G$  (Milne, 1933, 1935). В 1937 г. П.А.М. Дирак выдвинул гипотезу качественного объяснения “больших чисел”, из которой вытекало уменьшение  $G$  с космологическим временем (Dirac, 1937a). Тем самым становилась понятной исключительная слабость гравитации по сравнению с обычными взаимодействиями. Ныне изменение гравитационной постоянной, как реальный факт, рассматривает Дж. Барроу (Barrow, 2002, р. 272–273). Однако достоверного экспериментального подтверждения изменения  $G$  пока не имеет (по крайней мере на данный момент) (см. гл. 4.4). Заметим, что В. Паули в 1934 г. высказал пред-

<sup>1)</sup> Визгин, 1981, Франкфурт, 1968; Пайс, 1982; библиография: Визгин, 2001.

положение, что  $G$  возможно является квадратом другой постоянной (при этом автоматически объясняется притяжение и отсутствие гравитационного отталкивания) (Паули, 1934/36). Г.А. Гамов, как отмечали Г.Е. Горелик и В.Я. Френкель, также “сомневался в фундаментальности  $G$ , подозревая, что это замаскированный квадрат константы слабого взаимодействия, то легко допуская переменность  $G$ , то вообще исключая ее из числа «истинных констант»” (Горелик, Френкель, 1990, с.150). В связи с этим отметим, что в случае, если какой-либо масштаб энергии  $E_o$  или длины  $L_o$  приобретет фундаментальный смысл такой же, какой имеют постоянные  $c$  и  $\hbar$ , гравитационная постоянная будет выражаться через квадрат безразмерной постоянной:  $G = \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\hbar c^5}{E_o^2} = \frac{1}{a^2} \cdot \frac{c^3 L_o^2}{\hbar}$ , где постоянная  $a = E_{пл.}/E_o = L_o/L_{пл.}$ . Тем самым,  $G$  оказывается всегда положительной, т. е. автоматически объясняется существование именно притяжения и не существование гравитационного отталкивания. Например, в случае  $E_o = \eta$  ( $\eta$  — вакуумное среднее, определяющее массы частиц) гравитационная постоянная определяется соотношением:  $G = \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\hbar c^5}{\eta^2}$ , где  $a = E_{пл.}/\eta = 4,9586(1) \cdot 10^{16}$  — безразмерное “большое число”, характеризующее соотношение между слабым и гравитационным взаимодействиями.

Возможные модификации гравитации на малых расстояниях рассматривал Дж. Шерк (Шерк, 1979, с. 235–237). Он предположил, что гравитацию и ее суперсимметричные обобщения следует изменить на малых расстояниях. Тогда можно было бы ожидать, отмечает Шерк, что гравитационная постоянная  $G$  является не фундаментальной, а феноменологической постоянной, выражаемой в виде  $G \sim g^2/\Lambda^2$ , где  $g$  — фундаментальная безразмерная константа взаимодействия,  $\Lambda$  — масштаб энергии, на котором эйнштейновская теория гравитации перестает быть справедливой.

Тем не менее, пока более распространено представление о фундаментальности  $G$  и вера в справедливость эйнштейновской теории гравитации для всех масштабов. Однако, как отметил Осборн, основываясь на анализе квантовых ограничений на измерение кривизны, “понятие кривизны и понятия энергии, массы и импульса (если представить их в виде  $G_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} G$  и приравнять тензору энергии-импульса  $\kappa T_{ik}$ ) определены лишь для очень больших масс и больших объемов пространства” (Осборн, 1949, с. 284).

Отметим, что гравитационная постоянная добилась фундаментального статуса не сама по себе, в отличие от постоянных  $c$  и  $\hbar$ , а именно в связи с этими постоянными. В 1918 г. А. Эддингтон провозгласил фундаментальность всех трех постоянных:  $c$ ,  $\hbar$ ,  $G$ . В 1928 г. Г. Гамов, Д.Д. Иваненко, Л.Д. Ландау, в 1930-е гг. — М.П. Бронштейн, а затем в 1950-60-е гг. А.Л. Зельманов представили эволюцию физики как переход к  $c\hbar G$ -теории, т.е. общей теории, в которой все эти три по-



стоянные играют фундаментальную роль. Такой подход в дальнейшем развивали Г.Е. Горелик, Л.Д. Фаддеев, Л.Б. Окунь и др. (см. гл. 3.3). В 1950-е гг. выяснилась роль планковских величин в физике как границ применимости современных физических теорий — общей теории относительности и квантовой механики (первые идеи были высказаны еще М.П. Бронштейном в 1936 г.) (о роли планковских величин см. п. 4.1.3).

В 1967 г. А.Д. Сахаров выдвинул оригинальную идею интерпретации тяготения как упругости квантового вакуума (Сахаров, 1967а, б). Идея была изложена Сахаровым в небольшой заметке в ДАН АН СССР в августе 1967 г. и более подробно — в сборнике препринтов по гравитации и теории поля, изданном Институтом прикладной математики АН СССР в октябре того же года. При этом гравитационная постоянная определялась как эффективная константа, обусловленная флуктуациями вакуума на планковских масштабах. Сахаров получил следующую формулу (Сахаров, 1995, с. 161):

$$G = \frac{12\pi}{c_0 M_0^2 \ln |c_0/c_1|},$$

где  $M_0 \sim 10^{28}$  эВ, а  $c_0$  и  $c_1$  — некоторые постоянные.

Однако, поскольку планковская масса  $M_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 10^{28}$  эВ, то сахаровская формула будет работать только в том случае, если масштаб  $M_0 \sim 10^{28}$  эВ получит *независимое от гравитации обоснование* (например, как масштаб объединения трех других элементарных взаимодействий).

Следует также отметить, что гравитационная постоянная  $G$  не является естественным масштабом никакой физической величины, в отличие от таких постоянных как  $c$  и  $\hbar$ . Отсюда вытекает и отсутствие правильного предельного перехода по этой константе ( $G$  просто полагается равной нулю, т.е. гравитация выключается не постепенно, а сразу). Формально постепенность “выключения” гравитации можно достичь при предельном переходе  $\ell \gg r_g = \frac{2GM}{c^2}$ , где  $M$  — масса данного тела (т.е. для каждого тела получается свой характерный масштаб). Причем это неравенство должно быть очень сильным  $\ell \gg \gg r_g = \frac{2GM}{c^2}$  (например, гравитационный радиус Солнца  $r_g = 2,95325008$  км, а последняя планета находится на расстоянии  $6 \cdot 10^9$  км). Т.е. даже для  $\ell/r_g = 10^9$  гравитация все еще не “выключается”. Поэтому можно ввести логарифмический критерий  $\ln(\ell/r_g) \gg 1$ , но и он не является универсальным, а специфическим для данного тела.

Весь этот спектр концептуальных вопросов в связи с гравитационной постоянной  $G$  требует еще дополнительных специальных исследований физиков-теоретиков, экспериментаторов, методологов и историков науки.

## Глава 2.2

### Константы элементарных взаимодействий и их объединение

В данной главе рассматриваются константы трех взаимодействий — электромагнитного, слабого и сильного, прежде всего константы, характеризующие их силу. В 1970-е гг. прояснился путь объединения этих взаимодействий, получивший название Стандартной модели. Согласно сложившимся представлениям значения констант взаимодействий с ростом переданного импульса (уменьшением расстояния) приближаются друг к другу, пока не соединятся в одной точке. Помимо силовых констант, в двух взаимодействиях — слабом и сильном, существуют выделенные масштабы (вакуумное среднее  $\eta = 246$  ГэВ и конфайнмент кварков  $\Lambda^{(5)} = 0,211(30)$  ГэВ).

**2.2.1. Константы электромагнитного взаимодействия.** В отличие от других областей физики, в электромагнетизме, к сожалению, до сих пор не существует единства в применении систем единиц. Дело в том, что сама электромагнитная теория возникла в результате объединения законов электрических и магнитных явлений, в которых изначально использовались разные системы единиц. Некоторое объединение этих систем достигнуто гауссовой системой, однако в ней нарушена когерентность между единицами электрических и магнитных величин, возможно поэтому гауссова система так никогда и не была узаконена международными соглашениями, хотя она нашла широкое применение в теоретической электродинамике. Единицы электрических величин в гауссовой системе совпадают с единицами электростатической системы единиц и определяются путем выбора постоянной в законе Кулона равной точно 1.

В конце XIX в. возникла система Лоренца–Хевисайда (рационализованная гауссова система единиц), в которой в закон Кулона и другие законы электромагнетизма был введен множитель  $1/4\pi$ . При этом множитель  $4\pi$  стал фигурировать только в формулах, где существует осевая или сферическая симметрия, что удобно и соответствует принятым единицам механики. На рубеже XIX–XX вв. потребности прикладного электромагнетизма привели к возникновению системы МКСА, в которой четвертой основной единицей стал ампер — единица силы электрического тока. Эта система легла в основу Международной системы СИ, которая юридически узаконена как общеобязательная для использования в учебной и научной литературе с 1961 г. Тем не менее, эта система единиц из-за принципиальных недостатков так и смогла “завоевать” всю физику — теоретики по-прежнему широко используют гауссову систему единиц, в физике высоких энергий применяется рационализованная гауссова система единиц (система Лоренца–Хевисайда), а в физике элементарных частиц удобным является ис-

пользование в качестве меры (эталоны) заряда элементарного заряда  $e$ , так как все частицы имеют заряды кратные  $e$ . В результате, в одних и тех же монографиях и даже статьях одни формулы записываются в одной системе единиц, другие — в другой системе единиц, а третьи — в третьей. Иногда это делается даже без указания системы единиц, в которой записана формула. Проблема заключается в том, что все используемые в настоящее время в электромагнетизме системы единиц нарушают те или иные принципы метрологии. Причем все они нарушают следующий принцип: *система единиц должна строиться так, чтобы физические формулы имели универсальный вид, независимый от выбора единиц измерения физических величин*. К сожалению, во всех применяемых в электромагнетизме системах единиц коэффициенты в формулах не являются универсальными, а конвенциональными, так как они обусловлены тем или иным выбором конкретной единицы электрического заряда. Поскольку одним из характерных свойств фундаментальных постоянных является то, что они фигурируют в качестве коэффициентов в физических уравнениях, то нарушение этого принципа метрологии приводит к тому, что в физических уравнениях конвенциональные и фундаментальные постоянные начинают фигурировать *наравне*. Тем не менее, системы единиц с нарушением этого принципа позволяют достаточно продуктивно работать и получать правильные результаты, однако только до тех пор, пока не появляются формулы, в которых фигурируют только одни физические постоянные. Такого рода формулы в таких системах единиц являются *конвенциональными*, а не универсальными. А ошибочное представление об их универсальности приводит к ошибочным представлениям о статусе постоянных, которые в них фигурируют. Классическим примером такого рода формулы является формула постоянной тонкой структуры в гауссовой системе единиц:  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$ . На протяжении всего XX в. она служила источником ошибочных утверждений (которые делали и такие ученые, как М. Борн, М.П. Бронштейн, П.А.М. Дирак, см. подробнее: *Томилин, 2001*), о якобы нефундаментальности одной из этих трех постоянных. На самом деле, эта формула такова, потому что в этой системе единиц единица электрического заряда *выбрана* так, что  $e^2 \equiv \hbar c$ . В реальности в этой формуле фигурирует еще одна размерная постоянная, которая в гауссовой системе просто *выбрана* равной 1 (см. ниже). Другим примером такого рода, по-видимому, являются формулы для так называемого магнитного монополя, коэффициенты в которых являются конвенциональными, т. е. зависящими от выбора единиц (см. п. 4.2.1).

Учитывая все эти проблемы с современными системами единиц, для рассмотрения постоянных электромагнитного взаимодействия выберем логический путь, выявляя прежде всего универсальные физические закономерности и универсальные постоянные, а затем, опираясь на них, проанализируем постоянные в ныне принятых системах единиц.

**Постоянная тонкой структуры (постоянная Зоммерфельда) и постоянная Кулона.** Силу электромагнитного взаимодействия характеризует безразмерная постоянная  $\alpha$ , определением которой может служить формула для силы электромагнитного взаимодействия двух частиц. Существуют следующие экспериментальные факты и основные положения электромагнетизма:

- Сила электростатического взаимодействия обратно пропорциональна квадрату расстояния между взаимодействующими частицами:

$$F \sim \frac{1}{r^2}.$$

- Источником электромагнитных явлений являются электрические заряды частиц, которые квантуются в единицах кванта электрического заряда  $e$  (элементарного заряда) и имеют два знака: положительные и отрицательные, причем положительный заряд протона по абсолютной величине точно равен отрицательному заряду электрона.

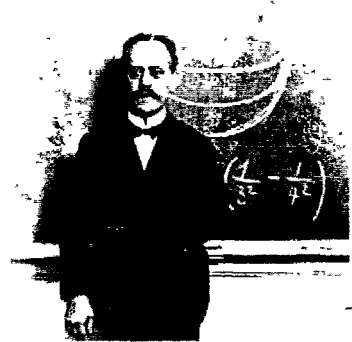
- Сила взаимодействия двух электронов (или любых частиц, заряды которых численно равны кванту электрического заряда  $e$ ):

$$F = \frac{\alpha \hbar c}{r^2}, \quad (2.2 1)$$

где  $\alpha$  — безразмерная постоянная, характеризующая силу электромагнитного взаимодействия, называемая в силу исторических причин *постоянной тонкой структуры* (именно эту формулу следует рассматривать как определение  $\alpha$ ). В системе  $c = 1$ ,  $\hbar = 1$  эта формула имеет простую форму:  $F = \alpha/r^2$ .

Численное значение  $\alpha$  экспериментально определено с большой точностью:  $\alpha = 1/137, 03599911(46) \cong 1/137$ , однако оно до сих пор так и остается теоретически необъясненным (попытки подбора какой-либо математической формулы для  $\alpha$  превратились в своеобразный интеллектуальный спорт, но так и остались пока безуспешными, см. гл. 4.3.).

История постоянной тонкой структуры подробно исследовалась в статьях Х. Крага (*Kragh*, 2003а, б). Впервые она появилась в статье 1910 г. А. Гааза, который обозначил величину  $\hbar c/e^2$  символом  $C$ . В работах Н. Бора по теории атома фигурировал множитель  $e^2/\hbar c$ , однако специальных обозначений для него Бор не вводил. Фактически история постоянной тонкой структуры началась с работ А. Зоммерфельда по теории спектров: когда он ввел обозначение  $\alpha' = (\pi e^2/\hbar c)^2$  (*Sommerfeld*, 1915), а затем  $\alpha = 2\pi e^2/\hbar c$ , определяя ее как отношение двух угловых мо-



А. Зоммерфельд

ментов в теории кеплеровского движения электрона вокруг ядра атома (Sommerfeld, 1916). Интересно, что отношение  $e^2/\hbar c \sim 10^{-3}$ , где  $e$  измеряется в электростатических единицах, первым оценил А. Эйнштейн (Einstein, 1909, S.192). Значение этой постоянной исключительно велико для физики атома, который является электромагнитной системой элементарных частиц, и, следовательно, для всего материального мира (см. ниже).

• Сила взаимодействия зарядов пропорциональна электрическим зарядам взаимодействующих тел. Если частица имеет заряд, равный  $q = ne$ , где  $e$  – элементарный заряд, то сила их взаимодействия возрастает в  $n$  раз. Это же верно и для второго заряда. В результате получаем, что в общем случае сила электромагнитного взаимодействия двух тел с зарядами  $q_1$  и  $q_2$ , находящихся на расстоянии  $r$ , равна:

$$F = \alpha \frac{(q_1/e)(q_2/e)\hbar c}{r^2} = \alpha \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\hbar c}{e^2}. \quad (2.2.2)$$

Эта формула выражает фундаментальные физические закономерности и не зависит от выбора единиц измерения механических и электромагнитных величин. Ее можно упростить, введя обозначение:

$$k_e = \alpha \frac{\hbar c}{e^2}. \quad (2.2.3)$$

Таким образом, закон Кулона, описывающий электростатическое взаимодействие электрических зарядов, имеет общий вид:  $F = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2}$ , где универсальная постоянная  $k_e = \alpha \frac{\hbar c}{e^2}$  при любых единицах механических и электромагнитных величин. Эту постоянную логично называть *постоянной Кулона*, поскольку в физике уже сложилась традиция названий постоянных по ассоциативной связи с законами, в которых она фигурирует, даже если сами авторы эти постоянные не вводили (постоянная Ньютона, постоянная Фарадея, постоянная Больцмана). Постоянная Кулона  $k_e$  имеет ясный физический смысл – это сила электромагнитного взаимодействия двух единичных зарядов на единичном расстоянии. Отметим, что размерная постоянная в общей форме (“general expression”) закона Кулона фигурировала еще у Дж.К. Максвелла:  $f e e' / r^2$ , причем он четко указал ее смысл: “ $f$  – отталкивание двух единичных зарядов на единичном расстоянии”<sup>1)</sup>; затем же он переходил от использования в качестве единицы электрического заряда произвольного эталона (“величины электризации некоторого определенного куска стекла, наэлектризованного в начале наших опытов”) к определению единицы электрического заряда через три механические единицы путем выбора  $f=1$  (электростатическая система единиц). Однако в этом же “Трактате” Максвелл пророчески указал на

<sup>1)</sup> Maxwell, 1873, p 42; см. Максвелл, 1873/91, т. 1, с. 65

то, что если из опытов по электролизу следует существование “молекулы электричества” (то, что сейчас называется элементарным зарядом  $e$ ), то это будет “наиболее естественная единица электричества” (“the most natural unit of electricity”) <sup>1)</sup>.

• Электромагнитные закономерности описываются четырьмя векторами полей: электрическим полем  $\mathbf{E}$ , магнитным полем  $\mathbf{B}$  (“магнитной индукцией”), а также вспомогательными полями  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{H}$ . Соотношения между полями, а также между полями и источниками определяются уравнениями Максвелла:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \dot{\mathbf{D}} + \mathbf{J}, & \operatorname{div} \mathbf{D} &= \rho, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\dot{\mathbf{B}}, & \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \end{aligned}$$

где  $\rho$  — плотность электрического заряда,  $\mathbf{j}$  — плотность электрического тока. Иногда в этих уравнениях в некоторых системах единиц выделяются множители  $4\pi$  при плотности заряда и тока и  $1/c$  при полях.

• Существует фундаментальный закон сохранения электрического заряда, в максвелловских уравнениях он воплощен в *уравнении непрерывности*:  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{J} = 0$ .

• Уравнение  $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$  выражает собой факт отсутствия магнитных зарядов как *специальных* источников магнитного поля, в отличие от электрических зарядов как реальных источников электрического поля. Таким образом, источником магнитного поля  $\mathbf{B}$  является только *движущийся* электрический заряд.

• В результате развития специальной теории относительности на основе открытия группы, оставляющей инвариантными максвелловские уравнения, сама максвелловская электродинамика приобрела законченный вид. Поэтому уравнение для силы Лоренца движущегося заряда получаются из закона для статического случая при применении релятивистских преобразований (преобразований Лоренца):

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \xrightarrow{\text{релятивистские преобразования}} \mathbf{F} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v}, \mathbf{B}].$$

Таким образом, силу Лоренца  $\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v}, \mathbf{B}]$  можно рассматривать как определение магнитного поля  $\mathbf{B}$ .

• Основные и вспомогательные поля связывают следующие соотношения

$$\mathbf{D} = \frac{c}{4\pi k_e} \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad \mathbf{H} = \frac{c}{4\pi k_e} \mathbf{B} - \mathbf{M},$$

где  $\mathbf{P}$  — вектор поляризации,  $\mathbf{M}$  — вектор намагниченности, которые описывают состояние среды. Отсюда видно, что основные и вспомогательные поля имеют *принципиально* разную размерность. Это

<sup>1)</sup> Maxwell, 1873, v. 1, p. 312; Максвелл, 1873/91, т. 1, с. 308.

показывает правоту А. Зоммерфельда, проводившего различия между интенсивными (т.е. отвечающими на вопрос “как сильно”) полями  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  и экстенсивными (т.е. отвечающими на вопрос “как много”) полями  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{H}$  (Зоммерфельд, 1949, с. 126). *Между интенсивными и экстенсивными величинами должна находиться интенсивная (силовая) постоянная*, что и видно из вышеприведенных формул (этот же принцип проявляется и в термодинамике, см.: Суханов, 2005, с. 1294).

• Электромагнитное поле описывается 4-х-тензорами  $F_{ik}$  и  $f_{ik}$  с нулевыми диагональными элементами, остальные компоненты которых составляют компоненты векторов соответственно  $\mathbf{E} = (E_x, E_y, E_z)$  и  $\mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z)$  для тензора  $F_{ik}$  и  $\mathbf{D} = (D_x, D_y, D_z)$  и  $\mathbf{H} = (H_x, H_y, H_z)$  для  $f_{ik}$ . При использовании тензоров электромагнитного поля уравнения Максвелла сокращаются до двух:  $\frac{\partial f_{ik}}{\partial x_k} = s_i$  и  $\frac{\partial F_{ik}^*}{\partial x_k} = 0$ , где  $s_i = (j_x, j_y, j_z, \rho/c)$  — четырехток и  $x_k = (x, y, z, ct)$ . При этом соотношение между тензорами:  $f_{ik} = \frac{c}{4\pi k_e} F_{ik} - m_{ik}$ , где тензор  $m_{ik}$  образуется из компонент векторов поляризации  $\mathbf{P} = (P_x, P_y, P_z)$  и намагниченности  $\mathbf{M} = (M_x, M_y, M_z)$ . Как видим, размерная постоянная  $k_e$  фигурирует фактически только в соотношении между этими двумя тензорами электромагнитного поля, т.е. между электрическими полями  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{D}$ , а также между магнитными полями  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{H}$ .

В 1950-е годы выяснилось, что постоянная тонкой структуры, на самом деле, имеет численное значение  $\alpha \cong \frac{1}{137,036\dots}$  лишь при *малых* переданных 4-х-импульсах  $Q$  (т.е. при небольших энергиях взаимодействия или на больших расстояниях), а при увеличении переданного импульса медленно возрастает навстречу силовым постоянным других взаимодействий (например,  $\alpha^{-1}(m_\tau) = 133,557(36)$ ,  $\alpha^{-1}(m_b) = 132,138(39)$ ,  $\alpha^{-1}(M_z) = 127,843(39)$  (Pivovarov, 2002, с. 1367), вплоть до значения  $\alpha_{GUT}$ , при котором происходит объединение взаимодействий (в 1970-е – 1980-е гг. предполагалось, что  $\alpha_{GUT} \sim 1/42$ , ныне принято, что  $\alpha_{GUT} \sim 1/25,6$ ). Пропорционально ей растет и кулоновская постоянная  $k_e = \alpha \frac{\hbar c}{e^2}$  (при выборе  $c$ ,  $\hbar$ ,  $e$  в качестве эталонов). Таким образом, стало ясно, что на самом деле, электродинамика является нелинейной теорией, а классическая электродинамика — ее линейное приближение при предельном значении  $\alpha \cong \frac{1}{137,036\dots}$ . Несмотря на то, что постоянная  $\alpha$  зависит от переданного импульса и медленно возрастает с его увеличением (т.е. является безразмерной постоянной второго рода), однако в атомной физике, спектроскопии она по праву может считаться *фундаментальной постоянной* с колоссальной точностью, превышающей потребности эксперимента, что позволяет с успехом

использовать классическую электродинамику как точную теорию. При высоких энергиях также можно использовать уравнения классической электродинамики, однако вводя затем поправки, связанные с изменением  $\alpha$  при этих энергиях (так называемая перенормировка заряда). Таким образом, между электрическими полями  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{D}$ , а также между магнитными полями  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{H}$  на самом деле существует нелинейное соотношение, поэтому пара  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{H}$  вовсе не является в электродинамике лишней даже в вакууме.

### Размерные постоянные в применяемых системах единиц.

Перейдем теперь к анализу размерных постоянных электромагнетизма в наиболее применяемых системах единиц, таких как гауссова, Лоренца–Хевисайда и СИ. Часто гауссову систему называют системой СГС (сантиметр–грамм–секунда), однако такое название неточно, так как выбор трех механических единиц вовсе никаким образом не определяет единицы электромагнитных и термодинамических величин. К примеру, система Лоренца–Хевисайда — тоже система сантиметр–грамм–секунда, отличается же она от гауссовой только выбором единиц электромагнитных величин.

В гауссовой системе, аналогично электростатической системе единиц, постоянная  $k_e$  выбирается равной точно 1. Тем самым единица электрического заряда однозначно определяется через три основные единицы механики. Такой выбор приводит к *силовому* определению единицы электрического заряда: это заряд, который на расстоянии 1 см отталкивает такой же заряд с силой в 1 дину. При этом электрический заряд и все остальные электромагнитные физические величины приобретают чисто механическую размерность, причем с дробными степенями. Например, размерность электрического заряда ( $масса^{1/2} \times \times \text{длина}^{3/2} \times \text{время}^{-1}$ ) и единица измерения: ( $г^{1/2} \times см^{3/2} \times сек^{-1}$ ). Механические системы единиц, в том числе системы СГС, являются одним из остаточных наследий механицизма, попыток свести все явления, в том числе электромагнитные и термодинамические к механическим. Гауссова система хороша тем, что позволяет минимизировать коэффициенты в уравнениях электромагнетизма, а электрическое и магнитное поля  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ , являющиеся компонентами одного тензора, разделить одной размерностью, что удобно. Однако в физике существуют величины разной размерности, являющиеся компонентами единых 4-х векторов (длина и время, энергия и импульс). За редукцию же электромагнитных единиц к механическим приходится платить неприемлемую цену: в таких системах единиц оказывается непродуктивным применение в задачах электромагнетизма такого мощного инструмента, как метод анализа размерностей. В связи с этим все теоретики, даже являющиеся апологетами гауссовой системы, как например, П. Бриджмен, при решении конкретных задач с помощью метода анализа размерностей неизбежно вводят еще одну дополнительную основную единицу —



электромагнитную, *поступаясь декларируемым принципом необходимости и достаточности трех основных механических единиц*. То же самое происходит, когда решаются конкретные задачи термодинамики: там с целью продуктивности метода анализа размерностей вводится еще одна основная единица — температура. В конце концов это привело к признанию, что гауссова система на самом деле основана не на трех, а на *четырёх* основных единицах, включая температуру. Дальнейший шаг, требуемый принципами метрологии, неизбежно связан с введением пятой основной единицы — электромагнитной.

Если мы выбираем  $k_e=1$  (гауссова система), тогда формула (2.2.3) превращается в хорошо известную формулу  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$ , которая является ничем иным как просто *определением элементарного заряда в гауссовой системе единиц*:  $e^2 \equiv \alpha \hbar c$ . Поэтому ее нельзя, разумеется, одновременно использовать для определения постоянной тонкой структуры  $\alpha \equiv \frac{e^2}{\hbar c}$ , как это иногда встречается в литературе. На самом деле, безразмерную постоянную можно корректно определять только как отношение физических постоянных однородных по размерности. Поясним это на очевидном примере: и гауссова система, и система Лоренца–Хевисайда ( $k_e = 1/4\pi$ ), как уже указывалось выше, являются системами СГС (сантиметр–грамм–секунда), они отличаются только единицами электромагнитных величин. Следовательно, в этих системах постоянные, имеющие механическую размерность эквивалентны, в то время как единицы заряда отличаются в  $\sqrt{4\pi}$  раз, безразмерная постоянная тонкой структуры  $\alpha$  вообще не зависит от выбора единиц, следовательно, “определение”  $\alpha \equiv \frac{e^2}{\hbar c}$  уже в системе Лоренца–Хевисайда не работает.

В этой системе, как прямо следует из (2.2.3):  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi \hbar c}$ , которое тоже правильнее рассматривать как определение элементарного заряда в этой системе единиц:  $e^2 \equiv 4\pi \alpha \hbar c$ , чем как определение  $\alpha$ . Поэтому в качестве универсального определения  $\alpha$  следует рассматривать (2.2.1), а не прибегать к разным определениям в разных системах единиц. Система Лоренца–Хевисайда отличается от гауссовой математически постоянными в законах электромагнетизма. При записи уравнений в этой системе множители типа  $4\pi$  оказываются только в тех законах, в которых существует осевая или сферическая симметрия, и исчезают из законов, в которых такая симметрия отсутствует, что соответствует принятому подходу в геометрии и механике. И в гауссовой системе и в системе Лоренца–Хевисайда в законах электромагнетизма отсутствуют какие-либо физические постоянные, характеризующие силу электромагнитного взаимодействия. На самом деле, при таком выборе единиц постоянная тонкой структуры никуда не исчезает, а просто оказывается включенной в сами определения ряда электромагнитных

величин, в том числе, электрического заряда. В этих системах единиц в силу принятых определений  $e^2 \sim \alpha \hbar c$  и, следовательно,  $e^2$  играет роль размерной константы электромагнитного взаимодействия. Именно это является причиной так называемого “роста” электрического заряда при высоких энергиях, при том, что закон сохранения электрического заряда не нарушается. На самом деле, речь идет о росте постоянной тонкой структуры  $\alpha$  и, соответственно, силы электромагнитного взаимодействия двух элементарных зарядов  $F = \frac{\alpha \hbar c}{r^2}$ . Просто в системе Лоренца–Хевисайда, которая нашла широкое применение в КЭД и физике высоких энергий, с ростом переданного импульса растет элементарный заряд  $e$ , выраженный в механических единицах, поскольку он определяется как  $e^2 \equiv 4\pi\alpha\hbar c$ .

В системе СИ вводится в дополнение к трем механическим еще одна основная единица — сила тока “Ампер”. Это позволяет успешно применять метод анализа размерностей, в отличие от систем СГС. В системе СИ в уравнения электромагнетизма вводятся сразу две дополнительные размерные постоянные  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$ , которые первоначально называли диэлектрической и магнитной проницаемостями вакуума (между ними существует связь:  $\epsilon_0\mu_0 = \frac{1}{c^2}$ ). При этом закон Кулона

выглядит так:  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1q_2}{r^2}$  (т. е. постоянная  $k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = \frac{\mu_0 c^2}{4\pi}$ ).

Для удобства измерений постоянная  $\mu_0$  выбирается равной точно определенному значению  $4\pi \times 10^{-7}$  Ньютон/(Ампер)<sup>2</sup>. Таким образом, множитель в законе Кулона  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  оказывается равным точно  $10^{-7} \times c^2 \times (\text{Фарада} \times \text{метр})$  или, что эквивалентно,  $10^{-7} \times c^2 \times (\text{Ньютон})/(\text{Ампер})^2$ .

Начиная с 1983 г., в связи с принятием практического значения скорости света  $c = 299792458$  м/с как точного, постоянная  $\epsilon_0$  и множитель  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  автоматически приобрели точные значения. Приведем курьезное точное значение коэффициента в законе Кулона в системе СИ:  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8987551787,3681764$  (Нм<sup>2</sup>/Кл<sup>2</sup>). Таким образом, в СИ, как и в гауссовой системе, коэффициент  $k_e$  в законе Кулона  $F = k_e \frac{q_1q_2}{r^2}$  выбирается равным некоторому точному значению: в гауссовой системе  $k_e=1$ , в СИ  $k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8987551787,3681764$  (Нм<sup>2</sup>/Кл<sup>2</sup>). Фактически это означает, что единица “Кулон” определяется так, что сила взаимодействия двух электрических зарядов в 1 Кулон на расстоянии 1 метр равна в точности 8987551787,3681764 Ньютон. Однако на самом деле такое теоретически точное определение этого коэффициента в СИ является бессмысленным, так как реальная экспериментальная точность измерений электромагнитных величин на самом деле не превышает 8 знаков. Отсюда также ясно, что введение в СИ четвертой основной

единицы является *фиктивным*: она в точности определяется через три механические единицы. В то же время ее введение дает возможность, как уже указывалось выше, использовать в задачах электромагнетизма метод анализа размерностей.

Относительно статуса постоянных  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  высказывались прямо противоположные мнения. Часть ученых категорически отрицает какой-либо физический смысл этих постоянных, считая их искусственно введенными постоянными, наследием дорелятивистской эфирной эпохи. Например, М.А. Леонтович отмечал, что система СИ пошла по пути введения "совершенно искусственных, не имеющих физического смысла двух констант электрической и магнитной проницаемости вакуума" (Леонтович, 1964, цит. по: 2003, с. 484). Аналогичное мнение высказывал Д.В. Сивухин (Сивухин, 1979, с. 336). Как правило такого же мнения придерживаются физики-теоретики, работающие вне электромагнетизма или в электродинамике вакуума и применяющие гауссову систему, в которой эти постоянные просто отсутствуют в силу принятых определений электромагнитных величин. Другая часть ученых, в основном работающих в экспериментальной электродинамике, напротив, наделяют эти постоянные фундаментальным статусом, связывая их со свойствами вакуума. Такое представление отражалось длительное время в терминах "электрическая постоянная вакуума" и "магнитная постоянная вакуума". Начиная с 1960-х гг., когда произошла попытка тотальной экспансии системы СИ на всю теоретическую физику (не вполне, впрочем, удавшаяся в силу ее принципиальных собственных недостатков) возникла конфронтация между сторонниками гауссовой системы единиц и СИ, напоминая по остроте конфронтацию между СССР и США в период "холодной войны". Единственным ее результатом стала поправка к терминологии: из названий постоянных  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  исчезло упоминание вакуума (они теперь называются просто электрической и магнитной постоянными), однако соотношение  $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ , которое фигурирует в качестве коэффициента между тензорами электромагнитного поля  $F_{ik}$  и  $f_{ik}$ , до сих пор продолжает называться "характерным сопротивлением вакуума" (см.: <http://physics.nist.gov/constants>). Однако, ни гауссова система, ни СИ не сумели увеличить свой ареал применения, в квантовой электродинамике и в физике высоких энергий полностью уступив позиции системе Лоренца-Хевисайда.

Отметим, что в системе СИ формула, связывающая постоянную тонкой структуры и другие постоянные имеет вид:  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{\mu_0 e^2 c}{2h}$ . Эта формула впервые была опубликована А. Зоммерфельдом (Sommerfeld, 1935, S.818) и прямо следует из (2.2.3) при  $k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ .

Очевидно, что постоянные  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  в том виде, в котором выбраны их конкретные значения, не имеют никакого физического смысла, так как они приняты просто для удобства экспериментальных измерений. Однако то место, которое занимают эти постоянные в физических законах, позволяет говорить об их физическом смысле. Так множитель  $(4\pi\epsilon_0)^{-1}$  имеет ясный физический смысл: *это сила взаимодействия двух единичных зарядов (т.е. зарядов, принятых за единицу измерения), находящихся на единичном расстоянии*. Точно также и множитель  $\frac{\mu_0}{2\pi}$  — это сила взаимодействия двух единичных токов на единичном расстоянии.

Однако, поскольку единица заряда в СИ принимается достаточно произвольно, просто исходя из удобства измерения, то это приводит к утрате фундаментального смысла этих постоянных. Отсюда следует важный вывод: если принять в качестве единицы заряда не искусственную, а *естественную* единицу электрического заряда — элементарный электрический заряд  $e$ , это обеспечит фундаментальный смысл множителя  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = \alpha \frac{\hbar c}{e^2}$ .

Дальнейшее развитие систем единиц в электромагнетизме видится следующим образом. Необходимо и сторонникам гауссовой системы, и СИ понять, что есть принципиальные недостатки, равно как и достоинства всех этих систем и сделать шаги по пути перехода к единой системе единиц, не нарушающей основные принципы метрологии.

Как видно из вышеизложенного, во всех этих системах фигурирует одна размерная постоянная, характеризующая силу электромагнитного взаимодействия ( $e^2$  в системах СГС,  $1/\epsilon_0$  в системе СИ). Поэтому единая система единиц в электромагнетизме возможна только при введении основной единицы какой-либо электромагнитной величины (например, заряда или тока) и отказа от выбора точного значения коэффициента в законе Кулона  $k_e$  (который при этом становится измеримой постоянной с точностью, соответствующей точности  $\alpha$ ). Именно такой путь является неизбежным при дальнейшем развитии квантовой метрологии, когда единицы массы (килограмм) и тока (Ампер) будут эталонированы через выбор точных значений постоянных  $\hbar$  и  $e$ . Шаг в этом направлении (отказ от точного значения  $\epsilon_0$ ) со стороны системы СИ уже сделан (Каршенбойм, 2005а, с. 295–296), осталось лишь сделать следующий шаг — перейти от  $\epsilon_0$  к обратной постоянной  $1/\epsilon_0$ , которая и будет при этом являться размерной константой электромагнитного взаимодействия.

**Постоянная тонкой структуры и атом.** Вследствие того, что постоянная тонкой структуры  $\alpha$  является константой связи электромагнитного взаимодействия, она играет огромную роль в строении атома — “кирпичиков” вещества. Так, постоянная тонкой структуры

устанавливает соотношение между т.н. “классическим” радиусом электрона  $r_o = \frac{k_e e^2}{m_e c^2} = 2,817940325(28) \cdot 10^{-15}$  м, комптоновской длиной волны электрона  $\lambda_e = \frac{\hbar}{m_e c} = 3,861592678(26) \cdot 10^{-13}$  м и радиусом первой орбиты атома Бора (боровским радиусом)  $a_o = \frac{\hbar^2}{m_e k_e e^2} = 5,291772108(18) \cdot 10^{-11}$  м (экспериментальные значения: NIST, 2005):

$$\frac{r_o}{\lambda_e} = \frac{\lambda_e}{a_o} = \alpha = \frac{1}{137,03599911(46)} \approx \frac{1}{137}.$$

Наконец, постоянная тонкой структуры определяет соотношение между боровским радиусом  $a_o$  и постоянной Ридберга  $R_\infty = \frac{k_e^2 m_e e^4}{4\pi c \hbar^3} = 10973731,568525(73) \text{ м}^{-1}$ :

$$4\pi R_\infty a_o = \alpha \approx \frac{1}{137}.$$

Таким образом, постоянная тонкой структуры определяет размеры атома, а также характерные частоты излучения, т.е. практически весь окружающий нас мир.

**2.2.2. Постоянная Ферми.** В 1933–34 гг. Э. Ферми выполнил исследования по теории бета-распада (распада нейтрона на протон с испусканием электрона), которые положили начало теории слабого взаимодействия.



Э Ферми

В основу теории Ферми положил аналогию между испусканием  $\beta$ -частиц (электронов) и испусканием “световых квантов” возбужденным атомом. Первоначальная идея заключалась в том, что один из нейтронов атома распадается на протон и электрон, который невозможно локализовать в ядре, так как его комптоновская длина превышает характерный масштаб атомного ядра. Однако такой подход приводил к тому, что энергия вылетающих электронов была бы всегда одной и той же, в то время как наблюдался непрерывный спектр энергий

от 0 до некоторого максимального значения  $\epsilon_o$ . Это привело к гипотезе о несохранении энергии при  $\beta$ -распаде, которую поддерживали Н Бор, Л Д Ландау и др. Помимо этого распад нейтрона со спином  $1/2$  на две частицы с такими же спинами очевидно приводил и к нарушению закона сохранения момента

Выход из этого дала гипотеза, что в ходе распада нейтрона появляется еще одна неизвестная частица — нейтрино:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ . Это

предположение было выдвинуто В. Паули в декабре 1930 г. в одном из частных писем (термин “нейтрино” предложил в 1931 г. именно Э. Ферми). Это спасало законы сохранения и гипотеза гипотетичной частицы была принята, однако убедительные доказательства существования нейтрино были получены только в 1956 г.

Первоначально Ферми послал свое краткое сообщение в виде письма в “Nature”. Однако заметка Ферми была отвергнута, так как носила, по мнению редактора, слишком абстрактный характер (Ферми, 1971, с. 524). В 1933 г. Ферми публикует статью, содержащую все основные расчеты, в итальянском журнале “Ricerca Scientifica” (Ферми, 1933). А год спустя — две более подробные статьи в центральных немецком и итальянском журналах (Ферми, 1934а,б; Ферми, 1934).

Ферми предложил следующий гамильтониан взаимодействия:

$$H = g\{Q\psi(x)\varphi(x) + \text{компл. сопряж.}\},$$

где  $g$  — константа, как отметил Ферми, размерностью  $L^5MT^{-2}$ . Далее Ферми рассчитал численное значение своей постоянной взаимодействия  $g$ , указав, что это оценка с точностью до порядка:  $g = 4 \cdot 10^{-50} \text{ см}^3 \cdot \text{эрг}$  (там же, с. 540). Эта постоянная соответствует современной постоянной  $G_\beta = 1,398(3) \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3$ , отвечающей за  $\beta$ -распад.

В 1956 г. Т. Ли и Ч. Янг предположили, что в слабых взаимодействиях не сохраняется четность. В 1957 г. несколькими группами ученых было открыто нарушение закона сохранения четности (Ц. Ву на  $\beta$ -распаде кобальта; Л. Ледерман и Р. Гарвин при распаде пионов и мюонов; Ф. Крауфорд и др. при распаде гиперонов). В этом же году Л.Д. Ландау, А. Саламом, Т. Ли, Ч. Янгом была выдвинута гипотеза сохранения комбинированной четности (СР-инвариантности). Эти открытия привели Р. Фейнмана и М. Гелл-Манна, Э. Сударшана и Р. Маршака, а также Дж. Сакураи к созданию так называемой V-A (векторно-аксиальной) теории слабых взаимодействий (Feynman, Gell-Mann, 1957/58; Sudarshan, Marshak, 1958; Sakurai, 1958; статья Фейнмана была отправлена в печать в сентябре, статья Сакураи — в октябре 1957 г., а Э. Сударшан и Р. Маршак высказали свои идеи в докладе на конференции в Италии также в сентябре 1957 г.). Слабое взаимодействие представлялось как контактное взаимодействие заряженных токов между элементарными частицами. Э. Сударшан и Р. Маршак предложили следующий гамильтониан для универсального четырехфермионного взаимодействия:

$$G\{[\bar{A}\gamma_\mu(1 + \gamma_5)B]^\dagger[\bar{C}\gamma_\mu(1 + \gamma_5)D] + H.c.\},$$

где  $G$  — универсальная константа связи слабого взаимодействия (ныне она обозначается  $G_F$ ) и  $A, B, C, D$  — четыре дираковских поля частиц,  $H.c.$  — эрмитово сопряженный оператор. Этот гамильтониан представлял собой комбинацию V-A (векторного и аксиального тока)

и позволял объяснять все бета-распады. Гамильтониан, предложенный Сакураи был по структуре аналогичен за исключением обозначений “истинных” фермионных полей, которые он обозначал  $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$  (Sakurai, 1958, p. 652).

В 1963 г. Н. Кабиббо распространил универсальную V-A теорию слабых взаимодействий на странные частицы и вывел, что между постоянной  $G_\beta$  и универсальной постоянной Ферми  $G_F$  существует следующее соотношение:  $G_\beta = G_F \cos \theta$ , где  $\cos \theta = 0,9736(21)$ ,  $\theta \approx 13^\circ$  — этот угол носит название угла Кабиббо (Cabibbo, 1963, p. 532).

В 1960-е гг. была открыта кварковая структура вещества. Это привело к тому, что заряженные токи в теории Ферми стали рассматриваться как суммы девяти заряженных кварковых токов. Коэффициенты этих заряженных токов представляют в виде матрицы Кобаяши-Маскавы с разными вариантами параметризации, как правило, через три угла и фазовый множитель (Kobayashi, Maskawa, 1972).

Третий шаг был связан с введением промежуточных калибровочных  $W^\pm$  и  $Z$ -бозонов, переводящих одни кварки в другие, и объединением электромагнитного и слабого взаимодействий на основе группы  $SU(2)_L \otimes U(1)$  (см. п. 2.2.4). Теория Ферми сохранила свое значение как низкоэнергетический предел взаимодействия, осуществляемого путем обмена бозонами.

В результате развития теории слабого взаимодействия выяснилось, что размерная постоянная Ферми  $G_F = 1,43588(2) \cdot 10^{-49}$  эрг  $\cdot$  см<sup>3</sup> =  $= 1,16639(1) \times 10^{-5} (\hbar^3 c^3) / \text{ГэВ}^2$  является универсальной постоянной слабого взаимодействия, однако помимо нее в теории фигурирует еще целый ряд эмпирических постоянных, которые будут, очевидно, выведены в рамках единой физической теории.

**2.2.3. Константы сильного взаимодействия.** Сильное взаимодействие ответственно за стабильность элементарных частиц, как системы кварков (кварк-кварковые силы) и ядра как протон-нейтронной системы (ядерные силы). И те, и другие силы передаются глюонами, имеющими нулевую массу, спин 1, нулевой электрический заряд, но несущими цветовой заряд. Ядерные силы принято характеризовать постоянной  $g_\pi^2/4\pi \approx 14$ , а кварк-кварковые силы — постоянной  $\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$ , которая определяется в диапазоне энергий от  $\Lambda \sim 0,211(30)$  ГэВ и выше, где сильно меняется, падая от бесконечных значений до  $\alpha_s(M_z) = 0,119(2)$  и затем до величины, соответствующей константе объединения взаимодействий.

Развитие теории сильного взаимодействия шло постепенно вглубь от раскрытия строения ядер атомов, возникновения составных моделей ядер, исследования их стабильности, до возникновения составных моделей элементарных частиц. После открытия Э. Резерфордом ядра атома, в котором сосредоточены электрически положительные частицы — протоны, стало ясно, что должны существовать мощные

силы, способные удерживать электрически отталкивающиеся частицы в ядре атома. Создание протон-нейтронной модели ядра (В. Гейзенберг, Д.Д. Иваненко) и открытие нестабильности нейтрона привело в 1935 г. Х. Юкаву к предположению, что ядерное взаимодействие осуществляется путем обмена между нуклонами (нейтронами и протонами) частиц с массой порядка  $100 \text{ МэВ}/c^2$ . Эти частицы — пионы в 1947 г., действительно, были обнаружены в космических лучах.

В 1950–60-е годы возникли составные модели элементарных частиц. В результате в физике утвердилась кварковая модель элементарных частиц, предложенная М. Гелл-Манном и Дж. Цвейгом. Согласно этой модели все барионы состоят из трех кварков, а мезоны — из кварка и антикварка. Эта модель позволила однозначно описать все известные элементарные частицы. Кварки и антикварки имеют дробный электрический заряд ( $\pm 1/3$  или  $\pm 2/3$ ), а также характеризуются особым квантовым числом, для которого принято название “цвет”, так как он принимает три градации, которые в сумме нейтрализуются. Поэтому адроны выглядят нейтральными по цвету (“белыми”) и несущими целочисленный электрический заряд. Теория цветового взаимодействия между кварками получила название квантовой хромодинамики. При этом ядерные силы внутри ядра удалось полностью описать через взаимодействие между кварками, составляющими различные частицы.

В квантовой хромодинамике имеется универсальная безразмерная постоянная  $\alpha_s$  и соответствующая ей размерная постоянная  $g_s^2 = 4\pi\alpha_s\hbar c$ . Константа сильного взаимодействия на самом деле не имеет постоянного значения, а зависит от переданного импульса следующим образом:

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{4\pi}{b \ln(Q^2/\Lambda^2)},$$

где  $b = 11 - \frac{2}{3}N_f$ ,  $N_f$  — число типов кварков (“ароматов”). Эта формула получена в однопетлевом приближении при учете, что переданный импульс  $Q$  много больше удвоенной массы кварков, и хорошо работает при  $Q > 2-3 \text{ ГэВ}$ . При этом для разных диапазонов импульсов следует использовать разное число типов кварков:  $N_f = 5$  для  $Q^2 > 100 \text{ ГэВ}^2$ . Для  $1 < Q^2 < 10 \text{ ГэВ}^2$  вклады тяжелых кварков можно не учитывать и  $N_f$  считать равным 3, а в диапазоне  $10 < Q^2 < 100 \text{ ГэВ}^2$  —  $N_f = 4$ . Помимо этого при импульсах  $Q < 10\Lambda$  формула должна корректироваться с учетом двухпетлевого приближения, а при  $Q < (3-5)\Lambda$  — трехпетлевого приближения и т. д., что существенно усложняет вид формулы (см.: *Hinchliffe*, 1998; *Вайнберг*, 2001, т. 2, с. 172).

В отличие от КЭД константа связи КХД уменьшается с ростом переданного импульса  $Q^2$ . Это было впервые обнаружено в 1968 г. в экспериментах по глубоко неупругому рассеянию электронов на нуклонах, и нашло естественное объяснение после открытия асимптотической свободы (“asymptotic freedom”) неабелевых калибровочных



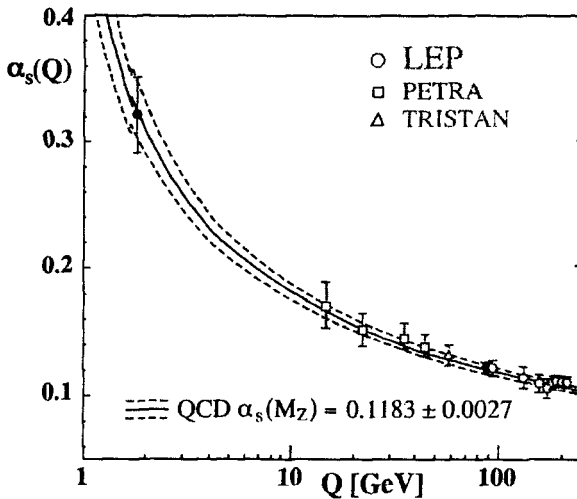


Рис. 2.2.3. Зависимость константы сильного взаимодействия  $\alpha_s$  от энергии по данным экспериментов (Bethke, 2004)

теорий Д. Политцером, Д. Гроссом и Ф. Вильчеком в 1973 г. (Нобелевская премия по физике, 2004)<sup>1)</sup>. С другой стороны при некотором характерном значении постоянной  $\Lambda$  константа связи  $\alpha_s$  становится бесконечно большой, что и обеспечивает конфайнмент — удержание кварков (см. рис. 2.2.3). Таким образом, в КХД имеется размерная постоянная, являющаяся естественным масштабом импульса (*a, следовательно, энергии и расстояния*). До этого только двум физическим теориям — специальной теории относительности и квантовой механике — были присущи две размерные постоянные, являющиеся естественными масштабами физических величин — соответственно, скорость света  $c$  и постоянная Планка  $\hbar$ . Роль размерной постоянной  $\Lambda$  как естественного масштаба энергии в КХД стала основанием для утверждения ее фундаментальности (Розенталь, 1980, с. 241) или универсальности (Окунь, 1990, с. 56). А.В. Ефремов также охарактеризовал постоянную  $\Lambda$  как “фундаментальный размерный параметр теории” (Ефремов, 1983, с. 269), “фундаментальную постоянную”, имеющую размерность импульса, а “появление фундаментальной размерной постоянной в теории с безразмерной константой взаимодействия” — “как особенность КХД” (Ефремов, 1990, с. 313). К сожалению, величина  $\Lambda$  оказалась не уникальной для разного числа кварковых ароматов  $N_f$ . Значения  $\Lambda$  для разных  $N_f$  определяются из условия непрерывности функциональной зависимости константы  $\alpha_s$  от переданного импульса

<sup>1)</sup> Gross, Wilczek, 1973; Politzer, 1973; Гросс, 2004; Политцер, 2004; Вильчек, 2004.

(“сшивание” происходит при масштабах, соответствующих массам  $b$ - и  $c$ - кварков —  $m_b = 4,2$  ГэВ и  $m_c = 1,29$  ГэВ). Наибольший интерес для физики в настоящее время имеет  $\Lambda$  для  $N_f = 5$ , так как соответствует широкому диапазону энергий от 4,2 ГэВ до  $m_t = 178$  ГэВ.

Численное значение постоянной  $\Lambda^{(5)}$  в настоящее время известно недостаточно точно, хотя в последние годы и достигнут прогресс в ее определении; она оценивается из разных процессов: электрон-позитронной аннигиляции, из глубоко неупругого рассеяния, анализа структурной функции фотона, ширины распада кваркониев и др. В 1980-е гг. имелись только предварительные оценки величины  $\Lambda^{(5)} = 0,1 \div 0,5$  ГэВ. В 1990-е–2000-е годы происходило уточнение значения  $\Lambda^{(5)} = 0,3$  ГэВ (Langacker, 1986),  $\Lambda = 190 \pm 50$  МэВ (Schopper, 1991),  $\Lambda^{(5)} = 253_{-96}^{+130}$  МэВ (SLD collaboration, 1995; 210 авторов),  $\Lambda^{(5)} = 263 \pm 42$  (эксп.)  $\pm 55$  (теор.) МэВ (ЦЕРН, 1998). По последним данным для схемы с так называемым минимальным вычитанием:  $\Lambda_{MS}^{N_f=5} = 211_{-30}^{+34}$  МэВ,  $\Lambda_{MS}^{N_f=4} = 294_{-38}^{+42}$  МэВ,  $\Lambda_{MS}^{N_f=3} = 336_{-38}^{+42}$  МэВ (Bethke, 2002, p. 4).

Статус постоянной(ых)  $\Lambda$  окончательно прояснится при дальнейшем развитии КХД и создании единой квантовой теории поля, объединяющей три элементарных взаимодействия — электромагнитное, слабое и сильное. Если постоянные  $\Lambda$ , соответствующие разному числу кварковых ароматов, удастся свести к простой функции некоего масштаба  $\Lambda_0$  и  $N_f$  (такая же ситуация была при развитии теории спектров, пока не выявилась постоянная Ридберга), то эта постоянная  $\Lambda_0$  окажется и естественной мерой энергии в теории великого объединения и, либо получит такой же статус, как и постоянные  $c$  и  $\hbar$ , либо с неизбежностью должна быть сведена к другому, более фундаментальному масштабу энергии (например, планковскому масштабу или вакуумному среднему), точно также, как была сведена к атомным постоянным постоянная Ридберга.

Таким образом, развитие теории сильного взаимодействия прошло путь от открытия ряда специфических констант  $g_i$ , характеризующих силы взаимодействий между элементарными частицами, к открытию универсальных постоянных  $g_s$ ,  $\alpha$  и  $\Lambda$ .

#### 2.2.4. Объединение констант элементарных взаимодействий.

К середине XIX в. было открыто несколько взаимодействий — гравитационное, электрическое, магнитное. Дж.К. Максвеллу удалось объединить два последних взаимодействия в рамках теории электромагнетизма, обобщая законы, открытые Ж.Б. Био, Ф. Саваром, А.-М. Ампером и др., в которых была установлена связь между этими взаимодействиями. Таким образом, к концу XIX в. в теоретической физике осталось только два независимых взаимодействия. В этот период естественным было предполагать, что одно из них является фундаментальным, в то время как другое редуцируется к нему. Например, в это время возник-

ли идеи, что гравитационное взаимодействие обусловлено дефектом между силами электрического притяжения и отталкивания и др. В начале XX в. в связи со сложившейся электромагнитной картиной мира можно было ожидать, что гравитацию удастся свести к электромагнетизму, а не наоборот. После создания Эйнштейном общей теории относительности А. Эйнштейном, Г. Вейлем, А. Эддингтоном и др. стала развиваться программа единой теории поля — объединения гравитации и электромагнетизма на основе геометрических моделей (см. *Визгин*, 1985). Однако в 1930-е гг. были открыты еще два фундаментальных взаимодействия — слабое и сильное. Таким образом, физики столкнулись с проблемой объединения четырех равноправных взаимодействий. Путь к решению этой проблемы заключался, как стало ясно в 1970-е гг., в объединении констант, характеризующих силы взаимодействия. Приведем в таблице универсальные постоянные, характеризующие силы взаимодействий (константы связи), и характерные масштабы энергии этих взаимодействий.

Т а б л и ц а 2.2.4. Константы, характеризующие силу физических взаимодействий, и характерные масштабы энергии

Взаимодействие	Размерная константа	Безразмерная константа	Характерный масштаб энергии
гравитационное	гравитационная постоянная $G$		планковский масштаб
сильное	постоянная $g_s$	постоянная $\alpha_s$	конфайнмент $\Lambda$
слабое	постоянная Ферми $G_F$		вакуумное среднее $\eta$
электромагнитное	постоянная Кулона $k_e$	постоянная тонкой структуры $\alpha$	

Гравитационное взаимодействие характеризуется универсальной размерной постоянной  $G$  (“ньютонской постоянной”), которая вместе с постоянными  $c$  и  $\hbar$  образует планковские величины — массу  $m_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 1,22 \cdot 10^{19}$  ГэВ/ $c^2$ , длину  $\ell_{pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}}$  и др. (см. п. 3.4.6). Универсальной безразмерной постоянной, характеризующей силу гравитационного взаимодействия нет, но можно образовать специфические безразмерные постоянные, которые характеризуют не только силу притяжения в целом, но и силу притяжения конкретных объектов, например, электрона и протона:  $\alpha_g = G \frac{m_e m_p}{\hbar c}$  или двух протонов  $\alpha_g = G \frac{m_p^2}{\hbar c}$  или любых других частиц. Нетрудно

понять, что все такого рода величины можно представить в виде отношения масс частиц к планковской массе:  $\alpha_g = \frac{m_e m_p}{m_{pl}^2} = \frac{m_e}{m_{pl}} \times \frac{m_p}{m_{pl}}$  или  $\alpha_g = \frac{m_p^2}{m_{pl}^2}$  и т. п. Поскольку частиц много и среди них нет наиболее фундаментальной, то и все такого рода постоянные носят специфический характер. Тем не менее, безразмерные соотношения оказываются полезными, когда речь идет о сравнении конкретных сил, например, электрических и гравитационных сил между протоном и электроном в атоме водорода.

Слабое взаимодействие характеризует постоянная Ферми  $G_F = 1,16639(1) \times 10^{-5}$  ГэВ/ $(\hbar c)^3$ . Она вместе с постоянными  $c$  и  $\hbar$  образует характерный масштаб слабого взаимодействия  $E_w = \sqrt{\frac{(\hbar c)^3}{G_F}} = 292,80$  ГэВ. Большее значение имеет, как считается, другой характерный масштаб — вакуумное среднее  $\eta = \sqrt{\frac{(\hbar c)^3}{\sqrt{2}G_F}} = 246,218$  ГэВ, который в соответствии с современными представлениями должен фигурировать в формулах для масс элементарных частиц:  $m_i = \alpha_i \times \eta$ , где  $\alpha_i$  — пока неизвестные безразмерные постоянные (две возможные формулы такого рода предлагаются автором ниже, для массы Z-бозона в этом параграфе и для массы электрона в п. 4.5.3). Слабое взаимодействие также, как и гравитационное, не характеризует универсальная безразмерная постоянная, но для разных частиц можно образовать специфические постоянные, например, для массы протона:  $\alpha_w = \frac{G_F m_p^2}{(\hbar c)^3}$  (если массы измерять в энергетических единицах) и  $\alpha_w = \frac{G_F m_p^2 c}{\hbar^3}$  (при измерении масс в обычных единицах). Все эти постоянные можно также представить в виде квадратов отношений масс частиц к масштабу  $E_w$  или вакуумному среднему:  $\alpha_w = \frac{m_i^2}{E_w^2} = \frac{m_i^2}{\sqrt{2}\eta^2}$ .

Длительное время для оценок использовалось соответствующее соотношение для массы протона. После открытия переносчиков слабого взаимодействия W- и Z-бозонов две массы этих частиц стали более привлекательными для образования безразмерных постоянных. Таким образом, в слабом взаимодействии начали фигурировать постоянные  $g$  и  $\bar{g}$ , где  $g^2 = 4\sqrt{2}\alpha_w$  при  $M = M_w$ ,  $\bar{g}^2 = 4\sqrt{2}\alpha_w$  при  $M = M_z$ .

Как видим, с точки зрения констант существует аналогия между гравитационным и слабым взаимодействием: и то, и другое не характеризуют универсальные безразмерные постоянные, но характеризуют универсальные размерные постоянные аналогичной (с точностью до комбинаций постоянных  $\hbar$  и  $c$ ) размерности, и которые, следовательно, можно сравнить. Это сравнение приводит к универсальной безразмерной постоянной, характеризующей соотношение между слабым и грави-

тационным взаимодействием:  $\lambda_{gw} = \frac{m_{pl}}{\eta} = \frac{1}{\hbar c} \sqrt{\frac{\sqrt{2}G_F}{G}} = 4,9586(10) \times 10^{16}$ , обратная ей постоянная:  $\lambda_{wg} = \frac{\eta}{m_{pl}} = 2,0167(10) \times 10^{-17}$ . Как

видим, гравитация значительно слабее “слабого” взаимодействия. Никакого теоретического обоснования, почему это число имеет именно такое, а не другое численное значение, пока нет, но, очевидно, что любая единая физическая теория должна так или иначе его объяснить.

Электромагнитное взаимодействие, в отличие от гравитационного и слабого, характеризует универсальная безразмерная постоянная:  $\alpha_e = \frac{1}{137,03599911(46)} = 7,297352568(24) \times 10^{-3}$  — постоянная тонкой структуры, играющая колоссальную роль в строении атомов. До сих пор, несмотря на все усилия, не удалось математически обосновать это значение.

В отличие от гравитационного и слабого взаимодействия электромагнитное взаимодействие не определяет никакого фундаментального масштаба энергии (или расстояния), однако можно вводить такие масштабы для различных частиц, носящие специфический характер — так называемые “классические радиусы” частиц, определяемые как  $r = \alpha_e \lambda = \alpha_e \frac{\hbar}{mc}$ , где  $m$  — масса частицы, и соответствующие масштабы энергии  $\alpha_e^{-1} mc^2$ . Минимальным таким масштабом является величина масштаба энергии для электрона:  $\alpha_e^{-1} m_e c^2 \approx 137 m_e c^2 \approx 70,025$  МэВ. Наряду с универсальной безразмерной постоянной тонкой структуры  $\alpha_e$ , силу электромагнитного взаимодействия характеризует универсальная размерная постоянная  $k_e$  (кулоновская постоянная), которая пропорциональна постоянной тонкой структуры:  $k_e = \alpha \frac{\hbar c}{e^2}$ . Следует отметить, что введение этой постоянной, несмотря на все очевидные преимущества, пока не получило признания, и в научной литературе продолжают использоваться в электромагнетизме различные частные системы единиц — гауссова, Лоренца–Хевисайда, СИ, которые при построении системы единиц электромагнитных величин нарушают те или иные принципы метрологии. В гауссовой системе и системе Лоренца–Хевисайда роль универсальной силовой размерной постоянной переходит от кулоновской постоянной  $k_e$  к величине  $e^2$ , так как в этих системах единиц постоянная  $k_e$  выбирается равной, соответственно, точно 1 и  $1/4\pi$ , и, следовательно, в этих системах единиц  $e^2 \equiv \alpha \hbar c$  и  $e^2 \equiv 4\pi \alpha \hbar c$ . Более последовательно, как уже указывалось выше, ввести в явном виде размерную постоянную  $k_e$  в законы электромагнетизма, так как при этом форма законов становится универсальной и не привязанной к конкретному выбору единицы заряда, а  $k_e$  имеет ясный физический смысл размерной постоянной, характеризующей силу электромагнитного взаимодействия, при этом электрический заряд является просто квантовым числом. Однако в КЭД и в стандартной модели

объединения взаимодействий уже сложилось представление о зарядах, как силовых характеристиках взаимодействий. поэтому в данном параграфе мы будем придерживаться общепринятой в физике высоких энергий системы Лоренца–Хевисайда. Следует при этом помнить, что все формулы, в которых фигурирует  $e^2$  не имеют универсального характера, в связи с тем, что коэффициенты в них привязаны к конкретному выбору единицы заряда (лоренц–хевисайдовскому). В отличие от этого универсальный характер носят формулы, в которых фигурирует не  $e^2$ , а постоянная тонкой структуры  $\alpha$ .

Сильное взаимодействие (цветовое) характеризуют безразмерная постоянная  $\alpha_s$  и размерная  $g_s^2 = 4\pi\alpha_s\hbar c$ . Наряду с ними в квантовой хромодинамике существует фундаментальный масштаб энергии  $\Lambda^{(5)} = 211_{-30}^{+34}$  МэВ, определяющий конфайнмент (удержание) кварков внутри частиц. Все остальные константы, характеризующие специфические процессы, полностью определяются через эти основные постоянные.

Как видим, с точки зрения наличия универсальных констант в разных взаимодействиях, существует аналогия между слабым и гравитационным взаимодействием (и там, и там имеются универсальные размерные постоянные, но отсутствуют универсальные безразмерные постоянные), и между электромагнитным и сильным взаимодействиями (в них существуют и те, и другие).

Как уже указывалось выше, постоянная  $\alpha_s$ , также как и постоянная тонкой структуры  $\alpha_e$ , являются постоянными второго рода, т.е. в принципе они не являются постоянными, так как зависят от переданного импульса  $Q^2$ , но их можно считать постоянными в ряде задач или внутри некоторых частных теорий. Причем если постоянная тонкой структуры очень медленно возрастает от значения  $1/137$  при обычных энергиях до  $1/129$  при энергиях вблизи  $M_Z$ , то постоянная  $\alpha_s$ , напротив, быстро спадает от бесконечного значения при масштабе конфайнмента  $\Lambda$  до значения  $\alpha_s(M_Z) = 0,1182 \pm 0,0027$  при  $M_Z$  (Bethke, 2004) и далее постепенно уменьшается до некоторого предельного значения.

Изменение констант взаимодействий навстречу друг другу с ростом масштаба энергии (уменьшении масштаба длины) лежит в основе современных представлений об объединении взаимодействий. *Объединение теорий взаимодействий с разными константами, характеризующими их силу, достигается при равенстве этих констант (т.е. тогда, когда взаимодействия становятся сравнимыми по силе)*. Проблема, однако, заключается в том, какие константы и каким образом следует сопоставлять друг с другом при том, что у нас нет универсальных безразмерных констант для всех взаимодействий.

В 1960-е годы Ш. Глэшоу, С. Вайнбергом и А. Саламом была разработана схема объединения электромагнитного и слабого взаимодействий на основе группы симметрии, являющейся произведением двух простых групп  $SU(2)_L \otimes U(1)$  (Glashow, 1961; Weinberg, 1967, Salam, 1968). Согласно этой теории слабое и электромагнитное взаимодействия явля-

ются различными компонентами единой калибровочной теории. В этой теории существуют две константы связи  $g$  и  $g'$ , связанные с постоянной тонкой структуры следующими соотношениями  $g^2 = \frac{4\pi\alpha}{\sin^2\theta_w}$  и  $g'^2 = \frac{4\pi\alpha}{\cos^2\theta_w}$ , где  $\theta_w$  — угол Вайнберга (в системе Лоренца-Хевисайда эти формулы приобретают компактный вид  $g = \frac{e}{\sin\theta_w}$  и  $g' = \frac{e}{\cos\theta_w}$ ). Угол Вайнберга является свободным параметром теории и зависит, как и константы взаимодействий, от переданного импульса; при некотором большом масштабе согласно этой теории достигается полное объединение этих взаимодействий и угол Вайнберга при этом, как считается, определяется равенством  $\text{tg}^2\theta_w = 3/5$ . Константы  $g$  и  $\bar{g}$  определяют массы калибровочных  $W^\pm$  и  $Z$ -бозонов, которые появляются при спонтанном нарушении симметрии  $M_w = \frac{1}{2}g\eta$  и  $M_z = \frac{M_w}{\cos\theta_w} = \frac{1}{2}\bar{g}\eta$ , где  $\bar{g} = \sqrt{g^2 + g'^2}$  и  $\eta$  — вакуумное среднее  $\eta = \sqrt{(\hbar c)^3/\sqrt{2}G_F}$  (Weinberg, 1967, p. 1265). В этой же работе Вайнберг, учитывая, что константы  $g$  и  $g'$  больше  $e$ , оценил нижние границы масс бозонов  $M_w > \frac{1}{2}e\eta = 40$  ГэВ и  $M_z > e\eta = 80$  ГэВ. Эти частицы, действительно, были экспериментально обнаружены в 1983 г, что стало полным триумфом теории (ранее в 1973 г были обнаружены нейтральные токи). Их массы согласно современным данным  $M_w = 80,425(38)$  ГэВ и  $M_z = 91,1876(21)$  ГэВ (PDG, 2005).

Соотношения между константами взаимодействий электрослабой теории можно выразить в геометрической форме в виде прямоугольного треугольника, где элементарный заряд соответствует высоте, опущенной из вершины в сторону гипотенузы (см. рис. 2.24, а). Этому треугольнику констант взаимодействий соответствует треугольник

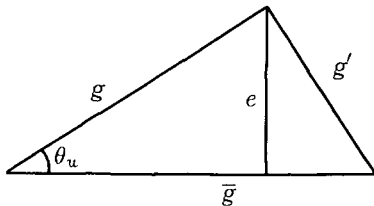


Рис. 2.24,а Соотношение между константами взаимодействий электрослабой теории в геометрическом виде

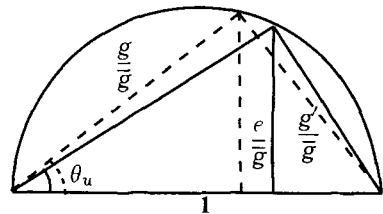


Рис. 2.24,б Соотношение между константами взаимодействий электрослабой теории при изменении переданного импульса

масс калибровочных  $W$  и  $Z$ -бозонов, так как их массы получаются домножением констант связи на множитель  $\frac{1}{2}\eta$ . При этом гипотенуза

соответствует  $M_z$ , а левый катет —  $M_w$  (однако правый катет не имеет прямого физического смысла).

С ростом переданного импульса константы меняются: угол Вайнберга растет, достигая в точке объединения некоторого предельного значения, которое определяется схемой объединения. При этом вершина сдвигается по окружности, описанной вокруг треугольника констант единичного диаметра (все стороны отнормированы на  $\bar{g}$ ).

После создания квантовой хромодинамики на основе группы симметрии  $SU(3)_c$  (индекс “с” означает “colour” — цвет), стало ясно, что наиболее простое объединение всех трех элементарных взаимодействий можно попытаться построить на основе группы  $SU(3) \supset SU(2)_L \otimes U(1)$  (Weinberg, 1972). Вайнберг вывел следующие соотношения между константами и массами частиц:  $g = 2e$ ,  $g' = -2e/\sqrt{3}$ ,  $M_w = (e^2/\sqrt{2}G_F)^{1/2} = 74,6$  ГэВ и  $M_z = M_w/\cos\theta_w = 2M_w/\sqrt{3} = 86,2$  ГэВ (там же, р. 1965). Однако соотношение между константами  $g' = g/\sqrt{3}$  противоречило экспериментальным данным и поэтому от этой схемы отказались.

Признание получило объединение взаимодействий на основе прямого произведения всех трех групп, соответствующих трем взаимодействиям — сильному, слабому и электромагнитному:  $SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)$ . Эта группа симметрии получила название *стандартной модели*. Однако эта группа по-прежнему включает три константы взаимодействий, а их объединение в одну константу произойдет только в том случае, когда будет принята “теория великого объединения” (GUT — grand unification theory) на основе *простой* группы, частью которой является группа  $SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)$ . В качестве единой группы Г. Джорджи и Ш. Глэшоу была предложена группа  $SU(5)$  (Georgi, Glashow, 1974). Предлагались и другие варианты:  $SU(4) \otimes SU(4)$  (Pati, Salam, 1973),  $SO(10)$ , включающая  $SU(5)$  в качестве подгруппы, (Fritzsch, Minkowski, 1975). Таким образом, стандартная модель фактически объединяет все три элементарных взаимодействия, хотя это объединение и не полное, так как в ней продолжают сохраняться три константы взаимодействий, а схема объединения не является окончательной, поскольку содержит 19 свободных параметров и существует некоторое небольшое несоответствие между теоретическими предсказаниями и экспериментальными данными.

Для оценки сближения констант взаимодействий используется метод ренормгрупп (к теории групп название не имеет отношения), основанный на экстраполяции функций поведения констант взаимодействий на большие энергии. Для констант элементарных взаимодействий это приводит к следующим уравнениям (Вайнберг, 2001, т. 2, с. 355):

$$\mu \frac{d}{d\mu} g_s(\mu) = -\frac{g_s^3(\mu)}{4\pi^2} \left( \frac{11}{4} - \frac{n_g}{3} \right),$$



$$\mu \frac{d}{d\mu} g(\mu) = -\frac{g^3(\mu)}{4\pi^2} \left( \frac{11}{6} - \frac{n_g}{3} \right) \mu \frac{d}{d\mu} g(\mu) = -\frac{g^3(\mu)}{4\pi^2} \left( \frac{11}{6} - \frac{n_g}{3} \right),$$

$$\mu \frac{d}{d\mu} g'(\mu) = -\frac{g'^3(\mu)}{4\pi^2} \left( -\frac{5n_g}{9} \right) \mu \frac{d}{d\mu} g'(\mu) = -\frac{g'^3(\mu)}{4\pi^2} \left( -\frac{5n_g}{9} \right),$$

где  $n_g$  — число поколений фермионов, пропорциональное числу кварковых ароматов  $N_f$ . Эти уравнения, полученные при импульсах от 1 до 100 ГэВ затем экстраполируются вплоть до масштабов  $10^{16}$  ГэВ, где и происходит объединение констант взаимодействий.

Угол Вайнберга следующим образом зависит от констант взаимодействий:

$$\sin^2 \theta_w = \frac{1}{1 + 3C^2} \left( 1 + 2C^2 \frac{e^2}{g_s^2} \right).$$

В точке объединения константы должны быть равны с точностью до рационального множителя  $C^2$  — коэффициента Клебша–Гордона:

$$g_s^2 = g^2 = C^2 g'^2.$$

Это же соотношение в виде через безразмерные постоянные выглядит так:

$$\alpha_s = \frac{\alpha_e}{\sin^2 \theta_w} = C^2 \frac{\alpha_e}{\cos^2 \theta_w}.$$

Отсюда следует, что в точке объединения  $\alpha_e = (1 + C^2)\alpha_s$  и  $\sin^2 \theta_w = \frac{1}{1 + C^2}$ .

Для единой простой группы, включающей  $SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)$  в качестве подгруппы,  $C^2 = 5/3$  (вывод этого см.: *Georgi, Quinn, Weinberg, 1974; Вайнберг, 2001, т. 2, с. 354*) и, следовательно:

$$\sin^2 \theta_w = \frac{1}{6} + \frac{5e^2(M_z)}{9g_s^2(M_z)} = \frac{1}{6} + \frac{5\alpha_e(M_z)}{9\alpha_s(M_z)}$$

При этом в точке объединения:  $\sin^2 \theta_w = \frac{3}{8}$  и  $\alpha_s = \frac{8}{3}\alpha_e$ .

Часто для простоты вводятся безразмерные постоянные  $\alpha_1 = C^2 \frac{\alpha_e}{\cos^2 \theta_w}$ ,  $\alpha_2 = \frac{\alpha_e}{\sin^2 \theta_w}$  и  $\alpha_3 = \alpha_s$ . Тогда в точке объединения так определенные безразмерные постоянные должны быть в точности равны:  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_{GUT}$ .

При энергиях, меньших масштаба объединения  $2 \cdot 10^{16}$  ГэВ, происходит нарушение симметрии и единое взаимодействие распадается на три элементарных взаимодействия, а константа единого взаимодействия  $\alpha_{GUT}$  распадается на три соответствующие константы взаимодействий, значения которых расходятся друг от друга с уменьшением энергии (увеличением расстояния).

Однако для масштаба  $M = M_z$  предсказание стандартной модели приводит к некоторому расхождению с экспериментальным значением

угла Вайнберга ( $\sin^2 \theta_w = 0,23124(24)$ ), в то время как экспериментальное значение  $\sin^2 \theta_w = 0,22215(76)$ ). Помимо этого стандартная модель предсказывала распад протона, который до сих пор не обнаружен.

В 1980-е гг. считалось, что стандартная модель позволяет объединить константы элементарных взаимодействий в одной точке. В 1990-е гг. выяснилось, что три логарифмические кривые констант не пересекаются точно в одной точке. Однако расширение стандартной модели до суперсимметричной модели <sup>1)</sup>, как оказалось, приводит к согласованию объединения констант в одной точке и, кроме того, открывает путь к дальнейшему объединению с гравитационным взаимодействием (Amaldi et al., 1991; см. рис. 2.2.4, в). При этом объединенная

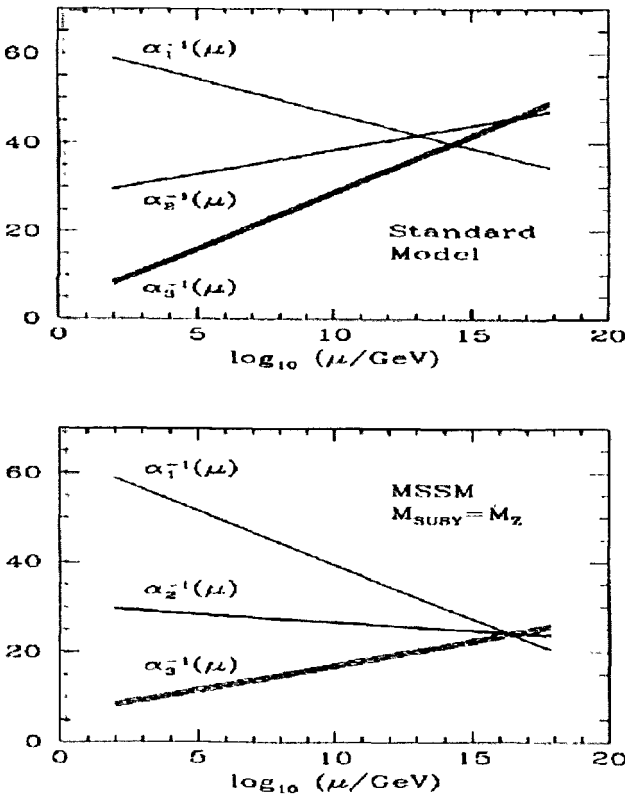


Рис. 2.2.4, в. Объединение трех констант взаимодействий. Рисунок из Нобелевской лекции Ф. Вильчека (2004)

<sup>1)</sup> Суперсимметрия, т. е. симметрия между фермионами и бозонами, в физику элементарных частиц была введена еще в 1970-е годы: Гольфанд, Лихтман, 1971; Волков, Акулов, 1972; Wess, Zumino, 1974a, b.

константа взаимодействия оказывается почти в 2 раза больше, чем предсказываемая стандартной моделью (1/25,6 вместо 1/42), а точка объединения смещается к масштабу  $10^{16}$  ГэВ, таким образом приближаясь к планковскому масштабу  $10^{19}$  ГэВ. Также в суперсимметричной схеме объединения константа  $\alpha_2$  вместо увеличения, как в стандартной модели, почти не меняется, лишь немного уменьшаясь (в логарифмическом масштабе). Недостатком суперсимметричной модели является удвоение числа существующих частиц, которым сопоставляются новые гипотетические частицы. Однако в истории физики уже был прецедент удвоения числа частиц, когда в 1930-е годы были открыты античастицы.

Кратко укажем свободные параметры стандартной модели, которые должны получить свое объяснение в “теории великого объединения” элементарных взаимодействий или “теории всего” (т.е. с участием гравитации).

- константы связи  $e$ ,  $g_s$  и угол Вайнберга  $\theta_w$ ; из которых можно получить константы  $g = \frac{e}{\sin \theta_w}$ ,  $g' = \frac{e}{\cos \theta_w}$  и  $\bar{g}^2 = g^2 + g'^2$ ;
- массы 3 бозонов  $M_w = \frac{1}{2} g \eta$ ,  $M_z = \frac{M_w}{\cos \theta_w} = \frac{1}{2} \bar{g} \eta$  и  $M_H$ ;
- массы 3 лептонов  $m_e$ ,  $m_\mu$ ,  $m_\tau$ ;
- массы 6 кварков  $m_u$ ,  $m_d$ ,  $m_s$ ,  $m_c$ ,  $m_t$ ,  $m_b$ ;
- 4 параметра матрицы Кобаяши–Маскавы (угол Кабиббо, еще два угла  $\theta_i$  и фаза  $\delta_i$ )

Из этих постоянных 19 являются независимыми, так как остальные связывают соотношения, приведенные выше. Этих независимых параметров, очевидно, слишком много, чтобы теория могла считаться законченной.

В 2000 г. индийский физик Ч. Раджу предположил, что угол Кабиббо является функцией параметра смешивания Вайнберга, и вывел следующую формулу:  $\theta_c = \theta_2 - \theta_1$ , где  $\theta_2 = \arctg(m_d/m_s)^{1/2}$  и  $\theta_1 = \arctg(m_u/m_c)^{1/2}$  (Raju, 2000). Расчет по его формуле дает значение  $\theta_c = 13^\circ 11'$  и  $\sin \theta_c = 0,228$ . Однако пока, в силу больших неопределенностей значений масс кварков, не ясно, истинны ли эти формулы или нет.

Позволим себе высказать некоторые соображения, связанные с размерными константами взаимодействия и масштабами масс калибровочных бозонов. Во-первых, следует отметить, что в первоначальной теории С. Вайнберга  $SU(3) \supset SU(2)_L \otimes U(1)$  (Weinberg, 1972) значение одной из постоянных  $g' = -2e/\sqrt{3}$ , которая соответствует разности квадратов масс  $W^\pm$  и  $Z$ -бозонов, оказалось *соответствующим* современному экспериментальным данным, в отличие от предсказаний объединения на основе  $SU(5)$ . В самом деле,  $\frac{e\eta}{\sqrt{3}} = 43,047$  ГэВ, что очень близко к современному экспериментальному значению  $\frac{g'\eta}{2} = \sqrt{M_z^2 - M_w^2} = 42,977$  ГэВ при  $M_z = 91,1876(21)$  ГэВ

и  $M_w = 80,425(38)$  ГэВ. При этом основную неточность вносит масса W-бозона. Согласно различным данным  $M_w = 80,427(46)$  (LEP),  $M_w = 80,451(61)$  (Tevatron, UA2),  $M_w = 80,425(38)$  (Langacker, 2003). Формула Вайнберга давала бы точный результат при  $M_w = 80,387$  ГэВ что находится в пределах точности измерения массы W-бозона. В то же время стандартная модель предсказывает  $\sqrt{M_z^2 - M_w^2} = M_z \sin \theta_w$  и, следовательно, имеет то же расхождение с экспериментальным значением, что и угол Вайнберга — несколько процентов. Не означает ли это, что схема Вайнберга 1972 г. не исчерпала свои возможности и в модифицированном виде может вернуться в физику?

Во-вторых, подход к массам частиц может быть основан на методе анализа размерностей. Согласно современным представлениям, массы элементарных частиц  $m$  должны описываться формулами типа  $m = \lambda \eta$ , где  $\eta$  — вакуумное среднее, а  $\lambda$  — некоторые неизвестные функции безразмерных констант взаимодействий. Очевидно, если основываться на трех элементарных взаимодействиях, то  $\lambda = \lambda(e, g_s, \hbar, c) = \lambda(\alpha_e, \alpha_s)$ . Поскольку размерности  $\dim(e^2) = \dim(g_s^2) = \dim(\hbar c)$  и  $g_s^2$  — быстро спадающая функция, то у нас оказывается немного простейших вариантов. Во-первых, это характерный масштаб  $E = e\eta = 74,56$  ГэВ, рассчитанный еще С. Вайнбергом (здесь  $c = 1$ ,  $\hbar = 1$ ,  $e^2 = 4\pi\alpha\hbar c$ ; в общем виде  $E = \frac{e\eta}{\sqrt{\hbar c}} = \sqrt{4\pi\alpha\eta}$ ). Если учитывать постоянную сильно-го взаимодействия, то надо изначально ориентироваться на значение  $\alpha_s(M_z) = 0,119(2)$ , если пытаться получить точную формулу для  $M_z$ . При этом  $g_s(M_z) = 1,22286$ . Ясно, что уже самая простейшая комбинация дает значение  $E = e g_s \eta = 91,18$  ГэВ исключительно близкое к экспериментальному  $M_z = 91,1876(21)$  ГэВ (в расчете использованы следующие значения:  $\alpha_e^{-1} = 137,03599911(46)$ ,  $\alpha_s(M_z) = 0,119(2)$ ,  $\eta = 246,218(1)$ ). При этом основную неточность привносит неточность постоянной  $g_s$ . Итак наше предположение заключается в том, что масса Z-бозона может определяться *точно* следующей формулой:

$$M_z = \frac{e g_s}{\hbar c} \eta.$$

Эту же формулу можно представить и в следующей форме через среднее геометрическое безразмерных констант взаимодействий:

$$M_z = 4\pi\sqrt{\alpha_e\alpha_s}\eta,$$

где  $e$  обозначает обычную величину элементарного заряда в системе Лоренца-Хевисайда:  $e^2 = 4\pi\alpha_e\hbar c$ , а численное значение постоянной  $\alpha_s$  соответствует как раз масштабу  $M_z$ .

К сожалению, в предполагаемую формулу для  $M_z$  существенную неточность вносит неопределенность постоянной  $\alpha_s$ , что не дает окончательного ответа о том, верна эта формула в точности или нет. Однако ее простота и изящность, а также соответствие экспериментальным данным в пределах допустимых отклонений позволяют надеяться на ее

справедливость. Если эта формула, действительно, верна, то ее можно использовать для уточнения значения постоянной  $\alpha_s(M_z) = 0,119025$ , а, следовательно, и масштаба конфайнмента кварков, который по нашим оценкам составляет  $\Lambda^{(5)} = 220(1)$  МэВ, что хорошо укладывается в доверительные интервалы по этим постоянным:  $\alpha_s(M_z) = 0,1182 \pm \pm 0,0027$  и  $\Lambda^{(5)} = 211(30)$  (Bethke, 2004).

Предлагаемая формула для  $M_z$  не противоречит стандартной модели. Однако, не следует исключать и других вариантов объединения, ориентируясь на соответствие эксперименту. Так, если сопоставлять вышеуказанную формулу Вайнберга (1972) для  $g'$  и формулу  $M_z = \frac{eg_s}{\hbar c} \eta$ , то, если они обе верны:  $\sin^2 \theta_w = \frac{1}{3g_s^2} = \frac{1}{12\pi\alpha_s}$  и для  $\alpha_s = 0,119025$   $\sin^2 \theta_w = 0,22299$  (согласно современным экспериментальным данным 0,22215(76)).

Не ясно, насколько вышеуказанные формулы являются точными в рамках какой-либо схемы объединения, или они окажутся в конце концов просто случайными совпадениями, однако несомненно, что окончательная физическая теория так или иначе должна давать точные формулы для масс бозонов, лептонов, кварков и параметров матрицы Кобаяши–Маскавы.

## ЧАСТЬ 3

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ: ПОНЯТИЕ, СВОЙСТВА, ЗНАЧЕНИЕ

В третьей части рассматриваются основные концептуальные аспекты, связанные с фундаментальными физическими постоянными (ФФП) в целом. Первая глава посвящена анализу характерной научной терминологии, в которой фиксировался статус физических постоянных: “фундаментальные”, “универсальные”, “абсолютные”, “естественные”, “мировые постоянные”. Во второй главе приводятся различные свойства фундаментальных постоянных, которые фиксируются различными учеными как их “определения”. Третья и четвертая главы посвящены методологическому анализу основных свойств фундаментальных постоянных в теоретической и экспериментальной физике: в третьей главе исследуется их роль как параметров предельного перехода от более общих теорий к частным и основанные на этом модели развития теоретической физики с точки зрения объединения основных физических теорий. Четвертая глава посвящена роли фундаментальных постоянных в экспериментальной физике как абсолютных масштабов в метрологии и развитию в связи с этим квантовой метрологии.

### Глава 3.1

#### Формирование общей терминологии

В научной литературе наряду с термином “физические постоянные” (“physical constants”) получили распространение несколько различных терминов для обозначения физических постоянных, которые имеют более важное значение для физики, чем другие — *фундаментальные, универсальные, абсолютные, естественные и мировые* постоянные. Кроме этих терминов также используется термин *атомные* постоянные, а также термины, характеризующие фундаментальные постоянные, как характерные масштабы соответствующих физических величин — *элементарный* (квант действия, заряд, длина), *предельная, критическая, максимальная, стандартная и др.* скорость взаимодействий.

**3.1.1. Универсальные постоянные.** Термин “универсальные постоянные” (“universelle Constant (Konstant)”, *нем.*; “universal constant”, *англ.*; “constante universelle”, *фр.*; “универсальная постоянная” и “мировая постоянная”, *рус.*) получил широкое распространение с конца

XIX в. Происхождение этого термина, по-видимому, связано с переносом универсального статуса физических законов на физические постоянные, которые в них присутствуют. Так, гравитационная постоянная стала именоваться универсальной (*universelle Constant, universal constant*), очевидно, в связи с тем, что она присутствовала в ньютоновском законе *всемирного* тяготения (“*Newton’s law of universal gravitation*”). Также именно представление об общности соотношения между энтропией и вероятностью послужила для М. Планка, по его признанию, основанием для характеристики постоянной  $k$  (постоянной Больцмана) как универсальной (Планк, 1943, с. 440). Очевидно, теми же соображениями универсальности формулы энтропии осциллятора он руководствовался, когда характеризовал постоянные  $a$  и  $b$  (затем  $h$  и  $k$ ), которые в ней фигурировали, как универсальные.

С другой стороны, научная терминология, несмотря на общечеловеческую универсальность самой науки, имеет ряд специфичных национальных особенностей. Так, термин “универсальные постоянные”, возможно, связан с лингвистическими особенностями немецкоязычной физики, которая занимала лидирующие позиции в физике с конца XIX века до 1930-х гг. XX в. Этот термин широко применяли именно немецкоязычные физики, и прежде всего — М. Планк.

В параграфе, посвященном постоянной Планка, подробно разбирались обстоятельства появления постоянных  $h$  и  $k$ . Им предшествовали две другие постоянные —  $a$  и  $b$ , появившиеся в докладе 18 мая 1899 г. на заседании Прусской Академии наук, которые Планк сразу охарактеризовал как “универсальные”: “ $a$  и  $b$  — две универсальные положительные постоянные (*universelle positive Constanten*)” (Планк, 1958, В. I, S. 585). В этом докладе Планк трижды использует термин “универсальные постоянные  $a$  и  $b$ ”, а также определяет их численные значения (там же, S. 649). Наконец, в самом конце доклада Планк предлагает естественную систему единиц (“*Natürliche Maasseinheiten*”), основанную на четырех физических постоянных — двух постоянных  $a$  и  $b$ , скорости света  $c$  и гравитационной постоянной  $f$ , таким образом, ставя свои новые постоянные в один ряд с постоянными  $c$  и  $G$  (в его обозначении —  $f$ ). В обобщающей статье, представленной в “*Annalen der Physik*” 7 ноября 1899 г., М. Планк вновь повторяет данные им характеристики постоянных  $a$  и  $b$  как *универсальных постоянных* и еще раз предлагает естественную систему единиц (ныне называемую планковской системой единиц; подробнее об этой системе единиц см. п. 3.4.6) (там же, S. 649, S. 665, S. 667). В 1900 г. Планк еще раз охарактеризовал постоянные  $a$  и  $b$  как универсальные в статье “Энтропия и температура лучистой энергии” (от 22 марта 1900 г.) (там же, S. 682). В октябре–декабре 1900 г. Планк перешел к другому закону излучения и к другим постоянным  $h$  и  $k$ . Он также неоднократно характеризовал их как универсальные постоянные: в статье “О законе распределения энергии в нормальном спектре” (7 янв. 1901 г.) (там же, S. 725, S. 726, S. 727); в дополнении к статье “О необратимых процессах излучения” (16 окт. 1901 г.) (там же,

S. 748); в книге “Теория теплового излучения” (1906) (*Planck*, 1906); в Нобелевской лекции (1920) <sup>1)</sup>; в “Научной автобиографии” <sup>2)</sup> и др. статьях и книгах.

Термин “универсальный” Планк также применял и в сочетании с термином “квант действия”:  $h$  — “универсальный квант действия” (“universelle Wirkungsquantum”) <sup>3)</sup>.

В ряде программных докладов наряду с изложением своей концепции научного познания, развития физического знания в ходе революции в физике, взаимоотношения классической физики и новейшей физики и др., М. Планк подчеркивал роль “универсальных постоянных” как “абсолютных центральных пунктов” (“absoluten Kernpunkt”) новейших физических теорий, а также приводил списки “универсальных постоянных”. Так в докладе “Единство физической картины мира” (1908) М. Планк отметил, что встречающиеся в законах теплового излучения постоянные (т. е. скорость света, постоянные Планка и Больцмана) “имеют универсальный характер (universellen Character), подобно постоянной тяготения” <sup>4)</sup>. В докладе “Отношение новейшей физики к механистическому мировоззрению” (сент. 1910 г.) М. Планк перечислил некоторые физические постоянные — “скорость света в пустоте, электрический заряд и масса неподвижного электрона, «элементарное количество действия», постоянная тяготения”, охарактеризовав их как универсальные постоянные (universellen Konstanten) <sup>5)</sup>. Об “универсальных постоянных” Планк говорил и в докладе “Двадцать лет работы над физической картиной мира”, прочитанном 18 февр. 1929 г. в Физическом институте Лейденского университета, приведя их список в следующем порядке: гравитационная постоянная, скорость света, масса и заряд электрона и протона <sup>6)</sup>. В докладе “Происхождение и влияние научных идей” в Берлинском обществе немецких инженеров 17 февраля 1933 г. М. Планк использовал термин “так называемые универсальные константы” по отношению к постоянным, связанным со строением материи: масса и заряд электрона и протона, “элементарный квант действия” <sup>7)</sup>.

Наряду с термином “универсальные постоянные” Планк также несколько раз использовал термин “Naturkonstanten” (“естественные постоянные” или “постоянные Природы”, см. п. 3.1.4.).

Термин “универсальная постоянная” использовал также и А. Эйнштейн, начиная с основополагающей статьи по СТО. В статье “К электродинамике движущихся тел” А. Эйнштейн постулирует, что

<sup>1)</sup> *Planck*, 1958, В. III, S. 127; *Планк*, 1975, с. 607.

<sup>2)</sup> *Ibid*, S. 395, S. 396.

<sup>3)</sup> *Ibid*, S. 64, S. 170.

<sup>4)</sup> *Ibid*, S. 21; *Планк*, 1975, с. 626.

<sup>5)</sup> *Ibid*, S. 44; *Планк*, 1975, с. 647.

<sup>6)</sup> *Ibid*, S. 188.

<sup>7)</sup> *Ibid*, S. 251; *Планк*, 1975, с. 599.



скорость света в пустоте является “согласно опыту” “универсальной константой” (Эйнштейн, 1965/67, т. 1, с. 10). Этот же термин Эйнштейн использовал и по отношению к скорости света в статье “О принципе относительности и его следствиях” (4 дек. 1907 г.) (там же, с. 68).

Термин “универсальная постоянная” А. Эйнштейн трижды использовал в статье “Вопросы космологии и общая теория относительности” (1917) по отношению к космологической постоянной  $\lambda$ , которую он ввел в закон тяготения, основываясь на концепции стационарной Вселенной (там же, с. 604, 611, 612) (в дальнейшем он предпочитал термин “ $\lambda$ -член”).

Однако в “Автобиографических заметках” (1949) А. Эйнштейн неожиданно охарактеризовал универсальность размерных постоянных как “кажущуюся”, так как их можно элиминировать из физических законов путем выбора соответствующих единиц измерения (см. п. 3.2.3).

Выборочный просмотр отдельных номеров журнала “Physikalische Zeitschrift”, проведенный автором, показал, что в начале века использование дополнительной терминологии еще не было широко распространено. Кроме М. Планка и А. Эйнштейна термин “универсальные постоянные” (“universellen Konstanten”) применяли В. Фогт ( $e$ ,  $m_e$ ), П. Эрнфест ( $R$ , “диэлектрическая постоянная эфира”  $K$ ,  $e$ ,  $h$ ), А. Гааз ( $G$ ,  $h$ ), М. Лауэ ( $k$ ), И. Штарк ( $h$ ), В. Игнатовский ( $c$ ), А. Зоммерфельд ( $h$ ), Г. Ми ( $G$ ), Дж. Джинс ( $e$ )<sup>1</sup>) Этот же термин использовали в книгах и статьях Г.А. Лоренц ( $h$ ,  $k$  и  $3k/2$ ), Э. Шредингер, М. Борн, В. Паули, В. Гейзенберг, У. Штилле, Р. Крониг и мн.др.<sup>2</sup>)

Из англоязычных авторов термин “универсальные постоянные” (universal constants) применяли П. Бриджмен, Г.Н. Льюис, П.А.М. Дирак<sup>3</sup>) (в дальнейшем Дирак предпочитал термин “фундаментальные постоянные”). Кроме них термин “универсальные постоянные” использовали Н. Бор, Н.А. Умов, Я.И. Френкель, М.П. Бронштейн, С.И. Вавилов, Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц, А.И. Ахиезер, Д.В. Сивухин, Л.Б. Окунь<sup>4</sup>) и др. В зарубежной литературе термин “универсальные постоянные” применяли И. Пригожин и И. Стенгерс (Пригожин, Стенгерс, 1984).

<sup>1</sup>) Voigt, 1899, S 119; Ehrenfest, 1906a, S. 528; 1906b, S. 532, см.: Эрнфест, 1972, с. 49; Haas, 1906, S. 659; 1910, S. 537; Laue, 1908, S. 778; Stark, 1908, S. 895; Ignatovskiy, 1910, S. 972; Sommerfeld, 1911, S. 1062; Mie, 1913, S. 1262; Jeans, 1913, p. 1299.

<sup>2</sup>) Lorentz, 1906/09, p. 79, 91, Лоренц, 1906/09, с. 125, 142; Шредингер, 1971, с. 70; Борн, 1935, с. 703; Паули, 1934/36, с. 7; 1949, с. 59; Гейзенберг, 1929/30, с. 99, Гейзенберг, 1959, с. 136

<sup>3</sup>) Бриджмен, 1920/31, с. 106; Lewis, 1923, p. 41, Дирак, 1930, с. 109.

<sup>4</sup>) Бор, 1955, с. 471; Умов, 1913, см.: 1950, с. 508–509; Френкель, 1927а, см. 1970, с. 30, Бронштейн, 1933, 1934, 1935; Вавилов, 1928b, с. 68, 1943/89, с. 132, Ландау, Лифшиц, 1988, с. 14; Ахиезер, 1988, с. 21; Окунь, 1990, с. 56; Сивухин, 1990, т. 2, с. 240.

**3.1.2. Мировые постоянные.** При появлении новых иностранных терминов они или *переводятся* на отечественный язык или *переносятся* (иногда происходит и то, и другое). В русскоязычных изданиях термину “универсальные постоянные” был найден аналог “мировые постоянные”, который применялся достаточно широко в начале XX в. Так, его использовал, например, О.Д. Хвольсон (*Хвольсон*, 1913, с. 55) (однако в книгах Хвольсон избегал дополнительных терминов, предпочитая четко определенные термины “постоянная тяготения”, “постоянная Планка”, “скорость света” и т.д. (*Хвольсон*, 1923; 1933)). В своей совместной статье термин “мировые постоянные” применили Г. Гамов, Д.Д. Иваненко и Л.Д. Ландау, причем даже в названии (*Гамов, Иваненко, Ландау*, 1928). С другой стороны западный термин “universelle Constant (Konstant)”, “universal constants” был и просто перенесен — “универсальные постоянные”. Характерно, что многие ученые применяли на равных правах и термин “мировые” и термин “универсальные” постоянные, причем в одних и тех же работах (напр., Г. Гамов, Д.Д. Иваненко и Л.Д. Ландау в упомянутой выше статье, М.П. Бронштейн и А.Л. Зельманов <sup>1)</sup>). Забавно то, что при публикации списка трудов Г. Гамова, название совместной статьи (*Гамов, Иваненко, Ландау*, 1928) было в обратном переводе на русский переведено как “Универсальные постоянные и граничные переходы” (*Гамов*, 1994, с. 136), а в переводе на английский при перепубликации статьи в 2002 г. “мировые постоянные” переведены как “world constants”, что соответствует авторскому термину “Weltkonstanten”, который фигурировал в немецкой аннотации их статьи. “Борьба” между терминами “мировые” и “универсальные” постоянные отражает реальные национальные особенности русского языка. Так сложилось, что слово “универсальный” в русском языке является более узким, прикладным и антропогенным по своему значению, чем слово “мировой”, которое несет смысл и чего-то основополагающего. Так, согласно словарю русского языка С.И. Ожегова, термин “универсальный” имеет два значения — 1) разносторонний, охватывающий многое; 2) с разнообразным назначением, для разнообразного применения. “Вторая жизнь” термина “мировые постоянные” вероятно связана с осознанием соответствия между латинским термином “universum”, ставшего основой для однокоренных западных терминов для обозначения Вселенной, и русскоязычными “мир”, “Вселенная”.

Достаточно долго термин “мировые постоянные” рассматривался как устаревший, но во второй половине XX в. наметилась тенденция к его возрождению (А.Л. Зельманов, М.А. Марков, Я.А. Смородинский, С.Р. Филонович <sup>2)</sup>) и др. Далее С.С. Герштейн и В.Б. Берестецкий ис-

<sup>1)</sup> Бронштейн, 1933, 1934, 1935; Зельманов, 1964, 1967, 1969.

<sup>2)</sup> Зельманов, 1955/60, с. 83–84; 1964, с. 227–269; 1967, с. 320–390; 1969, с. 274–324; Марков, 1993, с. 245; Смородинский, 1990, с. 29; Филонович, 1983, с. 6.

пользовали для обозначения постоянной Планка  $h$  двойной термин — “универсальная мировая постоянная” (*Герштейн, Берестецкий, 1990, с. 274*).

**3.1.3. Фундаментальные постоянные.** Термин “фундаментальные постоянные” (“fundamental constants”, *англ.*) широко использовался и используется в небесной механике, начиная с конца XIX в на протяжении всего XX в., в смысле “основные”, “основополагающие” постоянные небесной механики С. Ньюкомб, К.А. Куликов и др. <sup>1)</sup>. Его появление в астрономии, очевидно, связано с выделением подкласса астрономических постоянных, имеющих основополагающий характер для расчетов в небесной механике, а распространение — с лидерством англоязычной астрономии и астрофизики в первой половине XX в.

В 1913 г. Р. Милликен в статье, посвященной определению элементарного электрического заряда, использовал термин “fundamental constants” по отношению к постоянным  $e$ ,  $h$ ,  $k$ , постоянной в законе смещения Вина и еще нескольким специфическим постоянным теории газов (*Millikan, 1913, р. 141–143*). В 1918 г. английский астрофизик А.С. Эддингтон в обзоре по теории тяготения использовал термин “fundamental constants of nature” уже применительно только к трем постоянным  $c$ ,  $h$  и  $G$  (*Eddington, 1918, р. 91*). Таким образом, в начале XX в. термин “фундаментальные постоянные” был перенесен из небесной механики в физику, где он получил широкое распространение во второй половине XX в. В первой половине XX в. в научных работах доминировал термин “универсальные постоянные”, а термин “фундаментальные постоянные” почти не использовался. Среди выявленных случаев укажем следующие: в 1928 г. Г. Вейль охарактеризовал постоянные  $c$ ,  $h$ ,  $e$ ,  $m_e$  как фундаментальные постоянные природы (*Weyl, 1928/31, S. 61*), в 1937 г. П.А.М. Дирак такой же термин применил к тем же постоянным (впрочем, не ограничивая ими число фундаментальных постоянных) (*Dirac, 1937a*).

Широкое распространение термина “фундаментальные постоянные” (“fundamental constants”, *англ.*) в физике с 1940–50-х гг. и, особенно, во второй половине XX в., отражает осознание физиками более глубокой, основополагающей роли ряда физических постоянных после квантово-релятивистской революции

С другой стороны, не исключено, что распространение этого термина также, возможно, связано и с лингвистическими особенностями *англоязычной* физики, вышедшей на лидирующие позиции с конца 1940-х гг. В этот период его применяли П.А.М. Дирак, Н. Бор (в одной из работ Н. Бор использовал термин “универсальный” по отношению к постоянной Ридберга, и “фундаментальные” по отношению к постоянным  $c$  и  $h$  (*Бор, 1955, с. 471 и 476*)), Р. Фейнман, С. Вайнберг, П. Девис, Э.Р. Коэн, К. Кроу, Дж. Дюмонд, Б. Тейлор, В. Паркер, Д. Лангенберг,

<sup>1)</sup> *Newcomb, 1895, р. 16. Куликов, 1956, Kulikov, 1964, Фундаментальные постоянные астрономии, 1967*

Б. Петли и мн. др. Также этот термин широко применялся и на других языках, в частности, на русском — Л.Б. Окунь, Я.А. Смородинский, Я.М. Крамаровский, В.П. Чечев, В.Н. Мельников, О.П. Спиридонов и мн. др. В немецкоязычной физике ряд авторов применял термин “Grundkonstanten”: П. Йордан (по отношению к четырем постоянным  $c, h, k, l$ , где  $l$  — “классический радиус электрона” — *Jordan*, 1944, S. 185), У. Штилле (*Stille*, 1949, S. 211), а также “Fundamentalkonstanten” (см.: *Units*, 1991), Х.-Г. Шёпф (*Шёнф*, 1978, с. 105). Помимо термина “fundamental” также в середине XX века использовался термин “general physical constants” — основные физические постоянные <sup>1)</sup> и “principal constants” (основные/главные) (*Birge*, 1941, p. 234).

Ныне, согласно англоязычному словарю научных терминов С. Паркера, термины “фундаментальные постоянные” и “универсальные постоянные” считаются эквивалентными (*Parker*, 1989). В современной физике и в истории физики эти термины обычно не различаются, хотя, как мы видим, существовали исторические отличия в их появлении и использовании. Но можно рассматривать “фундаментальные постоянные” как подкласс “универсальных постоянных”, охватывающий постоянные, имеющие более основополагающее значение (например, постоянная Ридберга является универсальной постоянной, но так как она редуцируется к атомным постоянным, то последние можно рассматривать как более фундаментальные). Если это будет принято, то ситуация с терминами “физические постоянные”, “универсальные постоянные” и “фундаментальные постоянные” окажется в чем-то сходной с эволюцией терминов, описывающих структуру вещества — “атомы” (“неделимые”), “элементарные частицы” и т.д. — эти понятия с эволюцией физического знания потеряли первоначальный смысл, охватывали все большее количество объектов и требовали введения новых понятий или своего переопределения.

**3.1.4. Естественные постоянные.** Термин “постоянные Природы” (constants of nature) использовал Ч. Бэббидж, сформулировав задачу их аккумуляции (*Babbage*, 1832). В дальнейшем термин “естественные постоянные” (“постоянные Природы”) использовали М. Тизен, М. Планк, П. Эренфест, В. Паули, А. Эддингтон и др.

М. Тизен обсуждал “общие постоянные Природы” (allgemeine Naturconstanten) и их комбинации в докладе 15 июня 1900 г. (*Tiesen*, 1900). М. Планк использовал термин естественные (природные) постоянные (“Naturconstanten”) в своем знаменитом докладе 14 декабря 1900 г. по отношению к введенным им постоянным  $h$  (постоянной Планка) и  $k$  (ныне — постоянная Больцмана) (*Planck*, 1958, В. I, S. 699, S. 700) (в рус. пер. В.Я. Френкеля этот термин был переведен как “мировая постоянная”, (*Планк*, 1900d, с. 252, с. 253)). Постоянную в законе энтропии  $k$  (постоянную Больцмана), Планк назвал “второй

<sup>1)</sup> *Birge*, 1929, 1937, 1941, 1943, *Benford*, 1943.

естественной постоянной (Planck, 1958, В. I, S. 702), а в конце доклада — “постоянной излучения  $k$ ” (“Strahlungsconstanten  $k$ ” (там же, S. 706)) (в рус. пер. эти планковские термины были опущены — “постоянная  $k$ ” (Планк, 1900d, с. 254, 257)).

В концептуальной статье “Взаимоотношение физических теорий” (1914) М. Планк использовал два термина: “универсальная постоянная” (“universelle Konstant”) по отношению к скорости света и “естественная (природная) постоянная” (“Naturkonstant”, “Naturkonstanten”) по отношению к “элементарному кванту действия” (Planck, 1958, В. III, S. 106–107; Планк, 1914). Также термин “Naturkonstanten” применяли и другие ученые — П. Эренфест (“Naturkonstanten”: Ehrenfest, 1906с, S. 851), Г. Вейль (“fundamentalen Naturkonstanten”: Weyl, 1928/31, S. 61), В. Паули (“естественные постоянные”, “природные постоянные”, “естественные универсальные постоянные”: Паули, 1934/36, с. 7, с. 20), П. Бриджмен (“постоянные природы”: Бриджмен, 1920/31, с. 108).

А. Эддингтон в книге “Новые пути в науке” (1935) специально посвятил один параграф фундаментальным физическим постоянным, он назвал его “The constants of Nature” (“Постоянные Природы”). Наряду с термином “фундаментальные постоянные” (“fundamental constants”) Эддингтон использовал в этой же книге термин “естественные постоянные” (“natural constants”) (Eddington, 1935, p. 229), а также термин “the primitive constants of physics” (“первоосновные”). Под термином “естественные постоянные” (“natural constants”) Эддингтон понимал широкий круг физических и астрономических постоянных. Под фундаментальными постоянными Эддингтон понимал скорость света, массу атома водорода, абсолютный нуль температуры, механический эквивалент тепла, постоянную тяготения, постоянную Планка и “многие другие” постоянные (там же, p. 229). Но наиболее основополагающими, “первоосновными” (“the primitive constants of physics”; термин “primitive” используется в современной научной терминологии, например, для обозначения *основных цветов*) Эддингтон считал только *семь* следующих физических постоянных (в том порядке, в котором указал их сам автор): заряд электрона  $e$ , масса электрона  $m$ , масса протона  $M$ , постоянная Планка  $h$ , скорость света  $c$ , постоянная тяготения  $G$  и “космическая постоянная” (cosmical constant)  $\lambda$  (там же, p. 230). После открытия во второй половине XX в. еще десятков других элементарных частиц наличие в списке основополагающих констант масс частиц не выглядит столь очевидным, как в середине 1930-х гг., когда их было только четыре — электрон, протон, нейтрон и нейтрино, тогда еще гипотетическое. Еще в большей степени это касается космологической постоянной  $\lambda$  которая, возможно, вообще не существует или сама зависит от космологического времени. Ее присутствие в законе тяготения Эйнштейна было первоначально обусловлено концепцией стационарной Вселенной, которой следовал Эйнштейн, и, хотя ныне нет теоретиче-

ских запретов на ее существование, на ее величину наложены сильные экспериментальные ограничения

Ряд ученых также использовал комбинированные термины: С.И. Вавилов — “универсальная постоянная природы” (Вавилов, 1924; то же в кн.: Вавилов, 1956, т. 4, с. 273); В. Паули — “естественные универсальные постоянные” (Паули, 1934/36, с. 20); “grundlegended Naturkonstanten” — “основополагающие (фундаментальные) естественные постоянные” (К. Рамзауэр см.: Planck, 1958, В. III, S. 405, и П. Йордан: Jordan, 1944, S. 183, S. 185), “basic constants of nature” — основные постоянные природы (Bethke, 2004a, p. 2) и т. п.

**3.1.5. Абсолютные постоянные.** Термин “абсолютные постоянные природы” (“absolute constants of nature”, “absoluten Naturkonstanten”) применяли Г. Вейль, К. Ланцош<sup>1)</sup> и др. Также этот термин использовался по отношению к газовой постоянной — “абсолютная газовая постоянная”, например, М. Планком и мн. др. (Планк, 1901b, с. 268). В начале 1930-х гг. М. Борном в рамках своей нелинейной электродинамики было предположено существование новой гипотетической постоянной — предельного значения напряженности электромагнитного поля, которое он назвал “абсолютным полем” (см. п. 4.1.1).

В докладе “Происхождение и влияние научных идей” (1933) М. Планк, критикуя “бессмысленное выражение «Все относительно»”, отметил: “Все так называемые универсальные константы, как масса или заряд электрона или протона, или элементарный квант действия, являются абсолютными величинами (“absoluten Größen”): они представляют собой устойчивые неизменные камни для атомистики. Конечно, часто бывало, что величина, рассматриваемая как абсолютная, позже оказывалась относительной; но при этом она всегда сводилась к другим, более глубоко лежащим абсолютным величинам. Без предпосылки существования абсолютных величин вообще не может быть определено ни одно понятие, не может быть построена ни одна теория”<sup>2)</sup>. Также, как указывалось выше, М. Планк рассматривал “универсальные постоянные” как “абсолютные центральные пункты” (“absoluten Kernpunkt”) новейших физических теорий.

**3.1.6. Предельная, критическая, максимальная, стандартная, истинная, фундаментальная (скорость света).** Термины “предельная”, “критическая”, “максимальная скорость света”, или более широко — “скорость взаимодействий” отражают невозможность движения материальных тел и передачи взаимодействия выше данной скорости. Эти термины применяли, например, М. Планк, О.Д. Хвольсон, Я.И. Френкель и др. — “предельная скорость”, “критическая скорость” (Планк, 1928, с. 18, 112, 152, Хвольсон, 1933, с. 559), “предельная

<sup>1)</sup> Weyl, 1949, p. 287, 1976, S. 371, Ланцош, 1962, с. 62

<sup>2)</sup> Planck, 1958, В. III, S. 251, Планк, 1975, с. 599–600

скорость” (Френкель, 1927b, с. 70), “предельная скорость”, “критическое значение” (Френкель, 1933, ч. 1, с. 21); “предельная скорость распространения взаимодействий” (Раджабов, 1980, с. 168); максимальная скорость взаимодействий (Ландау, Лифшиц, 1988, с. 14) и мн. др. Я.И. Френкель также использовал термин “стандартная скорость света” (Френкель, 1970, с. 157), подчеркивая инвариантность скорости света в вакууме при преобразовании движения. Интересна также концепция “истинной скорости света”, предложенная Френкелем. “Истинная скорость  $c$ ” — скорость света в пустоте, в отличие от “кажущейся скорости света  $w$ ” в среде. Согласно Френкелю, как первичные, так и переизлученные частицами вещества волны, на самом деле, движутся с одной и той же “истинной скоростью  $c$ ”, в результате же интерференции образуется “сложный волновой процесс, который можно рассматривать с макроскопической точки как систему обыкновенных волн, распространяющихся со скоростью  $w$ , отличной от  $c$ ” (Френкель, 1933, ч. 1, с. 13-14). Термин “фундаментальная скорость” использовал А.Л. Зельманов (Зельманов, 1955/60, с. 83; 1964, с. 229).

**3.1.7. “Квантовая” терминология.** Термин “квант” (quantum) широко применялся в средневековой схоластической философии, а затем и в немецкой классической философии (например, Гегелем) в смысле “определенное количество” (Гегель, 1817, с. 247 и др.). Его проникновение в физику, по-видимому, связано с появлением термина “количество электричества” (“electrisches Quantum”, см. напр.: Helmholtz, 1882, S. 1000). После возникновения идеи дискретности заряда и существования минимального количества электричества (см. п. 1.3.2) в немецкой литературе распространился термин Гельмгольца “elementar Quantum”, который фигурировал в публикации его Фарадеевской лекции на немецком языке (в английском оригинале — “elementary portions” (Helmholtz, 1881)) Термин “квант энергии” (Energiequantum) в смысле “количество энергии” использовал В. Вин при обосновании закона смещения максимума излучения (1893), а также в статье, в которой он предложил закон теплового излучения (1896) (Wien, 1893, 1896).

В отношении введенных им постоянных  $a$  и  $b$  (1899), затем  $h$  и  $k$  (1900), Планк первоначально не использовал специальной “квантовой” терминологии, лишь характеризуя их как “универсальные” (universelle), “естественные” постоянные (Naturconstant) или называя их “постоянными излучения” (Strahlungskonstanten) <sup>1)</sup>

Впервые Планк использовал “квантовую” терминологию в статьях 1900–1902 гг. в отношении элементарного электрического заряда  $e$  (Das Elementarquantum der Elektrizität), а также масс атомов (элементарное количество материи) при расчете их численных значений <sup>2)</sup>.

<sup>1)</sup> Planck, 1958, В I, S. 585, 649, 682, 725, 726, 727, 748; В II, S. 241

<sup>2)</sup> Planck, 1958, В I, S. 706, 728–730, 743

В отношении величины энергии  $\varepsilon = h\nu$  Планк первоначально в основополагающем докладе 14 декабря 1900 г. и в последующих статьях использовал термин “элемент энергии” (Energieelement) <sup>1)</sup>, а затем — “квант энергии” (Energiequantum, Quantum) <sup>2)</sup>. Уже в 1900-х гг. под термином “квант” стали понимать некоторое *минимальное количество* соответствующей физической величины (т. е. то, что первоначально Планк и Гельмгольц называли “элементарным квантом”). От термина “квант” произошло множество терминов: “квант света”, “квантовая физика”, “квантовая теория”, “квантовая механика”, “квантование” и т. п.

Термин “квант света” (Lichtquantum) впервые появился в 1905 г. в статье Эйнштейна по фотоэффекту, однако он понимал под ним не корпускулу светового излучения, а *квант энергии* светового излучения. Расширение экспериментальных исследований со светового на другие диапазоны электромагнитного излучения привело к появлению термина “квант излучения” (quantum of radiation). Этот термин использовал А. Комптон, экспериментально доказавший в 1923 г. наличие и изменение импульса излучения  $p = \frac{h\nu}{c}$  в опытах по рассеянию рентгеновского излучения на атомах.

Новое направление в развитии квантовой теории было связано с пониманием постоянной  $h/2\pi$  как “кванта действия”. В книге “Теория теплового излучения” (1906) Планк впервые ввел применительно к  $h$  термины “квант действия”, “элемент действия”, “элементарный квант”, “элементарный квант действия” (Wirkungsquantum, Wirkungselement, Elementarquantum, elementare Wirkungsquantum), в дальнейшем он применял эти термины в научной переписке и статьях <sup>3)</sup>. Термин “элементарный квант действия” был поддержан А. Зоммерфельдом, который как и Планк включил его в название своего доклада на первом Сольвеевском конгрессе. Широко применял его и Н. Бор. Происхождение термина было связано с идеей Планка модификации классического принципа наименьшего действия с учетом постоянной  $h$  как “кванта действия”. Эта идея, несмотря на попытки отдельных ученых (см. *Джеммер*, 1966, с. 64–65), по неясным причинам не получила своего развития и термин “квант действия” в настоящее время выпал из употребления. Если бы эта идея оказалась осуществлена, то физики получили бы в свои руки второй важнейший методологический принцип, аналогичный по значимости принципу релятивистской инвариантности (возможно, однако, что именно этот подход фактически лежит в основе фейнмановских интегралов по траекториям).

Термин “квантовая теория” получил распространение после первого Сольвеевского конгресса (1911). Уже в его названии фигурировал термин “кванты”: *La théorie du rayonnement et les quanta*. Вскоре после

<sup>1)</sup> *Planck*, 1958, В I, S 703, 725

<sup>2)</sup> *Planck*, 1958, В II, S 249, 275

<sup>3)</sup> *Planck*, 1906, S 153, 1958, В II, S. 198, *Kuhn*, 1978, p 130–134



конгресса А. Пуанкаре опубликовал статью “О теории квантов” (*Sur la theorie des quanta*, 1911), в этом же году термин “квантовая теория” (*Quantentheorie*) использовали В. Нернст и Ф.А. Линдеманн в названии своей статьи (*Nernst, Lindemann*, 1911). Термин “квантовая механика”, по-видимому, впервые появился в предисловии к немецкому изданию трудов первого Сольвеевского конгресса, написанном Эйкенем (см.: *Джеммер*, 1966, с. 63), но приобрел свое настоящее значение после создания матричной (В. Гейзенберг, М. Борн, П. Йордан) и волновой (Э. Шредингер) механики в 1925–26 гг.

**3.1.8. Элементарный заряд, элементарный квант действия, элементарная длина.** Термин “элементарный” восходит к гельмгольцевскому “элементарному кванту” заряда и планковскому “элементу энергии”  $h\nu$  (*Energieelement*). В докладе “К теории распределения энергии в нормальном спектре” (14 дек. 1900 г.) Планк назвал заряд электрона “элементарным квантом электричества” (“*das Elementarquantum der Electricität e*”) (*Planck*, 1958, В. I, S. 706). Этот же термин Планк использовал и в других работах. Очевидно, термин “элементарный квант действия” (“*elementare Wirkungsquantum*”), который с 1906 г. начал применять Планк — возник по аналогии с термином, который Планк ранее применил по отношению к заряду. По отношению к другим постоянным, значения которых Планк обсуждал в этом же докладе — газовой постоянной, постоянной Лошмидта, постоянной Больцмана–Друде ( $3k/2$ ) и др., Планк не использовал каких-либо дополнительных характеристик.

Такого рода термины — элементарный квант электричества (Г. Гельмгольц, М. Планк), элементарный заряд, элементарная длина (И.Е. Тамм, Д.А. Киржниц и мн. др.) отражают предельные, критические параметры соответствующих физических величин — заряда, длины и т.д. Термин “элементарный заряд” (“*elementary charge*”) является общепринятым научным термином и отражает существование минимального электрического заряда.

Гипотеза о существовании элементарной (фундаментальной) длины является логичным развитием концепции фундаментальных постоянных. Ее активно развивали В. Гейзенберг, Г. Снайдер, И.Е. Тамм, М.А. Марков, Д.А. Киржниц и др. От других фундаментальных (универсальных) постоянных эту постоянную отличает то, что она является пока гипотетической. На ее роль претендовали комптоновская длина волны электрона, характерная длина слабого взаимодействия, планковская длина. Как считается, эта постоянная определяет предел применимости теории относительности, квантовой теории, а также принципа причинности (см. п. 4.1.2).

В терминах “квант”, “предельная”, “критическая”, “элементарный”, а также “естественные”, “абсолютные” постоянные также отражается свойство фундаментальных постоянных как естественных и абсолютных единиц соответствующих физических величин (абсолютных мер).

**3.1.9. Атомные постоянные.** Термин “атомные постоянные” обычно связывается с такими постоянными, как  $h$ ,  $e$ ,  $m_e$ ,  $m_p$  и некоторыми другими постоянными, играющими роль в атомной физике, в отличие от, например, гравитационной постоянной  $G$ , значимой для космологии. Термин “атомные постоянные” (“atomic constants”) ныне достаточно широко распространен. Одним из первых его использовал в 1929 г. Р.Т. Бёрдж по отношению к константам  $h$ ,  $e$ ,  $m_e$  в обзоре значений фундаментальных постоянных (Birge, 1929). По отношению к этим же константам этот термин использовал Ф. Кирхнер (Kirchner, 1939), а в 1957 г. — Э.Р. Козн, К.М. Кроу, Дж.В.М. Дюмонд (Cohen, Crowe, Dimond, 1957, p. 24). Введение этого термина было неслучайно — с помощью него выделялся подкласс фундаментальных постоянных, позволяющих производить согласованное уточнение их значений на основе измерений различных их комбинаций. Этот же термин (“Atomare Konstanten”) использовал У. Штилле (Stille, 1955, S. 328). Иногда этот термин применялся в сочетании “фундаментальные атомные постоянные” (Friesen, 1937; Birge, 1937; Sanders 1961/65) и мн. др.

**3.1.10. “Особые точки”.** В применении общепринятой терминологии существуют особенности, обусловленные нормами научной этики. М. Планк никогда не использовал термина “постоянная Планка”, а называл ее “постоянная  $h$ ” (“Konstanten  $h$ ”), “квант действия” (“Wirkungsquantum”), “элементарный квант действия” (“elementare Wirkungsquantum”), “элементарный квант  $h$ ” (“Elementarquantum  $h$ ”), “элемент действия  $h$ ” (“Wirkungselement  $h$ ”), хотя уже в начале XX в. термин “постоянная Планка” стал общепринятым. Также закон излучения, известный как закон излучения Планка, сам автор называл законом нормального распределения энергии.

Это не является особенностью только М. Планка, а проявлением общей закономерности, характерной для большинства крупнейших ученых мира. Так, например, Г. Лоренц никогда не использовал терминов “преобразования Лоренца” и “группа Лоренца”, хотя они были общепринятыми, а говорил “преобразования”, “преобразования движения” (“Transformation”, “Bewegungstransformation”) и “группа преобразований движения” (“die Gruppe der Bewegungstransformation”). В.Рентген всегда называл открытое им излучение X-лучами, хотя термин “рентгеновские лучи” стал общепринятым уже спустя несколько месяцев после их открытия (на Западе термин X-лучи сохранился до сих пор). Э. Шредингер открыл свое волновое уравнение в 1926 г., уже в том же году термин “уравнение Шредингера” стал общепринятым, однако сам Шредингер никогда его так не называл, он говорил “волновое уравнение”. П.А.М. Дирак вместо общепринятого термина “уравнение Дирака” также применял термин “волновое уравнение”. Никогда он не использовал и термина дельта-функция Дирака. Существует несколько уравнений, носящих имя А. Эйнштейна, однако сам Эйнштейн никогда

не использовал названий, в которых фигурировало его собственное имя. В. Гейзенберг никогда не говорил о соотношении неопределенностей Гейзенберга, он говорил просто о соотношении неопределенностей, принципе неопределенности. Н. Бор также никогда не употреблял терминов “квантовые постулаты Бора”, “теория атома Бора”, “принцип дополнительности Бора”, он говорил: “квантовые постулаты”, “теория атома”, “дополнительность”, “принцип дополнительности” (“complementarity”, “Komplementarität”). В. Паули называл открытый им принцип “принципом запрета”, хотя общепринятыми терминами были “принцип запрета Паули”, “принцип Паули”. Луи де Бройль никогда не использовал общепринятых терминов “волны де Бройля” и “де-бройлевская длина волны”. Р. Фейнман никогда не называл свои диаграммы диаграммами Фейнмана. В.Л. Гинзбург вместо общепринятого термина “теория Гинзбурга–Ландау” предпочитал термин “ $\Psi$ -теория”, связывая это с нормами русского языка (Гинзбург, 2003, с. 204). Среди крупных физиков лишь Э.Ферми использовал термины, содержащие его собственное имя: “статистика Ферми”, “уравнение Ферми”, являющиеся общепринятыми.

Появление этих “особых терминологических точек” связано со следованием морально-этическому императиву, согласно которому ученому не следует применять научный термин, содержащий его собственное имя, даже если этот термин является общепринятым (Томиллин, 1995). Это приводит к тому, что ученые употребляют в научных публикациях свою терминологию, подчас отличную от общепринятой. Таким образом, этот этический императив является одним из источников многообразия терминологии. Например, очевидно, что термин “квант действия” поддерживался во многом благодаря тому, что его применял сам М. Планк. В дальнейшем этот термин был вытеснен общепринятым “постоянная Планка  $h$ ” и стал считаться устаревшим.

\* \* \*

Таким образом, терминология, применяемая различными учеными в связи с физическими постоянными, многообразна. Наибольшее предпочтение в первой половине XX в. отдавалось термину “универсальные постоянные”. Возникновение этого термина связано, по видимому, с пониманием универсальности соответствующих физических законов — закона всемирного тяготения, уравнений Максвелла, закона теплового излучения. Термин “фундаментальные постоянные” использовался с конца XIX в. и до сих пор используется в небесной механике в смысле “основные постоянные”. В 1920-е гг. происходит изменение смысла термина “фундаментальные постоянные” в связи с осознанием “фундаментального статуса” некоторых физических постоянных, таких как скорость света и постоянная Планка. Во второй половине XX в. этот термин практически вытесняет термин “универсальные постоянные”, чему способствовал, возможно, и переход в середине XX в. от “немецко-” к “англоязычной” физике. Наряду с этими

терминами использовались также термины “абсолютные постоянные”, “естественные постоянные” (“постоянные Природы”), “мировые постоянные”, “атомные постоянные” и др. Среди других терминов также применялись термины “general physical constants” (*Birge*, 1929; *Cohen, Crowe, Dimond*, 1957, p. 103), “Allgemeine Konstanten” (*Stille*, 1955, S. 383).

С другой стороны, применяемая учеными терминология отражает как универсальные элементы развития физической картины мира, так и национальные и личностные факторы, связанные с тем, что науку развивают конкретные ученые с помощью средств конкретной языковой среды.

Очевидно, чтобы понять смысл фундаментальных (универсальных, мировых и т. д.) констант необходимо прежде всего исследовать свойства этих постоянных.

## Глава 3.2

### Свойства фундаментальных постоянных и их роль в физической картине мира

На современном этапе развития физики господствует дескриптивный тип определения фундаментальных констант — как правило им не дается определения, а, наоборот, перечисляются некие физические постоянные и им *по определению* присваивается статус фундаментальных (универсальных) постоянных. В то же время ряд ученых пытался дать те или иные определения понятию “фундаментальная постоянная”. Такого рода определения, как правило, отражают научные интересы самих авторов и должны рассматриваться в совокупности как разные свойства фундаментальных физических постоянных (ФФП). В различных определениях фундаментальных постоянных фиксируется то, что они:

1) являются *универсальными параметрами*, т. е. независящими от специфических условий и сохраняющими свое значение для всей Вселенной;

2) описывают *свойства элементарных частиц*;

3) присутствуют в фундаментальных физических законах в виде *коэффициентов пропорциональности*;

4) являются *фундаментальными естественными масштабами* соответствующих физических величин;

5) связаны с различными физическими теориями, описывающими разные явления, и *определяют область применимости теории*;

6) являются коэффициентами, устанавливающими *связь между понятиями различных теорий*, описывающих один и тот же класс явлений;

7) связаны с *эволюцией физических теорий*, их обобщением, и отражают принцип соответствия и соотношение предельного перехода между классическими и неклассическими теориями.

**3.2.1. Универсальность.** Свойство “универсальности” некоторых физических постоянных нашло отражение в самом термине “универсальная постоянная”. Как уже отмечалось выше, первоначальная характеристика некоторых постоянных как универсальных связана с универсальностью законов, в которых они присутствовали (закона всемирного тяготения, закона теплового излучения и др.).

Однако само введение универсальных постоянных в классические законы, как оказалось впоследствии, разрушило универсальность самих классических законов, которые уступили место релятивистским и квантовым законам. Оказалось, что все классические законы не универсальны, как считалось на протяжении 200 лет, а все они имеют ту или иную область применения. Причем границы применимости классических теорий определяют именно универсальные (фундаментальные) постоянные. Таким образом универсальный статус законов фактически оказался перенесенным на некоторые физические постоянные. Поэтому суть квантово-релятивистской революции можно кратко выразить как переход от универсальных законов к универсальным постоянным (*Пригожин, Стенгерс, 1984, с. 280*).

Другое понимание универсальности связано с независимостью от специфических свойств материальных объектов или внешней среды. Согласно современному словарю научной лексики: “Универсальная постоянная — постоянная, которая не зависит от вещества, излучения или внешних условий, например, масса электрона, постоянная Фарадея, постоянная Авогадро” (*Dictionary of scientific and technical terms, 1976, p. 93*). Такое понимание универсальности было, например, у С.И. Вавилова, который характеризовал гравитационную постоянную, как “универсальную постоянную, не зависящую ни от формы, ни от состава вещества, ни от каких-либо иных физических факторов” (*Вавилов, 1943/89, с. 132*).

Свойство “универсальности” в смысле сохранения значения для всей Вселенной важно для космологов, философов, метрологов (см. напр. *Кузнецов, Ляхов, 1964*). Важность именно этого свойства для метрологии подчеркивали Дж.К. Максвелл, Дж. Стони, М. Планк и др. ученые, стремившиеся построить естественные системы единиц. Максвелл даже назвал такой класс систем единиц *универсальными*. Планк отмечал, что такие системы единиц универсальны для представителей разных миров (землян и марсиан).

**3.2.2. Свойства элементарных частиц.** ФФП отражают те или иные свойства элементарных частиц — их массы, скорости, заряды, спины, магнитные моменты и т.д. Например, электрические заряды всех частиц квантуются в единицах элементарного заряда  $e$ . Скорости

всех частиц ограничены предельной скоростью  $c$ , которую имеют только безмассовые частицы (фотон). Спины частиц кратны постоянной Планка  $\hbar/2$ . Поэтому это свойство важно для ученых, работающих в физике элементарных частиц.

Исключение по такому определению составляет гравитационная постоянная  $G$ . Действительно, нет никаких данных о том, что гравитация играет какую-либо роль в физике элементарных частиц. Попытки привлечь гравитацию (и, следовательно, гравитационную постоянную) к теории электрона делались еще в 1910-20-х гг. Тогда возникла идея, что гравитация может быть ответственна за стабильность электрона, однако сопоставление сил электромагнитного и гравитационного взаимодействий для одной и той же частицы показало исключительную слабость гравитации (см. гл. 4.4). Гравитация и остальные взаимодействия и до сих пор существуют отдельно друг от друга, охватывая области макро- и микромира, на грани которых, как отмечал Зельманов, существует человек. В то же время, исходя из единства мира и единства физических взаимодействий логично ожидать, что гравитация включится в том или ином качестве (либо на равных правах, либо будучи редуцированной к остальным взаимодействиям) в состав единого взаимодействия. На это указывает, в частности, принятая схема объединения трех обычных взаимодействий, которое достигается при приближении к планковским масштабам.

В 1964 г. М.А. Марковым была выдвинута идея “максимона” — максимально возможной элементарной частицы, предельная масса которой есть планковская масса (ок.  $10^{-5}$  г), определяемая, как известно, комбинацией постоянных  $c$ ,  $\hbar$  и  $G$ . В рамках марковской концепции элементарных частиц, включающих максимон, определение (2) учитывает и планковскую массу  $m_{пл}$ , а, следовательно, и гравитационную постоянную  $G$ .

Следует отметить, что существующие законы тяготения (классический Ньютона и релятивистский Эйнштейна) предполагают универсальность этих законов независимо от масштабов. Это хорошо проверено на расстояниях от космических масштабов до порядка 1 см, однако на меньших расстояниях трудно рассчитывать на справедливость этих же законов. Если константы всех остальных взаимодействий меняются с изменением расстояния, то почему гравитация должна быть исключением? Если обнаружится, что гравитационное взаимодействие усиливается с уменьшением расстояния, то тогда оно может быть важным и для элементарных частиц.

Пока роль гравитации для элементарных частиц остается туманной, некоторые авторы совмещают это определение фундаментальных постоянных с определением (3) — присутствием физической постоянной в основных физических законах в виде коэффициентов пропорциональности.

**3.2.3. Коэффициенты пропорциональности в фундаментальных законах.** ФФП присутствуют в законах физических теорий в виде коэффициентов пропорциональности. Так гравитационная постоянная  $G$  присутствует в законе всемирного тяготения, эйнштейновская гравитационная постоянная  $\kappa$  — в законе тяготения Эйнштейна, постоянная Планка  $h$  фигурирует в уравнении Шредингера и др. законах квантовой механики, скорость света  $c$  — во всех релятивистских теориях.

Размерные коэффициенты в уравнениях характерны не только для современной физики, но и для античной и средневековой математики. Древнегреческие математики рассматривали математические уравнения как физические — *с размерными коэффициентами* (размерности длины и площади), причем строго проверялась размерность коэффициентов. В XVI в. Ф. Виет также рассматривал математические уравнения, например, записывая решения квадратного уравнения, как уравнения с размерными коэффициентами (он ввел символическое обозначение для коэффициентов и сам термин “коэффициент”) <sup>1)</sup>. В квадратном уравнении коэффициент при первой степени имел линейную размерность, а свободный член — размерность площади. “Причина этого — инерция греческой традиции (геометрическая алгебра), в которых однородность слагаемых в уравнении была необходимым условием осмысленности выражения”, — отмечает А Н Кричевец (*Кричевец*, 1999, с. 54). В отличие от современной физики размерные коэффициенты в этих уравнениях не носили универсального характера, значимого для всего мира.

В дальнейшем математики отказались от размерных коэффициентов (усилиями Декарта, Ферма и др.) и перешли к безразмерным коэффициентам, что стало важным шагом для “выделения” математики из физики, для реализации универсальных математических методов. Этот переход обычно рассматривается, как элиминация размерностей из уравнений (т.н. “проблема отказа от однородности слагаемых в уравнении”), однако, на самом деле эта операция эквивалентна обезразмериванию физических величин, т.е. замене  $x$  на  $x/x_0$ , где  $x_0$  — единица измерения величины  $x$ ). Таким образом, можно считать, что при этом размерности величин перешли в *определения самих математических величин*. Эта операция позволила отделить проблему решения математического уравнения от реализации того или иного набора физических величин со своими размерностями. При этом уравнения и их решения стали универсальными (например, уравнение колебания струны реализуется во многих процессах с совершенно различными физическими величинами).

В отличие от древнегреческой и средневековой математики в уравнениях современной физики присутствуют *универсальные* размерные

<sup>1)</sup> История математики, 1970, т. 1, с. 305.

постоянные, имеющие некоторое конкретное численное значение, определяемое выбором единиц.

Это свойство фундаментальных постоянных рассматривал как их *определение*, например, Р.Н. Фаустов. “фундаментальные физические постоянные — постоянные, входящие в уравнения, описывающие фундаментальные законы природы и свойства материи” (Фаустов, 1998, с. 381).

Однако существует возможность вообще исключить фундаментальные постоянные из законов соответствующим выбором системы единиц, основанном на переходе к той или иной естественной системе единиц и дальнейшем переходе от размерных к соответствующим безразмерным понятиям скорости, момента импульса, заряда, массы и т.д. Именно этот прием был применен в 1927 г. Д. Хартри с целью избавления от лишних множителей в уравнениях и переходе к анализу чисто математических уравнений (Hartree, 1928). Ранее это делал в отношении скорости света А. Пуанкаре в письме Г.А. Лоренцу и в своей статье, в которой он вывел правильные релятивистские преобразования (см. Poincaré, 1905a, b, Пуанкаре, 1905).

Это свойство универсальных физических постоянных отмечал также А. Эйнштейн. Причем он охарактеризовал их универсальность как “кажущуюся”, так как их можно элиминировать из физических законов. “Скорость света  $c$  является одной из величин, входящих в физические уравнения в качестве «универсальной константы». Однако если взять за единицу времени вместо секунды то время, за которое свет проходит 1 см, то  $c$  больше не будет входить в уравнения. В этом смысле можно было бы сказать, что константа  $c$  лишь *кажется* универсальной константой. Очевидно и всеми принято, что можно было бы исключить из физики еще две универсальные константы, вводя вместо грамма и сантиметра надлежащим образом выбранные “естественные” единицы (например, массу и радиус электрона)”<sup>1)</sup>.

Таким образом, при использовании произвольных систем единиц появляются дополнительные коэффициенты в уравнениях, а при переходе к естественным единицам и безразмерным физическим величинам лишние коэффициенты исчезают из уравнений, что свидетельствует о *выделенности естественных систем единиц* среди прочих. Вместе с тем, следует отметить, что фундаментальные физические постоянные при этом вовсе не исчезают вообще, как это кажется на первый взгляд, — они переходят в *определения* физических величин, точно также, как ранее при переходе к безразмерным математическим уравнениям масштабы перешли в определения математических величин. Однако в отличие от математики, где масштабы произвольны, фундаментальные физические масштабы устанавливаются самой природой

<sup>1)</sup> Эйнштейн, 1949, с. 281; перевод уточнен Г.Е. Гореликом: Горелик, 1983, с. 173.



**3.2.4. Естественные масштабы.** ФФП являются *естественными масштабами* соответствующих физических величин. Так, скорость света в вакууме  $c$  является естественной единицей скорости — ни один материальный объект не может превысить эту скорость. Поэтому скорость света иногда называют также “предельной скоростью”. Элементарный заряд  $e$  является естественной единицей электрического заряда — любой заряд есть целое кратное элементарного заряда. Постоянная Планка  $\hbar$  является естественной единицей для момента импульса и спина частиц. Постоянная Больцмана  $k$  является естественной мерой энтропии и теплоемкости. В то же время существуют физические постоянные, которые не являются характерными масштабами каких-либо физических величин. Например, гравитационная постоянная  $G$ , которая часто рассматривается как фундаментальная физическая постоянная, сама по себе не является естественным масштабом никакой физической величины (однако на роль естественных масштабов для космологии ранней Вселенной претендуют планковские величины, определяемые тремя постоянными  $c$ ,  $\hbar$  и  $G$ ).

Свойство фундаментальных постоянных выступать в виде естественных масштабов соответствующих физических величин подчеркивал В. Гейзенберг: “Универсальные постоянные определяют величины масштабов в природе, они дают нам характеристические величины, к которым можно свести (с которыми можно соотнести? — К.Т.) все другие величины в природе” (Гейзенберг, 1959, с. 136). Это фундаментальное свойство приводит к успешному применению естественных систем единиц в ряде физических теорий: в атомной физике — системы Хартри ( $\hbar$ ,  $e$ ,  $m_e$ ), в квантовой электродинамике — релятивистской  $c\hbar$ -системы, в релятивистских теориях тяготения — максвелловской  $cG$ -системы.

Вместе с тем существует большое количество прикладных задач, в которых также есть соответствующие естественные масштабы, важные именно для этих прикладных задач, но не столь фундаментальные как постоянные  $c$ ,  $\hbar$  (в аэродинамике — скорость звука, в гидродинамике — вязкость и т. д.). Поэтому в такого рода задачах также применяются свои специфические естественные системы единиц, основанные на своих специфических для данных задач естественных масштабах (“мах”, как мера скорости тела в единицах скорости звука и т. п.).

**3.2.5. Связь с физическими теориями.** ФФП связаны с основными физическими теориями. Так, скорость света связана со всеми релятивистскими теориями (электродинамикой, релятивистской механикой, релятивистской термодинамикой, релятивистскими теориями тяготения, квантовой электродинамикой и т. д.). Постоянная Планка  $\hbar$  фигурирует во всех теориях, описывающих квантовые явления (квантовая механика, КЭД, КХД). “Квантовая теория, — отметил Ф. Хунд, — это учение о роли, которую величина  $\hbar$  играет в природе” (Хунд, 1967,

с. 14). Это же можно сказать и о специальной теории относительности и скорости света  $c$ .

Гравитационная постоянная  $G$  фигурирует в теориях тяготения (классическая теория тяготения, общая теория относительности, различные релятивистские теории гравитации и т.д.). Исключение составляет элементарный заряд  $e$ . Он связывался рядом ученых, например, А. Зоммерфельдом, с теорией электронов Лоренца: “ $e$  — представитель электронной теории,  $h$  — основа основ квантовой теории, а  $c$  происходит из теории относительности” (Зоммерфельд, 1951, т. 1, с. 254). Однако такая концепция ныне не принята — теории уровня СТО или КМ, с которой бы связывался элементарный заряд, фактически нет. Элементарный заряд является источником электромагнитного поля, однако он отсутствует в уравнениях Максвелла. Тем не менее, элементарный заряд  $e$  фигурирует в уравнениях КЭД в виде коэффициента наряду с постоянными  $c$  и  $\hbar$ .

Соответствие между фундаментальной постоянной и физической теорией приводит к ее появлению в уравнениях этой теории (свойство (3)), однако данным свойством устанавливается более жесткое соответствие: одна фундаментальная постоянная — одна теория. К тому же свойство (3) является внешним, формальным и, как уже указывалось, уравнения теории можно привести к виду, в котором будут отсутствовать “лишние” коэффициенты. Свойство (5) подводит к проблеме, как и почему некоторые физические постоянные оказываются тесно связанными с определенными теориями. Как оказалось, фундаментальные физические постоянные не просто фигурируют как коэффициенты в физических законах, они определяют границы применимости физических теорий. Так скорость света ограничивает область применимости классической механики, постоянная Планка дает другое ограничение классической механики и т. д.

**3.2.6. Связь между физическими понятиями.** ФФП определенным образом связаны с физическими понятиями. Выше уже рассматривался переход к безразмерным понятиям, приводящий, в частности, к переопределению физических величин, к включению в их определения фундаментальных постоянных как их естественных масштабов. Другое интересное свойство наблюдается, когда развиваются две теории, построенные на разных принципах, но описывающие одни и те же явления (корпускулярная и волновая теории света, волновая и матричная механика). Оказывается, что фундаментальные постоянные выступают в виде коэффициентов, устанавливающих соответствие между понятиями разных теорий. Это было осознано после того, как выяснилось, что физические теории опираются на свой комплекс понятий и вопрос о соизмеримости этих теорий и понятий — нетривиален и требует специального исследования в каждом случае. Так, длительное время понятия скорости в корпускулярной и волновой теориях света рассматривались как эквивалентные, что привело к постановке в духе

идей Ф. Бэкона проблемы т.н. “решающего эксперимента”, который бы показал, как изменяется скорость света в среде (увеличивается или уменьшается) и, следовательно, какая теория истинна. Такой опыт был поставлен Физо в 1850 г. и дал, как тогда считалось, экспериментальное подтверждение именно волновой теории. Лишь в начале XX в. после объяснения А. Эйнштейном фотоэффекта на основе идеи квантованности энергии излучения и опытов А. Комптона стало ясно, что обе теории одинаково допустимы для описания физических явлений. Скорости же в этих теориях — по сути обратные величины, коэффициентом пропорциональности выступает скорость света. При установлении соответствия между понятиями скорости в волновой ( $w$ ) и корпускулярной теории ( $v$ ), Л. де Бройлем было установлено, что это — обратные понятия:  $w = c^2/v$  (см.: Френкель, 1933, с. 7–10, с. 34). Таким образом, скорость света в вакууме  $c$  оказалась коэффициентом, связывающим понятия двух разных теорий.

Постоянная Планка  $h$  выступает в качестве коэффициента пропорциональности между основными понятиями корпускулярной теории — энергией и импульсом, и основными понятиями волновой теории — соответственно, частотой и волновым вектором:  $E = h\nu$  и  $p = hk$ . Это свойство постоянной Планка отмечал, в частности, М. Джеммер (Джеммер, 1966, с. 50).

Гравитационная постоянная некоторыми учеными при соответствующем выборе понятий также иногда рассматривается как коэффициент пропорциональности между двумя разными физическими понятиями — гравитационной и инертной массами. Правда ныне нет физических оснований различать эти два понятия, поэтому их, следуя ньютоновской традиции, как правило, принимают эквивалентными; в этом случае гравитационная постоянная появляется в законе всемирного тяготения.

**3.2.7. Взаимоотношение между физическими теориями.** ФФП отражают эволюцию физических теорий. Физика представляет не просто некий набор никак несвязанных теорий, она претерпевает своеобразную эволюцию в ходе нашего познания законов природы и эта эволюция, идущая, очевидно, к единой физической теории, определяется существованием в Природе фундаментальных постоянных. Так, первоначально, в классической физике не было никаких постоянных, которые играли бы фундаментальную роль. Затем, в ходе квантово-релятивистской революции были развиты релятивистская механика (1905) и квантовая механика (1925–27). Обе эти теории основывались на принятии, соответственно, постоянных  $c$  и  $h$ , как фундаментальных. Поэтому, чтобы подчеркнуть роль в них фундаментальных постоянных, их часто характеризуют, как  $c$ -теория и  $h$ -теория. Ньютоновская теория тяготения также обычно рассматривается как  $G$ -теория, однако, следует отметить, что роль гравитационной постоянной  $G$  в этой теории существенно отличается от роли постоянных скорости света  $c$  в специальной теории относительности и постоянной Планка  $h$

в квантовой механике; она, в частности, не является характерным масштабом какой-либо физической величины (поэтому и предельный переход по ней невозможен; гравитация просто “выключается”), ньютоновскую теорию формально можно построить и без гравитационной постоянной, что исторически и реализовалось на протяжении более столетия с момента установления закона всемирного тяготения и т. п.

В ходе квантово-релятивистской революции было выяснено, что важнейшим принципом, регулирующим взаимоотношение между физическими теориями, является принцип соответствия. Как оказалось, новые физические теории вовсе не элиминируют предыдущие, классические теории сохраняют свою ценность как предельные случаи более общих теорий. Фундаментальные постоянные же ограничивают область применимости классических теорий.

После создания специальной теории относительности ( $c$ -теория) была осознана необходимость создания релятивистской теории тяготения ( $cG$ -теория, 1915), в качестве предельных случаев которой должны были фигурировать специальная теория относительности и ньютоновская теория тяготения. После создания квантовой механики ( $h$ -теория) была поставлена и реализована цель создания релятивистской квантовой теории, построенной на основе двух фундаментальных постоянных —  $c$  и  $h$  ( $ch$ -теория). Дальнейшее развитие физического знания стало прямо связываться с созданием более общих физических теорий, основанных на все большем числе фундаментальных постоянных. Единая физическая теория многими учеными ожидается как  $cGh$ -теория, т. е. теория, которая опирается на эти три постоянные  $c$ ,  $h$  и  $G$  как фундаментальные. Все ранее развитые физические теории (общая теория относительности, релятивистская квантовая теория) с точки зрения этой наиболее общей теории должны рассматриваться как ее предельные случаи. Это свойство фундаментальных постоянных имеет, очевидно, большое значение именно для истории науки, так как позволяет характеризовать в целом эволюцию физического знания.

## Глава 3.3

### Модели развития физики с точки зрения роли фундаментальных постоянных

В XX в. различными учеными были предложены модели эволюции физики. Эти модели прямо связаны с анализом роли фундаментальных постоянных в теоретической физике, прежде всего — во взаимоотношении между основными физическими теориями, которое регулируется принципом соответствия.

**3.3.1. Принцип соответствия и предельный переход.** Согласно принципу соответствия физические теории не сменяют полностью одна другую в ходе развития физики; напротив, историческое развитие

физики заключается в переходе ко все более общим теориям, а первоначально развитые теории сохраняют свою ценность в качестве предельных случаев этих общих теорий. Таково взаимоотношение между классической, ньютоновской, механикой (НМ) и релятивистской механикой (РМ), классической термодинамикой и релятивистской, классической механикой и квантовой (КМ), квантовой и релятивистской квантовой теорией (РКТ), ньютоновской теорией тяготения (НТТ) и релятивистскими теориями гравитации (РТГ), в том числе общей теорией относительности (ОТО).

Соотношение между классическими и неклассическими (релятивистскими, квантовыми) теориями устанавливается с помощью предельного перехода по той или иной фундаментальной постоянной. Под предельным переходом по какой-либо фундаментальной постоянной понимается переход по безразмерному отношению некоей размерной физической величины к соответствующей размерной физической постоянной (например, скорости тела  $v$  к скорости света  $c$  или действия  $S$  к постоянной Планка  $\hbar$ ). При этой операции основные законы и понятия более общей теории переходят в соответствующие законы и понятия первоначально развитой частной теории. Таким образом, фундаментальные постоянные определяют границы применимости этих частных теорий. Однако соответствие между законами и понятиями этих теорий не является полным. Например, релятивистский импульс  $\vec{P} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$  при предельном переходе  $v/c \rightarrow 0$  переходит в классический импульс  $\vec{P} = m\vec{v}$ . Энергия  $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$  в этом пределе

переходит в  $E = mc^2 + \frac{mv^2}{2}$ , в то время как в классической механике энергия покоя  $E_0 = mc^2$  является свободным параметром и обычно по умолчанию выбирается равной нулю. Также релятивистский эффект Доплера переходит при предельном переходе в формулу для классического эффекта Доплера, причем оказывается, что в классической кинематике отсутствует такой эффект, как поперечный эффект Доплера, и т. д. Таким образом, более общие теории содержат новое дополнительное знание, не имеющее аналогов в классических теориях. Экспериментальное подтверждение этих новых эффектов является наиболее убедительным свидетельством справедливости более общих теорий.

Часто предельный переход между теориями понимается как непосредственное стремление некоей фундаментальной постоянной к нулю или бесконечности ( $\hbar \rightarrow 0$ ,  $c \rightarrow \infty$ ). Однако эта операция не вполне корректна как в методологическом, так и в физическом смысле. Во-первых, изменение численного значения размерной постоянной может быть скомпенсировано простым изменением единиц. Поэтому реальными изменениями значений размерных фундаментальных постоянных

являются только такие, которые приводят к изменению безразмерных параметров. (В связи с этим и рассуждения о том, как выглядел бы мир, если бы та или иная размерная постоянная была бы больше или меньше современного значения, лишены физического смысла, если при этом не оговаривается, что происходит с безразмерными постоянными.) Во-вторых, даже формально условие  $c \rightarrow \infty$  не приводит к переходу от группы Лоренца к группе Галилея, необходимым условием для этого является, чтобы все физические величины с размерностью  $L/T$  были много меньше скорости света, как отмечал, например, Ж.-М. Леви-Леблон (*Lévy-Leblond*, 1977, p. 203). Поэтому предельный переход должен осуществляться не по размерным константам, а по безразмерным параметрам (отношениям размерных физических величин к соответствующим фундаментальным постоянным).

История развития принципа соответствия исследовалась в монографии И.В. Кузнецова "Принцип соответствия в современной физике и его философское значение" (*Кузнецов*, 1948), в коллективных монографиях "Принцип соответствия" (первую главу которой составила книга И.В. Кузнецова, а в последующих были рассмотрены история осознания принципа соответствия физических теорий в ходе революции в физике и история аналогичных принципов в других науках — математике, химии, биологии и т. д.) (Принцип соответствия, 1979) и "Методологические принципы физики" (*Зотов*, 1975), в монографии Н.Ф. Овчинникова (*Овчинников*, 1997). Различные аспекты принципа соответствия анализировались в статьях Н. Розена, И. Кона, Я.А. Смородинского<sup>1)</sup> и др. Рядом ученых, в том числе Т. Куном, П. Фейерабеном и др., высказывались возражения против соответствия физических теорий, а П.Г. Кардом была выдвинута идея "принципа несоответствия" физических теорий, дополняющая принцип соответствия (*Кард*, 1975). Основная библиография по исследованию принципа соответствия приведена в монографии "Принцип соответствия" (1979). Тем не менее, история и роль принципа соответствия исследованы еще недостаточно (см. п. 1.2.4).

Обычно принцип соответствия связывается с именем Н. Бора, а именно с его работами по квантовой теории. На самом деле идея соответствия новых законов с установленными ранее и имеющими хорошее эмпирическое обоснование законами неявно использовалась уже с момента зарождения классической физики в XVII в. Например, И. Ньютон при построении теории тяготения понимал, что из его теории должны следовать эмпирические законы Кеплера, а Дж.К. Максвелл — что из его электродинамики должны следовать законы Кулона и Ампера. Причем из ньютоновской теории тяготения следовал не собственно кеплеровский закон, являющийся чисто кинематическим, а модифицированный закон Кеплера, учитывающий

<sup>1)</sup> *Rosen*, 1964; *Cohn*, 1972; *Смородинский*, 1988, с. 192, 195.

отношение масс взаимодействующих тел и переходящий в собственно кеплеровский при предельном переходе  $m/M \rightarrow 0$ .

В ходе развития физики оказалось, что не только отдельные законы, но и хорошо развитые теории, такие как механика, могут обобщаться и становиться предельными случаями обобщенных теорий. Развитие квантово-релятивистской революции требовало осмысления соотношения нового и старого знания, что нашло отражение в докладах Л. Больцмана и А. Пуанкаре на Конгрессе искусства и науки в Сент-Луисе в сентябре 1904 г.

В докладе “О статистической механике” Больцман размышлял об особенностях развития теоретической и экспериментальной физики: “Развитие экспериментальной физики непрерывно прогрессирует, никогда не делает слишком внезапных скачков, <...> никогда не претерпевает серьезных переворотов и потрясений”, а “каждый твердо установленный факт остается навсегда неизменным”, напротив, теоретическая физика “переживает период переворота” (Больцман, 1904, с. 379, 380). Отмечая, что основания старых теорий “в настоящее время во многом становятся спорными” и “может случиться, что сложное теоретическое построение вдруг рухнет и будет заменено другим, более плодотворным”, Больцман указал, что “при этом, как правило, старая теория находит себе место в рамках новой в качестве картины для более узкого круга явлений” (там же, с. 380, 381).

В докладе на этом же конгрессе 24 сентября 1904 г. А. Пуанкаре прямо высказал идею соответствия и предельного перехода между “новой механикой” и классической механикой, предвосхитившую создание релятивистской механики. А. Пуанкаре отметил, что классическая механика должна сохраниться как предельный случай “новой механики” для малых скоростей движения по сравнению со скоростью света: “Возможно, мы должны создать совершенно новую механику, которую мы лишь смутно представляем, механику, где инерция возрастала бы со скоростью и скорость света являлась бы непреодолимым пределом. Обычная механика, более простая, оставалась бы как первое приближение, справедливое для скоростей не слишком больших, так что новая динамика включала бы старую” (Пуанкаре, 1904, с. 575).

В литературе, посвященной принципу соответствия, уже отмечалось, что соответствие между физическими теориями аналогично соответствию между такими математическими теориями, как евклидова и неевклидова геометрия <sup>1)</sup>. Неевклидову геометрию — геометрию Лобачевского и геометрию Римана, можно рассматривать как обобщение евклидовой геометрии, считавшейся единственно возможной на протяжении двух тысячелетий. Взаимоотношение между неевклидовой и евклидовой геометриями также подчиняется принципу соответствия (что в принципе не характерно для математических теорий), евклидову

<sup>1)</sup> Каган, 1944, с. 317–328; Кузнецов, 1948, с. 58; Овчинников, 1997, с. 149–152.

геометрию можно рассматривать как предельный случай неевклидовой геометрии при стремлении кривизны пространства к нулю (или радиуса кривизны к бесконечности), что было осознано еще Ф.К. Швейкартом и К.Ф. Гауссом. Так, Швейкарт в 1817 г. в письме Гауссу говорил о переходе “звездной” геометрии в евклидову при стремлении некоторой константы к бесконечности (см.: *Лобачевский*, 1946, с. 163). Позже Гаусс в письме Тауринусу от 8 ноября 1824 г. указал на предельный переход между “неевклидовой геометрией” (термин, впервые введенный Гауссом именно в этом письме) и евклидовой: “Допущение, что сумма трех углов треугольника меньше  $180^\circ$ , приводит к своеобразной, совершенно отличной от нашей (евклидовой) геометрии; эта геометрия совершенно последовательна, и я развил ее для себя совершенно удовлетворительно; я имею возможность решить в этой геометрии любую задачу, за исключением определения некоторой постоянной, значение которой а priori установлено быть не может. Чем большее значение мы придаем этой постоянной, тем ближе мы подойдем к евклидовой геометрии, а бесконечно большое ее значение приводит обе системы к совпадению” (*Гаусс*, 1824, с. 105–106). Существенным отличием неевклидовой геометрии от евклидовой было то, что все ее законы связаны с предварительным выбором некоторого фундаментального масштаба длины, относительно которого и можно мерить кривизну. Идея абсолютной единицы длины (“ein absolutes Maass der Lange”), по-видимому, впервые была высказана Г. Ламбертом в “Теории параллельных линий” (1776, опублик. в 1786) (*Lambert*, 1776/86, S. 199), затем в известном письме 1817 г. К.Ф. Гауссу эту “константу” размерности длины обсуждал Ф. Швейкарт (*Лобачевский*, 1946, с. 162–163), К.Ф. Гаусс в письме к Тауринусу также использовал термин “абсолютная мера длины” (“absolutes Maass”) (*Гаусс*, 1824, с. 106).

Аналогия между этими математическими и физическими теориями основана на аналогии между понятием “абсолютной единицы длины” в неевклидовой геометрии и понятием фундаментальных физических постоянных, как *абсолютных масштабов Природы*. Однако это не просто аналогия. Уже после создания релятивистской механики было выяснено, что пространство скоростей в релятивистской механике является не чем иным, как геометрией Лобачевского, где роль “абсолютной меры длины” играет скорость света в вакууме (*Varičak*, 1910a,b). А в общей теории относительности с помощью риманова пространства гравитация была представлена как искривление пространства-времени. При этом при стремлении компонентов тензора кривизны пространства-времени к нулю ОТО переходит в СТО, что соответствует переходу от римановой геометрии к псевдоевклидовой.

С точки зрения развития физических теорий, подчиняющихся принципу соответствия, эволюция физики идет от частных ко все более общим теориям, и окончательный итог большинство ученых видит в построении единой физической теории, которая описывала бы все наблюдаемые явления — “теории всего” (“theory of everything”). На



протяжении XX в. в физике реализовывалось несколько программ построения единой теории, основанных на выборе различных наборов фундаментальных постоянных. В первой трети XX в. попытки построения “единой теории поля” на основе программы геометризации физики предпринимали Г. Ми, Д. Гильберт, Г. Вейль, А. Эйнштейн, А. Эддингтон и др. (Визгин, 1985). Единая теория ими виделась фактически как  $SG$ - или  $SGe$ -теория. Другая известная попытка построения единой теории — нелинейной квантовой теории поля, основанной на таких фундаментальных постоянных, как  $c$ ,  $\hbar$  и фундаментальная длина  $l \approx 10^{-13}$  см — была предпринята В. Гейзенбергом в 1950-е гг. В последней трети XX в. приобрела популярность модель общей теории как  $c\hbar$ -теории (А.Л. Зельманов, Л.Б. Окунь, Л.Д. Фаддеев, Г.Е. Горелик, В.П. Визгин и др.). Процесс объединения физических теорий продолжился и в 1970-е-1980-е гг. В этот период было осуществлено объединение таких теорий, как квантовая электродинамика и теория слабого взаимодействия. Дальнейшее продвижение по пути объединения физических теорий ныне связывается с объединением теории электрослабого взаимодействия и квантовой хромодинамики, описывающей сильное взаимодействие. Основным камнем преткновения для реализации программы полного объединения физических теорий по-прежнему остается обособленность гравитации от других взаимодействий, связанная в том числе с ее исключительной слабостью (см. гл. 4.4).

В рамках концепции единой физической теории, которая должна объединить все физические теории на основе принципа соответствия, были предложены модели взаимоотношения физических теорий. У истоков такого рода моделей — программные идеи Л. Больцмана и А. Пуанкаре о сохранении старых теорий как частных случаев новых. В дальнейшей модели развития физики были основаны на осмыслении и обобщении опыта происшедшей релятивистской, а затем квантовой революций. Такого рода модели были предложены в 1914 г. М. Планком, в 1928 г. Г. Гамовым, Д.Д. Иваненко и Л.Д. Ландау, в 1932–35 годах М.П. Бронштейном, в 1934 г. В. Паули, в середине 1950-х годов А. Зельмановым, в 1966 г. М.Штраусом, затем появились модели, описывающие объединение взаимодействий и модели развития физики как эволюции исследовательских программ <sup>1)</sup>.

**3.3.2. Модель Планка.** Свои взгляды на развитие физики как эволюцию физических теорий, идущую по пути их объединения, М. Планк представил в докладе “Единство физической картины мира” (1908), в статье “Взаимоотношение физических теорий” (1914). Историю физики можно рассматривать, согласно М. Планку, как развитие, столкновение, взаимоприспособление и слияние различных физических

<sup>1)</sup> Planck, 1914; Планк, 1914; Гамов, Иваненко, Ландау, 1928; Бронштейн, 1933, 1934, 1935; Паули, 1934/36; Зельманов, 1955/60, 1964, 1966/70, 1967, 1969; Strauss, 1967; 1972; Штраус, 1966/70; Визгин, 1997.

теорий “на пути к высшему единству”. Эволюция физических теорий привела, согласно М. Планку, к формированию к началу XX в. трех основных и “разнородных” физических теорий: 1) *механики*, включая теорию упругости, гидродинамику и акустику; 2) *электродинамики*, включая магнетизм и оптику; 3) *термодинамики*. Эти три основные теории в процессе формирования поглотили другие, более частные теории. “Поэтому приходится признать, — делает вывод М.Планк, — что наука стоит тем ближе к своей цели, чем сильнее уменьшается число заключающихся в ней теорий” (Планк, 1914, с. 116). Дальнейшее развитие физического знания Планк видел в слиянии механики, электродинамики и термодинамики: “Главная цель всякой науки состоит в слиянии всех возросших в ней теорий в одну-единственную, в которой все научные проблемы занимали бы определенное место и получали бы однозначное решение” (там же, с. 116). “В физике, как опытной науке, — отмечал Планк, — нередко происходило и теперь происходит то, что две теории, которые получили самостоятельное развитие вступают в столкновение при дальнейшем расширении и должны подвергнуться взаимному изменению для того, чтобы остаться совместимыми друг с другом” (там же, с. 116). Важнейшим фактором в этом процессе модификации теорий должны играть именно универсальные постоянные. Этот прогноз Планк основывал на анализе уже происшедшей релятивистской революции, потребовавшей преобразования классической механики в механику релятивистскую. Импульс к такому преобразованию был заложен не внутри механики, достигшей определенной полноты, а извне — со стороны электродинамики, причем важнейшую роль здесь сыграло существование предельной скорости взаимодействия (скорости света): “Видоизменение, внесенное в механику теорией относительности, заключает в себе, в качестве одной из важнейших частей, введение новой универсальной постоянной, совершенно чуждой классической механике: скорости света в пустом пространстве” (там же, с. 119).

Следующая задача после объединения механики и электродинамики в одну теорию, которую Планк назвал “динамикой” (“Dynamik”), должна заключаться в “слиянии динамики с теорией теплоты”. Основным фактором для такого слияния должен стать учет того, что тепловое излучение обладает “прерывистыми свойствами, которые характеризуются новой естественной константой (Naturkonstant): элементарным квантом действия” (т. е. постоянной Планка). “Не подлежит никакому сомнению, — писал Планк в конце своей статьи, — что наступит время, когда элементарный квант действия, подобно химическим атомным весам, образует под тем или другим именем и в той или иной форме интегральную составную часть общей динамики. Физическое исследование не может удовлетвориться своими результатами до тех пор, пока учение о покоящейся и лучистой теплоте не будет сплавлено вместе с механикой и электродинамикой в единственную единую тео-

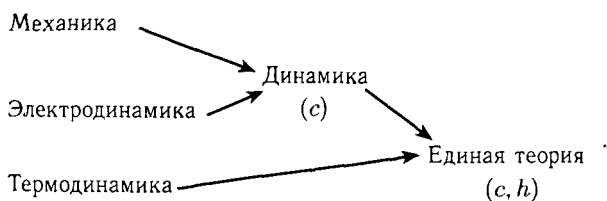


Рис. 3.3.1. Взаимоотношение физических теорий по Планку

рию (einzigen einheitlichen Theorie)" (там же, с. 122) (перевод уточнен В.П.Визгиным).

Идеи Планка о взаимоотношении между физическими теориями можно выразить графически в виде следующей схемы (рис. 3.3.1) (в скобках указаны постоянные, играющие фундаментальную роль в данных теориях):

В 1914 г. М. Планк не мог предвидеть, что изучение атомных явлений приведет первоначально к развитию новой механики, основанной на фундаментальной роли постоянной Планка  $\hbar$  ( $\hbar$ -теория), и лишь затем будет реализовываться задача создания объединенной релятивистской квантовой теории ( $ch$ -теории), а термодинамика с постоянной Больцмана ( $k$ -теория) останется в стороне. Однако Планк показал общее направление развития физики как объединение физических теорий на основе последовательного учета универсальных постоянных. Эта идея, выдвинутая Планком, легла в основу последующих моделей развития физики, предложенных другими учеными.

**3.3.3. Модель Гамова–Иваненко–Ландау: куб физических теорий.** В 1928 г. Г.А. Гамов, Д.Д. Иваненко и Л.Д. Ландау, молодые советские физики-теоретики, опубликовали статью в "Журнале Русского физико-химического общества" "Мировые постоянные и предельный переход" Обстоятельства ее появления подробно исследованы Г.Е. Гореликом, о них также вспоминали А.И. Ансельм и Д.Д. Иваненко <sup>1)</sup>. Возможно, сами авторы не придавали серьезного значения своей статье. Впоследствии ни они, ни другие ученые в научных работах на нее не ссылались. Однако Д.Д. Иваненко в воспоминаниях отметил, что, "по-видимому, эта трехавторная статья оказалась, в конце концов (как стало видно через более чем 60 лет) наиболее интересной из нашего периода 1923–1927 гг." (там же, с. 264). В двухтомное собрание работ Л.Д. Ландау эта статья по тем или иным причинам не была включена, как и все другие статьи, написанные в соавторстве с Д.Д. Иваненко. Тем не менее, в этой статье была представлена концепция развития теоретической

<sup>1)</sup> Гамов, Иваненко, Ландау, 1928; Горелик, Френкель, 1990, с. 149–151, Иваненко, 1994, с. 263–264

физики с точки зрения взаимоотношения физических теорий и роли фундаментальных (по терминологии авторов – мировых) постоянных. Прежде всего, авторы выделили три “истинные” универсальные постоянные –  $c$ ,  $h$ ,  $G$ . Это соответствовало идеям М. Планка (1899, 1906) и А. Эддингтона (1918), о выделении именно этих постоянных как наиболее фундаментальных (Планк к этому набору добавлял еще постоянную Больцмана), однако на своих предшественников авторы не ссылались. Принцип выделения “истинных” констант был основан, во-первых, на общности теорий, с которыми связаны эти постоянные (специальная теория относительности, “волновая механика Шредингера–Гейзенберга” и “общая теория относительности”), и, во-вторых, на существовании предельного перехода этих теорий в классические теории. В частности, они отметили, что обычная механика является тройне предельной по отношению к вышеуказанным трем теориям. Также авторы предположили, что в “законченной физике” останется только несколько “истинных” мировых постоянных, которые будут играть роль не “эмпирических” параметров физической теории, как ныне, а “простых коэффициентов размерности”. С учетом того, что далее они как об “истинных” постоянных говорили о трех постоянных  $c$ ,  $G$  и  $h$ , можно утверждать, что авторы, по сути, впервые сформулировали концепцию единой физической теории именно как  $cGh$ -теории (хотя формально термин “ $cGh$ -теория” у них отсутствовал).

Кроме этого, авторы выдвинули аргументы против развиваемой А. Эйнштейном и др. программы единой теории поля как  $cG$ -теории: из анализа размерностей они показали, что теория электрона с конечным зарядом и массой может быть построена только в единой  $cGh$ -теории, но не в “неполной системе теоретической физики, когда некоторые постоянные положены равными нулю”.

В статье Гамова–Иваненко–Ландау также представлена историко-научная концепция формирования современной физики как системы физических теорий с мировыми постоянными. Суть ее в том, что переход от физической теории без мировых постоянных к теории с мировой постоянной происходит через формирование промежуточной “вульгарной” теории (теория атома Бора, ряд дорелятивистских электродинамических теорий и т.п.).

Г.Е. Горелик, отмечая соответствие идей, изложенных в этой статье, и последующих моделей Бронштейна и Зельманова, предположил, что не М.П. Бронштейн развивал идеи Гамова–Иваненко–Ландау, а, наоборот, что именно Бронштейну принадлежала основная идея, которая, возможно, обсуждалась совместно в кругу друзей, была “коллективизирована” и воплотилась в совместную статью этих авторов. На это, по его мнению, указывает, во-первых, то, что  $cGh$ -подход впоследствии никак не проявлялся ни в творчестве Л.Д. Ландау, ни Д.Д. Иваненко, ни Г. Гамова, а, во-вторых, то, что М.П. Бронштейн

использовал “ключевые слова”, характеризуя фундаментальные постоянные как “границы применимости теории”, еще в первой своей статье 1925 г. “Об одном следствии гипотезы световых квантов” (*Бронштейн*, 1925). Действительно, идея единой  $cGh$ -теории практически не проявилась в последующих работах этих авторов. Г. Гамов оказался первым (и пока единственным) ученым, который включил еще в 1939 г. все эти три постоянные  $c$ ,  $h$  и  $G$  в название своей книги (*Гамов*, 1939). Однако в ней Г. Гамов обсуждал  $c$ -теорию,  $h$ -теорию и  $G$ -теорию по отдельности, а объединение  $c$ ,  $G$  и  $h$  произошло только в инициалах мистера Томпкинса (при этом символы постоянных превратились из строчных в прописные). В 1960-е годы Г. Гамов полагал фундаментальным масштаб, связанный с сильным взаимодействием, а не с гравитационным (*Гамов*, 1968). Среди работ Л.Д. Ландау можно указать на статью, написанную в 1954 г. вместе с А.А. Абрикосовым и И.М. Халатниковым, в которой была выяснена роль масштаба энергии  $\frac{e}{\sqrt{G}} c^2 = 10^{27}$  эВ (масштаб, ранее введенный Дж. Стони) как гравитационной границы применимости квантовой электродинамики (КЭД) <sup>1)</sup>. Д.Д. Иваненко лишь в воспоминаниях вновь обратился к совместной статье Гамова–Иваненко–Ландау, и, хотя высоко оценил ее, авторство идей никак не обсуждал.

В то же время эта статья — явная предшественница докладов и статей М.П. Бронштейна 1932–1935 гг., хотя сам Бронштейн формально никак не ссылался на эту статью. Лишь в первой публикации своей модели взаимоотношения физических теорий Бронштейн счел нужным высказать признательность Л.Д. Ландау, которому он был “благодарен за то, что целый ряд идей, легших в основание настоящей статьи, почерпнул из бесед с ним” (*Бронштейн*, 1933, с. 23). Не ясно, имел ли в виду Бронштейн именно  $cGh$ -подход или какие-либо другие идеи, также обсуждавшиеся им в статье. Не исключено, что именно Л.Д. Ландау обратил внимание М.П. Бронштейна на идеи, изложенные в статье Гамова–Иваненко–Ландау, в частности, на идею единой  $cGh$ -теории и предельный переход между физическими теориями. Однако почему тогда у Бронштейна фигурировал не сам куб теорий, а лишь его плоскостная развертка?

**3.3.4. Модель Бронштейна: плоскостная развертка куба теорий.** М.П. Бронштейн — выдающийся отечественный физик-теоретик и популяризатор науки, был репрессирован в 1938 г., и поэтому исследование его научного творчества было длительное время затруднено. Лишь на закате советского режима удалось переопубликовать его научно-популярные книги и в 1990 г. Г.Е. Горелику и В.Я. Френкелю

<sup>1)</sup> Ландау, Абрикосов, Халатников, 1954, с. 1180; Ландау, 1969, т. 2, с. 210.

издать научно-биографическую книгу о нем. Из архивных данных известно, что М.П. Бронштейн представил свой взгляд на взаимоотношение физических теорий и роль универсальных постоянных 26 февраля 1932 г. при обсуждении доклада Я.И. Френкеля “О кризисе современной физики” в ЛФТИ (Френкель, 1932; см.: Горелик, Френкель, 1990, с. 147). Причиной кризиса, по мнению Я.И. Френкеля, было развитие таких несовместимых теорий как квантовая механика и общая теория относительности. Постепенное объединение созданных теорий решит эту проблему, как считал Бронштейн. Созданные теории — это лишь предельные случаи единой теории. В дискуссиях по докладу Френкеля приняли участие также И.Е. Тамм, Вс.К. Фредерикс, А.С. Давыдов и др. К сожалению, в Архиве РАН имеется лишь неправленная стенограмма с текстуальными пропусками, также в ней отсутствуют и схемы, нарисованные Бронштейном и Давыдовым (судя по тексту это была та же схема Бронштейна, но несколько модифицированная)<sup>1)</sup>. В дальнейшем Бронштейн зафиксировал свое представление об эволюции физики в публикациях 1933-35 годов: в статье “К вопросу о возможной теории мира как целого”, в сборнике “Основные проблемы космической физики” вместе с переводами статей Дж.Джинса и др. астрофизиков и в своей книге “Строение вещества” (Бронштейн, 1933, 1934, 1935). Первые две статьи и соответствующая им часть книги Бронштейна фактически идентичны, за исключением обозначений. Название параграфа “Отношение физических теорий друг к другу и к космологической теории” в статьях и книге Бронштейна созвучно названию статьи М. Планка (Планк, 1914). Взаимоотношение физических теорий Бронштейн представил в виде двух графических схем (рис. 3.3.2. и 3.3.3.):

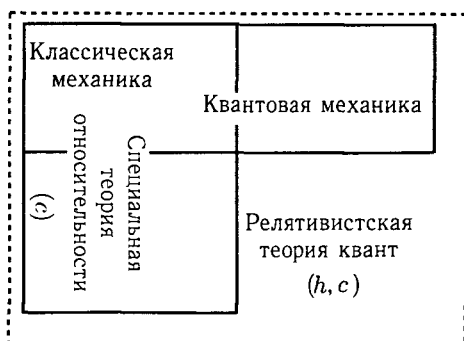


Рис. 3.3.2. Схема М.П. Бронштейна развития механики в ходе квантово-релятивистской революции

<sup>1)</sup>Текст дискуссии мной перепечатан и подключен к сайту ИИЕТ РАН: <http://www.ihst.ru/projects/physics/history/>.



Рис. 3.3.3. Схема М.П. Бронштейна взаимоотношения физических теорий

Вторая схема представляла собой обобщение первой схемы.

Бронштейн обозначил пунктиром еще не созданные к тому времени теории — релятивистскую квантовую теорию (хотя основные уравнения этой теории уже были открыты к этому времени, она из-за ряда проблем рассматривалась как незавершенная), теорию, объединяющую квантовую теорию, теорию электромагнитного поля и теорию тяготения (“единая теория поля”), а также космологическую теорию. Бронштейн подчеркнул полноту своей схемы: “В эту схему входят все вопросы, имеющие физический смысл, которые могут быть сформулированы в настоящее время, и возможно даже, что в нее входят все вообще имеющие физический смысл вопросы” (Бронштейн, 1934, с. 210).

Хотя Бронштейн формально не включил фундаментальные постоянные во вторую схему, в самом тексте он ясно указал, что релятивистская квантовая теория связана с постоянными  $c$  и  $h$ , теория тяготения — с  $G$  (гравитационной постоянной; во всех трех текстах он обозначал ее по-разному:  $\kappa$ ,  $g$ ,  $G$ ). После создания релятивистской квантовой теории, должна быть решена проблема “слияния квантовой теории с ее постоянной  $h$ , специальной теории относительности с ее постоянной  $c$  и теории тяготения с ее  $G$  в одно единое целое”. Далее Бронштейн подчеркнул, что программа Эйнштейна создания “единой теории поля”, объединяющей только общую теорию относительности и электродинамику, “не имеет физического смысла” и лишь вместе с квантовой теорией может быть достигнута “более интимная связь между тяготением и электромагнетизмом”. Аналогичный “выпад” против эйнштейновской программы был сделан ранее Гамовым, Ландау и Иваненко в своей статье.

Кратко схему Бронштейна можно изобразить так:

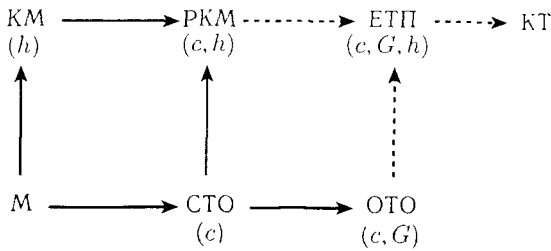


Рис. 3.3.4. Взаимоотношение физических теорий по М. П. Бронштейну

Таким образом, схема Бронштейна не только отражала взаимоотношение четырех созданных к этому времени физических теорий, но и предсказывала еще три физические теории, одна из которых —  $cGh$ -теория. Схема Бронштейна фактически является разверткой куба физических теорий, словесно представленного Гамовым, Иваненко и Ландау, и графически в 1950-е гг. — А.Л. Зельмановым, за исключением того, что в схеме Бронштейна не фигурировала ньютоновская теория тяготения.

**3.3.5. “Логическая структура” физики Паули.** В. Паули изложил свои представления о взаимоотношении физических теорий и роли универсальных постоянных в докладе “Пространство, время и причинность в современной физике” на заседании Философского общества в Цюрихе в ноябре 1934 г. В 1936 г. расширенный вариант доклада был напечатан в миланском журнале “Scientia” (Паули, 1934/36).

Во введении В. Паули выделил различные физические теории по их отношению к универсальным постоянным и к понятиям пространства, времени и причинности: “Анализируя роль, которую играют в структуре физики три естественные универсальные постоянные:  $c$  — скорость света в пустоте,  $\kappa$  — гравитационная постоянная (эйнштейновская гравитационная постоянная  $\kappa = 8\pi G/c^4$  — К.Т.), квант действия Планка  $h$ , можно выделить среди законов природы некоторые замкнутые группы. При определенных допущениях это разбиение правомерно. Такова область классической физики, в которой пространству и времени можно приписывать независимый смысл и где все подчиняется принципу причинности в его классическом понимании; область специальной теории относительности, в которой пространство и время рассматриваются как единый континуум; область общей теории относительности, в котором геометрические свойства пространственно-временного континуума зависят от материи; наконец, область квантовой механики, в которой перестает быть справедливой классическая причинность, а ее место занимает квантово-механическая дополнительность” (там же, с. 7). В. Паули подчеркнул “историческую непрерывность развития



физики, находящую свое выражение и в ее логической структуре”. “Оказывается, — писал В. Паули, — в физике более поздние этапы ее развития вовсе не сводят к нулю значение более ранних стадий, а лишь указывают границы применимости этих более ранних стадий, включая их как предельные случаи в более широкую систему новой физики. Так возникают различные области, между которыми устанавливаются разнообразные логические связи. Каждая из таких областей несет в себе свои собственные априорные предположения и полна в том смысле, что к системе законов природы соответствующей области нельзя добавить ни одного нового, не изменив, хотя бы частично, ее содержания” (там же, с. 8). “Существование различных логических областей, — подчеркнул Паули, — связано с существованием некоторых *естественных постоянных*, точное численное значение которых может быть получено путем измерений” (там же, с. 9).

В. Паули обсуждал в тексте статьи пять различных “логических областей”. Три из них он характеризовал как “классические”: 1) механика Ньютона–Галилея, термодинамика, классическая статистическая механика ( $c = \infty$ ,  $\kappa = 0$ ,  $h = 0$ ); 2) электродинамика Максвелла–Лоренца, оптика, специальная теория относительности ( $c$  – конечно,  $\kappa = 0$ ,  $h = 0$ ); 3) релятивистская теория гравитации ( $c$  – конечно,  $\kappa$  – конечна,  $h = 0$ ). Взаимоотношение этих трех логических областей Паули отразил в таблице (см. табл. 3.3.5). Две другие области, места которым в таблице не нашлось (так как пришлось бы выйти за пределы плоскости), связаны с развитием квантовой теории: 4) квантовая механика ( $c = \infty$ ,  $\kappa = 0$ ;  $h$  – конечно); 5) “более общая область” (т. е. релятивистская квантовая теория) ( $c$  – конечно,  $\kappa = 0$ ,  $h$  – конечно). Отметим, что ныне обычно под специальной теорией относительности подразумевают релятивистскую механику и классическую электродинамику, так как они основаны на одной группе преобразований.

В. Паули не привел общей графической схемы для взаимоотношения своих пяти областей. Но его модель развития основных физических теорий можно представить графически (рис. 3.3.4).

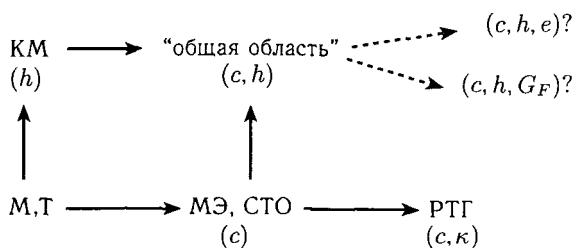


Рис. 3.3.4. Взаимоотношение физических теорий по В. Паули

Таблица 3.3.5. “Логические области” классической механики В. Паули

Область I	Область II	Область III
Приближение. $c = \infty$ $\kappa = 0$ $\hbar = 0$	$c$ — конечно. Приближение: $\kappa = 0$ $\hbar = 0$	$c$ — конечно, $\kappa$ — конечна. Приближение. $\hbar = 0$
Механика Галилея–Ньютона. Термодинамика и классическая статистическая механика.	Электродинамика Максвелла–Лоренца и оптика. Специальная теория относительности	Релятивистская теория гравитации
Объективный смысл имеет время, не зависящее от пространства	Физической реальностью обладает лишь четырехмерный пространственно- временной континуум	Геометрические и кинематические свойства пространственно-временного континуума обуславливаются физическими объектами и описываются $g$ -полем, которое определяет и гравитационные взаимодействия Эквивалентность всех систем отсчета
Объективный смысл имеет равномерное и прямолинейное движение. Независимость геометрических и кинематических свойств пространственно-временного континуума от материи (физических объектов)		
Объективный смысл имеет совпадение во времени и в пространстве точно определенных физических объектов Причинность в смысле однозначной детерминированности результатов измерения в произвольный момент времени переменных, дающих полное описание физического состояния, если их начальные значения в принципе могут быть измерены Независимость закономерностей протекания физических явлений от характера наблюдения, однозначный объективный характер этих закономерностей.		

Нетрудно увидеть в этой структуре схему, аналогичную схеме М.П. Бронштейна. Единственное отличие — М.П. Бронштейн продолжил схему в будущее, добавив еще одну “область”, которая должна объединить две такие различные теории, как РТГ (ОТО) и РКТ, а также космологическую теорию, которая будет вытекать из объединенной теории.

Однако В Паули, в отличие от М.П. Бронштейна, не стремился замкнуть физику именно на  $cG\hbar$ -теории. Напротив, он полагал возможным дальнейшее развитие теории аналогичным образом за счет включения еще по крайней мере *двух естественных постоянных*. Первая из них — элементарный заряд. “Эта природная константа еще не нашла своего места среди констант  $c$ ,  $\hbar$  и  $\kappa$ ”, — подчеркнул Паули.

Вторая — константа, характеризующая открытое незадолго до этого слабое взаимодействие (т.е. постоянная Ферми  $G_F$ , характеризующая “силу” слабого взаимодействия). Таким образом, схемы Паули и Бронштейна отличаются по исследовательским программам, которые в них заложены — схема Бронштейна (а до него — Гамова, Иваненко и Ландау) просто замыкает физику на  $cGh$ -теории, в то время как схема Паули предполагает развитие различных теорий взаимодействий.

Паули не ссылаясь на предложенные другими учеными модели эволюции физики. Однако влияние статьи Планка (*Планк, 1914*) очевидно — и в самой идее о роли универсальных постоянных во взаимоотношении между теориями, и в терминологии (“естественные постоянные”). По сравнению со статьей Планка В. Паули учел новые физические теории 1920-1930-х гг. — квантовую механику, релятивистскую квантовую теорию, а также предполагал возможность включения в схему теории слабого взаимодействия.

**3.3.6. “Куб физических теорий” становится наглядным (Зельманов).** 27 января 1955 г. известный советский космолог А.Л. Зельманов на заседании астрономической секции 2-го съезда Всесоюзного астрономо-геодезического общества сделал доклад, посвященный критике экстраполяции локальных свойств наблюдаемой части Вселенной на Вселенную в целом. Сборник докладов был опубликован только в 1960 г. и в публикации Зельманов снабдил свой доклад дополнением, в котором “содержатся уточнения, необходимость которых стала ясна автору лишь спустя значительное время после съезда”. Именно в этом дополнении Зельмановым была описана модель куба физических теорий, идентичная предложенной ранее Гамовым, Иваненко и Ландау. Основные уточнения были направлены на пояснение терминов, использованных Зельмановым в докладе 1955 г. Разъясняя термин “основные физические теории”, Зельманов пояснил, что это “такие теории, содержанием которых являются основные законы физики”: ньютонова механика (НМ), ньютонова теория тяготения (НТТ), специальная теория относительности (СТО), нерелятивистская квантовая механика (НКМ); общая теория относительности (ОТО), релятивистская квантовая механика (РКМ). Зельманов указал, какие мировые постоянные фигурируют в этих теориях и отметил, что “ни одна из перечисленных шести теорий не является общей из всех”. Поэтому должна быть создана “единая физическая теория (ЕФТ)”, чьи “основные уравнения должны содержать три мировые постоянные — постоянную тяготения, фундаментальную скорость и планковскую постоянную”. Далее Зельманов отметил: “С одной стороны, ЕФТ должна явиться обобщением ОТО на область квантовых явлений. С другой стороны, ЕФТ должна представить собой обобщение РКМ на область гравитационных явлений. ЕФТ должна содержать в себе единую теорию всех полей и частиц (включая гравитоны, если они существуют). При этом должен быть получен вывод элементарной

длины из трех основных мировых постоянных” (Зельманов, 1955/60, с. 84). Под элементарной длиной, как и многие физики того времени, Зельманов понимал характерный масштаб теории элементарных частиц: “В РКМ, по-видимому, должна быть включена и еще не построенная общая теория элементарных частиц, не содержащая теории гравитонов. Такая теория элементарных частиц, по-видимому, будет содержать в своих уравнениях еще одну фундаментальную постоянную — элементарную длину. Но последнюю нельзя считать независимой мировой постоянной, так как принципиально мыслим ее вывод из трех упоминавшихся выше мировых постоянных (постоянная тяготения, фундаментальная скорость и планковская постоянная), который, однако, не может быть достигнут в РКМ, поскольку она не охватывает гравитационных явлений и не содержит в своих уравнениях постоянной тяготения” (там же).

По воспоминаниям Ю.С. Владимирова, Зельманов неоднократно излагал модель куба физических теорий в своих лекциях в МГУ в конце 1950-х годов. В 1960-е годы он еще несколько раз ее публиковал

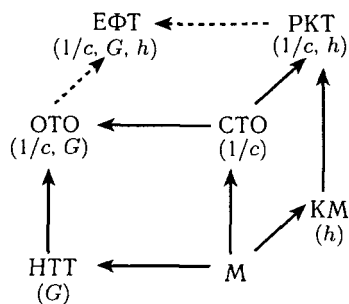


Рис. 3.3.5. Куб физических теорий

(Зельманов, 1964, 1966/70, 1967, 1969), уже сопровождаемая трехмерным графическим изображением (рис. 3.3.5).

Модель “куба физических теорий” получила широкое распространение во второй половине XX века и стала ассоциироваться только с А.Л. Зельмановым, первым опубликовавшим ее в виде рисунка, хотя идейно она полностью соответствовала модели Гамова, Иваненко и Ландау, и являлась пространственным обобщением модели Бронштейна.

Вершины куба в модели Зельманова составляли “основные физические теории, т. е. теории, содержанием которых являются основные законы и представления теоретической физики”. Зельманов выделил семь “основных физических теорий”, добавив к схеме М.П. Бронштейна ньютоновскую теорию тяготения, как  $G$ -теорию: “Ньютонова механика (НМ); ньютонова теория тяготения (НТТ), представляющая собой

расширение основных представлений НМ на область гравитационных явлений; специальная теория относительности (СТО), представляющая собой результат перестройки основных представлений НМ, необходимой, прежде всего, в области больших скоростей; нерелятивистская квантовая механика (КМ), представляющая собой результат перестройки основных представлений НМ, необходимой в области явлений микромира; общая теория относительности (ОТО), иначе говоря, эйнштейнова теория тяготения, представляющая собой обобщение СТО на область гравитационных явлений и вместе с тем обобщение НТТ на область больших скоростей и сильных полей тяготения; релятивистская квантовая теория (РКТ), представляющая собой обобщение СТО на область микромира и вместе с тем обобщение КМ на область больших скоростей и высоких кинетических энергий. Среди существующих основных физических теорий отсутствует теория, которая была бы наиболее общей из всех. Она должна была бы явиться либо синтезом ОТО и РКТ, либо заменой такого синтеза, показывающей его принципиальную невозможность. Такую еще не построенную теорию мы условно называем единой физической теорией (ЕФТ)” (Зельманов, 1967, с. 322).

“Соотношение перечисленных семи теорий можно представить следующей схемой... (см. выше рис. 3.3.5 — *К.Т.*), — на которой стрелки направлены от теорий менее общих к теориям более общим. На схеме указаны три мировые постоянные, входящие в основные уравнения и другие формулы соответствующих теорий: гравитационная постоянная (НТТ, ОТО, ЕФТ), обратная величина фундаментальной скорости света  $1/c$  (СТО, ОТО, РКТ, ЕФТ) и планковская постоянная (КМ, РКТ, ЕФТ)” (там же, с. 323).

Отметим, что на рисунке Зельманова отсутствовала восьмая вершина куба, которая была введена позже последователями его идей для полноты этой модели и которая характеризует некую гипотетическую теорию, нерелятивистскую квантовую теорию тяготения. А.Л. Зельманов обосновывал причину ее отсутствия принципиальной невозможностью ее построения: “Легко заметить, что наш перечень не включает теорию, основные уравнения которой должны содержать две постоянные —  $\gamma$  и  $h$ . Эта теория может быть лишь нерелятивистской квантовой теорией тяготения. Но так как гравитационные кванты — гравитоны — должны перемещаться подобно фотонам с фундаментальной скоростью, то квантовая теория тяготения, как и квантовая теория электромагнитного поля, неизбежно должна быть релятивистской. Следовательно, нерелятивистская квантовая теория тяготения должна свестись к неквантовой нерелятивистской теории (т.е. к ньютоновой теории тяготения) и, таким образом, не может существовать как самостоятельная теория” (Зельманов, 1964, с. 238). Сейчас, напротив, построение такой теории считается теоретически возможным. Например, Л.Б.Окунь отмечал, что такого рода теория должна описывать взаимодействие гипотетических частиц с массой

$10^{-2}-10^{-1}m_{пл}$ , приводящее к образованию атомоподобных структур (Окунь, 1991, с. 190).

В работах Г.Е. Горелика (Горелик, 1982; 1983; 1988) (по-видимому, он был первым, кто опубликовал “восьмивершинную” модель), Л.Б. Окуня (Окунь, 1991), а также в книге В.Г. Агакова и А.Л. Зельманова (Зельманов, Агаков, 1989) анализируется

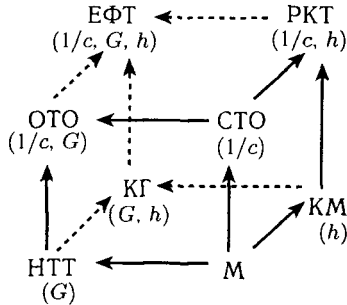


Рис 3.3.6. Куб физических теорий (современный вид)

восьмивершинный куб, который ныне и называется “кубом физических теорий” или “кубом Зельманова” (рис. 3.3.6).

Достоинство модели “куб теорий” — в наглядном воплощении концепции геометризации физики на основе взаимоотношения основных физических теорий XX в. В.П. Визгин рассматривает “куб физических теорий” как куб фундаментальных кинематических теорий. Следует отметить, что это всего лишь модель, и ее не следует, как и любую модель, переоценивать, отождествляя с самой физической реальностью. Любая модель отражает лишь часть реальности и всегда существует область, в которой модель перестает работать. Особенностью (возможно, недостатком) модели Зельманова является отсутствие в ней трех теорий взаимодействия — электромагнитного, слабого и сильного, под знаком объединения которых проходило развитие физики второй половины XX в., а также термодинамики. С другой стороны, гравитационное взаимодействие, действительно, является выделенным по сравнению с другими взаимодействиями, по крайней мере только его удалось представить как изменение геометрии пространства-времени. Это подчеркивал и сам Зельманов: “Схема с тремя константами не раскрывает всех типов взаимодействия, известных уже в настоящее время. Очевидно, что из всех видов взаимодействия наша схема выделяет тяготение. <...> Выделение гравитационного взаимодействия коренится в его универсальном характере и в указанном резком отличии от всех других видов взаимодействия” (Зельманов, 1964, с. 241). В силу этого развитие физики конца XX в., шедшее по пути объединения различных теорий взаимодействия, никак не могло быть отражено этой схемой.

Ю.С. Владимиров в связи с этим отмечал, что наглядный учет этого “потребовал бы перехода от куба в трех измерениях к гиперкубу в пространстве большего числа измерений (с учетом количества констант, характеризующих электрослабые и сильные взаимодействия), или, иначе, — на горизонтальной оси  $G$  следовало бы изобразить сразу все константы, характеризующие четыре физических взаимодействия” (Владимиров, 2002, с. 201).

А.Л. Зельманов также отметил еще один факт “неполноты” “схемы с тремя константами”: “Качественно различные закономерности существенны для объектов и систем различных типов, даже если к ним применимы одни и те же основные физические теории. Например, существенно различаются закономерности поведения систем, состоящих из небольшого и очень большого числа частиц. В этом последнем случае проявляются, в частности, специфические закономерности, изучаемые статистической физикой и термодинамикой” (там же, с. 240–241).

В 2001 г. в докладе при получении медали М. Планка Й. Фрелихом была представлена модель “гиперкуба физических теорий”, в которой наряду с тремя постоянными  $c$ ,  $G$ ,  $\hbar$  фигурирует и постоянная Больцмана  $k$  (Fröhlich, 2001). Такая модель, к сожалению, уже уступает в наглядности кубу теорий. Также она вызвала возражения по поводу рассмотрения постоянной Больцмана  $k$  как фундаментальной (Okun, 2001, p. 5; Окунь, 2002, с. 1404).

С другой стороны, включение в модель куба  $G$  как фундаментальной постоянной также не может не вызывать сомнений. Во-первых, сомнение вызывает даже рассмотрение ньютоновской теории тяготения как  $G$ -теории (т.е. теории, в которой  $G$  играет фундаментальную роль). Совершенно очевидно, что гравитационная постоянная  $G$  играет в классической теории тяготения совершенно другую роль, чем постоянные  $\hbar$  и  $c$ , соответственно, в квантовой механике и теории относительности. Об этом же свидетельствует и историческое развитие этой теории: если создание специальной теории относительности и квантовой механики прямо связано с осознанием фундаментальной роли постоянных  $c$  и  $\hbar$ , то исторически формирование классической теории тяготения, прошло формально без гравитационной постоянной, появившейся лишь в начале XIX в. (см. гл. 2.1). Кроме того, если в ходе квантово-релятивистской революции новые понятия и величины вводились взамен прежних, то, как заметил сам Зельманов, “при переходе от ньютоновой механики к ньютоновой теории тяготения новые представления, понятия и величины вводятся лишь в дополнение к прежним” (Зельманов, 1964, с. 239), т.е. ньютоновская теория тяготения является дополняющей, а не обобщающей теорией по отношению к ньютоновской механике.

Постоянные  $c$  и  $\hbar$  являются фундаментальными мерами соответственно скорости  $v$  и действия  $S$ , и именно по отношениям  $v/c$  и  $S/\hbar$  и осуществляется предельный переход к классическим теориям. Физический смысл гравитационной постоянной заключается в том,

что  $G$  является размерной константой связи гравитационного взаимодействия, т. е. характеризует силу гравитационного взаимодействия. В отличие от постоянных  $c$ ,  $\hbar$  и  $k$ , постоянной  $G$  нельзя сопоставить физическую величину той же размерности (постоянной Больцмана по размерности соответствуют энтропия и теплоемкость). Поэтому предельный переход по гравитационной постоянной фактически невозможен ( $G$  просто полагают равной нулю, т. е. “выключают” тяготение) (см. п. 2.1.9).

Таким образом, модель Зельманова построена на рассмотрении как фундаментального гравитационного взаимодействия и отражает исследовательскую программу построения единой теории как  $cG\hbar$ - или  $chl_{пл}$ -теории.

В 1970–1990-е гг. модель Зельманова (дополненная до полноценного восьмивершинного куба) приобрела большую популярность. Ее активно пропагандировали Г.Е. Горелик, Л.Б. Окунь и др. Г.Е. Горелик несколько раз излагал идею “куба физических теорий”: в книгах “Почему пространство трехмерно?” (Горелик, 1982), “Размерность пространства” (Горелик, 1983), в книге о М.П. Бронштейне (совместно с В.Я. Френкелем) (Горелик, Френкель, 1990), в статьях (Горелик, 1978/79, 1980/81, 1988). Интересно, что обложка номера журнала “Знание–сила” № 2 1988 г. со статьей Г.Е. Горелика “ $c \times G \times \hbar = ?$ ” была оригинально оформлена в духе “куба теорий”: “куб теорий” был вынесен на двустороннюю обложку, причем при закрытой обложке была видна только одна вершина куба (ньютоновская механика), а при раскрытии части обложки появлялись все более глубокие теории в виде вершин куба (Горелик, 1988).

В 1989 г. Л.Д. Фаддеевым на международной конференции в Италии и в статье в “Природе” была выдвинута концепция эволюции физических теорий как математической теории деформации алгебраических структур (Фаддеев, 1989). Его концепция, также основанная на  $cG\hbar$ -подходе, заключалась в том, что развитие физики с математической точки зрения заключается в переходе ко все более и более устойчивой структуре с фундаментальными постоянными  $c$ ,  $G$  и  $\hbar$ , однако детальной разработки своей концепции он, к сожалению, не представил.

Л.Б. Окунь охарактеризовал “куб теорий” как “консенсусную” модель развития физики — в мае 1991 г. на Первой Сахаровской конференции (см. Окунь, 1991) и в июле 1991 г. в лекции на Международной школе по субъядерной физике в Центре научной культуры им. Э. Майорана в Эриче (Италия). Школа была посвящена теме “Физика при наивысших энергиях: к пониманию происхождения массы”, а лекция Л.Б. Окуня “Проблема массы: от Галилея до Хиггса” открывала эту школу (Окунь, 1993). В этой лекции для описания развития теоретической физики Л.Б. Окунь, по образному выражению Г.Е. Горелика, “использовал  $cG\hbar$ -объектив” (Горелик, 1996).



**3.3.7. Модель Штрауса.** В докладе на конференции “Диалектика и современное естествознание” (Москва, 26–29 октября 1966 г.) немецким историком и философом физики М. Штраусом была предложена еще одна модель, которая более близка к реальному состоянию современной физики, “расколотому” на два направления (ОТО и КТП), развитых на основе разных парадигмальных установок (Strauss, 1967; 1972; Штраус, 1966/70). М. Штраус, так же как М.П. Бронштейн и В. Паули, выделил пять уже разработанных физических теорий: классическая теория (без констант),  $h$ -теория (нерелятивистская квантовая механика),  $c$ -теория (специальная теория относительности),  $hc$ -теория (квантовая теория поля),  $hc\kappa$ -теория (эйнштейновская теория гравитации),  $\kappa$  — эйнштейновская гравитационная постоянная). Подход Штрауса фактически объединяет идеи, заложенные в модели “куб физических теорий” ( $cGh$ -подход) и В. Паули (включение теорий взаимодействий). Прежде всего он считает, что дальнейшее развитие ОТО и КТП пойдет по пути учета двух новых фундаментальных физических постоянных — двух разных фундаментальных длин. Дальнейшее развитие КТП будет связано, согласно М. Штраусу, с введением элементарной длины  $l \approx 10^{-13}$  см. Эта теория должна описывать все элементарные частицы и все взаимодействия, за исключением гравитации. Развитие ОТО должно, согласно М. Штраусу, произойти в направлении учета планковской длины  $l_{pl} = \sqrt{\hbar c k} \approx 10^{-33}$  см (т. е. создания теории, в которой планковские масштабы играют фундаментальную роль). Таким образом, М. Штраус фактически обобщает представления о развитии физических теорий, характерные для 50–60-х гг., когда ученые, работавшие в квантовой теории поля полагали необходимым введение в теорию элементарной длины  $10^{-13}$  см (В. Гейзенберг, И.Е. Тамм и др.), а работавшие в теории гравитации — введение планковской длины  $10^{-33}$  см (Дж. Уилер и др.). Это представление Штрауса в точности соответствует и ранним идеям Зельманова (Зельманов, 1955/60). Согласно М. Штраусу, на этом этапе развития физики должны возникнуть две трехконстантные теории —  $hcl$  и  $hck$  (вторая — это  $cGh$ ). Однако, в отличие от Зельманова, который предполагал, что элементарная длина будет выведена из планковской, и Гамова, который пытался сделать обратное, Штраус считал, что эти две теории, содержащие две разные фундаментальные длины, должны объединиться в единую  $hckl$ -теорию (рис. 3.3.7). (У Штрауса стрелка была направлена от ОТО ( $\kappa, c$ ) к ньютоновской теории тяготения ( $\kappa$ ) и от СТО ( $c$ ) к классической механике, характеризуя предельный переход.)

Модель Штрауса, очевидно, точнее описывает реальный путь развития физики, чем модель Зельманова, так как отражает объединение трех негравитационных взаимодействий. Однако непонятно строение единой теории, основанной на существовании *двух* разных фундаментальных длин. По-видимому, лишь одна из них окажется, в конце концов, действительно фундаментальной, а другая — нет. В противном случае существование двух фундаментальных длин будет означать

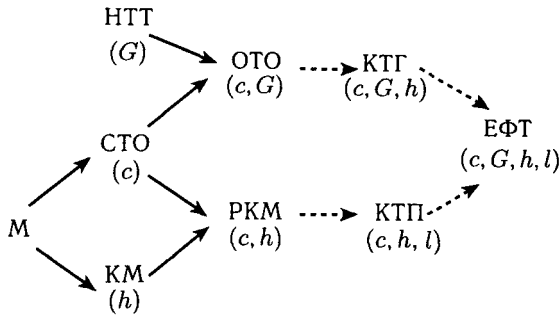


Рис. 3.3.7. Схема М. Штрауса взаимоотношения основных физических теорий

принципиальную разобщенность гравитации и других взаимодействий, т. е. отказ в какой-то мере от единства физического описания природы. Кстати, и Зельманов допускал вероятность такого “сценария”, что видно из его прогноза: единую физическую теорию (ЕФТ) Зельманов видел либо как “синтез ОТО и РКТ”, либо как “замену такого синтеза, показывающую его принципиальную невозможность” (Зельманов, 1967, с. 322). Отметим, что соотношение между этими фундаментальными длинами  $10^{20}$  — одно из так называемых “больших чисел”. Сам М. Штраус отмечал перспективность для решения этой проблемы гипотезы Дирака. Так или иначе единое описание всех взаимодействий неизбежно должно основываться на объяснении больших чисел (см. 4.4).

**3.3.8. “Древо взаимодействий”.** Развитие физики, согласно сложившимся представлениям и накопленному опыту, идет по пути объединения различных теорий. В XX в. по мере развития представлений о строении материи были открыты в добавление к гравитационному (XVII в.) и электромагнитному (XIX в.) еще два взаимодействия — слабое (1930-е гг.) и сильное (1960-е гг.). Основой для объединения теорий взаимодействий является непостоянность констант связи и их постепенное приближение с ростом переданного импульса к некоему общему значению. Считается, что при больших импульсах (малых расстояниях) взаимодействие является единым и характеризуется одной константой связи. При уменьшении импульса (увеличении расстояния) появляется “спектр” взаимодействий: взаимодействия “расходятся” со своими константами связи. При этом гравитационное взаимодействие рассматривается как базовое с неизменной константой связи, что основано на экстраполяции результатов экспериментов в макрофизике в область микромира. Объединение взаимодействий описывается ныне в виде “древа взаимодействий” (см. рис. 3.3.8; ГВС — теория Глэшоу–Вайнберга–Салама; ТВО — теория великого объединения (GUT);

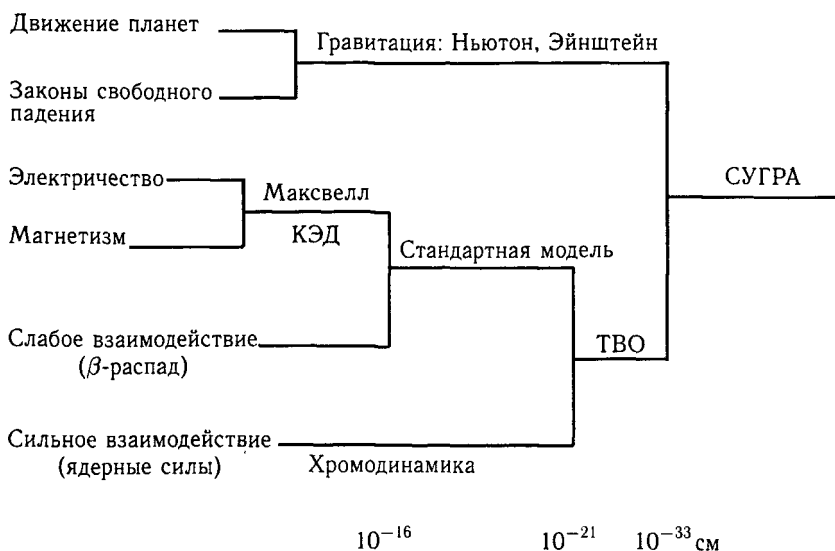


Рис. 3.3.8. Схема объединения фундаментальных взаимодействий (Wess, 1987, S. 4)

СУГРА — супергравитация)<sup>1)</sup>. Схема Л. Ледермана отличалась от схемы Ю. Весса добавлением “ядерных сил” как общего “корня” слабого и сильного взаимодействий и оптики как третьего корня максвелловской электродинамики.

**3.3.9. Модель истории физики первой трети XX в. как развитие глобальных исследовательских программ.** Схемы развития физики, предлагавшиеся Планком, Бронштейном, Паули, Зельмановым и др., основаны на анализе взаимоотношения между физическими теориями. Действительно, эволюция физики идет в основном как формирование и обобщение различных физических теорий. В то же время рассмотрение только уже развитых и признанных теорий не охватывает всей истории физики. Реальная история физики значительно шире конкретных результатов в виде получивших признание теорий. Весьма продуктивным для истории физики является описание эволюции физики как процесса формирования и развития научно-исследовательских программ. Концепция научно-исследовательских программ была выдвинута И. Лакатосом и обоснована на примерах из истории физики (Лакатос, 1970). Не ясно, насколько этот подход является универсальным по отношению ко всем наукам, но в истории физики он показал свою продуктивность. Тем не менее, общей модели эволюции физики

<sup>1)</sup> Lederman, 1986, p. 599; Wess, 1987, S. 4; Гротц, Кландор-Клайнгротхаус, 1990, с. 24.

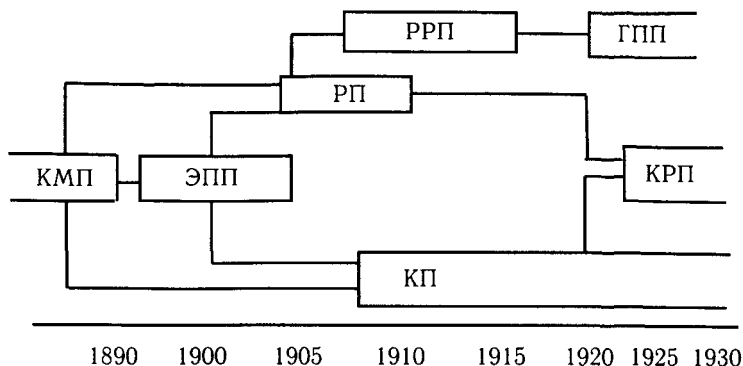


Рис. 3.3.9. Схема В.П. Визгина взаимоотношения глобальных исследовательских программ в первой трети XX в.

как развития исследовательских программ в XVII–XX вв. пока в научной литературе не представлено. Часть такого рода модели — модель “динамики взаимодействия глобальных исследовательских программ” в физике в 1890–1930 гг., т. е. в период квантово-релятивистской революции, была представлена В.П. Визгиным (Визгин, 1997, с. 9). В.П. Визгин выделил семь глобальных исследовательских программ первой трети XX в. и представил графически их взаимодействие с учетом времени возникновения каждой программы (рис. 3.3.9).

Характерно, что эти глобальные исследовательские программы определенным образом отличаются по отношению к фундаментальным физическим постоянным. Так, классико-механическая программа (КМП) строилась без фундаментальных постоянных; релятивистская программа (РП) основана на постулате фундаментальности скорости света в вакууме  $c$ ; квантовая программа (КП) — на принятии фундаментального статуса постоянной Планка  $h$ ; квантово-релятивистская программа (КРП) — на принятии фундаментального статуса постоянных  $c$  и  $h$ ; расширенная релятивистская программа (РРП), включавшая описание тяготения — на принятии фундаментальными постоянных  $c$  и  $G$ . ЭПП (электромагнитно-полевая программа, сформировавшаяся на основе максвелловской электродинамики и теории электронов Лоренца) опиралась на фундаментальность скорости света  $c$  и элементарного заряда  $e$ . Провал этой программы был связан с неудачей включения квантования заряда  $e$  в максвелловскую электродинамику и ошибочной гипотезой о редукции квантовых явлений к электромагнитным (т. е. с неудачей редукции постоянной Планка  $h$  к соотношению  $e^2/c$ ). ГПП (геометрическая полевая программа), ставившая целью единое геометрическое описание всех тогда известных двух взаимодействий, опирались соответственно на фундаментальность постоянных  $c$ ,  $G$  и  $e$ . Неслучайно именно в рамках этого направления на арене физики

вновь появился масштаб Стони. Неудача этой программы крылась в отсутствии знания в то время о других взаимодействиях, которых, как оказалось впоследствии, нельзя игнорировать при последовательном объединении взаимодействий, в отсутствии знания о “бегущих” константах связи, а также в огромной разнице между силами электромагнитного и гравитационного взаимодействий.

Достоинство модели развития физики как совокупности научно-исследовательских программ заключается также в том, что эта модель позволяет включить в рассмотрение ряд теорий, не получивших признания, но опиравшихся на введение в физику тех или иных новых фундаментальных постоянных (теория Борна–Инфельда, построенная на идее существования абсолютного поля; нелокальные теории поля, построенные на введении некоторой фундаментальной длины, и др.), что является существенным для понимания реальной эволюции физики.

\* \* \*

Таким образом, в течение XX в. был предложен целый ряд моделей эволюции физики, основанных на роли фундаментальных физических постоянных во взаимоотношении физических теорий. Эти модели соответствовали определенным этапам развития физической картины мира в XX в., а также различным исследовательским программам.

Очевидно, наиболее наглядной моделью (платоново тело!) является модель “куб физических теорий”, отражающая программу построения единой  $cGh$ -теории, основанной на фундаментальной роли планковских величин. В то же время эта модель игнорирует развитие квантовой теории поля, достигшей существенного прогресса в 1970–1990-е гг. на пути объединения электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий. Модель М. Штрауса учитывает как  $cGh$ -теорию, так и развитие квантовой теории поля, что точнее отражает эволюцию физики в конце XX в., однако неясны принципы объединения этих двух теорий, построенных на разных фундаментальных масштабах длины.

Теперь на рубеже XX–XXI вв. можно подвести некоторый итог прогнозам развития тех или иных программ. Отметим, что до сих пор ОТО не развита до давно ожидаемого уровня  $cGh$ -теории. Тем не менее, в соответствии с этой исследовательской программой в 1970–1990-е гг. развивались некоторые экзотические частные теории, например квантовая теория черных дыр (Я.Б. Зельдович, С. Хокинг и др.). Прогресс КТП в 1970–1980-е гг. связан с объединением электромагнитного и слабого взаимодействий без введения каких-либо дополнительных фундаментальных масштабов. Лишь развитие квантовой хромодинамики привело к появлению в этой теории фундаментального масштаба энергии  $\Lambda$  — энергии конфайнмента кварков, который однако принимает разные значения для разного числа типов кварков. Если один такой масштаб  $\Lambda_0$  окажется в КХД уникальным для всех диапазонов энергии, то дальнейший прогресс неизбежно будет связан с

объяснением соотношений между тремя масштабами —  $\Lambda_0$ , вакуумным средним  $\eta$  и планковским масштабом  $E_{pl}$ .

Ясно, что в различных предложенных моделях воплотились два взгляда на эволюцию физики. С точки зрения фундаментальных констант как абсолютных масштабов, физические теории постепенно объединяются в единую физическую теорию с полным набором фундаментальных констант, что приводит к моделям типа многомерного гиперкуба. С точки зрения теорий взаимодействий, их объединение, основанное на постепенном объединении с ростом энергии их характерных силовых констант в единую константу единого взаимодействия, приводит к модели типа “древа взаимодействий”. Можно попытаться объединить оба взгляда в виде следующей схемы взаимоотношения основных физических теорий ( $k_g, k_e, k_w, k_s$  — размерные константы связи соответственно гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий, в качестве них принимаем:  $k_g = 4\pi G, k_e = 4\pi\alpha\hbar c/e^2, k_w = \sqrt{2}G_F, k_s = 4\pi\alpha_s\hbar c/g_s^2$ ) (см. рис. 3.3.10).

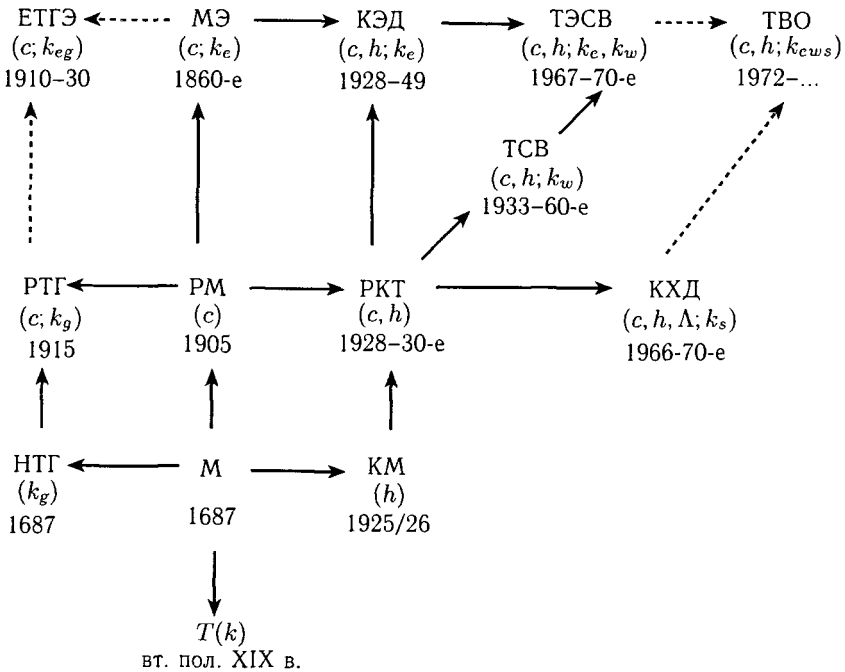


Рис. 3.3.10. Развитие основных физических теорий XVII–XX вв.

На рисунке представлены основные физические теории — классическая механика (М), термодинамика (Т), релятивистская механика (РМ), квантовая механика (КМ), релятивистская квантовая теория (РКТ), теории взаимодействия — ньютоновская теория гравитации (НТТ), максвелловская электродинамика (МЭ), релятивистская теория

гравитации (РТГ/ОТО), теория слабого взаимодействия (ТСВ), квантовая хромодинамика (КХД), квантовая электродинамика (КЭД), теория электрослабого взаимодействия (ТЭСВ). В левом верхнем углу указана также гипотетическая единая теория гравитации и электромагнетизма (“единая теория поля”), различные варианты которой предлагали 1910–30-х гг. Д. Гильберт, Г. Вейль, А. Эйнштейн, А. Эддингтон и др. В скобках рядом с теориями указаны физические постоянные, играющие фундаментальную роль в этих теориях. Точка с запятой отделяет два класса фундаментальных постоянных друг от друга — фундаментальные постоянные, являющиеся абсолютными масштабами Природы, и константы связи, характеризующие “силы” взаимодействий (последние, как известно, являются “плавающими”, т. к. сами зависят от энергии взаимодействия). Стрелка от релятивистской механики (РМ) к максвелловской электродинамике (МЭ) указывает на логическое расширение теории, в то время как исторически развитие шло в обратном направлении. Переход от одной теории к другой связан с введением еще одной новой константы: константы, характеризующей взаимодействие, или константы, являющейся неким абсолютным масштабом. Исключением из этого правила является КХД, в которой появились сразу 2 новые константы по сравнению с другими теориями. Дальнейшее развитие физики ожидается на пути создания квантовой теории поля (КТП), объединяющей ТЭСВ и КХД (теории великого объединения, ТВО). Тогда в физике останутся две глобальные теории — РТГ, описывающая физику макромира, включая Вселенную в целом, и КТП, описывающая физику микромира, включая кварки. После этого прояснится и путь объединения этих двух теорий в единую физическую теорию (ЕФТ); одной из предполагаемых моделей которой является теория супергравитации (СУГРА).

Роль фундаментальных постоянных во взаимоотношении между физическими теориями делает также актуальным как для истории физики, так и для самой физики построение общей модели развития физики XX в. как эволюции глобальных исследовательских программ, особенно, с точки зрения использования в них различных фундаментальных постоянных (элементарной длины, энергии, поля и т. д.).

## Глава 3.4

### От измерения фундаментальных постоянных к квантовой метрологии

**3.4.1. Фундаментальные постоянные как абсолютные меры Природы.** Существование размерных констант класса  $C$  (абсолютных мер, см. Введение) открывает возможность перехода от произвольных мер к абсолютным мерам Природы, т. е. к мерам, имеющим абсолютную собственную точность.

Метрология в своей эволюции прошла несколько основных этапов. Первоначально человек выбирал в качестве мер *параметры своего*

тела. Эти меры были удобны, так как каждый всегда носил свои меры с собой, но их точность была невысока из-за разброса антропометрических параметров. От этого периода до наших дней сохранились названия различных мер таких как “фут”, “дюйм” (“большой палец”, по-голландски), миля (тысяча двойных шагов) и др. Прогресс классической физики в XVII–XIX вв. в значительной степени был обязан переходу от случайных мер к универсальным естественным мерам, таким как параметры земной орбиты, Земли, воды, земной атмосферы. Третий этап связан с открытием на рубеже XIX–XX веков фундаментальных констант как абсолютных мер Природы, т. е. эталонов, имеющих абсолютную собственную точность, и последующим развитием квантовой метрологии в конце XX века. С точки зрения фундаментальных констант развитие метрологии можно описать как переход *от измерения фундаментальных постоянных к измерению фундаментальными постоянными*.

По традиции системы единиц, основанные на фундаментальных постоянных, называются “естественными системами единиц” (“natural systems of units”). Мы используем здесь общепринятую терминологию, хотя она и не точно характеризует суть фундаментальных постоянных как абсолютных мер Природы — параметры Земли, например, тоже являются *естественными* мерами. Более точное название, очевидно, “универсальные”, как предлагал Дж.К. Максвелл, или “фундаментальные системы единиц”, т. к. эти системы основаны на универсальных (фундаментальных) постоянных, или абсолютные, учитывая их абсолютную собственную точность. Ранее история естественных систем единиц рассматривалась в обзоре Е.Ф. Долинского и Б.И. Пилипчука, энциклопедических статьях А.В. Воронеля, К.П. Широкова, Я.А. Смородинского, а также в обзоре автора <sup>1)</sup>.

Измерение — это экспериментальное нахождение соотношения между измеряемой величиной  $X$  и некоторым эталоном  $L$ . В результате измерения мы получаем некую физическую величину  $X = a \times L$ , где  $a$  — численное значение, а  $L$  — выбранная мера (размерность) величины  $X$ ; между численным значением  $a$  и размерностью  $L$  фигурирует знак умножения, который часто опускается. Например, запись значения ускорения свободного падения  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  эквивалентна  $g = 9,81 \times \frac{1 \text{ метр}}{(1 \text{ секунда})^2}$ .

Любое измерение не является точным. Неточность измерения складывается из неточности эталона и неточности процедуры измерения: поскольку величина равна произведению численного значения на ее единицу измерения, то *относительная ошибка, с которой мы измеряем физическую величину  $X$  равна сумме собственной ошибки эталона  $\delta L$  и самой измерительной процедуры  $\delta a$ :  $\delta X = \delta a + \delta L$* .

<sup>1)</sup> Долинский, Пилипчук, 1965; Воронель, 1962; Широков, 1983; Смородинский, 1990; Tomilin, 1999b.



Первоначально человечество использовало эталоны, собственная точность которых была очень невелика. Например, определение единиц измерения через параметры человека из-за антропометрических отличий индивидуумов несло в себе потенциальную ошибку — 15–20% в каждом акте измерения другим человеком ( $\delta L \sim 0,15 \div 0,20$ ). Сглаживание антропометрических отличий путем усреднения (например, определение фута как “средней длины ступней 16 человек, выходящих из храма от заутрени в воскресенье”) увеличило точность эталонов примерно на порядок. Определение эталонов длины как длины секундного маятника, затем — в конце XVIII в. — как определенной части меридиана Земли, и, в конце XIX в. — как длины определенного металлического бруска, хранящегося при определенных условиях, многократно увеличило точность самих эталонов. Современная относительная точность эталонов длины и времени  $10^{-12}$ .

До начала XX в. вопрос об измерении физических постоянных, таких как скорость света  $c$ , гравитационная постоянная  $G$  и др., стоял как один из важных вопросов классической физики, которая, казалось, близка к своему завершению. В 1871 г. Дж.К. Максвелл отмечал: “Повидимому распространилось мнение о том, что через несколько лет все основные физические постоянные будут с достаточной точностью определены и единственным оставшимся для ученых занятием будет достижение при дальнейших измерениях следующих десятичных знаков” (Максвелл, 1968, с. 22).

В результате научной революции рубежа XIX–XX вв. и установления парадигмы фундаментальных констант процесс измерения физических постоянных приобрел совершенно иной смысл. Суть квантово-релятивистской революции можно выразить как открытие существования *абсолютных эталонов*, в качестве которых выступают фундаментальные постоянные. Например, скорость света в вакууме является абсолютным эталоном скорости, а постоянная Планка — действия. Под понятием “абсолютный эталон” понимается то, что этот эталон  $L_0$  имеет *абсолютную собственную точность*  $\delta L_0 = 0$ . Еще до открытия фундаментальных постоянных человек применял абсолютные эталоны, когда измерял множества, которым можно сопоставить натуральный ряд. Например, один человек является абсолютным эталоном для измерения группы людей, а одна овца — для измерения отары овец и т. д. В ходе развития физики были открыты абсолютные эталоны как для дискретных (электрический заряд, момент импульса, спин), так и непрерывных величин (скорость). С точки зрения метрологии можно дать определение фундаментальных физических постоянных, как физических постоянных, имеющих *абсолютную собственную точность*. Очевидно, что ошибка при измерении физической величины  $X$  соответствующим абсолютным эталоном равна только ошибке самой измерительной процедуры  $\delta X = \delta F_0$ , так как собственная ошибка абсолютного эталона  $\delta L_0 = 0$ .

Открытие фундаментальных постоянных как абсолютных эталонов привело к тому, что процесс измерения фундаментальных постоянных оказался процессом измерения абсолютных эталонов ( $\delta L_o = 0$ ) с помощью эталонов, имеющих ограниченную точность ( $\delta L > 0$ ) и неизбежно должен был быть обращен при достижении экспериментальной физикой определенного уровня. Суть квантовой метрологии заключается в переходе к эталонам, имеющим абсолютную собственную точность ( $\delta L_o = 0$ ). Еще с 1870-х гг., ученые начали прямо предлагать системы единиц, основанные на фундаментальных постоянных, т. н. *естественные системы единиц*. Однако немедленный переход к квантовой метрологии в течение последующего столетия был нецелесообразен в связи с тем, что процедура измерения на основе фундаментальных постоянных  $F_o$  вносила погрешности, намного превышающие сумму погрешностей общепринятых в это время эталонов  $L$  и соответствующих процедур измерения  $F$ , т. е.  $\delta X = \delta F_o \gg \delta X = \delta L + \delta F$ .

Развитие теоретической физики взаимосвязано с развитием экспериментальной физики, развитие последней идет по направлению увеличения точности измеряемых физических величин, т. е. направлено к минимизации ошибок  $\min(\delta X) = \min(\delta L + \delta F)$ . Развитие экспериментальной физики в свою очередь взаимосвязано с развитием метрологии, идущей по направлению к увеличению точности эталонов, т. е. по направлению к минимизации  $\min(\delta L)$ . Очевидно, что этот процесс завершится полным переходом к квантовой метрологии, т. е. достижения  $\delta L = 0$ . Открытие во второй половине XX в. ряда макроскопических квантовых эффектов, таких как эффект Джозефсона, квантования магнитного потока, квантового эффекта Холла, привело к тому, что измерительная процедура для некоторых физических величин  $F_o$  на их основе стала более точной, чем на основе обычных практических эталонов, т. е.  $\delta X = \delta F_o < \delta X = \delta L + \delta F$ . Это обусловило стремительный прогресс квантовой метрологии и постепенный переход от эталонов, имеющих относительную точность, к фундаментальным постоянным как эталонам, имеющим точность абсолютную.

Чтобы смысл опытов по “измерению фундаментальных постоянных” стал ясен, рассмотрим одну из естественных систем единиц, например, систему Планка ( $c, G, \hbar, k$ ). Есть ли в этой системе единиц проблема “измерения” скорости света? Очевидно, что нет. Скорость света сама выступает в качестве единицы скорости и никакой проблемы ее “измерения” не существует. Очевидно также, что есть другая проблема — определение соотношения между скоростью света и некой практической единицей скорости, ибо человечество привыкло пользоваться единицами измерения, удобными для повседневной практики. Однако эта проблема является проблемой выбора человеком практических единиц измерения, а не фундаментальной проблемой физики. Выбор практических единиц можно осуществить двояко: выбрать для практической единицы скорости некое физическое явление в качестве эталона (например, среднюю скорость движения Земли по орбите)

и затем тем или иным путем определить соотношение между выбранным эталоном и скоростью света, либо просто выбрать практическую единицу скорости как определенную часть от скорости света (например, точно  $1/300000000$ ). В первом случае, практический эталон неизбежно будет содержать некоторую неточность. Во втором случае практический эталон будет иметь абсолютную собственную точность; именно такой путь и является основным для дальнейшего развития метрологии. Первый шаг в этом направлении был сделан в 1983 г., когда практическое значение скорости света  $299792458$  м/с было выбрано как точное. В современной физике фундаментальным статусом наделяются десятки различных физических постоянных, таких как скорость света  $c$ , постоянная Планка  $h$  (или  $\hbar$ ), элементарный электрический заряд  $e$ , массы некоторых частиц, например, электрона  $m_e$  или протона  $m_p$ , гравитационная постоянная  $G$ , постоянная Ферми  $G_F$ , постоянная Больцмана  $k$  и др. <sup>1)</sup>. Однако их число превышает число эталонов, которое необходимо и достаточно для полного эталонирования физических величин. Поэтому на их основе был построен целый ряд различных естественных систем единиц. Прежде чем приступить к их описанию, сделаем несколько предварительных замечаний об обозначениях.

Традиционно естественные системы единиц записываются с помощью равенства той или иной постоянной единице, например, планковская система часто записывается  $c=1$ ,  $\hbar=1$ ,  $G=1$ . На самом деле, такая форма записи не точна: она отражает то, что эта постоянная выбрана в качестве меры, например, скорость света выбрана в качестве меры скорости. В естественных системах единиц размерности вовсе не исчезают, наоборот, они приобретают фундаментальный смысл, так как размерности всех физических величин составляются из фундаментальных постоянных. Однако наряду с этим возможно применение *безразмерных естественных систем единиц*, переход к которым можно осуществить именно путем формального принятия некоторых констант равными единице  $c=1$ ,  $\hbar=1$  и т.п., что удобно для решения математически сложных задач (первым это осуществил, по-видимому, Д. Хартри при представлении своего метода решения уравнения Шредингера). При этом все фундаментальные постоянные формально исчезают из физических законов, но перемещаются в определения физических величин. Такая процедура эквивалентна переходу к другой системе физических понятий: все размерные физические величины при этом заменяются на безразмерные (например, вместо скорости  $v$  используется величина  $\beta = v/c$ ), а восстановление размерностей происходит уже в окончательном результате (фактически — обратный переход к системе размерных понятий). Поэтому форму записи типа  $c=1$  или  $\hbar=1$  желательно сохранить только для обозначения перехода к безразмерным естественным системам единиц.

---

<sup>1)</sup> См. таблицы фундаментальных постоянных: Фаустов, 1998; Mohr, Taylor, 2005; Каршенбойм, 2005а.

А в целом более целесообразно использовать формы записи типа  $cG\hbar k$ -система или  $(c, G, \hbar, k)$  (для планковской системы).

Кроме этого, если система единиц предназначена не для описания какого-либо одного частного класса явлений (например, механических), а претендует на описание всей физики, то целесообразно чтобы описание системы единиц было исчерпывающе полным. Для этого необходимо указывать все конвенциональные элементы, связанные с выбором единиц, т.е. как те постоянные, которые выбираются в качестве основных мер, так и те постоянные, которые выбираются равными 1 или какой-либо математической постоянной. А их общее число, как было выше отмечено, одно и тоже во всех системах единиц — пять. Например, запись  $(c, G, \hbar)$  не является полной, так как выбор электромагнитных и термодинамических единиц остается произвольным. Однако запись  $(c, G, \hbar, k; k_e = 1)$  уже однозначно определяет не только единицы механических, но и электромагнитных и термодинамических величин. Постоянные этих двух разных классов мы будем отделять в записи естественной системы единиц точкой с запятой.

**3.4.2. Астрономическая система единиц ( $G = 1$ ).** Вопреки распространенному убеждению, что история естественных систем единиц началась с Планка и планковской системы единиц, следует отметить, что на самом деле некоторые постоянные в законах выбирались равными единице изначально. Так, в небесной механике изначально применялась естественная система единиц, основанная на выборе коэффициента в законе всемирного тяготения равным единице ( $G = 1$ ) — так называемая астрономическая система единиц. Первоначально этот коэффициент вообще не вводился, так как классическая механика и классическая теория тяготения масштабно инвариантны (законы не зависят от выбора меры длины и других мер). С современной точки зрения это эквивалентно выбору  $G = 1$ . Постоянная тяготения за ненужностью длительное время вообще не вводилась в закон всемирного тяготения, а импульсом к ее введению послужил переход к единой системе мер во Франции в конце XVIII в. Гравитационная постоянная часто и в современных работах по небесной механике выбирается равной единице. Этот подход к выбору единиц измерения К.Ф. Гауссом был доведен до уровня принципа и воплощен в так называемую концепцию абсолютных мер Гаусса.

**3.4.3. Абсолютная система К.Ф. Гаусса ( $G = 1, k_m = 1, k_e = 1$ ).** К.Ф. Гаусс рассматривал закон  $F = \frac{m_1 m_2}{r^2}$  как универсальный закон природы для масс, “магнитных масс” и электрических зарядов (Gauss, 1840). В 1832 г. К.Ф. Гаусс при количественном анализе земного магнетизма предложил такую же форму закона и для “магнитных масс” (т.е.  $k_m = 1$ ) (Gauss, 1832) и позже К.Ф. Гаусс и В. Вебер предложили такую же форму закона и для электрических зарядов

(т. е.  $k_e = 1$ ). В качестве основных механических единиц Гаусс использовал миллиметр, миллиграмм и секунду. Также в небесной механике Гаусс использовал такую же форму закона всемирного тяготения — без гравитационной постоянной (т. е.  $G = 1$ ) (*Gauss*, 1813). Таким образом, идея “абсолютной системы единиц” Гаусса заключалась в сведении электрических, магнитных и гравитационных единиц к трем основным механическим единицам путем выбора коэффициентов  $k_i = 1$  в соответствующих законах.

**3.4.4. Универсальные системы Дж.К. Максвелла ( $\lambda_{Na}$ ,  $c$ ,  $G$ ), ( $\lambda_{Na}$ ,  $c$ ,  $m_o$ ).** В докладе Математической и физической секций Британской Ассоциации по развитию науки 15 сентября 1870 г. в Ливерпуле Дж.К. Максвелл отметил: “Если поэтому мы хотим получить абсолютно неизменные стандарты длины, времени и массы, то мы должны искать их не в размерах, или в движении, или в массе нашей планеты, но в длине волны, периоде колебаний и в абсолютной массе этих неразрушимых, неизменных и совершенно одинаковых молекул” (*Maxwell*, 1870; рус. пер.: *Максвелл*, 1968, с. 15).

Три года спустя в 1873 г. Максвелл опубликовал свой знаменитый “Трактат об электричестве и магнетизме”. В первой главе, посвященной системам единиц, Максвелл проанализировал различные применяемые в науке и на практике системы, и предложил две “универсальные системы единиц” (“universal system of units”) (*Maxwell*, 1873, v. 1, p. 3–4). Максвелл опирался на три основные единицы (“fundamental units”) — длину, время и массу, через которые, как он отметил, можно выразить единицы физических величин “во всех динамических науках”. В качестве наиболее универсального стандарта длины (“the most universal standard of length”) Максвелл предложил выбрать “длину волны в вакууме света определенного вида, испускаемого каким-либо широко распространенным веществом (например, натрием), имеющим в своем спектре четко отождествляемые линии”. В качестве универсальной единицы времени (“universal unit of time”) — “период колебаний того же света, длина волны которого является единицей длины”. При этом, как отметил Максвелл, “если за единицу длины и времени принять величины, выведенные из колебаний света, то единицей скорости станет скорость света”. Выбор скорости света  $c$  в качестве меры скорости вел, в частности, к унификации электростатической и электромагнитной систем единиц. В качестве “универсального эталона массы” Максвелл предложил выбрать “массу одной молекулы стандартного вещества”. Второй вариант универсальной системы Максвелла отличался лишь выбором единицы массы, которая определялась через закон всемирного тяготения как масса, которая создает единичное ускорение на единичном расстоянии (т. е. коэффициент в законе всемирного тяготения выбирался равным 1). По существу, Максвелл предложил два основных типа естественных систем единиц, связанных с описанием атомных и гравитационных явлений.

Единицы электромагнитных величин Максвелл определяет двумя способами. Во-первых, — путем выбора коэффициента в законе Кулона равным 1 (электростатическая система единиц) (§ 39–41). Силу Кулона Максвелл записывает в виде  $fee'r^{-2}$ , где “ $f$  — отталкивание двух единичных зарядов на единичном расстоянии”, а затем указывает: “Мы в состоянии выбрать единицу, руководствуясь определенным принципом; для того, чтобы эта единица могла быть включена в общую систему единиц, мы определим ее так, чтобы  $f$  было равно единице”. Интересно, что Максвелл обозначает коэффициент пропорциональности в законе Кулона тем же символом, которым С.Д. Пуассон обозначал гравитационную постоянную (по первой букве от “logse” — силы; в данном случае этот символ обозначает единичную силу).

Таким образом, Гаусс предложил общий принцип выбора единиц на основе принятия коэффициентов в законах, в которых проявляется механическое действие того или иного явления (электрическое, магнитное, гравитационное), равными единице. Максвелл фактически следовал этому принципу Гаусса и пришел к тому, что при объединении двух разных явлений — электричества и магнетизма — две системы единиц, которые были предназначены для описания специфических явлений своих областей, оказались распространены на общий круг явлений электромагнетизма. Системы единиц стали конкурировать в области электромагнетизма. Максвелл естественно должен был сравнить обе системы, что он и сделал.

В третьей части Максвелл анализирует единицы в электромагнитной системе единиц и в гл.10 сравнивает размерности физических величин. Для этого ему приходится сначала расширить количество основных единиц до четырех и лишь затем, после сравнительного анализа размерностей физических величин в этих двух системах, Максвелл редуцирует их к трем основным, а затем выводит, что соотношения физических величин в этих двух системах единиц являются степенью некоторой скорости  $v$ , “абсолютное значение которой не зависит от величины используемых основных единиц”. В дальнейшем Максвелл показывает, что эта величина есть скорость света  $V$ , и делает вывод: “следовательно, совпадение или расхождение значений  $V$  и  $v$  обеспечивает проверку правильности электромагнитной теории света” (п. 786; Максвелл, 1873/91, с. 338). Далее Максвелл сопоставляет экспериментальные данные и показывает их соответствие.

Интересно, что в этом же трактате Максвелл предложил и другое определение единицы электрического заряда. В главе, посвященной электролизу, Максвелл для объяснения эмпирического закона Фарадея выдвинул предположение об эквивалентности количества электричества при разложении одной молекулы различных веществ. Это количество электричества Максвелл назвал “молекулярным зарядом”, а также “молекулой электричества” (“one molecule of electricity”), подчеркнув, что “если бы величина его была известна, это была бы наиболее естественная единица электричества (“the most natural unit

of electricity”) (*Maxwell*, 1873, v. 1, p. 312; *Максвелл*, 1873/91, т. 1, с. 308). Идея “молекулы электричества”, несмотря на то, что она, как отметил сам Максвелл, “не гармонировала с остальным содержанием этого трактата” оказалась пророческой. И все первые вычисления элементарного электрического заряда производились именно из закона электролиза Фарадея.

**3.4.5. Система Дж. Стони ( $c, G, e; k_m = 1$ ).** В 1874 г. известный ирландский физик Дж. Стони (1826–1911) предложил естественную систему единиц, основанную на следующих фундаментальных константах: 1) электромагнитная постоянная, связанная с отношением электростатических и электромагнитных единиц (т.е. скорость света  $c$ ), 2) “коэффициент гравитации” (гравитационная постоянная  $G$ ) и 3) количество электричества, связанного с разложением одной молекулы в процессе электролиза (т.е. элементарный заряд  $e$ ) (*Stoney*, 1874/81). Стони использовал электромагнитную систему единиц (т.е. он выбрал  $k_m = 1$ , где  $k_m$  — коэффициент в законе  $F = k_m \frac{m_1 m_2}{r^2}$  ( $m_1$  и  $m_2$  — “магнитные массы”)). Дж. Стони оценил из закона электролиза Фарадея минимальную величину электрического заряда  $e = 10^{-20}$  “ампер” (названия электромагнитных единиц в то время еще не были “узаконены”. Это значение Стони соответствует  $10^{-20}$  Кулон. Это была первая в истории оценка значения элементарного электрического заряда  $e$  (современное значение  $e = 1,60217653(14) \cdot 10^{-19}$  Кл  $= 4,80320440(15) \cdot 10^{-10}$  эл. стат. ед.).

В системе Стони единица длины  $l_{st} = \frac{e\sqrt{G}}{c^2} = 1,3807 \cdot 10^{-34}$  см, единица времени  $t_{st} = \frac{e\sqrt{G}}{c^3} = 4,6054 \cdot 10^{-45}$  с, единица массы  $m_{st} = \frac{e}{\sqrt{G}} = 1,8592 \cdot 10^{-6}$  г, где  $e$  — элементарный заряд в гауссовой системе единиц ( $k_e = 1$ ). (В общем виде  $l_{st} = \frac{e\sqrt{k_e G}}{c^2} = \sqrt{\alpha} \times \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = \sqrt{\alpha} \times l_{pl}$ ;  $t_{st} = \frac{l_{st}}{c} = \sqrt{\alpha} \times t_{pl}$ ;  $m_{st} = e\sqrt{\frac{k_e}{G}} = \sqrt{\alpha} \times m_{pl}$ ). Таким образом, единицы Стони отличаются от планковских величин множителем  $\sqrt{\alpha}$ , где  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры.

Позже в 1956 г. Б. Людовичи вновь предложил эту систему с некоторой модификацией электромагнитных единиц (рационализацией электромагнитных единиц и выбором дополнительной магнитной единицы) (*Ludovichi*, 1956). Единицы длины, времени и массы в системе Людовичи в  $\sqrt{4\pi}$  раз больше единиц Стони.

Значение масштаба Стони состоит в том, что он определяет область применения КЭД и ОТО. Так в 1954 г. Л.Д. Ландау, А.А. Абрикосов и И.М. Халатников показали, что КЭД становится неприменимой из-за

гравитации при импульсах  $p^2 \sim \frac{e^2}{G}$ ,  $p \sim 2 \cdot 10^{-6} \text{ г} \sim 10^{27} \text{ эВ}$  (т.е. при масштабе Стони) (Ландау, Абрикосов, Халатников, 1954; то же: Ландау, 1969, т. 2, с. 206–211). В связи с этим масштаб Стони должен был бы стать масштабом объединения гравитации и электромагнетизма, если бы удалось построить корректную теорию такого рода. Поэтому неслучайно Г. Вейль неоднократно обсуждал “гравитационный радиус заряда”  $r_{eg} = \frac{e\sqrt{G}}{c^2}$  (Weyl, 1917, S. 145), т.е. длину Стони, в своих работах по единой теории в 1917–19 гг., но в реальности он не смог ввести этот масштаб в свою теорию из-за очень маленького значения  $r_{eg}$  (подробнее см.: Горелик, 1989).

Масштаб Стони наряду с планковским масштабом фигурировал в работах М.А. Маркова, В.П. Фролова и Л.Б. Окуня (см. с. 241).

**3.4.6. “Естественные единицы измерения” М. Планка 1899 г. (a, b, c, f) и 1906 г. (c, h, f, k).** В феврале 1897 г. — мае 1899 г. М. Планк прочитал в Прусской Академии наук в Берлине пять докладов о необратимых процессах излучения. В последнем пятом докладе 18 мая 1899 г. (представлен в печать 1 июня 1899 г.) он использовал введенный им логарифмический закон энтропии осциллятора для объяснения закона излучения Вина. Количественный анализ потребовал введения в закон энтропии двух новых размерных физических постоянных  $a$  и  $b$ . Планк сразу охарактеризовал эти постоянные как “универсальные” (“universal”) в связи с универсальностью, как он полагал, законов энтропии и излучения. Планк вывел из закона энтропии закон излучения Вина, а из последнего — законы Стефана–Больцмана и закон смещения Вина. Поскольку в этих двух законах уже были определены экспериментально две соответствующие постоянные, то Планк смог выразить через них и численно рассчитать значения двух новых, введенных им “универсальных постоянных”:  $a = 0,4818 \cdot 10^{-10} \text{ с} \cdot \text{град}$  и  $b = 6,885 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с}$ .

В заключительном параграфе “Естественные единицы измерения” Планк предложил естественную систему единиц, основанную на четырех “универсальных константах”  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $f$  ( $c$  — скорость света,  $f$  — гравитационная постоянная  $G$ ) (Planck, 1899, S. 599–600) и вычислил сами значения единиц длины, времени, массы и температуры:

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{bf}{c^3}} &= 4,13 \cdot 10^{-33} \text{ см}, & \sqrt{\frac{bf}{c^5}} &= 1,38 \cdot 10^{-43} \text{ с}, \\ \sqrt{\frac{bc}{f}} &= 5,56 \cdot 10^{-5} \text{ г}, & a \sqrt{\frac{c^5}{bf}} &= 3,50 \cdot 10^{32} \text{ }^\circ\text{Цельсия.} \end{aligned}$$

В своем докладе Планк формально не предложил тот или иной способ выбора электромагнитных единиц, но в других работах он применял гауссову систему единиц, т.е. выбирал постоянную в законе Кулона равной 1.



Планк отметил, что “эти единицы сохраняют свое естественное значение до тех пор, пока справедливы законы тяготения, оба начала термодинамики и пока остается неизменной скорость распространения света в вакууме. Поэтому, измеренными самыми разными интеллектами посредством самых разных методов, они будут иметь всегда одно и то же значение” (Ibid, S. 600).

Вскоре М. Планк опубликовал подробное изложение своих исследований по теории теплового излучения в “Annalen der Physik” (Planck, 1900a). Текст статьи был написан на основе пятого доклада 18 мая 1899 г. и целиком в неизменном виде включал тот же заключительный параграф о естественных единицах измерения из статьи (Planck, 1899).

В октябре 1900 г. Планк перешел к другому закону излучения, а в докладе 14 декабря у него впервые появились постоянные  $h$  и  $k$  (см. § 1.2.3). К идее естественной системы единиц М.Планк вернулся спустя несколько лет в книге “Теория теплового излучения” (1906 г.), посвятив ей специально один из параграфов. Эта книга с 1906 г. по 1923 г. выдержала пять переизданий и в первых трех изданиях Планк сохранял этот параграф (текст параграфа в книге идентичен соответствующему параграфу в статьях (Planck, 1899, 1900a) за исключением формул и численных значений физических постоянных) (Planck, 1906/13). С четвертого издания (1921) М. Планк исключил этот параграф (он, очевидно, выпал из структуры книги), но сохранил упоминание своей системы в предисловии к 4-му изданию, которое публиковалось и в последующих переизданиях. Еще один раз М.Планк упомянул свою систему единиц в докладе “Единство физической картины мира” (Лейден, 1908) (Planck, 1909; рус. пер.: Планк, 1909, с. 23–50). Планк подчеркнул, что достоинство его системы в том, что она опирается на константы, описывающие универсальные явления — тяготения и теплового излучения. Таким образом, в течение 1899–1923 гг. М.Планк по крайней мере восемь раз опубликовал свою идею естественной системы единиц, причем пять раз с численным расчетом единиц длины, времени, массы и температуры.

В первых изданиях “Теории теплового излучения” Планк получил еще более заниженные по сравнению с данными конца 1900 г. значения универсальных постоянных (“universellen Konstanten”):  $h = 6,415 \cdot 10^{-27}$  эрг · с,  $k = 1,34 \cdot 10^{-16}$  эрг/град (Planck, 1906/13, S. 166). Представленные им единицы естественной системы имели следующие значения:

$$\sqrt{\frac{fh}{c^3}} = 3,99 \cdot 10^{-33} \text{ см}, \quad \sqrt{\frac{fh}{c^5}} = 1,33 \cdot 10^{-43} \text{ с},$$

$$\sqrt{\frac{ch}{f}} = 5,37 \cdot 10^{-5} \text{ г}, \quad \frac{1}{k} \sqrt{\frac{c^5 h}{f}} = 3,60 \cdot 10^{32} \text{ град}.$$

Для сравнения приведем современные значения:

$$\ell_{nл} = \sqrt{\frac{Gh}{c^3}} = 4,05131(30) \cdot 10^{-33} \text{ см,}$$

$$t_{nл} = \sqrt{\frac{Gh}{c^5}} = 1,351375(100) \cdot 10^{-43} \text{ с,}$$

$$m_{nл} = \sqrt{\frac{hc}{G}} = 5,45555(40) \cdot 10^{-5} \text{ г,}$$

$$T_{nл} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{hc^5}{G}} = 3,55136(28) \cdot 10^{32} \text{ К.}$$

Таким образом, рассчитанные Планком постоянные  $h$  и  $k$  были меньше современного значения на 3%, а единицы естественной системы отличались от современных на 1,5%.

Теоретическое отличие постоянных  $h$  и  $b$ , и постоянных  $a$  и  $h/k$ , исследованное во второй главе (см. п. 1.2.4) приводит к теоретическому отличию между единицами планковских систем 1899 г. ( $a, b, c, f$ ) и 1906 г. ( $c, f, h, k$ ): единицы длины, времени и массы в первоначальной планковской  $abcf$ -системы больше соответствующих единиц  $chfk$ -системы (т.е.  $cGhk$ -системы) в  $\frac{5^2}{\beta^2} \sqrt{\varepsilon} = \frac{(5\pi)^2}{3\beta^2 \sqrt{10}} = 1,055$  раз, а единица температуры в  $\frac{5\pi^2}{3\beta\sqrt{10}} = 1,048$  раз меньше.

Ныне под планковскими величинами подразумеваются единицы  $cG\hbar k$ -системы, отличающиеся от планковских величин 1906 г. и 1913 г. в  $\sqrt{2\pi}$  раз в связи с заменой  $h$  на  $\hbar = h/2\pi$ . В современной "планковской системе" единица длины —  $\ell_{pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = 1,61624(12) \cdot 10^{-33}$  см (планковская длина), единица времени  $t_{pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} = 5,39121(40) \cdot 10^{-44}$  с, единица массы —  $m_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2,17645(16) \cdot 10^{-5}$  г (планковская масса), единица температуры  $T_{pl}^{\circ} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} = 1,41679(11) \cdot 10^{32}$  К, единица энергии —  $E_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} = 1,2209(1) \cdot 10^{19}$  ГэВ. В физике высоких энергий планковская масса часто измеряется прямо в энергетических единицах:  $m_{pl} = 1,2209(1) \cdot 10^{19}$  ГэВ/ $c^2$ . Естественно, что все эти численные значения рассчитаны исходя из универсальности гравитационной постоянной для любых масштабов, что может оказаться и не так, учитывая, что все другие

постоянные взаимодействий меняются в зависимости от переданного импульса.

В научной литературе использовались и другие определения планковских единиц. Например, единицы, получаемые через равенство гравитационного радиуса и комптоновской длины волны, отличаются от общепринятых множителем  $\sqrt{2}$ . Кроме этого, из соображений рационализации (аналогично рационализации электромагнитных величин) закон всемирного тяготения можно записывать, выделяя в явном виде множитель  $4\pi$ :  $F = \frac{k_g}{4\pi} \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$ . Постоянная  $k_g = 4\pi G$  в сочетании с постоянными  $c$  и  $\hbar$  в этом случае определяет единицы, отличающиеся от общепринятых на множитель  $\sqrt{4\pi}$ . Б. де Витт использовал для удобства “абсолютные единицы” ( $c$ ,  $\hbar$ ,  $16\pi G$ ), которые отличаются от общепринятых на множитель  $\sqrt{16\pi}$  (DeWitt, 1964, p. 114).

Роль планковских величин оставалась долго неясной, однако в 1928 году Г.А. Гамов, Д.Д. Иваненко и Л.Д. Ландау, как уже указывалось выше, представили модель развития теоретической физики как переход к  $c\hbar$ -теории. В 1950-е гг. была открыта роль планковских величин как границ применимости современных физических теорий — квантовой механики и общей теории относительности (см. п. 4.1.3).

**3.4.7. Электронная система единиц ( $c$ ,  $m_e$ ,  $e$ ;  $k_e = 1$ ).** “Электронная система” (термин использовал М. Борн в 1935 г., возможно, что он использовался еще до него) появилась в физике, по-видимому, в начале XX в., в период когда господствовала электромагнитная картина мира и электрон рассматривался как фундаментальный кирпичик вещества. Достоверно неизвестно, кто первым предложил электронную систему единиц. Реального применения в физике эта система единиц не нашла. Даже Г.А. Лоренц в “Теории электрона” использовал систему Лоренца–Хевисайда (систему СГС с выбором  $k_e = 1/4\pi$ ). Единицей длины в электронной системе является классический радиус электрона  $r_e = k_e \frac{e^2}{m_e c^2} = \alpha \lambda_e \approx \frac{\lambda_e}{137}$ , где  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры. Значение этого масштаба заключается в том, что он является пределом применимости классической электромагнитной теории. В 1934–35 гг. М. Борн использовал электронную систему при построении унитарной нелинейной теории электромагнитного поля (Борн пришел к выводу, что “истинным” радиусом электрона следует считать величину  $1,236 \cdot r_e = 3,48 \cdot 10^{-13}$  см) (Борн, 1935). В 1950-е гг. многие ученые рассматривали длину  $10^{-13}$  см как фундаментальный масштаб, например, В. Гейзенберг в своей нелинейной единой теории (Heisenberg, 1966; Гейзенберг, 1966). Открытие множества других частиц привело к снижению статуса электрона как уникальной частицы, определяющей фундаментальные масштабы Природы. Однако в 1966 г. эту же систему единиц вновь предложил С.П. Капица, оказалось, что эта система

единиц удобна для классической электродинамики и электроники (Капица, 1966).

Метрологи Е.Ф. Долинский и Б.И. Пилипчук указывают на Дж.А. Флеминга, как автора естественной системы ( $c$ ,  $m_p$ ,  $e$ ), однако ссылаются на вторичный источник, который оказался недоступен (Долинский, Пилипчук, 1965, с. 7). Мне пока не удалось найти этому прямое подтверждение, но в некоторых работах Флеминг по отдельности выбирал скорость света в качестве меры скорости и элементарный заряд в качестве меры заряда.

**3.4.8. Атомная система Хартри ( $\hbar$ ,  $m_e$ ,  $e$ ;  $k_e = 1$ ).** В 1927 г. английский физик и математик Д. Хартри предложил новый метод для нахождения решений уравнения Шредингера в случае многоэлектронных атомов (метод самосогласованного поля, развитый В.А. Фоком в 1930 г.). В начале своей статьи Хартри выбрал специальные атомные единицы: радиус Бора  $a_0$  как единицу длины, массу электрона  $m_e$  как единицу массы, и заряд электрона  $e$  как единицу заряда (Hartree, 1928). Затем он выбрал коэффициент в законе Кулона  $k_e = 1$ . Фактически Хартри перешел не только к естественным мерам атомной физики, но и осуществил неявный переход от размерных физических величин к безразмерным, так как его целью было представление определенного способа решения сложной математической задачи. Размерные коэффициенты в уравнении Шредингера при этом фактически переводились из уравнения Шредингера в сами определения физических величин (формально это эквивалентно полаганию в уравнениях  $\hbar = 1$ ,  $m_e = 1$ ,  $e = 1$ ). Система Хартри оказалась удобной для атомной физики, которая описывается законами нерелятивистской квантовой механики, и поэтому нашла в этой области очень широкое применение. Для выбранных Хартри единиц, как было отмечено самим Хартри, единица действия равна  $h/2\pi$ . Поэтому мы можем описать систему Хартри как ( $\hbar$ ,  $m_e$ ,  $e$ ;  $k_e = 1$ ). В системе Хартри единица длины — радиус Бора  $a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e k_e e^2} = \frac{\lambda_e}{\alpha} \approx 137\lambda_e = 5,291772108(18) \cdot 10^{-9}$  см, единица времени  $t_0 = \frac{\hbar^3}{m_e k_e^2 e^4} = 2,418884326 \cdot 10^{-17}$  с. Единицей скорости является скорость света, умноженная на постоянную тонкой структуры:  $v_0 = \alpha c \approx \frac{c}{137}$ . Это — скорость электрона в атоме водорода и нижний предел для скоростей электронов в более сложных атомах. Единица энергии  $E_0 = \frac{m_e k_e^2 e^4}{\hbar^2} = \alpha^2 m_e c^2 = 43,5974417(75) \cdot 10^{-19}$  Дж = 27,2113845(23) эВ названа “хартри” (hartree) в честь Д. Хартри в 1958 г. (иногда ее называют “ридберг”).

**3.4.9. Квантово-релятивистская система ( $c$ ,  $\hbar$ ,  $m_p$ ;  $k_e = 1$ ).** В 1931 г. американский физик А. Руарк предложил две новые системы единиц для задач атомной физики (Ruark, 1931). Обе системы были

основаны на скорости света  $c$  и массе электрона  $m_e$ . В качестве третьей единицы Руарком были выбраны радиус Бора  $a_0$  (в первой системе) и комптоновская длина волны электрона  $\lambda_e = \frac{\hbar}{m_e c} = 3,861592678(26) \cdot 10^{-11}$  см (во второй системе). В обеих системах Руарк выбирал постоянную  $k_e = 1$ . Вторая система получила широкое применение и называется обычно “квантово-релятивистской системой” ( $c, \hbar, m_0; k_e = 1$ ), где  $m_0$  масса некоторой частицы, как правило, электрона. Появление этой системы связано с развитием квантово-релятивистской теории и открытием волнового уравнения Дирака. В квантово-релятивистской системе единица времени  $\tau_0 = \frac{\hbar}{m_0 c^2} = 1,288088668(9) \cdot 10^{-21}$  с (для электрона), а единица заряда равна  $\alpha^{-1/2} = \sqrt{137,036} = 11,706237$  заряда электрона (т.е. в определение единицы заряда включена постоянная  $\alpha$ , характеризующая силу электромагнитного взаимодействия). Такой выбор единицы заряда приводит к тому, что с увеличением энергии взаимодействия вместе с ростом постоянной  $\alpha$  меняется и масштаб измерения заряда (т.н. “эффективный заряд”). Более целесообразно выделять в явном виде постоянную  $\alpha$  в электромагнитных законах, тем самым сохраняя единицу заряда неизменной. Интересно, что Руарк понимал, что модификация его системы с выбором в качестве единицы электрического заряда элементарного заряда приводит к появлению коэффициента в законе Кулона, но почему-то считал это неприемлемым.

Первая система Руарка не получила распространения, а вторая, модифицированная путем выбора  $k_e = 1/4\pi$  и выбора в качестве единицы энергии эВ — электронвольта, стала общепринятой во второй половине XX в. в физике высоких энергий ( $c, \hbar, \text{эВ}; k_e = 1/4\pi$ ) (см. например: *Хелзен, Мартин*, 1984, с. 26; *Окунь*, 1990, с. 203; *Райдер*, 1985).

**3.4.10. Квантово-электродинамическая система ( $c, \hbar, e, m_p, k$ ).** В 1949 г. немецкий физик и метролог У. Штилле предложил естественную систему единиц для электродинамики, основанную на скорости света  $c$ , постоянной Планка  $\hbar$ , элементарном заряде  $e$ , массе протона  $m_p$ , ядерном магнетоне  $\mu_k = 1/2\pi$  и постоянной Больцмана  $k$  (*Stille*, 1949). По сути, систему Штилле можно рассматривать как модификацию квантово-релятивистской системы путем выбора более естественных единиц для электромагнетизма, таких как элементарный заряд  $e$  и ядерный магнетон  $\mu_k$ .

В системе, предложенной Штилле, единицей длины является комптоновская длина протона  $\lambda_p = \frac{\hbar}{m_p c} = 1,32141098555(88) \cdot 10^{-13}$  см, единицей времени  $\tau_p = \frac{\hbar}{m_p c^2} = 4,407752596 \cdot 10^{-23}$  с.

Метролог А. Кук в 1972 г. отметил перспективность для квантовой метрологии системы единиц, основанной на постоянных ( $c, \hbar, e, m_e; N_A$ ) (*Cook*, 1972; *Кук*, 1972, с. 85). В настоящее время квантовая метрология подошла к рубежу, на котором все три постоянные — скорость

света  $c$ , постоянная Планка  $h$  и заряд электрона  $e$ , будут выбраны точными (Каршенбойм, 2005a,b). В отличие от метрологов ряд ученых (П.В. Бриджмен, Д. Хартри) считали систему единиц, основанную на постоянных  $c$ ,  $h$ ,  $e$  принципиально невозможной. Это связано с тем, что многие ученые привыкли использовать гауссову систему единиц ( $k_e = 1$ ). На самом деле нет ограничений на одновременный выбор  $c$ ,  $h$ ,  $e$  в качестве эталонов, это приводит лишь к появлению постоянной тонкой структуры в ряде формул электродинамики, в том числе — в законе Кулона. Ограничения, накладываемые формулой постоянной тонкой структуры  $\alpha = \frac{k_e e^2}{\hbar c}$ , приводят к четырем основным типам атомных естественных систем единиц:

	Единица скорости, $c$	Единица действия, $\hbar$	Единица заряда, $e$	Постоянная в законе Кулона, $k_e$	Единица длины	Единица энергии
атомная (система Хартри)	$\alpha^{-1}$	1	1	1	$a_0 = \frac{\lambda_e}{\alpha} \approx 137\lambda_e$	$\alpha^2 m_e c^2$
электронная	1	$\alpha^{-1}$	1	1	$r_0 = \alpha \lambda_e \approx \frac{\lambda_e}{137}$	$m_e c^2$
квантово-релятивистская	1	1	$\sqrt{\alpha}$	1	$\lambda_e$	$m_e c^2$
квантово-электродинамическая	1	1	1	$\alpha$	произвольна	произв.

Наряду с этими основными типами естественных единиц можно получить их разновидности, выбирая постоянную в законе Кулона равной не 1, а другому числу, например,  $1/4\pi$  (т. н. “рационализация” электромагнитных единиц, как в системе Лоренца–Хевисайда). Такого рода разновидность квантово-релятивистской системы единиц, в частности, нашла широкое применение в физике высоких энергий (в этой системе  $e^2 = 4\pi\alpha\hbar c$ ).

**3.4.11. Естественные системы единиц: от многообразия к единству.** Возможна ли единая естественная система единиц в физике? Совершенно очевидно, что в ряде специфических задач *всегда* будут применяться свои специфические естественные системы единиц. Например, в гидростатике удобно выбирать плотность воды в качестве единицы плотности, в аэродинамике удобно выбирать не скорость света, а скорость звука в качестве меры скорости (скорость при этом будет выражаться так называемым числом Маха). То есть в физических задачах имеет смысл выбирать в качестве основных масштабов те масштабы, при достижении которых происходит

качественное изменение поведения системы, такое, что даже вызывает необходимость использовать для описания разные физические модели. Тем не менее, правомерен вопрос: возможна ли единая естественная система единиц, основанная на фундаментальных постоянных?

Основные предлагавшиеся естественные системы единиц, целиком основанные на фундаментальных постоянных представлены в табл. 3.4.1.

Для эталонирования термодинамических величин ряд ученых, начиная с М. Планка, вводил в естественные системы единиц постоянную Больцмана  $k$  (поскольку других вариантов не предлагалось, в данной таблице это для простоты не фиксируется). Также предлагались некоторые другие системы единиц, но либо они несущественно отличаются от описанных выше систем (множителями  $4\pi$  и др.), либо не были целиком “естественными” (основанными только на фундаментальных постоянных). Ныне наиболее применяемые системы единиц — система Хартри:  $(\hbar, m_e, e; k_e = 1)$  — в атомной физике, система Планка  $(c, \hbar, G, k; k_e = 1)$  — в квантовой гравитации, физике черных дыр, и квантово-релятивистская система:  $(c, \hbar, eV; k_e = 1/4\pi)$  — в физике высоких энергий.

Как видим, в современной физике применяются различные естественные системы единиц. Значение систем единиц, основанных на постоянных  $c$ ,  $\hbar$  и  $e$ , заключается в том, что они могут стать *основой для конвергенции всех естественных систем единиц*. В системах Хартри и квантово-релятивистской системе постоянная тонкой структуры неявно фигурирует во всех уравнениях, будучи включенной в определения соответственно единицы скорости и единицы заряда. Переход к системе  $(c, \hbar, e)$  приводит к тому, что постоянная тонкой структуры  $\alpha$  появляется в качестве множителя в уравнениях электродинамики в явном виде. Это выглядит, на первый взгляд, как некоторое неудобство, однако все компенсируется тем, что мы используем единую систему единиц и все физические уравнения приобретают ясный физический смысл.

Система  $(c, \hbar, e)$  сама по себе не фиксирует масштаба длины и энергии. Для того, чтобы эта система единиц стала полной (т.е. достаточной для эталонирования всех физических единиц), должна быть открыта и (или, если она уже открыта) приобрести фундаментальный статус еще одна размерная постоянная, не являющаяся комбинацией постоянных  $c$ ,  $\hbar$  и  $e$ . Этот масштаб должен определяться другими взаимодействиями — слабым, сильным, гравитационным или масштабом их объединения (электромагнитное взаимодействие само по себе не дает никакого выделенного масштаба). Соответственно у нас возникают четыре масштаба, связанные с этими взаимодействиями:

1) Вакуумное среднее  $\eta$ . Этот масштаб, определяется постоянной Ферми  $\eta = \sqrt{\frac{c^3 \hbar^3}{\sqrt{2} G_F}} = 246$  ГэВ и, как считается, определяет массы частиц:  $M_i = \alpha_i \eta$ , где  $\alpha_i$  — некоторые безразмерные константы.

Таблица 3.4.1. Основные предлагавшиеся естественные системы единиц

	Единица скорости	Единица действия	Единица заряда	Единица массы	Коэффициенты в законах	Единица длины
Астрономическая система					$G=1$	большая полуось земной орбиты
К Ф. Гаусс и В. Вебер (1832 и др.)					$G=1, k_m=1, k_c=1$	практические меры (1 мм и др.)
Дж К. Максвелл (1870, 1873)	$c$		$m_0$			длина волны одной из линий спектра $\lambda_{Na}$
Дж К. Максвелл (1873)	$c$				$G=1$	длина волны одной из линий спектра $\lambda_{Na}$
Дж. Стони (1874/81)	$c$		$e$		$G=1, k_m=1$	длина Стони $\ell_{st}$
М Планк (1899, 1906 и др.)	$c$	$h$			$G=1$	планковская длина $\ell_{pl}$
Электронная система (автор?)	$c$		$e$	$m_e$	$k_e=1$	классический радиус электрона
Д. Хартри (1927)		$\hbar$	$e$	$m_e$	$k_c=1$	радиус Бора $a_0$
А. Руарк (1931)	$c$			$m_e$	$k_e=1$	радиус Бора $a_0$
А. Руарк (1931)	$c$	$h$		$m_e$	$k_e=1$	комптоновская длина волны электрона $\lambda_e$
У Шгилле (1949)	$c$	$h$	$e$	$m_p$		комптоновская длина волны протона $\lambda_p$
А. Кук (1972)	$c$	$\hbar$	$e$	$m_e$		комптоновская длина волны электрона $\lambda_e$
единая естественная система единиц	$c$	$\hbar$	$e$	$\Lambda_0 ?$ $\eta ?$ $E_{pl} ?$ $E_{GUT} ?$	$k_t = \alpha_t \cdot R(c, \hbar, e, \dots)$ $k_c = \alpha \frac{\hbar c}{e^2}$	$\frac{\hbar}{\text{ед. массы} \times c}$



2) Энергия конфайнмента кварков  $\Lambda$ . Этот масштаб является естественным масштабом энергии в КХД, он характеризуется часто как фундаментальная размерная постоянная КХД; однако  $\Lambda$  зависит от числа “ароматов” кварков и только при выделении из них ( $\Lambda^{(3)}$ ,  $\Lambda^{(4)}$ ,  $\Lambda^{(5)}$  ...) некоторого наиболее фундаментального  $\Lambda_0$  может действительно оказаться фундаментальным масштабом физики. В этом случае при объединении КХД и ТЭСВ этот масштаб должен сохранить свое фундаментальное значение и в теории великого объединения.

3) Планковский масштаб  $E_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} = 1,2209(1) \cdot 10^{19}$  ГэВ определяет границы применимости современных физических теорий — общей теории относительности и квантовой механики, см. п. 4.1.3.

4) Масштаб объединения взаимодействий  $E_{GUT}$ . Согласно современным представлениям, константы трех элементарных взаимодействий при некоторой большой энергии объединяются в одну безразмерную константу  $\alpha_{GUT}$ . Тогда масштаб объединения всех взаимодействий может определяться из условия равенства двух оставшихся сил взаимодействия:  $G = \alpha_{GUT} \frac{Gm_{GUT}^2}{\hbar c}$  (т. е.  $\frac{Gm_{GUT}^2}{\hbar c} = \alpha_{GUT}$ ), что приводит к масштабу  $E_{GUT} = E_{pl} \times \sqrt{\alpha_{GUT}} = \sqrt{\alpha_{GUT} \frac{\hbar c^5}{G}}$ . При  $\alpha_{GUT}^{-1} \cong 25,6$   $E_{GUT} \cong \frac{1}{5} E_{pl}$ .

Очевидно, что планковский масштаб не подходит (по крайней мере пока) для метрологических целей. Следует также отметить, что конкретное его значение рассчитывается исходя из того, что гравитационная постоянная сохраняет свое значение для любых масштабов (это проверено только для масштабов  $> 1$  см). Если закон тяготения модифицируется начиная с субмиллиметровых расстояний, то это может приводить к росту гравитационной постоянной и передвижению планковского масштаба к масштабам, связанными с обычными взаимодействиями (и даже совпасть с одним из них). Такой сценарий желателен в связи с тем, что он автоматически решает проблему “больших чисел” (в данном случае — слабости гравитации по сравнению с обычными взаимодействиями). В противном случае теория должна каким-то образом объяснить появление безразмерных чисел типа  $E_{pl}/\eta = 4,9586(1) \cdot 10^{16}$ .

Окончательное решение в пользу одного из этих масштабов (или еще какого-либо нового масштаба) связано с построением единой теории (“теории всего”). Однако, можно надеяться, что уже объединение ТЭСВ и КХД прольет свет на решение этой проблемы.

**3.4.12. Естественные системы единиц: pro et contra.** В пользу естественных систем единиц обычно выдвигается аргумент упрощения физических уравнений в результате выкидывания лишних коэффициентов. Это, на самом деле, касается лишь безразмерных естественных систем единиц и связано, как выше отмечалось, с временным изменением системы физических понятий (переход к безразмерным понятиям → замена символов → математические расчеты → замена символов → восстановление исходных понятий). В естественных системах единиц с сохранением размерностей коэффициенты, являющиеся комбинациями постоянных, все равно остаются в уравнениях. Важнейшим аргументом в пользу естественных систем единиц является то, что они представляют собой природные эталоны, имеющие абсолютную собственную точность, что дает настоящую твердую опору для метрологии.

Против использования естественных систем единиц выдвигалось несколько возражений: экспериментальной нецелесообразности, непрактичности и теоретической ущербности. Первое возражение — экспериментальной нецелесообразности — было связано с тем, что в системах, основанных на фундаментальных постоянных, измерения физических величин давали существенно большие погрешности, чем в системах, основанных на макроскопических эталонах. Ситуация кардинально изменилась после открытия макроскопических квантовых эффектов во второй половине XX в. В результате в 1970-е гг. стало ясно, что перейти к скорости света как мере скорости выгоднее, чем использовать для этого практические эталоны, так как никакими методами невозможно было измерить длину точнее, чем световым отрезком. Надо полагать, что дальнейший прогресс квантовой метрологии приведет к полному переходу к естественным эталонам и в экспериментальной физике. Второе возражение — непрактичности — связано с существованием общего требования удобства мер для повседневной практики. Естественные меры, очевидно, удобны для описания физического устройства мира, но не для практики (например, атомные масштабы длины меньше практических мер в  $10^9$ – $10^{11}$  раз, а планковский масштаб длины меньше в  $10^{33}$  раз). Это возражение снимается, если сохранить использование практических мер, но точно привязать эти меры к фундаментальным масштабам. Именно это и произошло в 1983 г., когда было принято значение скорости света  $c = 299792458$  м/с как *точное* (единица длины стала определяться как световой отрезок, т. е. путь, проходимый светом за единицу времени). Это означало, в частности, что практическая единица скорости 1 м/с определяется теперь как  $\frac{1}{299792458}$  от скорости света  $c$  (т. е. все скорости с 1983 г. мы измеряем в долях от скорости света). Это революционное для метрологии событие оказалось совершенно незаметным для повседневной практической деятельности. Очевидно, следует и в дальнейшем ожидать принятия некоторых практических

значений фундаментальных постоянных как точных. На первой очереди, очевидно, принятие практического значения постоянной Планка как точного, например, значения  $\hbar = 1,05457168 \cdot 10^{-34}$  кг · м<sup>2</sup>/с и определение через эту постоянную практической единицы массы (килограмма):  $1 \text{ кг} = 8,5224664 \cdot 10^{50} \hbar/c^2$  (сек). Переход к новому определению килограмма на основе принятия точного значения постоянной Планка  $\hbar$  или постоянной Авогадро  $N_A$  ожидается в 2007 году (Kibble, Robinson, 2003; Каршенбойм, 2005b; Mills et al., 2005). Затем логично ожидать эталонирование “Ампера” на основе точного практического значения элементарного заряда, что автоматически приведет к отказу от выбора точного значения постоянной в законе Кулона  $k_e$ .

Затем логично ожидать принятие как точного практического значения элементарного заряда.

При этом практические меры сохраняют свое значение для практических целей, но они будут определяться как определенные точные части от фундаментальных масштабов, как это уже осуществлено в отношении скорости света. В связи с этим для ученых было бы удобным выбрать соотношения между практическими и фундаментальными мерами наиболее просто, например, в виде  $m \cdot 10^n$  или даже  $10^n$  (однако это потребовало бы изменения практических мер, что связано с большими затратами). Такого рода идею впервые высказал А. Грецки (Gretsky, 1959) Он предложил выбрать практические единицы так, чтобы планковские величины и, соответственно, постоянные  $c$ ,  $\hbar$ ,  $G$  и  $k$  были бы равны точно  $10^n$ . Это соответствует выбору практических единиц  $l_o = 1,616$  см,  $t_o = 0,539$  с,  $m_o = 217,65$  г и  $T_o = 1,417$  град. При этом планковские величины имели бы следующие значения: планковская длина  $l_{pl} = 10^{-33} l_o$ ; время  $t_{pl} = 10^{-43} t_o$ ; планковская масса  $m_{pl} = 10^{-7} m_o$ ; температура  $T_{pl}^o = 10^{32} T_o$ . Соответственно и фундаментальные постоянные  $c$ ,  $\hbar$ ,  $G$  и  $k$  имели бы в этой системе удобные значения:  $c = 10^{10}$ ,  $\hbar = 10^{-30}$ ,  $G = 10^{-6}$  и  $k = 10^{-19}$  соответствующих практических единиц. Хотя система единиц, предложенная А. Грецки, вряд ли найдет применение в связи с недостаточной точностью эталонирования масс на основе гравитационной постоянной  $G$ , тем не менее сама идея является исключительно перспективной и могла бы реализоваться в будущем в рамках какой-либо другой естественной системы единиц, более приемлемой для квантовой метрологии, если бы не непреодолимые финансовые затраты и психологические проблемы, связанные с кардинальным изменением всех уже ставших привычными практических мер.

Выдвигалось еще одно возражение против естественных систем единиц: невозможность использования такого эффективного метода как анализ размерностей. На самом деле это касается лишь безразмерных естественных систем единиц, а в размерных естественных системах единиц применение анализа размерностей оказывается не

только возможным, но и исключительно продуктивным, так как сразу позволяет получать формулы, включающие фундаментальные постоянные (т.е. автоматически решается проблема, которая стала камнем преткновения для концепции анализа размерностей П. Бриджмена), см. п. 4.2.5.

Общий вектор эволюции естественных систем единиц (см. табл. 3.4.1) можно кратко выразить как переход от системы, в которой в качестве эталонов выбирались практические эталоны, а коэффициенты в законах (константы взаимодействий) принимались равными 1, к системе, в которой в качестве эталонов выбираются фундаментальные постоянные, являющиеся абсолютными масштабами (скорость света  $c$ , постоянная Планка  $\hbar$ , элементарный заряд  $e$ , постоянная Больцмана  $k$ ), а размерные константы взаимодействий выражаются через безразмерные константы взаимодействий и комбинации эталонных констант. Для перехода к единой естественной системе единиц не существует никаких принципиальных препятствий, за исключением открытия еще одной постоянной, имеющей фундаментальный статус и не являющейся комбинацией постоянных  $c$ ,  $\hbar$ ,  $e$  и  $k$ . Формально такой постоянной может быть и гравитационная постоянная  $G$  (т.е. возможно применение естественной системы единиц  $(c, \hbar, G, e, k)$  — планковской системы единиц, модифицированной в области электродинамики выбором элементарного заряда в качестве единицы заряда), однако не в пользу  $G$  говорит то, что она *не является естественным масштабом* никакой физической величины, в отличие от постоянных  $c$ ,  $\hbar$ ,  $e$  и  $k$ . Поэтому единую естественную систему единиц лучше записывать в виде  $(c, \hbar, E_o, e, k)$ , где  $E_o$  — некоторый фундаментальный масштаб энергии, на роль которого претендуют энергия конфайнмента кварков  $\Lambda_o$ , вакуумное среднее  $\eta$ , планковский масштаб  $E_{pl}$ , масштаб объединения взаимодействий  $E_{GUT}$ , а также какой-либо другой масштаб, фундаментальность которого выяснится в дальнейшем.

Таким образом, развитие естественных систем единиц по направлению к единой системе абсолютных эталонов Природы выявляет фактически тот же самый набор фундаментальных постоянных, что и развитие физических теорий по направлению к их объединению в единую физическую теорию.

# ЧАСТЬ 4

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ПРОГРАММАХ XX ВЕКА

### Глава 4.1

#### Программа фундаментальных физических постоянных.

##### 1. От попыток введения новых фундаментальных постоянных к переоткрытию планковских величин

После создания специальной теории относительности и квантовой теории, в которых, соответственно, скорость света  $c$  и постоянная Планка  $h$  играли фундаментальные роли, естественным было ожидать дальнейшее развитие физического знания на пути открытия новых фундаментальных постоянных. В разных физических теориях в связи с их условной полнотой существуют те или иные частные проблемы на границах или, тем более, за границами их применимости. Такого рода проблемы можно было попытаться разрешить путем введения новых фундаментальных постоянных в физические теории. Критерием правильности такого подхода должны служить как экспериментальные подтверждения новых физических эффектов, так и способность модифицированных теорий к объединению с уже развитыми теориями на пути создания полной единой физической теории.

**4.1.1. Абсолютное поле (М. Борн, Л. Инфельд).** Идея существования новой фундаментальной постоянной — максимально возможного значения напряженности поля была предложена в декабре 1933 г. М. Борном и Л. Инфельдом в рамках развитой ими нелинейной электродинамики <sup>1)</sup>. Первая статья была направлена Борном в "Nature" в июле 1933 г. из Гёттингена (*Born, 1933*). В ней Борн отметил, что создание квантовой электродинамики встретило серьезные трудности, и высказал предположение, что проблема кроется в точечной модели электрона, которая приводит к бесконечной собственной энергии электрона, в то время как он имеет конечную массу. Квантование электромагнитного поля, возможно, облегчится, по идее Борна, если обобщить электродинамику с учетом конечного радиуса электрона. Ранее нелинейное обобщение максвелловской электродинамики было осуществлено Г. Ми, однако его теория, лагранжиан которой в явном виде

<sup>1)</sup> *Born, 1933, 1933/34, 1934; Born, Infeld, 1933a,b, 1934a,b.*

зависел от электромагнитных потенциалов, противоречила наблюдениям. В том же 1933 г. М. Борн был вынужден эмигрировать из фашистской Германии, сначала в Доломитендорф (северная Италия), где он был лишен книг и научной периодики и занимался, по его воспоминаниям, только развитием нелинейной электродинамики, а затем — в Великобританию, где продолжил свои исследования в Кембридже в сотрудничестве с польским физиком Л. Инфельдом. В 1935 г. М. Борн работал по приглашению Ч. Рамана в Бангалоре (Индия). В этот период с ним велись переговоры о его переезде в СССР и одна из его индийских лекций на эту тему была переведена на русский язык (Борн, 1935).



М. Борн

Борн и Инфельд предлагали следующие лагранжианы для своей теории <sup>1)</sup>:  $L = \frac{1}{a^2} \sqrt{1 + a^2(B^2 - E^2)}$  (Born, 1933),  $L = \frac{1}{a^2} \sqrt{1 + a^2 F}$ , где  $F = \sum_{k>l} f_{kl}^2$  (Born, 1933/34),  $L = \frac{1}{a^2} \left\{ 1 - \sqrt{1 + a^2(B^2 - E^2)} \right\}$  (Born, Infeld, 1933a),  $L = b^2 \left\{ 1 - \sqrt{1 - b^{-2}(E^2 - B^2)} \right\}$  (Born, Infeld, 1933b),  $L = b^2 \left\{ \sqrt{1 + \frac{1}{b^2}(B^2 - E^2)} - \frac{1}{b^4}(B \cdot E)^2 - 1 \right\}$  (Борн, 1935). Все они в пределе слабых полей (т.е. при  $E \ll b$  и  $B \ll b$ ) переходили или прямо в лагранжиан максвелловской электродинамики  $L = \frac{1}{2}(B^2 - E^2)$  или отличались от него на некоторую постоянную. Таким образом, нелинейная электродинамика Борна-Инфельда переходила в пределе в классическую электродинамику, т.е. выполнялся принцип соответствия. Кроме этого, лагранжиан  $L = b^2 \left\{ 1 - \sqrt{1 - b^{-2}(E^2 - B^2)} \right\}$  по форме был аналогичен лагранжиану “механики Эйнштейна”:  $L = mc^2 \left\{ 1 - \sqrt{1 - v^2/c^2} \right\}$ .

Суть этой теории, как отметили Борн и Шредингер в 1935 г., заключалась во введении новой “универсальной постоянной”  $b$ , верхнего предела для напряженности электрического и магнитного полей, который достигался в центре электрона (Born, Schrödinger, 1935). Эту новую универсальную постоянную  $b = a^{-1}$  Борн и Инфельд назвали “абсолютным полем” (absolute field) (Born, Infeld, 1933a; Борн, 1935, с. 716) или “константой абсолютного поля” (Born, Schrödinger, 1935).

<sup>1)</sup> В своих статьях Борн и Инфельд обозначали магнитное поле разными символами, здесь везде использован символ  $B$ .

Значения  $b$  электрическое поле достигало в “центре” электрона, а само поле спадало по закону:  $E = \frac{e}{\sqrt{r_0^4 + r^4}} = \frac{b}{\sqrt{1 + (r/r_0)^4}}$ , где  $b = \frac{e}{r_0^2}$  (Борн и Инфельд использовали гауссову систему, т.е. выбирали в законе Кулона постоянную  $k_e = 1$ ). Радиус  $r_0$  Борн и Инфельд интерпретировали как “радиус электрона”, который в предположении электромагнитной природы массы, оказывался равным  $r_0 = 1,236 \frac{e^2}{mc^2}$ , т.е. был больше т.н. “классического радиуса” электрона в 1,236 раз. Тем самым, отмечал М. Борн, “новая теория поля устраняет трудности, связанные с «радиусом электрона» (или, что то же самое, с бесконечной собственной энергией электрона, рассматриваемого как точечный заряд)” (Born, 1933/34, p. 432)

М. Борн и Л. Инфельд рассматривали свою теорию лишь как шаг к созданию нелинейной квантовой электродинамики. “Конечно, эта теория является лишь предельным случаем квантовой электродинамики, подобно тому, как классическая механика есть предельный случай квантовой механики (принцип соответствия Бора)”, — отмечал М. Борн (Born, 1935, с. 717).

Параллельно с развитием нелинейной электродинамики Борна–Инфельда усилиями П.А.М. Дирака, В. Гейзенберга и др. развивалась и стандартная модель квантовой электродинамики. Квантовая электродинамика предсказывала и ряд новых эффектов, в том числе рассеяние света на свете. Как показали немецкие физики ученики В. Гейзенберга Г. Эйлер и Б. Коккель (Euler, Kockel, 1935), этот эффект можно было также представить и как следствие нелинейного поправочного члена в уравнениях Максвелла, соответствующего функции Лагранжа:

$$L = \frac{1}{2} (\mathbf{B}^2 - \mathbf{E}^2) - \frac{1}{90\pi} \left( \frac{e^3}{m^2 c^4} \right) \frac{1}{\alpha} \left\{ (\mathbf{B}^2 - \mathbf{E}^2)^2 + 7(\mathbf{B} \cdot \mathbf{E})^2 \right\}.$$

В этом пункте КЭД и теория Борна–Инфельда допускали сравнение. Разложение в ряд (в приближении слабых полей) функции Лагранжа теории Борна–Инфельда приводило к выражению:

$$L = b^2 \left\{ \sqrt{1 + \frac{1}{b^2} (\mathbf{B}^2 - \mathbf{E}^2) - \frac{1}{b^4} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{E})^2} - 1 \right\} = \\ = \frac{1}{2} (\mathbf{B}^2 - \mathbf{E}^2) - \frac{1}{8b^2} \left\{ (\mathbf{B}^2 - \mathbf{E}^2)^2 + 4(\mathbf{B} \cdot \mathbf{E})^2 \right\}.$$

Сравнение коэффициентов при вторых членах функции Лагранжа (на расхождение коэффициентов при третьем члене предлагалось “не обращать внимание”) приводило к установлению следующей связи между постоянной тонкой структуры, “абсолютным полем”  $b$  и другими атомными постоянными:

$$45\pi \left( \frac{m^2 c^4}{e^3} \right)^2 \alpha = 4b^2 \quad (4.1 1)$$

Эту связь М Борн интерпретировал как формулу для определения постоянной тонкой структуры  $\alpha^{-1} = \frac{45}{4} \pi (1,236)^4 = 82,4$  (т к поле  $b$  им уже было определено выше, исходя из предположения, что вся масса электрона имеет электромагнитную природу) Таким образом, значение  $\alpha$  оказалось равным  $1/82$ , что в 1,66 раза было больше экспериментального значения  $1/137$ , но, как отметил Борн, “имеет правильный порядок величины” Причину расхождения Борн видел с одной стороны в “произвольных предположениях, сделанных в теории Дирака–Гейзенберга”, а с другой стороны — в использованном им (Борном) способе вычисления “радиуса электрона” и “абсолютного поля”, основанного “на классическом вычислении, которое в действительности является неоправданной экстраполяцией классической теории на внутреннее строение электрона” (там же, с 728)

На самом деле такой подход “получения” постоянной тонкой структуры не был вполне оправдан, т к значение этой постоянной получалось не в рамках одной теории, а при согласовании двух теорий, построенных на разных основаниях, согласовании (причем — неполном), которое достигалось при значении  $\alpha = 1/82$ . Поэтому формула (4 1 1) определяет на самом деле не способ вычисления постоянной тонкой структуры, а лишь указывает, как можно было бы выразить “абсолютное поле” через другие фундаментальные постоянные —  $c$ ,  $h$ ,  $e$ ,  $m_e$  и постоянную тонкой структуры  $\alpha$  Возможно, что в дальнейшем следовало бы попытаться найти другую функцию  $E(r)$ , которая бы, с одной стороны, соответствовала закону Кулона при больших  $r$ , а с другой — соответствовала связи (4 1 1) Однако и в этом случае постоянная тонкой структуры фигурировала бы в такой теории лишь в качестве свободного параметра

Таким образом, с помощью гипотезы “абсолютного поля” М Борну и Л Инфельду удалось избавиться от проблемы бесконечности энергии поля точечного электрона, характерной для классической электродинамики Однако цена, заплаченная за это, оказалась неприемлемой, так как оказалось, что ее “нельзя было согласовать с квантовой механикой” (Борн, 1977, с 18) Кроме того, после открытия множества элементарных частиц массу электрона уже было трудно рассматривать как одну из фундаментальных постоянных типа  $c$  или  $h$ , поэтому формулу (4 1 1) вряд ли следует рассматривать как связь между равноценными постоянными В 1968 г Борн считал, что уже не следует рассматривать “электромагнитное поле и его источники обособленно друг от друга” (Борн, 1977, с 227) Тем не менее, несмотря на общую неудачу теории Борна–Инфельда, нелинейное обобщение классической электродинамики отражало общее направление развития физики квантовая электродинамика, как оказалось, также приводит к эффектам,



которые можно описать через нелинейные радиационные поправки к закону Кулона (см. *Ахиезер, Берестецкий*, 1981, с. 320–398). Это означает, что в принципе нелинейная электродинамика, основанная на некотором другом лагранжиане, чем лагранжиан теории Борна–Инфельда, может оказаться корректной теорией с большей областью применимости, чем классическая электродинамика, и использоваться в некоторых задачах наряду с КЭД.

**4.1.2. Фундаментальная (элементарная) длина (В. Гейзенберг, Г. Снайдер, И.Е. Тамм и др.).** Под фундаментальной (элементарной) длиной понимают гипотетическую фундаментальную постоянную размерности длины, которая определяет “пределы применимости фундаментальных физических представлений — теории относительности, квантовой теории, принципа причинности” (*Киржниц*, 1998). Это одна из двух гипотетических постоянных, удостоенных специальных статей в “Физической энциклопедии” (вторая — магнитный монополю).

После квантово-релятивистской революции, в которой в физической теории появились фундаментальные константы  $c$  и  $\hbar$ , как границы применимости классических теорий, в физике “родилась” программа третьей революции в физике, в ходе которой существующая физика, основанная на квантово-релятивистском формализме, должна быть модифицирована за счет учета третьей фундаментальной постоянной размерности длины. Это ожидание было основано, с одной стороны, на осознании принципиальных проблем, присущих современным физическим теориям, основанным на моделях точечных частиц и приводящих к появлению бесконечно больших величин (т.н. “расходимостям”), а с другой стороны, на проблеме объяснения “спектра” масс частиц, десятки которых были открыты в 1950-е гг.

С 1930-х годов физики начали вводить фундаментальные длины в физические теории или иные фундаментальные постоянные (кривизны, массы и др.), что означало и автоматическое введение соответствующих масштабов энергии или длины.

С конца 1930-х гг. В. Гейзенберг стал развивать идеи, связанные с введением новой универсальной постоянной размерности длины. В статье “Границы применимости современной квантовой теории” (1938) он отметил, что расходимости “препятствуют формулировке в замкнутой форме квантовой теории элементарных частиц, которая позволила бы объяснить явления, наблюдаемые в ядерной физике и в космических лучах”. “Это обстоятельство наводит на мысль о том, что в теории элементарных частиц существенную роль играет некая универсальная постоянная, имеющая размерность длины, и что все расходимости исчезнут, если должным образом учесть эту постоянную” (*Гейзенберг*, 1938, с. 272). При этом Гейзенберг сослался на несколько источников, в которых ранее затрагивались эти вопросы: выступление Н. Бора

на конференции по ядерной физике в Риме (1931) и на Сольвеевском конгрессе (1933), статьи М Борна, посвященные нелинейной электродинамике (1933, 1938), статья А. Марха (1936) и статья самого Гейзенберга (1938).

Характерно, что, предлагая новую универсальную постоянную, Гейзенберг прибегнул к историко-физической аргументации, указав на исторические параллели: “С этой точки зрения расходимости, возникающие в современной волновой теории, можно сравнить с расходимостью, некогда возникавшей в теории излучения абсолютного черного тела, устранить которую удалось лишь после того, как было понято, что в теорию излучения необходимо внести универсальную постоянную  $h$ ” (Гейзенберг, 1938, с. 272) <sup>1)</sup>.



В. Гейзенберг

Далее Гейзенберг обосновывает классический радиус электрона как фундаментальный масштаб (с точностью до порядка): “По данным ядерной физики универсальная длина по порядку величины сравнима с классическим радиусом электрона  $r_0 = 2,81 \cdot 10^{-13}$  см. Среди характерных проявлений универсальной длины можно назвать существование элементарных частиц с массой около  $\hbar/r_0 c$  (к их числу принадлежат нейтроны, протоны, тяжелые электроны), ядерные силы, действующие на расстоянии  $r_0$ , и, наконец, взрывообразные процессы при столкновении частиц с энергией, превышающей  $\hbar c/r_0$  в системе центра масс. В то же время можно предположить, что универсальная длина указывает границы применимости современной теории так же, как  $\hbar$  и  $c$  определяют границы применимости классической физики” (там же, с. 272). Гейзенберг указывает диапазон для истинного значения универсальной длины: “Вместе с тем необходимо подчеркнуть: утверждение о том, что универсальная длина имеет величину порядка классического радиуса электрона, оставляет сравнительно большой допуск для истинного значения универсальной длины. Величина  $r_0 = 2,81 \cdot 10^{-13}$  см в наших расчетах служит верхней границей для этой постоянной, и, возможно, было бы правильнее заменить  $r_0$  в 5 или 10 раз меньшей величиной. Неопределенность в выборе универсальной длины пока неизбежна” (там же, с. 272–273).

<sup>1)</sup>Здесь Гейзенберг подразумевает так называемую “ультрафиолетовую катастрофу”, связанную с законом Рэлея–Джинса. Логика развития физики могла идти именно так, как описал Гейзенберг, однако исторически планковский закон излучения возник на базе модернизации закона Вина, а потом появился закон Рэлея–Джинса со своей “ультрафиолетовой катастрофой” (см. гл. 1.2).

Основываясь на масштабе  $10^{-13}$  см, как фундаментальном, В. Гейзенберг в 1950-е гг. развил нелинейную квантовую теорию поля, получившую широкую известность. Подход Гейзенберга (Гейзенберг, 1957) был основан на нелинейном обобщении уравнения Дирака при предположении полевой сущности массы. Гейзенберг опирался на волновое уравнение, в котором член с массой был заменен на нелинейный член с коэффициентом  $l$ :

$$\gamma_\nu \frac{\partial \psi}{\partial x_\nu} - l^2 \psi (\psi^+ \psi) = 0,$$

где  $\psi_\nu$  — спинорная волновая функция, описывающая материю, знаком “+” Гейзенберг обозначал сопряженный оператор. Это уравнение Гейзенберг рассматривал как упрощенную модель, которая должна иллюстрировать “основные черты будущей адекватной теории, поскольку она описывает мир, состоящий из элементарных частиц, свойства которых качественно сходны со свойствами известных нам частиц” (там же, с. 225).

Исследования Гейзенберга вызвали дополнительный интерес, когда в 1957 г. к разработке этой теории на некоторое время подключился В. Паули. Зимой 1957/58 гг. Гейзенбергу и Паули удалось включить в теорию группу изотопического спина  $U_2$ , являющегося одним из основных свойств частиц, и тем самым продвинуться на пути единого описания элементарных частиц. Основные результаты были доложены Гейзенбергом в апреле 1958 г. на конгрессе, посвященном 100-летию со дня рождения Планка. Статьи Гейзенберга, а также некоторых физиков, развивавших это направление: Ф. Кортеля, Г. Миттера, Р. Асколи, Г. Дюрра, С. Шлидера, К. Ямадзак и др., были переведены на русский язык и опубликованы в 1959 г. (Нелинейная квантовая теория поля, 1959).

В рамках своей теории Гейзенбергу удалось численно вывести константы связи. Гейзенберг показал, что в его модели теории материи содержится квантовая электродинамика со значением константы связи  $\alpha_F = 1/267$  (Гейзенберг, 1957, с. 239). Гейзенберг так прокомментировал это: “Нельзя было ожидать точного совпадения теоретического значения постоянной тонкой структуры с ее эмпирическим значением, равным  $(1/137)$ , поскольку рассматриваемая здесь модель теории не является точной теорией; однако тот факт, что для  $\alpha_F$  получено правильное по порядку величины значение, указывает на то, что наша модель весьма близка к действительности” (там же).

В 1966 г. Гейзенберг обобщил свои исследования в монографии “Введение в единую полевую теорию элементарных частиц” (Heisenberg, 1966). При формулировании своей теории Гейзенберг опирался на “руководящие принципы” — “эмпирическую групповую структуру (законы сохранения) и релятивистскую причинность” (Гейзенберг, 1966, с. 45). Поскольку некоторые группы справедливы лишь приближенно, Гейзенберг проводит “различие между фундаментальными группами,

которые характеризуют исходный закон природы” (в качестве которых он принимал группу Лоренца и группу изоспина  $U_2$ ), и “приближенными симметриями, возникающими из динамики системы” (приближенными динамическими симметриями Гейзенберг считал группу  $SU_3$  и более высокие). “Наиболее сильным аргументом в защиту выбора такой линии раздела” Гейзенберг считал то, “что в случае  $U_2$  существует голдстоуновская частица (фотон), а для группы  $SU_3$  она отсутствует” (там же, с. 187). Основываясь на этих предположениях, а также на принципе простоты, Гейзенберг положил в основу “мировое уравнение”:

$$i\sigma^\nu \frac{\partial \chi(x)}{\partial x^\nu} + l^2 \sigma^\nu : \chi(x)(\chi^*(x)\sigma_\nu \chi(x)) : = 0,$$

где полевой оператор  $\chi(x) = \chi_{\alpha\beta}(x)$  — определялся как двухкомпонентный (вейлевский) спинор относительно преобразований Лоренца (первый индекс) и в изопространстве (второй индекс),  $\sigma^\nu = (1, \boldsymbol{\sigma})$  — матрицы Паули, символом  $::$  Гейзенберг обозначал произведение трех полевых операторов в одной пространственно-временной точке, а  $l$  — “произвольная константа размерности длины”, которую “можно принять просто за единицу длины” (там же).

С использованием четырехкомпонентного дираковского спинора  $\psi_\alpha(x)$  полевое уравнение Гейзенберга имело вид

$$\gamma_\nu \frac{\partial \psi}{\partial x^\nu} + l^2 \gamma_\nu \gamma_5 : \psi(\bar{\psi} \gamma^\nu \gamma_5 \psi) : = 0.$$

Это уравнение, как отметил Гейзенберг, “явилось первым нелинейным спинорным уравнением, которое было признано в качестве возможного базиса теории элементарных частиц” (там же, с. 47). Вид уравнения был “подсказан” Гейзенбергу формулами для слабого взаимодействия (там же, с. 181).

В рамках своей теории Гейзенберг получил значение постоянной тонкой структуры  $1/120$  “в удовлетворительном согласии с эмпирической величиной  $1/137$ ” (там же, с. 166). Касаясь ограничений, накладываемых универсальной длиной, Гейзенберг отметил: “К «локальной» области, пространственные размеры которой имеют порядок  $10^{-14}$  см или меньше, понятие вероятности неприменимо. Универсальную длину, которая в теорию входит через константу  $l$  или через массу протона, можно определить как такую длину, ниже которой квантовомеханическое понятие вероятности теряет силу” (там же, с. 187).

В 1947 г. Г. Снайдер предложил перейти к импульсному пространству постоянной кривизны с целью избавления от расходимостей (импульсное пространство использовал и Гейзенберг, переходя в него при расчетах из координатного) (Snyder, 1947a,b). При этом появлялась новая фундаментальная постоянная размерности длины. Снайдеру, действительно, удалось избавиться от расходимостей, возникающих при

интегрировании по импульсам, и его работа привлекла внимание теоретиков. Однако так называемые угловые расходимости остались и, возможно, из-за этого Снайдер перестал развивать свой подход. С конца 1940-х до начала 1970-х гг. это направление развивали Б.В. Медведев, Ю.А. Гольфанд, В.Г. Кадышевский и др. (Медведев, 1955; Гольфанд, 1959; Кадышевский, 1961a,b).

В 1950–60-е гг. последовательно отстаивал необходимость введения фундаментальной длины И.Е. Тамм. В 1964 г. в развитие идей Снайдера И.Е. Тамм в докладе на 12 Международной конференции по физике высоких энергий в Дубне, а затем на Международной конференции в Киото в 1965 г. выдвинул предложение об использовании кривого импульсного пространства при построении нелокальной квантовой теории поля (Тамм, 1964, 1965). В отличие от предшественников, рассматривавших импульсное пространство с постоянной кривизной, Тамм обосновал возможность применения искривленного импульсного пространства. Суть теории Тамма заключалась в предположении, что соотношения неопределенностей Гейзенберга должны быть распространены на измерения разных координат. Обоснование этого Тамм видел в том, что все более точное измерение каждой координаты должно быть связано с увеличением энергии, что в свою очередь приводит к образованию новых быстро распадающихся частиц на малых расстояниях  $10^{-13}$ – $10^{-14}$  см. Невозможность отличить первоначальные частицы от появившихся в результате распада “может наложить принципиальный предел точности измерения координат” (Тамм, 1975, т. 2, с. 219). В этом случае, как отмечал Тамм, “должно существовать соотношение неопределенностей между координатами и тогда в принципе невозможно построить последовательную теорию в координатном пространстве”. В теории Тамма фигурировали три неопределенные константы — фундаментальная длина  $l_0$ , степенной коэффициент в законе для суммы импульсов  $C$  и константа связи  $\lambda$ . При  $C > 3$  обеспечивалась сходимость интегралов, поэтому Тамм выбрал  $C = 4$  и получил соотношение между массой протона и фундаментальной массой:  $M_p = 0,01 M_0$  (там же, с. 225), т. е. фундаментальная масса оказывалась равной примерно 94 ГэВ, а длина соответственно  $2,1 \cdot 10^{-16}$  см. Интересно, что этот масштаб оказался близок к масштабам объединения электромагнитного и слабого взаимодействий. Развитие своей теории Тамм опубликовал в совместной работе с В.Б. Вологодским (Тамм, Вологодский, 1972), а популярное изложение представил в докладе, зачитанном А.Д. Сахаровым в 1968 г. на Общем собрании АН СССР в связи с вручением И.Е. Тамму Золотой медали им. М.В. Ломоносова (Тамм, 1968). Одной из принципиальных трудностей теории Тамма было отсутствие правильного предельного перехода к плоскому пространству. Эту проблему Тамм надеялся преодолеть путем выбора другого вида метрического тензора, однако не успел это осуществить.

Проблему элементарной длины затронул в 1968 г. А.Д. Сахаров в популярной статье “Существует ли элементарная длина” (Сахаров, 1968). Он подробно описал идеи Гейзенберга, связанные с введением универсальной длины порядка классического радиуса электрона (в единицах энергии  $\alpha^{-1}m_e \approx 70$  МэВ), показал, что спектр масс ряда частиц хорошо описывается в этих единицах:  $3/2$  ( $\mu$ -мезон),  $2$  ( $\pi$ -мезон),  $7$  ( $K$ -мезон),  $8$  ( $\eta$ -мезон),  $13,5$  (протон и нейтрон),  $16$  ( $\Lambda$ -гиперон),  $17$  ( $\Sigma$ -гиперон),  $19$  ( $\Xi$ -гиперон),  $1/137$  (электрон),  $0$  (фотон, нейтрино, гравитон) (там же, с. 387). Однако, как отметил Сахаров, были открыты еще десятки элементарных частиц, в том числе нестабильные с гораздо большими массами, поэтому выбор масштаба, связанного с электроном, “сейчас вряд ли убедителен”. Далее Сахаров рассматривает отклонения от законов квантовой электродинамики, в частности в связи с измерением магнитного момента частиц, и приходит к выводу, что “квантовая электродинамика безусловно справедлива для энергий и импульсов, меньших нескольких ГэВ” (там же, с. 393). Поэтому заключает Сахаров: “Совокупность теоретических и экспериментальных аргументов заставляет признать, что предположенная Гейзенбергом граница теории должна быть отодвинута в сторону гораздо более высоких энергий. Этот результат, хотя и негативный, представляется очень важным для современной физики элементарных частиц”. Далее Сахаров привел аргументы Е. Вигнера и М.А. Маркова в пользу планковского масштаба  $L_0$  и отметил: “Сейчас все больше физиков склоняются к тому, что именно грань  $L_0$  определит наиболее существенные перемены в наших представлениях. Все же очень важно убедиться, что никакая промежуточная между  $r = 2,8 \cdot 10^{-13}$  см и  $L_0 = 1,61 \cdot 10^{-33}$  см характерная длина не играет столь же фундаментальной роли” (там же, с. 395). Длину  $6 \cdot 10^{-17}$  см, связанную со слабым взаимодействием, рассматривал как фундаментальную В.Г. Кадышевский (1961а,б).

В конце 1930-х гг. также возникло направление, связанное с гипотезой о дискретном строении пространства-времени. В 1929 г. Р. Фюрт предположил, что соотношения неопределенностей Гейзенберга, возможно, указывают на дискретный характер физических величин (Fürth, 1929а,б). Попытки операторного представления координат предпринимали М.А. Марков (1940), Г. Снайдер (1947), И. Ватанабе (Watanabe, 1960). Другое направление связано с прямым внедрением дискретных математических методов: переход к уравнениям в конечных разностях рассматривали Амбарцумян, Иваненко (Ambarzumian, Iwanenko, 1930), Мёглих, Ромпе (1930-е гг.), Дарлинг, Цилзел, Шифф, Кальдиrola (1950-е гг.). Подробный обзор различных подходов представлен в монографии А.Н. Вяльцева и статье Д.А. Киржница (Вяльцев, 1965; Киржниц, 1966).

В конце 1960-х гг. С. Вайнберг, А. Салам и Ш. Глэшоу и др. определили общую стратегию объединения элементарных взаимодействий на основе групп симметрий, что привело к созданию стандартной модели (см. 2.2.4). При этом удалось избавиться от ряда

трудностей, связанных с бесконечными значениями физических величин. Революция, которую так долго ожидали многие физики в связи с появлением элементарной длины, не совершилась. Это отметил в 1995 году Д.А. Киржниц: “Важно добавить, что физика элементарных частиц обошлась без третьей (после создания теории относительности и квантовой теории) революции, которая, как ожидали многие, должна была привести к коренной ломке наших представлений о пространстве-времени, причинности и т.д. Выход из кризиса лежал скорее на реформистском пути — пути перехода от примитивных и ограниченных старых к более сложным и богатым содержанием новым моделям частиц и их взаимодействий” (см.: Сахаров, 1995, с. 396). Далее Киржниц отметил, что именно на планковских масштабах “пространственно-временная картина испытывает достаточно радикальные (хотя и не столь революционные, как думал Гейзенберг) изменения”: “проявляются скрытые на больших масштабах измерения пространства, входят в игру квантовые флуктуации координат и времени и т.п.”, поэтому именно планковский масштаб следует рассматривать как фундаментальный.

Однако наряду с планковским масштабом, в 1970-е годы существенную роль приобрели масштабы слабого и сильного взаимодействия. Характерный масштаб слабого взаимодействия — вакуумное среднее  $\eta = \sqrt{\frac{(\hbar c)^3}{\sqrt{2}G_F}} = 246,218 \text{ ГэВ}$ , согласно современным представлениям, определяет массы частиц:  $m = \lambda\eta$ . В квантовой хромодинамике появился спектр фундаментальных размерных постоянных  $\Lambda^{(n)}$  — энергии конфайнмента (удержания) кварков внутри элементарных частиц, где  $n$  — число типов (“ароматов”) кварков (особенно большое значение имеет масштаб  $\Lambda^{(5)} = 211(30) \text{ МэВ}$ , соответствующий широкому диапазону энергий). При этом стандартная модель объединения взаимодействий привела к близкому к планковскому масштабу  $10^{16} \text{ ГэВ}$ , при котором объединяются все три элементарные взаимодействия. Уже здесь, как считается, гравитация отвечает за “тонкую подгонку” объединения констант в одной точке, а на планковском масштабе должно существовать только одно фундаментальное взаимодействие.

Следует отметить, что численные значения планковских величин, например, масштаба энергии  $1,2209(1) \cdot 10^{19} \text{ ГэВ}$ , вычисляются при неявном предположении постоянности силы тяготения для любых, даже самых малых масштабов, что может оказаться не так (проверено для расстояний  $> 1 \text{ см}$ ). При росте  $G$  с уменьшением расстояния планковский масштаб может существенно пододвинуться к характерным масштабам элементарных частиц (и даже совпасть с одним из них), что было бы во многих отношениях предпочтительнее решения проблемы “больших чисел”. В этом случае планковский масштаб может “переползти” через так называемую “пустыню”, отделяющую его от характерных масштабов, определяющих массы частиц. В противном

случае (постоянности  $G$ , т. е. линейности закона тяготения для любых самых малых масштабов) перед физикой будет стоять задача объяснения столь сильного различия между силами гравитационного и элементарных взаимодействий и появления “больших чисел” типа:  $m_{пл}/\eta = 4,9586(1) \cdot 10^{16}$ , где  $m_{пл}$  — планковская масса,  $\eta$  — вакуумное среднее, определяющее массы частиц.

**4.1.3. Открытие планковских величин как границ применимости современных физических теорий.** Планковские величины (длина, время, масса, энергия, температура и т. д.) не представляют (по крайней мере до сих пор) существенного значения для метрологии, но, как оказалось, имеют исключительную важность для теоретической физики как *границы применимости современных физических теорий*. История планковских величин, особенно в связи с пионерскими работами М.П. Бронштейна, подробно проанализирована Г.Е. Гореликом <sup>1)</sup>.

Еще в 1916 г. А. Эйнштейн отмечал, что “квантовая теория должна модифицировать не только максвелловскую электродинамику, но также и новую теорию гравитации” <sup>2)</sup>. То же он высказал в 1918 г.: “Нам кажется, что построение усовершенствованной квантовой теории должно повлечь за собой и видоизменение теории тяготения” <sup>3)</sup>. Это, очевидно, неявно подразумевало создание  $sGh$ -теории. В 1918 г. А. Эддингтон в “Докладе о релятивистской теории гравитации” охарактеризовал три физические постоянные  $c$ ,  $h$  и  $G$  как “фундаментальные константы природы” (“fundamental constants of nature”) и предположил, что они определяют “фундаментальную единицу длины” (“fundamental unit of length”) —  $4 \cdot 10^{-33}$  см, которая “должна быть ключом к некоторой существенной структуре” (Eddington, 1918, p. 91) В 1927 г. в совместной статье Г. Гамова, Д.Д. Иваненко и Л.Д. Ландау “Мировые постоянные и предельный переход” авторы представили концепцию эволюции физики в сторону единой теории, в которой постоянные  $c$ ,  $G$ ,  $h$  должны играть фундаментальную роль (Гамов, Иваненко, Ландау, 1928). В 1936 г. роль  $h^{1/2}c^{1/2}/G^{1/2}$  (т. е. планковской массы) как предела измеримости величин в релятивистской квантовой теории была установлена М.П. Бронштейном <sup>4)</sup>.

В дальнейшем планковские величины на некоторое время выпали из поля зрения теоретиков. Лишь с конца 1940-х гг. они были вновь независимо переоткрыты рядом ученых в связи с развитием квантовой гравитации и выяснением их роли как границ применимости общей теории относительности и релятивистской квантовой теории —

<sup>1)</sup> Горелик, 1983, гл 5, Горелик, Френкель, 1990, с 134–191, Gorelik, 1992.

<sup>2)</sup> Einstein, 1916; Эйнштейн, 1965/67, т. 1, с. 522.

<sup>3)</sup> Einstein, 1918, Эйнштейн, 1965/67, т. 1, с. 642.

<sup>4)</sup> Bronstein, 1936, S. 149, основная часть статьи репринтно воспроизведена в кн. Gorelik, Frenkel, 1994, p 175–182.



М. Осборном (1949), О. Клейном (1954–55), Дж.А. Уилером (1955), Е. Вигнером (1957) и др.

В 1950-е–60-е гг. различные ученые, работавшие как в релятивистской теории гравитации, так и в квантовой теории поля, не зная об идеях естественных единиц Дж. Стони и М. Планка, осознали важность планковских масштабов и масштаба Стони как границ применимости этих теорий. В 1949 г. М. Осборн показал, что принцип неопределенности накладывает ограничение для тел конечной массы на измерение кривизны пространства (*Osborne*, 1949). Причем нижним пределом для массы точечной частицы выступает именно планковский масштаб  $M \gg (hc/G)^{1/2} \approx 10^{-5} \text{ г}$  (*Осборн*, 1949, с. 278). Выше уже указывалось, что в 1954 г. Л.Д. Ландау, А.А. Абрикосовым и И.М. Халатниковым была выяснена роль масштаба энергии  $10^{27}$  эВ (т. е. масштаба Стони, который меньше планковского масштаба энергии в  $\sqrt{\alpha}$  раз), как гравитационной границы применимости КЭД. В 1950-е гг. роль планковской длины, как гравитационного предела применимости релятивистской квантовой теории, показал О. Клейн (*Klein*, 1954; 1955, 1956, 1957). В 1955 г. Дж.А. Уилер в статье “Геоны” доказал, что длина  $\sqrt{G\hbar/c^3}$  является квантовым пределом общей теории относительности (*Wheeler*, 1955). Это была планковская длина; в этот период Уилер, как и многие другие физики, еще не знал, что этот масштаб уже был введен ранее Планком (это следует из письма Дж.А. Уилера Г.Е. Горелику от 10 февраля 1981 г., см.: *Горелик*, 1983, с.104). В 1958 г. Г. Салекер и Е. Вигнер показали, что планковский масштаб определяет квантовый предел измеримости в ОТО (*Saleker*, *Wigner*, 1958). Эти же вопросы рассматривали Т. Редже и Б. де Витт<sup>1)</sup>. В 1950-е гг. ряд авторов предлагал различные варианты планковской системы единиц, не зная об оригинальной работе М. Планка. Роль Планка в установлении этих фундаментальных масштабов была восстановлена в 1957–58 гг. (возможно в связи с его 100-летним юбилеем) и нашла отражение в терминологии (термин “планковские величины” — “Planck values”).

Отметим следующие важные идеи, связанные с планковскими величинами.

**4.1.4. Предельная масса элементарных частиц и черных дыр (М.А. Марков, С. Хокинг).** Работы Дж. Уилера 1950-х гг., в которых он переоткрыл планковские величины, привлекли внимание теоретиков к роли гравитационного поля в микрофизике и роли планковских величин, как фундаментальных масштабов как микро- так и макрофизики. В 1964 г. Б. де Витт высказал предположение, что планковские длины автоматически появятся в квантовой теории поля, учитывающей гравитационные эффекты (*DeWitt*, 1964). В 1965 г. М.А. Марков предположил существование стабильных объектов, имеющих планковскую

<sup>1)</sup> *Regge*, 1958; *DeWitt*, 1962, 1964.

массу и назвал такие гипотетические частицы максимонами (Markov, 1965, Марков, 1965, 1966) Масса “максимонов” оказывалась предельной массой, ограничивающей массы элементарных частиц. Согласно этой концепции гравитационные силы доминируют на малых расстояниях, а сильное, слабое и электромагнитное взаимодействие возникают лишь в составных образованиях подобно силам Ван-дер-Ваальса в молекулярной физике. В 1969 г. М.А. Марков также рассматривал гипотетические объекты, имеющие характерные масштабы массы и длины Дж. Стони (т.е. образуемые из постоянных  $c$ ,  $G$  и  $e$ ), названные им “фридмонами” (Марков, 1969; 1970). Модели “фридмонов” и “максимонов”, а также особенности их взаимодействия с веществом, М.А. Марков в дальнейшем исследовал совместно с В.П. Фроловым, в частности они показали, что именно длина Стони  $e\sqrt{G}/c^2$  определяет минимальные размеры, в которые можно заключить заряженную частицу (Марков, Фролов, 1970; 1972). В 1979 г. ими была показана возможность образования гравитационно-связанных систем “максимонов” (Марков, Фролов, 1979).

В 1970-х годах С. Хокинг также отметил возможность существования гипотетических частиц планковской массы и образования ими сверхплотной материи на начальной стадии существования Вселенной (Hawking, 1971, 1972) и предположил, что планковская масса является предельной массой черной дыры (Hawking, 1974, 1975). И. Пригожин и И. Стенгерс считали, что “планковская масса определяет тот самый порог, выше которого частица обретает свойства черной дыры” (Пригожин, Стенгерс, 1994, с. 230)

**4.1.5. Предельная плотность и кривизна (М.А. Марков).** В 1982 г. М.А. Марков с целью решения проблемы сингулярности коллапсирующей Вселенной предположил, что существует универсальный закон природы, согласно которому значение плотности материи ограничено планковским масштабом (Марков, 1982). Марков модифицировал правую часть эйнштейновского закона тяготения путем введения новой фундаментальной постоянной — предельной плотности материи, являющейся комбинацией “универсальных констант”  $c$ ,  $\hbar$  и  $G$ :

$$\rho_o = \frac{c^5}{G^2 \hbar} \approx 10^{94} \text{ г/см}^3.$$

Фактически эта величина — “планковская плотность”, т.е. плотность в планковской системе единиц, хотя формально такого рода величину сам М. Планк и не вводил. Модифицированный закон тяготения выглядит согласно М.А. Маркову так:

$$R_{\mu}^{\nu} - \frac{1}{2} R \delta_{\mu}^{\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu}^{\nu} \left[ 1 - (\rho/\rho_o)^{2n} \right] - \Lambda (\rho/\rho_o)^{2n} \delta_{\mu}^{\nu},$$

где  $n \geq 1/2$ .

В случае малых плотностей это уравнение переходит в обычное эйнштейновское уравнение тяготения:  $R_{\mu}^{\nu} - \frac{1}{2} R \delta_{\mu}^{\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu}^{\nu}$ . А при приближении к предельной плотности — в уравнение де Ситтера:  $R_{\mu}^{\nu} - \frac{1}{2} R \delta_{\mu}^{\nu} + \Lambda \delta_{\mu}^{\nu} = 0$ , описывающее мир без материи. Это позволяло избежать сингулярностей как в начальном состоянии, так при гравитационном коллапсе Вселенной.

Марков рассматривал закон предельной плотности материи (энергии) как “универсальный закон”, который “должен выполняться для всех полей” (там же, с. 152). Следовательно, должны модифицироваться и уравнения для других полей, в т.ч. для электромагнитного, которые “должны быть нелинейными”. Марков отметил “некоторую аналогию” развиваемых им идей с нелинейной электродинамикой Борна-Инфельда.

Гипотезу предельной плотности материи М.А. Марков развивал и в последующих статьях и докладах: на конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.А. Фридмана (Ленинград, 1988); на Англо-советском семинаре (Москва, 14 мая 1990 г.); на Первой сахаровской конференции по физике (Москва, 1990) и др. <sup>1)</sup>

В 1994 г. М.А. Марков выдвинул также идею постепенного ослабления гравитационного взаимодействия с увеличением плотности массы (Марков, 1994). При этом гравитационная постоянная в теории тяготения заменялась на функцию  $G = G_0 \Psi\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)$ , где  $\rho_0$  — предельное максимальное значение плотности масс; при  $\rho \rightarrow \rho_0$ ,  $\Psi \rightarrow 0$ . При такой модификации уравнения Эйнштейна достигалась остановка коллапса Вселенной при планковских масштабах.

М.А. Марков также обсуждал другой возможный вариант модификации уравнения тяготения Эйнштейна, связанный с введением предельной кривизны в левую часть уравнения Эйнштейна.

**4.1.6. Максимальная температура (А.Д. Сахаров).** В 1965 г. А. Пензиасом и Р. Вильсоном было открыто остаточное космическое радиоизлучение, подтвердившее горячую модель Вселенной. Перед учеными встала проблема изучения ранней Вселенной, для которой были характерны большие плотности и температуры. В 1966 г. А.Д. Сахаров, один из создателей отечественной термоядерной технологии, анализируя закономерности поведения “фотонного газа” при высоких плотностях, характерных для ранней Вселенной, показал, что в результате учета гравитационного взаимодействия фотонов, при плотностях (концентрации) фотонов порядка “гравитационной единицы”  $n_0 = \approx c^{9/2} \hbar^{-3/2} G^{-3/2} = 2,4 \cdot 10^{98} \text{ см}^{-3}$  рост плотности энергии фотонов  $\epsilon$  начинает постепенно замедляться. В результате при плотности фотонов  $n_0$  достигается максимум производной  $d\epsilon/dn$  и, соответственно,

<sup>1)</sup> Markov, 1983a,b; Марков, 1986; 1987.

температуры. Максимальное значение температуры оказывается равным

$$T_0 = k^{-1} c^{5/2} \hbar^{1/2} G^{-1/2} = 1,42 \cdot 10^{32} \text{ град.}$$

“ $T_{\text{макс}}$  порядка  $T_0$  следует рассматривать как абсолютный максимум температуры для любого вещества, находящегося в равновесии с излучением”, — отмечал А.Д. Сахаров (Сахаров, 1966а, с. 217). Впрочем, отметил Сахаров, “приведенное рассуждение, конечно, может оказаться несостоятельным при необходимости пересмотра основных принципов или основных представлений физики при  $n \sim n_0$ ”, т. е. при планковских масштабах (там же).

Спустя полгода Сахаров поместил популярное изложение своей статьи в “Природе” (Сахаров, 1966b), в которой также привел как максимально возможную температуру  $10^{32}$  градусов. “Существенно, — отметил Сахаров, — что такой вывод действителен не только для того единственного случая, когда все вещество Метагалактики находилось в сверхплотном состоянии, а для любого отдельного сгустка вещества и излучения такой плотности” (там же, с. 361). Сахаров также понимал, что этот вывод связан с экстраполяцией законов термодинамики и теории относительности на область сверхплотностей и сверхтемператур: “Однако надо сделать одну важную оговорку. Хотя законы термодинамики представляются наиболее общими и фундаментальными положениями физики, нельзя быть уверенным, что они, как и другие основные принципы, останутся действительными при таких плотностях и температурах. Установление абсолютного максимума температуры может иметь смысл лишь до того предела, до которого сохраняется само понятие температуры, энтропии и пространственно-временных величин, с которыми оперирует современная физика” (там же).

Фактически Сахаров оперировал с планковскими величинами — температурой и длиной. (Отличие связано лишь с использованием Сахаровым и другими учеными второй половины XX в. в определении планковских величин постоянной  $\hbar$  вместо  $h$ ). В этих работах Сахарова ссылки на Планка в связи с “максимальной температурой” и “гравитационной единицей” отсутствовали (возможно, он переоткрыл их для себя, как и многие другие ученые), но появились в последующих работах (в статье “Элементарная длина” (1968) и др.).

В 1995 г. Д.А. Киржниц в комментарии к изданию научных работ Сахарова отметил, что согласно современной инфляционной модели Вселенной “вывод о существовании максимальной температуры неизбежен”, однако механизм появления  $T_{\text{макс}}$  иной и  $T_{\text{макс}} \ll T_0$  (Сахаров, 1995, с. 218).

Помимо этого, изучался вопрос существования максимального ускорения и была установлена его связь с сахаровской максимальной температурой излучения <sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> *Caianello*, 1981; *Brandt*, 1983, *Caianello*, *Landt*, 1985; *Massa*, 1985

## Глава 4.2

### Программа фундаментальных физических постоянных.

#### 2. Постоянные $c$ , $\hbar$ и $e$ в макроскопических квантовых эффектах

Если какие-либо физические постоянные являются фундаментальными (абсолютными эталонами), то и их комбинации также соответствуют неким фундаментальным количествам (квантам) соответствующих физических величин (с точностью до безразмерных множителей). Теперь уже ясно, что прямой путь к формулам макроскопических квантовых эффектов лежал через метод анализа размерностей при рассмотрении постоянных  $c$ ,  $\hbar$  и  $e$  как фундаментальных. Уже в 1920–30-е гг. можно было на основе анализа размерностей выявить те физические величины, размерности которых являются комбинациями действия, скорости и электрического заряда (это магнитный поток, проводимость, сопротивление и магнитный заряд, а также коэффициент в законе Кулона) и целенаправленно искать квантовые закономерности, связанные с этими физическими величинами (т.е. характерные масштабы  $e^2/\hbar$ ,  $\hbar c/e$ ,  $e^2/\hbar c$  с точностью до безразмерных множителей). Этот путь, если бы был реализован, мог бы привести к более раннему открытию квантования магнитного потока и квантового эффекта Холла. Однако основным препятствием на этом пути было широкое использование гауссовой системы единиц, в которой единица электрического заряда выбирается так, что  $e^2 \equiv \alpha \hbar c$ . Это приводило к ошибочным представлениям у ряда крупнейших физиков о якобы невозможности одновременной фундаментальности постоянных  $c$ ,  $\hbar$ ,  $e$  и гипотезам о редукции  $e^2$  к  $\hbar$  и  $c$ , или, наоборот,  $\hbar$  к  $e^2$  и  $c$  (подробнее см.: *Томилин*, 2001). С другой стороны, метрологи не только никогда не утверждали подобного, но и предлагали соответствующие системы единиц, которые и оказались, в конце концов, базовыми для квантовой метрологии.

**4.2.1. Квант магнитного заряда (П.А.М. Дирак).** Специальная теория относительности, опирающаяся на кинематическое истолкование релятивистских преобразований, полностью прояснила смысл магнитного поля как релятивистской добавки к обычному электрическому полю, возникающей в результате движения заряженной частицы. Таким образом окончательно утвердилась асимметрия источников поля: в природе существуют электрические заряды  $q$  — источники электрического поля  $\mathbf{E}$ , напротив, аналогичных изолированных источников магнитного поля не существует, магнитное поле  $\mathbf{B}$  (его также называют магнитной индукцией) есть поле, порождаемое движущимся электрическим зарядом. Отсутствие источников магнитного поля выражается

формулой  $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$ . Магнитное поле, в отличие от электрического, не совершает работы над зарядом, его действие приводит лишь к изменению направления импульса частицы.

Однако в 1931 г. П.А.М Дирак, основываясь на соображениях симметрии, высказал идею существования изолированных магнитных зарядов (*Dirac*, 1931; *Дирак*, 1931). В качестве аргумента Дирак использовал принцип красоты, которому отвечала симметричная форма уравнений Максвелла с источниками электрического и магнитного зарядов. Ранее Дирака аналогичные формулы для потенциала магнитного полюса были предложены С.А. Богуславским в 1929 г. (*Толкачев, Томильчик*, 1990).

Первоначальной целью Дирака, как он сам позже отметил, было вывести значение постоянной тонкой структуры  $\alpha \cong 1/137$  (*Дирак*, 1978, с. 189) Однако эта цель сама по себе была утопичной: постоянная тонкой структуры не характеризует соотношение между электрическим и магнитным полем, она характеризует силу электромагнитного взаимодействия в целом и является свободным параметром и в классической и в квантовой электродинамике. Дирак также формулировал свою цель как получение численного значения элементарного заряда  $e$ , так как он полагал формулу  $e^2 = \alpha \hbar c$  фундаментальной, в то время как она имеет такой вид только в гауссовой системе единиц. Естественно, что Дираку не удалось вывести значение постоянной тонкой структуры. Позже он отметил, что “по этой причине мои доводы представлялись мне неудачными и я в них разочаровался” (там же, с. 189). Однако формулы, связывающие кванты электрического и магнитного заряда, которые получил Дирак, можно было интерпретировать как доказательство другого важного экспериментального факта: *квантования электрического заряда*. Именно так Дирак и представил свое исследование при публикации. Кратко результат Дирака представляется обычно таким образом: *если существует квант магнитного заряда, то электрический заряд должен квантоваться*.

Дирак получил следующие формулы, связывающие кванты электрического и магнитного зарядов:

$$\frac{eg}{\hbar c} = \frac{1}{2} n, \quad (4.2.1)$$

$$e_0 g_0 = \frac{1}{2} \hbar c, \quad (4.2.2)$$

$$g_0 = \frac{1}{2} \alpha^{-1} e_0 \approx \frac{137}{2} e_0. \quad (4.2.3)$$

В самом деле, из формулы (4.2.1) следует квантование электрического заряда при любом ненулевом значении магнитного заряда  $g$ .

Поскольку переход от второй формулы к третьей был осуществлен Дираком с использованием формулы  $\alpha = \frac{e_0^2}{\hbar c} \cong \frac{1}{137}$ , справедливой

только в гауссовой системе единиц (например, в системе Лоренца-Хевисайда, широко применяемой ныне в КЭД и физике высоких энергий  $\frac{e_0^2}{\hbar c} = 4\pi\alpha \cong \frac{4\pi}{137}$ ), то, очевидно, что эти две дираковские формулы *не могут быть универсальными одновременно*. Отметим, что Дирак даже в 1960-е годы был все еще уверен в универсальности формулы  $\alpha = \frac{e_0^2}{\hbar c} \cong \frac{1}{137}$  для любых систем единиц, что привело его к абсурдному заключению о нефундаментальности постоянной Планка  $\hbar$  и принципа неопределенности Гейзенберга (Дирак, 1963, с. 574). Какая же из этих формул Дирака является универсальной?

На первый взгляд такой выглядит формула (4.2.2), после Дирака она была получена неоднократно самыми разными способами. Однако, эта формула получена в гауссовой системе единиц, где все поля наделяются одной размерностью. Нетрудно понять, что в общем случае между полями **D** и **V** существует *размерный* коэффициент, который выбирается произвольно. Из-за этого этот же размерный коэффициент неизбежно должен присутствовать и в этих формулах. Таким образом, все эти формулы не могут иметь универсального характера. Это подтверждается, например, тем, что, как видно из статьи Ю. Швингера, условие квантования Дирака имеет несколько другой вид при использовании *рационализированных* (лоренц-хевисайдовских) единиц электрического заряда (Schwinger, 1966, p. 1091; 1975, p. 3105):

$$eg/4\pi = \frac{1}{2} n\hbar c. \quad (4.2.4)$$

(Помимо этого, Швингер рассмотрел модифицированный вариант сингулярности полей, который привел к удвоенному значению кванта магнитного заряда по сравнению с дираковским.)

Интересно, что С. Коулмен, также использовавший рационализированные электрические единицы получил все же формулу Дирака (4.2.1), а не Швингера (4.2.4) (Коулмен, 1981). Это связано с тем, что он использовал стандартную нерационализированную формулу для магнитного поля **V**.

Таким образом оказывается, что формула (4.2.1) прямо зависит от выбора коэффициента в формуле для магнитного поля, а формула (4.2.3) вдобавок зависит еще и от выбора коэффициента в формуле для электрического поля (т.е. от выбора единиц электрического заряда).

На этих формулах были основаны оценки массы магнитных монополей, экспериментальные поиски которых в течение второй половины XX века так и не увенчались успехом. Следует отметить, что имеет смысл анализировать только такие физические формулы, вид которых не зависит от выбора единиц измерения тех или иных физических величин. К сожалению, в электродинамике до сих пор пока не перешли

к такого рода системе единиц и продолжают использоваться системы, нарушающие основные принципы метрологии. Поэтому истинное значение идеи Дирака (т. е. возможная справедливость или принципиальная ошибочность) не может быть понято в рамках существующих систем единиц, поскольку в этих системах коэффициенты в формулах не универсальны, а носят конвенциональный характер, обусловленный конкретным выбором единиц электромагнитных величин. Именно в силу этого формулы (4.2.1)–(4.2.3) нельзя рассматривать как *универсальные* и делать на их основе конкретные предсказания. Повидимому, коэффициент в формуле (4.2.3) произволен, а само введение кванта магнитного заряда носит фиктивный характер.

**4.2.2. Квант магнитного потока (Ф. Лондон).** В 1948 г. немецким физиком-эмигрантом Ф. Лондоном (1900–1954), работавшим в США, крупным ученым, специалистом в области низких температур и сверхпроводимости, создателем вместе со своим братом Г. Лондоном первой макроскопической теории сверхпроводимости, был предсказан эффект квантования магнитного потока в сверхпроводящем кольце с током (*London, 1948, p. 570; London, 1950, p. 151–152*). В 1953 г. идея квантования магнитного потока была поддержана норвежским физико-химиком Л. Онсагером на Международной конференции по теоретической физике в Книто (*Onsager, 1953*).

Суть эффекта заключается в следующем. Замкнутый неодносвязный проводник (например, кольцо) помещается в магнитное поле, которое индуцирует в проводнике ток. При переходе к низким температурам (проводник погружается в жидкий гелий) кольцо становится сверхпроводящим и “захватывает” часть внешнего магнитного поля, соответствующую дискретным значениям магнитного потока:  $\Phi = nhc/2e = n\Phi_0$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ), где  $c$ ,  $h$  и  $e$  — фундаментальные физические постоянные: скорость света, постоянная Планка и элементарный заряд. Этот сверхпроводящий ток и магнитный поток сохраняются бесконечно долго и при выключении внешнего поля; образуется структура, напоминающая магнит.

Величина  $\Phi_0 = hc/2e = 2,06783372(18) \cdot 10^{-7}$  гаусс  $\cdot$  см<sup>2</sup> (СГСЭ) называется квантом магнитного потока (в системе СИ  $\Phi_0 = h/2e = 2,06783372(18) \cdot 10^{-15}$  Вб, формулы в СИ и СГС отличаются из-за того, что в этих системах единиц используются понятия магнитного поля, отличающиеся на постоянную  $c$ ). Сверхпроводящий ток — это



Фриц Лондон



коллективное явление, создаваемое частицами (парами электронов с противоположными спинами), находящимися в одном состоянии (фазовая когерентность). Макроскопическая дискретность связана с тем, что электроны при изменении внешних условий переходят в другое квантовое состояние не по отдельности, а все сразу.

Первоначально предсказанная Лондоном величина кванта потока была  $\Phi_0 = hc/e$ , так как Лондон исходил из того, что сверхпроводящий ток создается электронами. Лишь в 1950-е гг. была принята модель сверхпроводящего тока, создаваемого спаренными электронами с противоположными спинами и имеющими общий заряд  $2e$ . Это предположение легло в основу микроскопической теории сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера (1957). После ее создания стало ясно, что в формулах макроскопических теорий сверхпроводимости под зарядом носителей тока  $e$ , который ранее отождествлялся с зарядом электрона, следует понимать заряд куперовской пары  $2e$ . Отсюда вытекала необходимость корректировки формул путем замены  $e$  на  $2e$ . Такое предположение в отношении эффекта квантования магнитного потока, а именно, что квантом магнитного потока может являться именно величина  $\Phi_0 = hc/2e$ , а не  $\Phi_0 = hc/e$ , было высказано в 1959 г. Л. Онсагером в частной беседе с У.М. Фэрбенком на конференции по сверхпроводимости в Кэмбридже (Англия) (см.: *Deaver, Fairbank, 1961*).

В июне 1961 г. две группы экспериментаторов — Б.С. Дивер и У.М. Фэрбенк (Стенфордский ун-т, Калифорния, США), и Р. Долл и М. Нёбауэр (Баварская Академия наук, Германия) объявили об открытии квантования магнитного потока (*Deaver, Fairbank, 1961; Doll, Nöbauer, 1961*). Эксперименты носили исключительно тонкий характер. Сам квант магнитного потока очень мал и чтобы действительно зарегистрировать квантование магнитного потока необходимо было работать со слабыми магнитными полями и кольцами, имеющими как можно меньшую площадь. Чтобы создать такие проводники Долл и Нёбауэр напыляли на кварцевую нить тонкий слой металла (свинца). В результате получался проводник цилиндрической формы диаметром 10 микрон. Этот проводник подвешивался перпендикулярно

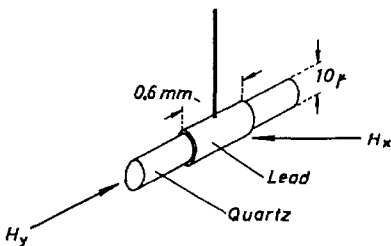


Рис. 4.2.2а. Схема установки Долла и Нёбауэра

на другую кварцевую нить и по ее закручиванию при подаче дополнительного магнитного поля можно было судить о захваченном магнитном потоке (см. рис. 4.2.2а). Дивером и Фэрбенком такой же оловянный полый цилиндр диаметром около 2 микрон приводился в колебательное движение, что индуцировало в окружающей регистрирующей системе токи, величина которых

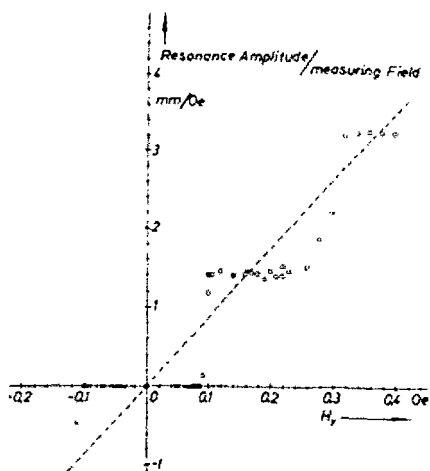


Рис. 4.2.2б. Результаты Р. Долла и М. Нёбауэра

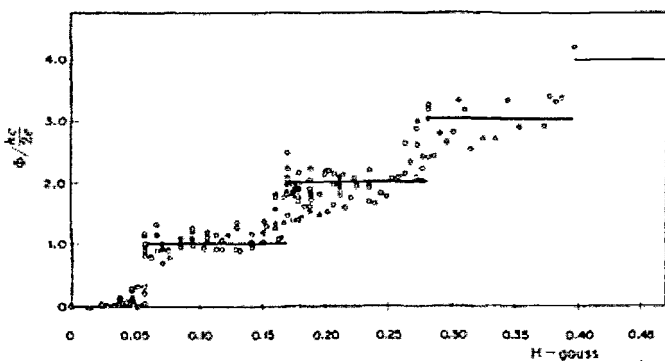


Рис. 4.2.2в. Результаты Б.С. Дивера и У.М. Фэрбенка

зависела от величины захваченного кольцом магнитного потока. Эксперименты показали, что поле, меньшее определенного порогового значения, вообще не захватывается, при его превышении захватывается 1 квант потока, соответствующий величине  $hc/2e$ ; при превышении следующего порога захватывается два кванта потока и т. д., т. е. полностью подтвердили теоретическое предсказание Ф. Лондона 1948 г. с корректирующим множителем 1/2 для кванта магнитного потока (см. рис. 4.2.2б, в). Одновременно это стало первым экспериментальным подтверждением теории Бардина-Купера-Шриффера. Третья пара экспериментаторов — Дж. Меркьюри и Л. Вант-Холл, по-видимому из-за тонкости эффекта его зарегистрировать в 1961 г. не смогла (они использовали 1 мм кольца) (*Mercereau, Vant-Hall, 1961*).

Статьи Дивера и Фэрбенка и Долла и Нёбауэра были опубликованы в одном номере “Physical Review Letters” от 15 июля 1961 г. вместе с двумя статьями теоретиков, объясняющими этот эффект — Л. Онсагера (*Onsager, 1961*) и Н. Байерса и Ч. Янга, которые также работали в Стенфордском университете и получили возможность познакомиться с результатами Дивера и Фэрбенка еще до их публикации (*Byers, Yang, 1961*). Все четыре статьи были представлены в журнал в течение нескольких дней с 16 до 19 июня 1961 г., причем в статье Долла и Нёбауэра, представленной 19 июня, отмечалось, что статья была доложена на конференции по сверхпроводимости, прошедшей с 15 по 17 июня в Нью-Йорке. Возможно, эта конференция и побудила всех участников озаботиться о немедленной публикации. Это свидетельствовало о том, что открытие уже состоялось и началась борьба за приоритет и потенциальную Нобелевскую премию, которую это открытие несомненно заслуживало. Однако в отличие от последовавших затем открытий других макроскопических квантовых эффектов — Джозефсона и квантового эффекта Холла, Нобелевской премией оно отмечено не было. Это произошло, очевидно, по формальным причинам: сам Ф. Лондон, предсказавший эффект, к этому времени уже умер, а оставшихся претендентов оказалось слишком много (по положению о присуждении Нобелевской премии она не дается посмертно и дается не более чем трем ученым одновременно). Ранее Ф. Лондон за создание макроскопической теории сверхпроводимости дважды выдвигался на Нобелевскую премию — в 1937 г. и 1942 г., причем в первый раз его номинировал наш соотечественник физико-химик С.З. Рогинский (см.: *Блох, 2005*, с. 154). Если бы Лондон дождался экспериментального подтверждения своего эффекта, то весьма велика вероятность, что он получил бы Нобелевскую премию в 1961 г. одновременно с Л.Д. Ландау.

В 1931 г. П.А.М. Дирак выдвинул гипотезу о существовании кванта магнитного заряда (магнитного монополя). Его формула для квантования магнитного заряда одновременно означала *квантование магнитного потока* вокруг магнитного заряда. В самом деле, Дирак указывает (см.: *Дирак, 1931*, с. 395; *Монополь Дирака*, с. 51), что полный поток магнитного поля вокруг монополя равен  $\Phi = 4\pi g = 2\pi n \frac{\hbar c}{e}$ , т. е.  $\Phi = n \frac{\hbar c}{e} = n\Phi_0$ , а это и есть формула квантования магнитного потока при  $\Phi_0 = \frac{\hbar c}{e}$ . Таким образом, Дирак предвосхитил эффект квантования магнитного потока (хотя и вокруг специфического топологического объекта), причем квантом магнитного потока фактически выступала та же самая величина, что и у Ф. Лондона. Отметим, что между квантом магнитного заряда и квантом магнитного потока в данном случае выполняется соотношение:  $4\pi g_0 = \Phi_0$ , где множитель  $4\pi$  связан с интегрированием по замкнутой поверхности вокруг магнитного заряда.

Не исключено, что вспомогательное фиктивное понятие магнитного заряда, которое применяется в электромагнетизме, дополненное идеей его квантованности в соответствии с формулой Дирака, может быть продуктивным в ряде задач, и приводить к правильным результатам. Однако в целом в электромагнетизме существует глубокая связь между квантованием электрического заряда и квантованием магнитного потока, а не магнитного заряда — фиктивной физической величины.

**4.2.3. Постоянные  $\hbar$  и  $e$  в эффекте Джозефсона.** В 1961 г. Б. Джозефсон, молодой студент-дипломник, работавший в Мондовской лаборатории Королевского общества в Кембридже под руководством Б. Пиппарда, предсказал новые эффекты в сверхпроводниках, разделенных узкой несверхпроводящей прослойкой, связанные с квантовомеханическим туннелированием спаренных электронов (куперовских пар) через потенциальный барьер (*Josephson*, 1962). Во-первых, это постоянный сверхпроводящий ток через несверхпроводящую прослойку при нулевой разности потенциалов на переходе — стационарный эффект Джозефсона. Этот ток (джозефсоновский ток) устанавливает определенную разность фаз (от 0 до  $\pi/2$ ) двух когерентных состояний сверхпроводников, расположенных по разную сторону от потенциального барьера:  $I = I_0 \sin \delta$ . Во-вторых, при подаче на контакт некоторого постоянного напряжения  $V$  между сверхпроводниками генерируется высокочастотный переменный ток сверхпроводимости с частотой, определяемой соотношением Джозефсона:  $\hbar\omega = 2eV$  (нестационарный эффект Джозефсона).

Уже в 1963 г. Ф. Андерсоном и Дж. Роуэллом был обнаружен стационарный эффект Джозефсона, а С. Шапиро получил косвенное подтверждение нестационарного эффекта Джозефсона (*Anderson, Rowell*, 1963; *Shapiro*, 1963). В 1965 г. отечественные ученые И.К. Янсон, В.М. Свистунов и И.М. Дмитренко наблюдали генерацию СВЧ-излучения на джозефсоновском переходе (*Янсон, Свистунов, Дмитренко*, 1965). История открытия описывалась самим Джозефсоном в Нобелевской лекции, в статье Ф. Андерсона и др. (*Josephson*, 1973; *Anderson*, 1970).

Эффект Джозефсона позволил с большой точностью определить соотношение  $e/h = 2,41798940(21) \cdot 10^{14}$  Гц/В, и таким образом открыл прямой путь к созданию стандарта единицы напряжения (вольта).

Постоянная  $K_J = \frac{2e}{h}$  называется постоянной Джозефсона.

**4.2.4. Кванты проводимости и сопротивления (К. фон Клитцинг).** В 1980 г. К. фон Клитцингом (Германия) был открыт квантовый эффект Холла (КЭХ) — квантования в двумерном электронном газе при низких температурах и сильном магнитном поле проводимости  $\sigma_H = \nu e^2/h$  и сопротивления  $R_H = h/\nu e^2 = 25812,80/\nu$  Ом (Нобелевская премия 1985 г.).

Экспериментальной работе К. фон Клитцинга предшествовали теоретическая работа Т. Андо, И. Мацумото и И. Уемура (*Ando, Matsumoto, Uemura, 1975*), в которой предсказывались эффекты квантования и фигурировали близкие формулы. Однако значение этой работы стало ясно лишь после открытия К. фон Клитцинга. С. Гирвин считает, что “экспериментальное открытие ЦКЭХ и ДКЭХ явилось сюрпризом и захватило теоретиков врасплох”<sup>1)</sup>. Степень влияния статей японских и советских ученых на исследования Клитцинга не вполне ясно. Известно, что Клитцинг знал работы японских ученых: в частности, в своей статье он сослался на статью Т. Андо 1974 г., но ссылки на статью Андо–Мацумото–Уемура 1975 г. у Клитцинга появились лишь в последующих публикациях. На значение статьи Андо и др. было указано в официальном пресс-релизе Комитета по Нобелевским премиям, где исследования Андо и др. японских ученых были оценены как важный шаг (“important step”). Это же отмечали А.Я. Шик и Ю.В. Шмарцев в предисловии к сборнику переводов оригинальных работ (Квантовый эффект Холла, 1986), они также указали на важность статьи отечественных ученых Э.М. Баскина, Л.И. Магарилла и М.В. Энтина, в которой также обсуждались вопросы квантования проводимости (*Баскин, Магарилл, Энтин, 1978*).

Новым и неожиданным, что проявилось в результате экспериментального исследования Клитцинга по сравнению с предшествующими работами, было то, что квантование макроскопической проводимости является абсолютно точным эффектом и не требует идеальных условий (однородности магнитного поля, чистоты и правильной геометрии образцов).

Впервые плоские плато на холловских кривых были обнаружены К. фон Клитцингом и Т. Энглертом еще в 1978 г. и тогда они рассматривались как некие аномалии, которые не удавалось обосновать в рамках существовавших в то время теорий (*Englert, Klitzing, 1978*). Эти аномалии фон Клитцинг экспериментально исследовал в лаборатории сильных магнитных полей Института им. М. Планка в Гренобле в течение зимы 1980 г. и в ночь с 4 на 5 февраля 1980 г. получил “отчетливые холловские ступени”. Хотя тогда не удалось выполнить прецизионные измерения, как вспоминал фон Клитцинг, “именно тогда родилась мысль о квантовом эффекте Холла” (Квантовый эффект Холла, 1989, с. 12). В дальнейшем фон Клитцинг продолжил экспериментальное изучение обнаруженного им плато на холловских прямых в своей лаборатории в Вюрцбурге, а также при технической помощи Федерального физико-технического бюро (Брауншвейг). Исследования были проведены на разных образцах, которые предоставили Ж. Дорда (исследовательская лаборатория фирмы “Сименс”) и М. Пеппер (Кавендишская лаборатория). В результате К. фон Клитцингу удалось

<sup>1)</sup> Гирвин, 1987, с. 375; ЦКЭХ и ДКЭХ — целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла.

подтвердить “фундаментальное квантовое соотношение  $R_H = h/e^2i$ ” с точностью до  $10^{-5}$ .

Квантовый эффект Холла открыл возможность создания эталона сопротивления, а также более точного измерения постоянной тонкой структуры. Сама статья, в которой впервые было объявлено о квантовом эффекте Холла, была опубликована в “Physical Review Letters” за подписью трех авторов — К. фон Клитцинга, Ж. Дорда и М. Пеппера (получена 30 мая 1980 г.). Она была представлена именно как новый метод более точного определения постоянной тонкой структуры на основе измерения квантованного холловского сопротивления (*Klitzing, Dorda, Pepper, 1980*). Уже к 1983 г. экспериментальную точность эффекта квантования удалось довести до  $10^{-7}$ .

Важный топологический подход в понимании этого эффекта был предложен в 1981 г. Р. Лафлиным (лаборатория Белла, США) (*Laughlin, 1981*), согласно которому макроскопическая проводимость квантуется потому, что является топологическим инвариантом. Это направление развивалось Д.Дж. Таулессом (*Тулесс, 1987*, с. 113–126) и др.

Открытие ЦКЭХ, как отмечал С. Гирвин, “вызвало революцию в метрологии электрических величин”, а значит и фундаментальных постоянных (*Гирвин, 1987*, с. 371).

В 1982 г. Д. Цуи, Х. Штёрмером и А. Госсардом (лаборатория Белла, США) был открыт дробный квантовый эффект Холла:  $\sigma_H = (n/m)e^2/h$ , где  $n$  и  $m$  — целые числа. В 1998 г. Р. Лафлин, Х. Штёрмер и Д. Цуи получили Нобелевскую премию по физике (*Лафлин; Штёрмер; Цуи, 1998*).

**4.2.5. Возможны ли другие макроскопические квантовые эффекты?** Как видим, в макроскопических квантовых эффектах фигурируют различные комбинации постоянных  $c$ ,  $h$  и  $e$ . Суть предлагаемого подхода — выполнить анализ размерностей физических величин не в наиболее применяемых системах единиц типа *длина–время–масса (LTM)* или *длина–время–масса–ток (LTMI)*, а в системе *частота–скорость–действие–электрический заряд (FVSQ)*. Отметим, что именно в направлении такого рода системы единиц и развивается в настоящее время квантовая метрология. Причем, поскольку существуют естественные меры для скорости — скорость света  $c$ , действия — постоянная Планка  $h$ , электрического заряда — элементарный заряд  $e$ , то именно их и следует выбирать в качестве основных мер, наряду с четвертой единицей — некоторой частотой  $\nu$ . Таким образом, для анализа размерностей физических величин будем применять общую систему *FVSQ* и конкретную естественную систему единиц  $(c, h, e, \nu)$ . Ранее уже предлагались различные системы единиц, основанные на постоянных  $c$ ,  $h$  и  $e$  (см. п. 3.4.10), но для анализа размерностей они не применялись.

Распространено мнение, что переход к естественным системам единиц приводит к невозможности использования метода анализа размерностей, и это является одним из аргументов против применения естественных систем единиц. На самом деле, как отмечалось в предыдущей главе (см. 3.4.12), этот аргумент верен лишь по отношению к *безразмерным* физическим величинам, а не по отношению к естественным системам единиц вообще. При использовании фундаментальных постоянных в качестве эталонов именно они выполняют роль основных единиц измерения, и, следовательно, *составляют конкретные размерности физических величин*. Например, если мы выбираем в качестве мер сантиметр, грамм и секунду (система СГС), то именно они и составляют конкретные размерности всех физических величин в этой системе. В системе единиц ( $c, h, e, \nu$ ) размерности всех физических величин составляют именно постоянные  $c, h, e$ , а также частота  $\nu$ . Поэтому переход к естественным системам единиц не только не приводит к уничтожению размерностей физических величин, напротив, *размерности физических величин в такого рода системах приобретают фундаментальный характер*, так как их составляют фундаментальные физические постоянные.

Наличие размерностей у физических величин позволяет применять метод анализа размерностей. В ряде случаев, действительно, удобно использовать безразмерные величины, например, тогда, когда физические уравнения уже известны и проблема заключается лишь в их решении. Переход к безразмерным естественным системам единиц, например к системе ( $c = 1, \hbar = 1, e = 1, m_e = 1$ ) эквивалентен замене физических величин  $v/c \rightarrow \tilde{v}$ ,  $S/\hbar \rightarrow \tilde{S}$ ,  $Q/e \rightarrow \tilde{Q}$ ,  $m/m_e \rightarrow \tilde{m}$  и т. д.

Проанализируем размерности всех физических величин механики и электродинамики в системах  $LTM$  (например, гауссова система) и  $LMTI$  (например, СИ), а также общей системе  $FSVQ$  и конкретной системе ( $c, h, e, \nu$ ) (см. табл. 4.2.1). Формально перейти к системе  $FSVQ$  из системы  $LMTI$  (например, СИ), можно, например, осуществляя замену  $L \rightarrow VF^{-1}$ ,  $T \rightarrow F^{-1}$ ,  $M \rightarrow SFV^{-2}$ ,  $I \rightarrow QF$ , а далее в конкретную систему ( $c, h, e, \nu$ ) с помощью замен  $F \rightarrow \nu$ ,  $V \rightarrow c$ ,  $S \rightarrow h$ ,  $Q \rightarrow e$ .

Из таблицы видно, что размерности физических величин в системах СИ и СГС не несут существенной информации о физических законах. В системе ( $c, h, e, \nu$ ), напротив, *сама структура формул размерностей физических величин соответствует формулам известных макроскопических квантовых эффектов* (с точностью до безразмерных множителей) (см. табл. 4.2.1).

Например, размерность энергии в общей системе частота–скорость–действие–заряд ( $FSVQ$ ) равна  $\dim(E) = \text{действие} \times \text{частота} = SF$ , а при выборе конкретных мер  $c, h, e$  и  $\nu$ :  $\dim(E) = h\nu$ . Аналогично размерность импульса в системе ( $c, h, e, \nu$ ) равна  $\dim(p) = \frac{h\nu}{c}$ .

Таблица 4.2.1. Размерности физических величин и физические законы

Физическая величина	Размерность в системе LTM (СГС)	Размерность в системе LMTI (СИ)	Размерность в системе FSVQ	Размерность в системе (c, h, e, ν)	Физический закон
Длина, $l$	$L$	$L$	$V/F$	$c\nu^{-1}$	
Время, $t$	$T$	$T$	$F^{-1}$	$\nu^{-1}$	
Частота, $\nu$	$T^{-1}$	$T^{-1}$	$F$	$\nu$	
Скорость, $v$	$\frac{L}{T}$	$\frac{L}{T}$	$V$	$c$	Предельная скорость взаимодействий $v = c$
Ускорение, $w$	$\frac{L}{T^2}$	$\frac{L}{T^2}$	$VF$	$c\nu$	
Масса, $m$	$M$	$M$	$\frac{SF}{V^2}$	$\frac{h\nu}{c^2}$	Соотношение Комптона $m = \frac{h\nu}{c^2}$
Плотность, $\rho$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{SF^4}{V^5}$	$\frac{h}{c^5} \nu^4$	
Энергия, $E$	$\frac{ML^2}{T^2}$	$\frac{ML^2}{T^2}$	$SF$	$h\nu$	Квантование энергии излучения (Планк, Эйнштейн) $E = h\nu$
Импульс, $p$	$\frac{ML}{T}$	$\frac{ML}{T}$	$\frac{SF}{V}$	$\frac{h\nu}{c}$	Квантование импульса света (Эйнштейн, Штарк) $p = \frac{h\nu}{c}$
Сила, $F$	$\frac{ML}{T^2}$	$\frac{ML}{T^2}$	$\frac{SF^2}{V}$	$\frac{h\nu^2}{c}$	
Момент импульса, $L$ Действие, $S$ Спин	$\frac{ML^2}{T}$	$\frac{ML^2}{T}$	$S$	$h$	Квантование момента импульса (Бор) $L = nL_0 = n\hbar$
Плотность энергии, $\epsilon$	$\frac{M}{LT^2}$	$\frac{M}{LT^2}$	$\frac{SF^4}{V^3}$	$\frac{h\nu^4}{c^3}$	



Продолжение таблицы 4.2.1

Физическая величина	Размерность в системе LTM (СГС)	Размерность в системе LMTI (СИ)	Размерность в системе FSVQ	Размерность в системе (c, h, e, v)	Физический закон
Электрический заряд, $q$	$\frac{M^{1/2}L^{3/2}}{T}$	$TI$	$Q$	$e$	Квантование электрического заряда раг (Стони) $Q = nq_0 = ne$
Коэффициент в законе Кулона, $k_e$	безразм.	$\frac{ML^3}{I^2T^4}$	$\frac{SV}{Q^2}$	$\frac{hc}{e^2}$	Формула для постоянной $k_e$ : $k_e = \alpha \frac{\hbar c}{e^2} = \frac{\alpha \hbar c}{2\pi e^2}$
Электрическое поле $\mathbf{E}$	$\frac{M^{1/2}}{TL^{1/2}}$	$\frac{ML}{IT^3}$	$\frac{SF^2}{QV}$	$\frac{h}{ec} \nu^2$	
Магнитное поле $\mathbf{B}$	$\frac{M^{1/2}}{TL^{1/2}}$	$\frac{M}{IT^2}$	$\frac{SF^2}{QV^2}$	$\frac{h}{ec^2} \nu^2$	
Электрическое поле $\mathbf{D}$	$\frac{M^{1/2}}{TL^{1/2}}$	$\frac{TI}{L^2}$	$\frac{QF^2}{V^2}$	$\frac{e}{c^2} \nu^2$	
Магнитное поле $\mathbf{H}$	$\frac{M^{1/2}}{TL^{1/2}}$	$\frac{I}{L}$	$\frac{QF^2}{V}$	$\frac{e}{c} \nu^2$	
Напряжение, потенциал, $U, \phi$	$\frac{M^{1/2}L^{1/2}}{T}$	$\frac{ML^2}{IT^3}$	$\frac{SF}{Q}$	$\frac{h\nu}{e}$	Эффект Джозефсона $U = \pi \frac{\hbar\nu}{e} = \frac{h\nu}{2e}$
Электрический ток, $I$	$\frac{M^{1/2}L^{3/2}}{T^2}$	$I$	$QF$	$e\nu$	Квантовое туннелирование $I = e\nu$
Сопротивление, $R$	$\frac{T}{L}$	$\frac{ML^2}{I^2T^3}$	$\frac{S}{Q^2}$	$\frac{h}{e^2}$	Квантовый эффект Холла $R_0 = \frac{h}{e^2}$
Проводимость, $\sigma$	$\frac{L}{T}$	$\frac{I^2T^3}{ML^2}$	$\frac{Q^2}{S}$	$\frac{e^2}{h}$	Квантовый эффект Холла $\sigma_0 = \frac{e^2}{h}$

Продолжение таблицы 4.2.1

Физическая величина	Размерность в системе LTM (СГС)	Размерность в системе LMTI (СИ)	Размерность в системе FSVQ	Размерность в системе (c, h, e, ν)	Физический закон
Емкость, $C$	$L$	$\frac{I^2 T^4}{ML^2}$	$\frac{Q^2}{SF}$	$\frac{e^2}{h\nu}$	
Индуктивность, $L$	$\frac{T^2}{L}$	$\frac{ML^2}{I^2 T^2}$	$\frac{S}{Q^2 F}$	$\frac{h}{e^2 \nu}$	
Магнитное сопротивление, $R_m$	$\frac{L}{T^2}$	$\frac{T^2 I^2}{ML^2}$	$\frac{Q^2 F}{S}$	$\frac{e^2}{h} \nu$	
Магнитный поток, $\Phi$ "магнитная масса", $m$	$M^{1/2} L^{1/2}$	$\frac{ML^2}{IT^2}$	$\frac{S}{Q}$	$\frac{h}{e}$	Квантование магнитного потока (Лондон) $\Phi_o = \pi \frac{\hbar}{e} =$ $= \frac{h}{2e}$

Как видно, формулы для размерностей  $\dim(v) = c$ ,  $\dim(E) = h\nu$ ,  $\dim(p) = \frac{h\nu}{c}$  прямо соответствуют формулам для скорости света в вакууме  $v = c$ , энергии фотона  $E = h\nu$  и его импульса  $p = \frac{h\nu}{c}$ . Размерность массы в системе  $(c, h, e, \nu)$  равна  $\dim(m) = \frac{h\nu}{c^2}$ , что соответствует известному соотношению Комптона между массой частицы и ее длиной волны (частотой):  $\lambda = \frac{h}{mc}$ ,  $\nu = \frac{mc^2}{h}$ . Размерность кулоновской постоянной  $k_e$  в системе  $(c, h, e, \nu)$  равна  $\dim(k_e) = \frac{hc}{e^2}$ . В реальности же выполняется формула (2.2.3):  $k_e = \frac{\alpha}{2\pi} \frac{hc}{e^2} = \alpha \frac{\hbar c}{e^2}$ , где безразмерная постоянная тонкой структуры  $\alpha^{-1} \approx 137,03599911(46)$ . (Метод анализа размерностей, как известно, не позволяет дать значения *безразмерных* множителей).

Анализ размерностей в системе  $(c, h, e, \nu)$  таких электромагнитных физических величин, как напряжение  $U$ , ток  $I$ , сопротивление  $R$ , проводимость  $\sigma$ , магнитный поток  $\Phi$  приводит к следующим формулам:  $\dim(U) = \frac{h\nu}{e}$ ,  $\dim(I) = e\nu$ ,  $\dim(R) = \frac{h}{e^2}$ ,  $\dim(\sigma) = \frac{e^2}{h}$ ,  $\dim(\Phi) = \frac{h}{e}$ , которые прямо соответствует формулам макроскопических квантовых эффектов  $U = \frac{h\nu}{2e} = \pi \frac{\hbar\nu}{e}$  (эффект Джозефсона),  $R_o = \frac{h}{2e}$  и  $\sigma_o =$

$= \frac{e^2}{h}$  (квантовый эффект Холла),  $\Phi_0 = \frac{h}{2e} = \pi \frac{\hbar}{e}$  (эффект Лондона — квантования магнитного потока в сверхпроводящем контуре с током). Существование еще одного квантового эффекта, в котором выполняется формула  $I = e\nu$ , было предсказано К.К. Лихаревым и А.Б. Зориним (Likharev, Zorin, 1984a,b; Likharev, 1985).

Из таблицы видно, что некоторым физическим величинам, анализ размерностей которых мы выполнили, прямо соответствуют уже открытые квантовые эффекты, другим физическим величинам (напряженности электромагнитного поля, емкости, индуктивности, магнитному сопротивлению и т. д.), напротив, не соответствуют никакие известные квантовые эффекты. Возможны два варианта: 1) или соответствующие формулы  $E = \frac{h}{ec} \nu^2$ ,  $B = \frac{h}{ec^2} \nu^2$ ,  $C = \frac{e^2}{h\nu}$ ,  $L = \frac{h}{e^2\nu}$ ,  $R_m = \frac{e^2}{h} \nu$  и т. д. реализуются в уже открытых квантовых эффектах; 2) или существуют новые макроскопические квантовые эффекты, в которых и реализуются эти формулы (с точностью до безразмерных множителей).

Таким образом, анализ размерностей в системах единиц, основанных на постоянных  $c$ ,  $h$  и  $e$ , и, особенно, в системе  $(c, h, e, \nu)$  оказывается существенно более продуктивным, чем в практических системах СГС, СИ и др., позволяя получить целый ряд известных физических формул, а также, возможно, указать на существование некоторых новых эффектов. Это свидетельствует о предпочтительности систем единиц, основанных на постоянных  $c$ ,  $h$  и  $e$ . Развитие квантовой метрологии в конце XX в. привело к принятию в 1983 г. некоторого практического значения скорости света как точного и, как следует, очевидно, ожидать, приведет к принятию в ближайшем будущем также как точных практических значений постоянной Планка  $h$  и элементарного заряда  $e$  (см. 3.4.12), т. е. к установлению системы единиц, основанной именно на постоянных  $c$ ,  $h$  и  $e$ .

## Глава 4.3

### “Пифагорейская” программа обоснования численных значений фундаментальных постоянных

Принципы обоснования значений фундаментальных постоянных были рассмотрены во Введении. Напомним кратко, что задачей физики является обоснование безразмерных постоянных, проблемы же обоснования численных значений размерных постоянных принципиально не существует. Проблему обоснования значений размерных постоянных можно ставить лишь в той мере, в которой речь идет об обосновании безразмерных соотношений между ними (т. е. тех же безразмерных постоянных). В XX в. было открыто множество различных безразмерных постоянных, которые выступают в существующих теориях

в качестве независимых параметров и которые должны определяться в рамках единой физической теории. Наиболее важные из них это постоянная тонкой структуры (постоянная Зоммерфельда)  $\alpha_e^{-1} = 137,03599911(46)$ , отношение масс протона и электрона:  $m_p/m_e = 1836,15267261(85)$ , численные значения которых до сих пор не имеют принципиального физического обоснования. Число существующих размерных фундаментальных постоянных превышает число метрологически независимых постоянных, которых необходимо и достаточно для полного эталонирования единиц физических величин — пяти. Следовательно, должны быть еще открыты многие взаимосвязи между размерными постоянными. Очевидно, что такого рода взаимосвязи вытекают из фундаментальных принципов Природы, и, следовательно, их можно из них вывести. В XX в. получило распространение “угадывание” формул для вычисления тех или иных безразмерных постоянных или формул, связывающих размерные постоянные, без их какого-либо обоснования, которое можно охарактеризовать как “пифагорейскую” программу обоснования численных значений фундаментальных постоянных. Такой подход в принципе может быть продуктивным, если результат соответствует эксперименту и если при этом эти формулы удастся затем вывести из некоторых фундаментальных оснований (желательно, прямо из фундаментальных принципов), таким образом включив в физическую картину мира. Неизвестно, сколь часто физики прибегают к этому “оружию” на своей рабочей “кухне”, но в научные журналы обычно представляются результаты, как выведенные из тех или иных теоретических предположений дедуктивным способом.

**4.3.1. Генезис “пифагорейской” программы.** Первоначальным импульсом для развития “пифагорейской” программы в области обоснования значений физических постоянных был фантастический успех теории спектров, когда удалось свести все спектральные линии к простым формулам и открыть связь эмпирической постоянной Ридберга с другими более фундаментальными постоянными.

Поэтому появление в 1920-е гг. программы А. Эддингтона своеобразной арифметизации физики, построенной на представлении о целочисленности основных физических мировых параметров, было закономерным. Методологическая обоснованность этой программы была связана с *принципом простоты*. Эта программа оказалась удивительно продуктивной в конце XIX в. для химии (заряд, валентность), а в начале XX в. и для физики (квантовые числа). В области оснований математики также развивалась,



А. Эддингтон

наряду с другими программами (теоретико-функциональной программой К. Вейерштрасса и теоретико-множественной Г. Кантора) программа Л. Кронекера арифметизации математики — сведения всех математических теорий к арифметике, теории целых чисел. Широкую известность получил афоризм Кронекера: “Бог создал целые числа, все остальное — творение человека”. В конце 1910-х гг. прогресс в развитии атомной теории был достигнут выдвиганием квантовых постулатов и введением квантовых чисел — магнитного, орбитального и др., смысл которых был тогда еще не ясен. Именно в продуктивности этой своеобразной программы “арифметизации физики” А. Зоммерфельд увидел возрождение духа кеплеровских и пифагорейских идей. В 1919 г. в предисловии к первому изданию своей фундаментальной книги “Атомы и спектры” Зоммерфельд писал: “То, что мы слышим сегодня на языке спектров, и есть подлинная музыка сфер атомов, созвучие целочисленных отношений, одно из многих проявлений все возрастающего порядка и гармонии. <...> Все целочисленные закономерности спектральных линий и атомистики берут свое начало в конечном счете из квантовой теории. Она есть тот таинственный орган, на котором природа исполняет музыку спектров, и ее ритму подчиняется строение атома и ядра” (цит. по: Паули, 1948, с. 225).

В докладе 15 июля 1925 г. на открытом заседании Баварской академии наук А. Зоммерфельд охарактеризовал целые квантовые числа “как возрождение мистической веры пифагорейцев в гармонию сфер, определяемых целыми числами” и связал начало математической физики с теорией колеблющейся струны, построенной Пифагором на основе целых чисел (см.: Зоммерфельд, 1936, с. 112).

В докладе “Значение рентгеновских лучей для современного познания природы”, прочитанном в Киле 3 ноября 1925 г. по программе недели науки и искусства, Зоммерфельд отметил “удивительный поворот к арифметическому, целочисленному, которое совершила современная физика” (Зоммерфельд, 1925, с. 85). Зоммерфельд вновь вспомнил Кеплера в связи с развитием квантовой теории: “Вот Кеплеру бы дожить до современной квантовой теории! Он увидел бы осуществленной свою самую смелую юношескую мечту, но не в макрокосмосе небесных тел, а в микрокосмосе атома” (там же, с. 86). Оказавшись продуктивной на начальном этапе, эта программа арифметизации физики ведет, как точно уловил Зоммерфельд дух того времени, к возрождению пифагорейства в физике: “Рука об руку с этим поворотом к арифметическому возникло известное влечение современной физики к пифагорейской мистике чисел. Как раз исследователи, наиболее плодотворно работавшие в теоретической спектроскопии — Бальмер, Ридберг, Ритц, — были ясно выраженными приверженцами мистики чисел. Сознательно или бессознательно они в основу своих исследований ставили требование, чтобы закономерности для частот в спектре были столь гармоничны, столь эстетически просты, сколь это совместимо с экспериментальными данными; полученные результаты оправдали их

исходную точку зрения. Управляемые целыми квантовыми числами спектральные серии фактически по смыслу являются обобщениями древнего трезвучия лиры, из которого пифагорейцы еще 2500 лет назад выводили гармонию явлений в природе, а наши кванты действительно напоминают о той роли, которую, по-видимому играли целые числа у пифагорейцев, причем не в качестве некоего атрибута, а как сама суть физических явлений” (там же, с. 86). Однако уже в следующем — 1926 г. непонятные квантовые числа удалось интерпретировать как собственные значения уравнения Шредингера, тем самым дав твердое физическое обоснование (“здоровую основу”, как выразился А. Зоммерфельд позже: *Зоммерфельд*, 1936, с. 112) квантовым числам в рамках новой физической теории — волновой механики. Однако даже в способе объяснения квантовых чисел А. Зоммерфельд увидел аналогию с физическим объяснением музыкальных закономерностей пифагорейцев: “Квантовые числа появляются теперь совершенно таким же способом, как и целые числа при колебании струны, т. е. как следствие граничных условий” (там же, с. 112).

Рождение в 1928 г. умозрительной теории Эддингтона, основанной на идее целочисленности физических постоянных, было прямым развитием программы, оказавшейся достаточно продуктивной в предыдущий период развития науки. Возрождение пифагорейского духа в физике сформировало благоприятный “внутринаучный климат” для “произрастания” этой экзотической программы. С другой стороны, самой сути этой программы был благоприятен не только внутринаучный, но и “социокультурный климат” в 20-е–30-е гг. в Европе, связанный со стремлением к абсолютному порядку, достигаемому любой ценой на основе упрощения социальных отношений.

**4.3.2. Теория Эддингтона.** Теория Эддингтона началась с попыткой объяснения постоянной тонкой структуры  $\alpha \approx 1/137$  (современное значение  $\alpha = 1/137,03599911(46)$ ; в то время  $\approx 1/136$ ). Эта постоянная, характеризующая силу электромагнитного взаимодействия, была введена в физику в 1915 г. А. Зоммерфельдом и поэтому иногда называется *постоянной Зоммерфельда*. Еще до Эддингтона было сделано несколько попыток обосновать постоянную Планка  $h$  путем ее редукции к отношению  $e^2/c$ , где  $e$  выражалось в электростатических единицах (Дж. Джинс, Г.Н. Льюис и Э. Адамс)<sup>1)</sup>. С точки зрения современного знания это означало фактически предложение ими формул для постоянной тонкой структуры. Из формулы Джинса следовало, что постоянная тонкой структуры  $\alpha^{-1} = (4\pi)^2 = 157,91367$ , а формула Льюиса–Адамса давала существенно более точный результат для того времени:  $\alpha^{-1} = \frac{16\pi^3}{\sqrt[3]{15\pi}} = 137,34807$ .

<sup>1)</sup> *Jeans*, 1913; *Lewis, Adams*, 1914; о других попытках такого рода см.: *Томили*, 2001; *Kragh*, 2003а.

В 1920-е гг. численное значение постоянной тонкой структуры было известно еще недостаточно точно. Измерения А. Комптона показывали, что  $\alpha^{-1}$  близка к числу 135,9. В этот период некоторые физики, основываясь на принципе простоты законов природы, полагали, что это число действительно *может быть* целочисленным и равным 136. К их числу относились А. Эддингтон, А. Зоммерфельд и многие др.

В декабре 1928 г. А. Эддингтон в "Proceedings of Royal Society" опубликовал статью, в которой представил уравнение Дирака для движения электрона на основе 16-мерной геометрии (Eddington, 1928). В основе эддингтоновского подхода лежала интерпретация 4-х мерных матриц Дирака как 16-мерных векторов. В результате, как отметил М.П. Бронштейн, "получилась весьма стройная система геометрических отношений", а уравнение Дирака предстало в "весьма изящной и симметричной форме" (Бронштейн, 1930, с. 10–11). Оказалось, что для двух покоящихся электронов справедлив закон Кулона, в котором вместо квадрата заряда стояло отношение  $1/136 \cdot hc/2\pi$ , что Эддингтон интерпретировал как редукцию элементарного заряда к постоянным  $\hbar$  и  $c$ , и обоснование целочисленности значения постоянной тонкой структуры (Eddington, 1929). Число 136 соответствовало числу независимых элементов симметричной матрицы  $16 \times 16$ , которое Эддингтон интерпретировал как *число степеней свободы электрона*:

$$\alpha^{-1} = \frac{n^2(n^2 + 1)}{2} = 136 \quad \text{при } n = 4,$$

где число 4 соответствовало размеру матриц Дирака.

Уже в 1930 г. когда выяснилось, что постоянная Зоммерфельда не 136, а близка к 137, Эддингтон изменил свою теорию, просто прибавив еще одну степень свободы электрону (Eddington, 1930). В течение нескольких лет гипотеза Эддингтона казалась приемлемой. Однако в конце 1930-х гг. после согласования значений постоянных, получаемых разными методами, все таки стало окончательно ясно, что постоянная  $\alpha^{-1}$  — число *нецелое*. Это привело Эддингтона и его последователей к корректировке первоначальной формулы. В посмертно изданной книге "Фундаментальная теория" (название принадлежало Э. Уиттекеру, подготовившему книгу к изданию) Эддингтон сохранил первоначальную точную связь между постоянными  $e^2/\hbar c = 1/137$ , однако при этом ему пришлось вводить различие между истинными величинами постоянных и их измеряемыми значениями, которое определялось так называемым "числом Бонда"  $\beta = 137/136$  в соответствующей степени ( $1/12$  или  $1/24$ ) (Eddington, 1949, p. 65)

Кроме формулы для постоянной тонкой структуры Эддингтон предложил в 1930-е гг. формулы для вычисления массы протона, массы мю-мезона (мезотрона, по терминологии того времени), магнитного момента протона и гравитационной постоянной (Eddington, 1932, 1936, 1940a, 1940b). Ряд своих формул Эддингтон представлял как формулы для вычисления размерных постоянных. На самом деле во всех этих формулах Эддингтона подразумевалось вычисление отношений масс,

постоянной тонкой структуры, отношения гравитационной и электромагнитной сил взаимодействия протона и электрона и т. д., т. е. безразмерных постоянных.

Отношение к теории Эддингтона было неоднозначным. Эддингтон имел в 1920-30-е гг. громадный авторитет как выдающийся астрофизик, открывший закон, связывающий светимость и массы звезд, разработавший теорию строения звезд, как один из первых активных сторонников общей теории относительности Эйнштейна, подтвердивший в 1919 г. экспериментально ее следствия (измерение отклонения лучей вблизи Солнца), а также как автор ряда книг по теории относительности, “исключительную ценность” которых признавал сам А. Эйнштейн, которыми восхищался А. Зоммерфельд (см.: *Эйнштейн*, 1926, с. 238; *Зоммерфельд*, 1926, с. 237) и другие ученые и которые переводились на многие иностранные языки, в том числе на русский. А. Эддингтон был не только знатоком эйнштейновской теории относительности, но сам участвовал в развитии эйнштейновской программы единой теории поля, создав аффинную единую теорию поля (1921) (см.: *Визгин*, 1985). Авторитет Эддингтона, в частности, отражался в том, что он был также членом многих академий наук и научных обществ, в том числе с 1923 г. — иностранным членом-корреспондентом АН СССР. С 1938 г. до своей смерти в 1944 г. он возглавлял Международный астрономический союз. Весомость заслуг Эддингтона заслонила длительное время умозрительную шаткость его концепции.

Среди тех, кто первоначально поддерживал “пифагорейские” идеи Эддингтона, был А. Зоммерфельд, которому, как крупнейшему специалисту по теории атома и спектров, несомненно, этот подход был близок к сердцу. Как вспоминал В. Гейзенберг, в 1920-е годы получил распространение афоризм, рождение которого Гейзенберг связывал с именем В. Паули: “Если целые числа — иди к Зоммерфельду” (*Гейзенберг*, 1968, с. 297). О “большой популярности этого изречения среди молодых физиков” упоминал и сам В. Паули, не указывая, однако, его автора (*Паули*, 1948, с. 255). Известно лишь, что это было перефразирование распространенной в то время в Германии рекламы “Если очки — иди к Рунге”. Кроме того, Зоммерфельд верил в гармонию природы, которую он видел именно в целочисленных закономерностях, и в постижение этой гармонии: “И когда сегодня в путанице линий спектра железа мы наводим порядок, то нами руководит твердая вера в целочисленность и гармонию явлений природы. <...> Природа действительно математически закономерна, внутренне целочисленна и разумна. Человеческие ум и руки действительно в состоянии путем расчетов и экспериментов постичь не зависящие от нас реальности. В этом заключена, если хотите, доля метафизической веры” (*Зоммерфельд*, 1925, с. 87). В лице Зоммерфельда идея Эддингтона попала на благодатную почву. В 1929 г. Зоммерфельд охарактеризовал идею Эддингтона, как “смелую догадку”, основанную на “убедительных доводах, восходящих к Дираку”. Далее он оценивает ее еще более высоко:



это — “гениальная догадка” и пишет, что высказаться за идею Эддингтона его заставляют два довода: опытное подтверждение значения 136 (согласно опытам того времени — 135,9) и “исключительная красота его предположения и удовлетворение, которое оно приносит”. Таким образом основаниями для принятия теории Эддингтона для Зоммерфельда были *ее соответствие опытным данным и принцип красоты*. Касаясь последнего, Зоммерфельд специально оговаривается: “Пусть простят теоретика, который склонен ставить эстетический критерий на одни весы с экспериментами; но открытия последних 20 лет в области теории относительности и квантов часто показывали, что природа отдает предпочтение и математически наиболее совершенному решению, которое является и объективно верным” (Зоммерфельд, 1929, с. 20). Далее Зоммерфельд отмечает, что “если Эддингтон прав”, то это бы “открыло неслыханные перспективы в упрощении физической картины мира”. Таким образом, Зоммерфельд руководствовался и *принципом простоты*.

Еще один аргумент в пользу эддингтоновской теории был связан с тем, что это была “теория геометрического объяснения”, что было, очевидно, привлекательно с точки зрения программы геометризации физики (Борн, 1933, с. 109). Через два года — в 1935 г. в известной лекции “Таинственное число 137”, Макс Борн уже высказался определенно против спекулятивных идей Эддингтона: “Я лично никогда не мог понять эту теорию. Она мне кажется мистической” (Борн, 1935, с. 725). там же он отметил, что нет никаких оснований считать  $\alpha^{-1}$  целым числом. В этой же лекции Борн представил собственные соображения получения значения  $\alpha^{-1}$  в рамках своей нелинейной электродинамики.

На рубеже 1920–30-х гг. эксперименты показывали существенное отличие от целого числа значения постоянной  $\alpha^{-1} \approx 137,2 \div 137,3$ , что не свидетельствовало в пользу теории Эддингтона. Второе дыхание теория Эддингтона получила в середине 1930-х годов, после того, как произошло уточнение значения постоянной тонкой структуры и ее обратная величина оказалась значительно ближе к целому числу 137, чем считалось до этого. В этот достаточно короткий период идеи Эддингтона снова оказались в центре внимания, их рассматривали как возможные А. Зоммерфельд, П.А.М. Дирак, Р.Т. Бёрдж и др. Так, Р.Т. Бёрдж рассматривал точное значение 137 как возможное для уточнения атомных постоянных (Birge, 1935, 1937). А. Зоммерфельд высказался в пользу идей Эддингтона в письме к А. Эйнштейну: “Теперь смелый путь вычислений Эддингтона кажется мне наиболее обещающим из-за полученных им количественных результатов (не только постоянная тонкой структуры, но и магнитный момент протона и протон-протонное взаимодействие). Но никто не может понять этот путь” (Зоммерфельд, 1937, с. 243). Последняя оговорка Зоммерфельда весьма примечательна — предположения, лежащие в основании эддингтоновских рассуждений носили явный спекулятивный характер.

В этом же 1937 г. П.А.М. Дирак отметил, что рассуждения Эддингтона “не всегда строги”, но “в случае малых чисел (обратной величины постоянной тонкой структуры  $hc/e^2$  и отношения массы протона к массе электрона) они, видимо, представляются в основном правильными” (Дирак, 1937а, с. 335). Однако, размышляя над эддингтоновскими построениями, для численных значений т. н. *больших чисел* в физике Дирак придумал совершенно другое объяснение на основе простой идеи о их взаимосвязи, что сразу объясняло их огромные порядки, так как они оказывались связанными с космологическим временем, выраженным в атомных единицах (см. гл. 4.4).

В книге “Атомная физика” (переработанное издание “Современной физики”) Макс Борн, отметив привлекательность идеи Эддингтона, охарактеризовал ее как гипотезу *ad hoc*, не имеющую эвристической силы: “Идея целочисленности привлекательна, и, по-видимому, ее подтверждают позднейшие эксперименты, дающие число 137,030 ( $\pm 0,016$ ), что очень близко к целому. Все же теория Эддингтона не смогла предсказать некоторых новых явлений (таких, как существование различных типов мезонов, эффекта Лэмба–Резерфорда и др.) и, кроме того, слишком фантастична, чтобы быть приемлемой” (Борн, 1935/63, с. 196). Г. Вейль отметил в 1949 г.: “Что бы ни думал по этому поводу (обоснования значения постоянной тонкой структуры — К.Т.) Эддингтон, такой теории до сих пор нет” (Вейль, 1949, с. 347).

Если для западных ученых была характерна мягкая критика теории Эддингтона, учитывая его авторитет как астрофизика, то советские физики, напротив, проявляли жесткость по отношению к ней и не стеснялись в выражениях. В СССР стали стандартными обвинения Эддингтона в идеализме и “возрождении пифагорейского культа числа” (Июффе, 1949, с. 356). Появился даже термин “эддингтоновщина”, который использовали и ведущие отечественные физики. Спекулятивные идеи Эддингтона, действительно, представляли вполне заслуженный объект критики, тем самым оказывая, в период существования идеологизированного государства и кампании по борьбе с низкопоклонством перед западной наукой, полезную услугу советским физикам, нуждавшимся в критикабельной теории, разработанной на Западе. Со спокойной совестью теорию Эддингтона критиковали, защищая теорию относительности и квантовую теорию от попыток идеологического погрома, С.И. Вавилов, В.А. Фок, Л.Д. Ландау, И.Е. Тамм и др. Интересно, что в критике эддингтоновских идей нашли общий язык, как крупнейшие советские физики, так и советские философы, такие, как Э. Кольман (Кольман, 1938).

На подготовительных заседаниях Всесоюзного совещания физиков 1949 г., на котором теория относительности и квантовая механика могли при неблагоприятном стечении обстоятельств разделить участь генетики, разгромленной в августе 1948 г., ведущие советские физики твердо заняли позицию отстаивания этих теорий, одновременно

противопоставляя им идеи Эддингтона, Джинса как “идеалистические” Именно такого рода теории и были отданы идеологическому “минотавру” как характерные образцы “физического” идеализма Так, И Е Тамм, заявив, что наиболее вредное влияние на науку оказывают “идеалистические направления неокантианского и неопифагорейского типа”, охарактеризовал теорию Эддингтона, как “совершенно абсурдную попытку путем мистики чисел найти закономерности природы” (Тамм, 1949, л 160) Обоснование Эддингтоном числа частиц во Вселенной Тамм назвал “совершенно нелепым” Далее Тамм отметил, что ряд западных ученых высказывает спекулятивные идеи в духе Эддингтона “Если эти конкретные попытки Эддингтона являются уже достоянием истории, они уже разрушены, то тем не менее существует его вредное влияние на целый ряд работ зарубежных физиков Мне попала немецкая книга Рослина, вышедшая в 1948 г, где он берет вначале число условий, затем число предпосылок, а их сумма равна числу элементарных частиц во Вселенной В журнале “Physical Review” появились в течение года четыре заметки американского физика Уитмера, который вскрывает мистический смысл в числе  $42 < >$  Такого рода чистая эддингтоновщина встречается в ряде работ и оказывает на конкретные работы наиболее вредное влияние” (там же, л 162–163)

Несмотря на поддержку ряда крупных ученых, уже в 1930-е гг стало ясно, что идеи Эддингтона слишком спекулятивны, чтобы претендовать на какую-либо научную значимость Уже на рубеже 1920-х–30-х гг молодые физики теоретики, такие как В Паули и М П Бронштейн критически оценили идеи Эддингтона Так, Паули в письме О Клейну от 18 февраля 1929 г писал “Я теперь рассматриваю “труд-136” (“136-Arbeit”) Эддингтона как полную чушь, более точно как романтическую поэзию, но не как физику”<sup>1)</sup> В 1930 г совершенно четко высветил основные проблемы эддингтоновского построения М П Бронштейн “Законы природы, в формулировке которых участвуют целые числа, обладают совершенно особым характером если они не абсолютно точны, то они теряют всякую ценность, — подчеркнул Бронштейн — Молекула воды не может состоять приблизительно из двух водородных и одного кислородного атома точнее говоря, если мы признаем соотношения, которые привели к отношению 2:1 для числа водородных и кислородных атомов в воде лишь приближенно, а не абсолютно верными, то наше представление о химической природе воды придется изменить не приближенно, а совершенно радикальным образом То же относится и к работе Эддингтона или дробь  $hc/2\pi c^2$  действительно может быть абсолютно точно сконструирована из целых чисел, или указанная им сверкающая звезда физической истины окажется обманчивым болотным огоньком, а все его теоретическое построение — нелепым пифагорейским бредом Погоня за целыми числами опасна еще и в том отношении, что они дают поймать себя даже и там, где

<sup>1)</sup> Pauli, 1929, S 491, см также Kragh, 2003a p 416

их в действительности нет” (Бронштейн, 1930, с. 15). Дальнейший прогресс физики отодвинул теорию Эддингтона из области передовой физической мысли в область истории экзотических физических идей. Явной неточностью является утверждение, что Эддингтон — “первый теоретически определил постоянную тонкой структуры” (Храмов, 1983, с. 307). Речь может идти лишь о том, что Эддингтон *пытался* теоретически обосновать значение постоянной тонкой структуры и других физических постоянных, основываясь на некоторых спекулятивных предположениях. Отличие “обоснованных” им значений от современных экспериментальных данных наглядно показывает несостоятельность его теории.

После уточнения значения постоянной тонкой структуры, открытия множества других частиц, теория Эддингтона была окончательно осознана как псевдонаучная, что нанесло серьезный ущерб авторитету крупнейшего английского астрофизика. Его книги перестали переиздаваться, особенно в СССР. К сожалению, в тени его спекулятивной теории остались его блестящие книги по теории относительности и оригинальная философская концепция селективного субъективизма (см.: Эддингтон, 1939). Тем не менее существует по крайней мере одна конструктивная ссылка на книгу Эддингтона: Э. Сударшан и Р. Маршак, развивая теорию слабого взаимодействия после открытия несохранения четности и прибегнув к киральному преобразованию дираковского спинора  $\psi$  в  $\gamma_5\psi$ , указали, что сам термин “киральность” использовал ранее Эддингтон <sup>1)</sup>.

**4.3.3. Другие “пифагорейские” гипотезы.** После публикации Эддингтона, как отмечает М.П. Бронштейн, “точно прорвался какой-то мешок, и из него посыпались различные соотношения между универсальными физическими постоянными, причем в этих соотношениях играют роль целые числа” (Бронштейн, 1930, с. 14). Бронштейн приводит несколько примеров и характеризует их как “сплошную каббалистику”.

Так, Э.Э. Уитмер опубликовал в 1929 г. в “Nature” статью (Witmer, 1929), в которой предположил, что отношение масс протона и электрона  $M/m = (43)^2 = 1849$ , где число  $43 = 1^2 + 2^2 + 2^2 + 3^2 + 3^2 + 4^2$ . Числа же  $1^2, 2^2, 2^2, 3^2, 3^2, 4^2$  интересны тем, что, если их удвоить, то получится ряд чисел 2, 8, 8, 18, 18, 32, т.е. числа химических элементов в периодах периодической системы элементов Менделеева.

В 1929 г. Р. Фюрт предложил формулу для безразмерного соотношения, характеризующего силу гравитации:  $\frac{hc}{G(M+m)^2} = \pi \cdot 16^{32} = 1.069 \cdot 10^{39}$  (Fürth, 1929a,b). Это число соответствовало в то время экспериментальному значению в пределах точности эксперимента  $(1.066 \pm 0.03) \cdot 10^{39}$  и не соответствует современному эксперимен-

<sup>1)</sup>Eddington, 1949, p. 111. Sudarshan, Marshak, 1958, p. 1861.

тальному значению  $(1,062 \pm 0,001) \cdot 10^{39}$ . Большой интерес, по мнению Бронштейна, представляла попытка Р. Фюрта уже “без всякой помощи арифметической мистики” вывести формулу, связывающую отношение масс протона и электрона и постоянную тонкой структуры:  $M/m = \frac{32hc}{15e^2} - 2 = \frac{64\pi}{15\alpha} - 2$ . Согласно современным данным  $64\pi/15\alpha = 1836,848162(5)$ , в то время как левая часть “равенства” — 1836,15267261(85). Таким образом, в результате укороченная формула  $M/m = \frac{64\pi}{15\alpha}$  оказалась даже ближе к реальности, чем обоснованная Фюртом.

Две другие наиболее известные спекулятивные теории, в рамках которых обосновывались значения фундаментальных постоянных — теории Р.О. ди Бартини (*Бартини*, 1965, 1966) и И.Л. Герловина (*Герловин*, 1973, 1990). Оба этих ученых представили таблицы физических постоянных, как безразмерных, так и размерных, как *вычисленные* ими в рамках их теорий. Такая форма представления является псевдонаучной, поскольку проблемы вычисления численных значений *размерных* постоянных в физике не существует, так как они зависят от выбора единиц измерения. Как уже выше отмечалось, в физике существует проблема теоретического обоснования численных значений *безразмерных* постоянных — постоянной тонкой структуры, отношений масс и т. д. Итак, форма этих теорий псевдонаучна, а является ли научным само содержание?

Работа талантливого авиаконструктора Р.О. ди Бартини “Некоторые соотношения между физическими константами” была опубликована в 1965 г. в “Докладах Академии Наук” по представлению академика Бруно Понтекорво (*Бартини*, 1965). В ней он представил таблицу 14-ти физических постоянных, значения которых вычислялись по предложенным им соотношениям. В последующей работе “Соотношения между физическими величинами” (*Бартини*, 1966) он расширил таблицу до 21 постоянной (с учетом известных соотношений между константами, число независимых постоянных осталось прежним).

По мнению Бартини “между фундаментальными физическими величинами (очевидно, он имеет ввиду физические постоянные — *К.Т.*) не установлена аналитическая связь и эти величины определены только экспериментально, так как не существует теории, могущей дать способ их теоретического определения”. Бартини претендует на открытие этой таинственной “аналитической связи между основными физическими константами”.

В первой части своей работы Бартини обосновывает 6-мерное пространство  $(3 + 3)$  — с тремя пространственно- и тремя времениподобными координатами, основываясь на анализе некоторой функции распределения частот спектра случайных переходов между конфигурациями различного числа измерений. Два геометрических параметра некоего шестимерного тора Бартини отождествляет с двумя основны-

ми безразмерными физическими постоянными — постоянной тонкой структуры и отношения масс протона и электрона.

Отметим, что Бартини фактически отталкивался от формулы  $\alpha^{-1} = \frac{1}{8} e^7 = 137,079145$ , даже в то время лишь приближенно соответствовавшей экспериментальному значению постоянной тонкой структуры  $\alpha^{-1} = 137,03743$ . Поэтому Бартини пришлось "обосновывать" введение корректирующего множителя в эту формулу. Окончательно предложенные им формулы для постоянной тонкой структуры и отношения массы "нуклона" к массе электрона:  $\alpha^{-1} = \frac{1}{8} e^{6,999696} = 137,0374910$  и  $n/m = \frac{64\pi}{15\alpha} = 1836,868$ . Последняя формула напоминает вышеуказанную формулу Р. Фюрта с заменой массы протона на массу "нуклона".

Другой физик И.Л. Герловин в своей монографии "Основы единой теории всех взаимодействий в веществе" (1990 г.) также теоретически "получает" значения 38-ми физических постоянных, в том числе и размерных (немалую часть из них он вводит сам). Вот как он обосновывает возможность вычисления размерных постоянных: "В отличие от всего того, что ранее представлялось о будущей возможности теоретического определения мировых констант, разработки, выполненные нами в ТФП (теории фундаментального поля — *К.Т.*), открыли уникальную возможность вычисления *всех мировых констант* как безразмерных, так и, что выглядит парадоксально, размерных констант из *безразмерных постоянных*, найденных в теории (это выглядит не парадоксально, а псевдонаучно — *К.Т.*). Эта последняя возможность связана с тем, что всем, без исключения, мировым постоянным, имеющим в трехмерном пространстве привычные размерности, соответствует в линейном пространстве величина, имеющая однозначную размерность (например, только длину, или только время, или только массу), а в точечном-нульмерном пространстве всем мировым константам с любой размерностью однозначно соответствует определенная безразмерная величина (как правило, эта величина для фундаментальных констант равна единице). Поэтому, определив, скажем, для константы гравитации безразмерное значение ее в нульмерном пространстве, находим значение этой константы в линейном пространстве в  $\text{см}^2$ , или  $\text{с}^2$ , или  $\text{г}$ , а затем и численное значение этой размерной константы в трехмерном пространстве, где она в принятой нами системе единиц имеет размерность  $\text{см}^3/\text{г} \cdot \text{с}^2$ " (Герловин, 1990, с. 205). Суть выраженного здесь Герловиным процесса заключается в обычном использовании естественной системы единиц (в данном случае — планковской) и переходе от нее к общепринятой. Как отмечалось выше, численные значения пяти независимых размерных постоянных нельзя получить теоретически, ибо это означало бы доказательство фундаментальности таких единиц как грамм или сантиметр, а обоснование остальных размерных постоянных сводится к обоснованию безразмерных констант.

На самом деле Герловин также, как и Бартини, получает в рамках своей “теории” лишь безразмерные постоянные, оба используют в своей работе различные модификации планковской  $c\hbar$ -системы единиц. Для перехода к обычным единицам СГС им, естественно, приходится использовать планковские величины — длину, время и массу. Этот вполне обычный процесс перехода от одной системы единиц к другой (в данном случае от планковской системы единиц к практической системе СГС), представляется ими как процесс *вычисления* размерных постоянных.

Хотя книга И.Л.Герловина написана в 1989 г., он совершенно игнорирует фундаментальный шаг метрологии в сторону квантовой метрологии, сделанный в 1983 г., когда значение скорости света 299792458 м/с было принято *точным* (могли выбрать и любое другое значение). В своей книге Герловин “получает” значение скорости света  $2,997574555 \cdot 10^{10}$  см/с. Интересно, что он сказал бы о “получении” значения скорости света, если бы оно было принято равным точно 1 или 300000000 м/с?

Отметим, что хотя и Бартини и Герловин на самом деле вовсе и не получают значения размерных физических постоянных, но, представляя в такой *псевдонаучной форме* свои статьи, они формулируют и пытаются достичь мнимую цель получения значений размерных постоянных.

Что касается обоснования ими безразмерных постоянных, то способ их получения достаточно туманен (в основном — это чисто математические спекуляции: у Бартини это геометрические параметры 6-мерного тора, у Герловина геометрические параметры трех вложенных друг в друга геометрических структур). Как и в теории Эддингтона и др., представленные ими “вычисленные” значения физических постоянных соответствовали экспериментальным данным того времени, но отличаются от современных значений, существенно выходя за пределы доверительных интервалов.

Если Бартини и Герловин представили свои соображения в псевдонаучной форме “определения размерных констант”, то некоторые другие ученые вообще отбрасывали размерности физических постоянных и анализировали и пытались обосновать сами численные значения *без их размерности*, что псевдонаучно уже и по содержанию. Например, А.И.Заказчиков придумал формулы для численных значений постоянных (в системе СГС) в виде математических комбинаций постоянных математических постоянных  $\pi$  и  $e$ , а также постоянной тонкой структуры  $\alpha$ . Например, для скорости света он предложил формулу  $\left(\frac{16}{3} \pi^2 \alpha^{-9}\right)^{1/2} \times \text{см/с} \approx 2,9950582 \times 10^{10} \text{ см/с}$  (Заказчиков, 2001, с. 220). Естественно, что пытаться “обосновать” какие-либо численные значения размерных постоянных *по отдельности* от их размерности

абсолютно псевдонаучно — это означало бы одновременное обоснование практических мер как фундаментальных масштабов Природы, в данном случае единицу скорости 1 см/с. Пикантность ситуации для скорости света заключается еще и в том, что определенное практическое значение с 1983 г. *выбрано как точное*. Это означает, что то число, которое Заказчиков пытается "обосновать" как фундаментальное, мы на самом деле выбираем по соглашению.

Закономерную случайность численных значений размерных фундаментальных постоянных пытался обосновать Р. Фриден (*Frieden*, 1986). Рассмотрев обычный список фундаментальных постоянных, отбросив их размерности и взяв от их численных значений десятичный логарифм, Фриден получает 15 чисел, распределение которых близко к равномерному (по критерию  $\chi^2 - 0,75$ ). Фриден выдвигает гипотезу, что порядки численных значений фундаментальных постоянных распределены равномерно и, следовательно, сами значения фундаментальных постоянных распределены по закону  $1/x$ . Полученное распределение, как утверждает Фриден, не зависит от применяемой системы единиц, поэтому он характеризует закон  $1/x$  как вероятностный закон для фундаментальных констант. Конкретные же значения фундаментальных постоянных устанавливаются, по его мнению, в соответствии с этим вероятностным законом в момент Большого Взрыва.

На самом деле, Фриден решает задачу, которой нет — проблемы обоснования численных значений фундаментальных размерных постоянных, речь может идти только об обосновании безразмерных постоянных. Вопреки его утверждению, что распределение численных значений размерных постоянных равномерно и не зависит от выбора системы единиц, легко убедиться, что это не так: достаточно перейти в какую-либо естественную систему единиц (например, Хартри или Планка) и численные значения одних постоянных будут равны 1 или иметь значения порядка 1, значения же других постоянных окажутся исключительно большими типа  $10^{40}$  или малыми типа  $10^{-40}$  (это — принцип *кластеризации* значений постоянных, открытый П.А.М. Дираком (*Дирак*, 1937b), который выполняется, как он предположил, на протяжении всего космологического времени, см. гл. 4.4.).

Не касаясь всех формул, которые предлагались для "вычисления" значений фундаментальных констант, приведем лишь те, которые имеют эстетическую привлекательность или наиболее близки к экспериментальным данным. Так, оригинальная формула была предложена И.Л. Герловиным и В.А. Кратом для "вычисления" гравитационной постоянной через атомные константы (*Крат, Герловин*, 1974; *Krat, Gerlovin*, 1974):

$$G = a_g \cdot \frac{9}{32} \left( \frac{\lambda_p^2 R_\infty^2 e}{\pi m_p} \right)^2 = 6,67339 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2),$$

где (подгоночный?) множитель  $a_g = 1,000888$ , элементарный заряд измеряется в электростатических единицах (точность этой формулы



невелика — 0,1%). Однако совершенно ясно, что универсальная гравитационная постоянная не может определяться через специфические постоянные типа масс электрона или протона, или, тем более, постоянную Ридберга. Если бы эта формула, действительно, работала, ее следовало бы интерпретировать как формулу для какой-либо специфической постоянной как комбинации более универсальных.

Для отношения масс протона и электрона сразу несколькими авторами была предложена формула  $6\pi^5 = 1836,118$  (современное экспериментальное значение  $1836,15267261(85)$ )<sup>1)</sup>. Статья Ленца интересна своей рекордной компактностью: она состояла всего из двух предложений — в первом он предлагал формулу, а во втором сравнивал с экспериментальным значением.

Для постоянной тонкой структуры предлагались самые различные формулы: А. Уайлером  $(8\pi^4/9)(2^{45}/\pi^5)^{1/6} = 137,036082$ , М. Александрианом  $(3\pi m_e m_p / 32 m_{\pi^\pm}^2 = 1/137,94)$ , Дж. Розеном  $(N(N-1)/4\pi = 137,0324$  при  $N = 42)$  и др. Вывод Уайлером своей формулы был подвергнут критике Б. Робертсоном<sup>2)</sup>. Помимо этого Робертсон привел еще список шести формул, предложенный Р. Роски и Э. Прозеном, типа  $\alpha^{-n} = 2^m 3^k 5^i \pi^j$ , где  $i, j, k, m, n$  — целые числа, которые дают значение постоянной тонкой структуры с точностью 6 знаков, что наглядно показывает, что формула, дающая такую точность вовсе не обязана быть истинной. Все эти формулы также не соответствуют современным экспериментальным данным.

Интерес с точки зрения красоты представляет изящная формула В. Меллена (*Mellen*, 1975), дающая, кстати, среди других формул очень близкое к экспериментальному  $\alpha^{-1} = 137,03599911(46)$  значение этой постоянной:

$$\alpha^{-1} = \sqrt{137^2 + \pi^2} = 137,0360157$$

Эту же формулу опубликовал в 1978 г. Т. Бургер (*Burger*, 1978).

Отметим, что формулу Меллена также можно представить в следующем компактном виде

$$\alpha^{-1} = \pi / \sin \varphi, \quad \text{где} \quad \operatorname{tg} \varphi = \pi / 137.$$

Но как обосновать целое число 137 в этой формуле? Доживи Эддингтон до наших дней, он несомненно увидел бы в этой формуле воплощение своих идей и смог бы ее “обосновать” через формулы типа  $\alpha^{-1} = \operatorname{tg} \varphi$ , где  $\operatorname{tg} \varphi = 2\pi / (n^2(n^2 + 1) + 2)$  при  $n = 4$  или  $\operatorname{tg} \varphi = \pi / (2^7 + 2^3 + 1)$ . Поразительна точность формулы Меллена — 0,00001%, однако точность, с которой ныне известна постоянная тонкой структуры по крайней мере на порядок лучше.

Сравнительный анализ результатов некоторых спекулятивных теорий был проведен в 1976 г. Д. Иглсом, который сделал вывод, что

<sup>1)</sup> *Lenz*, 1951; *Wyler*, 1969; *Good*, 1970; *Delaney*, 1974.

<sup>2)</sup> *Wyler*, 1969, 1971; *Alexanian*, 1975; *Rosen*, 1976; *Robertson*, 1971.

наиболее близки к экспериментальным формулы Аспдена, уточненные ими совместно, например,  $\alpha^{-1} = 108\pi(8/1843)^{1/6} = 137,035915$ , однако вскоре они тоже разошлись с экспериментом и их пришлось корректировать <sup>1)</sup>.

В 1981 г. Г.Б. Аракелянном были предложены формулы для постоянной тонкой структуры  $\alpha^{-1} = 44\pi - \arccos \frac{1}{e} = 137,036007939$ , а также аналогичные формулы для масс некоторых частиц, дающие значения масс с точностью 5–6 знаков (Аракелян, 1981, с. 146–147). Значение постоянной тонкой структуры по формуле Аракеяна лишь в 9 знаке отличается от современного значения  $\alpha$  (отличие лишь на 0,000006%), все же выходя за пределы доверительного интервала. Правда, следует отметить, что последние уточнения постоянной тонкой структуры 137,03599976(50) и 137,03599911(46) также вышли за пределы доверительного интервала предыдущего значения 137,0359895(61), которое было принято в 1986–1998 гг., однако численное значение, предсказываемое Аракелянном, все же отличается на порядок по доверительному интервалу от современного значения постоянной тонкой структуры.

Композитор М.А. Марутаев, занимающийся поиском математического обоснования гармонии, увидел в начальных цифрах постоянной  $1/137$  мистические тройку, семерку и туз из “Пиковой дамы” А.С. Пушкина. В статье в сборнике “Золотое сечение” он предложил следующую формулу:  $2^{5/11} = 1,370350985$  (Марутаев, 1990). Это число, по его мнению, является мерой нарушения симметрии. Постоянная тонкой структуры получается у него из этого числа умножением на  $100 = 10^2$  после того, как ему удастся “обосновать” фундаментальность десятичной системы счисления. Итак, его формула  $\alpha^{-1} = 10^2 \cdot 2^{5/11} = 137,0350985$ .

Наиболее точное значение постоянной тонкой структуры на данный момент дает формула, подобранная С. Плюффе в 1999 г. с помощью специального (машинного?) алгоритма (см. Weisstein, 2003):

$$\alpha^{-1} = 96(e^{1/2} + 2^{1/3})^{1/3} = 137,035999777.$$

Однако структура как этой, так и всех других предложенных формул для безразмерных констант выглядит совершенно необоснованной. Даже если какая-либо подобранная формула, например С. Плюффе, окажется точной, сможет ли она помочь в дальнейшем развитии физического знания?

В одной из лекций 1983 г. Р. Фейнман писал: “Время от времени кто-нибудь замечает, что некоторая комбинация  $\pi$ ,  $e$  (основания натуральных логарифмов), двоек и пятерок образует таинственную константу взаимодействия. Но знали бы те, кто любит играть с арифметикой, как много чисел можно получить, комбинируя  $\pi$ ,  $e$  и т. д.

<sup>1)</sup> Eagles, 1976, см. также: Станюкович, Мельников, 1983, с. 15; Aspden, 1966; Aspden, Eagles, 1972, 1975; Aspden, 1986.

Вот и следуют сквозь всю историю современной физики одна статья за другой с выводом  $e$  (Фейнман обозначает этим символом  $\sqrt{\alpha} - K.T.$ ) с точностью до нескольких значащих цифр — и только для того, чтобы не сойтись с результатами экспериментов после новых, более тщательных измерений” (Фейнман, 1983/85, с. 115).

В самом деле, очевидно, можно придумать произвольное количество различных формул в виде комбинаций различных математических постоянных для получения *любого* числа с точностью 5–6–7 знаков; а, используя машинные алгоритмы, можно подобрать формулы, дающие даже 9–10 знаков. Для оценки адекватности “пифагорейского” подхода в физике могут служить рациональные приближения, которые исторически предлагались для математических постоянных, например, для иррационального числа  $\pi$ :  $22/7 \approx 3,14286$  и  $355/113 \approx 3,1415929$ , они дают ошибку соответственно в 4-м и 8-м знаках, и это показывает, что “пифагорейский” подход еще не исчерпал своего ресурса, хотя его продуктивность, по-прежнему, выглядит сомнительной.

Отметим, что все формулы для постоянной тонкой структуры или отношения  $m_p/m_e$ , предлагавшиеся просто “с потолка” или в рамках спекулятивных теорий, и дававшие *на момент их публикации* численные значения тех или иных физических постоянных в пределах доверительных интервалов, ныне не попадают в доверительные интервалы их современных экспериментальных значений.

“Пифагорейские” гипотезы при рождении кажутся, пользуясь выражением Ф. Бэкона, светоносными (поскольку они опираются на такие важные методологические принципы, как принцип красоты и принцип простоты) и плодоносными (поскольку они как бы объясняют значения физических постоянных). Однако этот период продолжается в течение короткого времени. С развитием физического знания точность формул оказывается все меньшей. Это свидетельствует о том, что сами эти формулы были получены не из каких-либо физических принципов, а *подобраны* из тех значений констант, которые были известны на момент “подбора”. Максимальный успех, на который может рассчитывать “пифагорейская” программа — случайно угадать какие-либо эмпирические закономерности.

Конструктивное направление в обосновании значений физических констант заключается, очевидно, в выделении *однотипных* констант (т. е. констант одного рода), затем в поиске эмпирических формул, которые бы *одновременно* давали их значения (по крайней мере, примерные для начала). Ориентируясь на такого рода эмпирические формулы, можно было бы более определенно пытаться строить теоретические конструкции, однако без всякой гарантии на их истинность.

В заключение еще раз подчеркнем характерные особенности спекулятивных конструкций, позволяющие отличать их от традиционной программы:

1. Неясность, мистицизм предпосылок (что отмечают даже сторонники этих теорий) и даже в некоторых случаях отказ от каких-либо предпосылок (позиция этически более честная, чем стремление дать туманное обоснование).

2. В силу этого теория не обладает внутренней способностью к ее развитию другими учеными.

3. Соответствие опытным данным только в течение короткого периода развития науки, сменяющееся полным несоответствием опытным данным.

4. Введение из-за этого поправочных коэффициентов в формулы (своеобразная “агония” теории).

5. Нулевая эвристика, т. е. неспособность предсказывать новые явления.

Как уже неоднократно подчеркивалось выше, задачи определения численных значений размерных постоянных не существует. Однако, несмотря на все вышеперечисленные аргументы, в гипотетическом нахождении некоторых закономерностей, связанных именно с *размерными* физическими постоянными, как это не удивительно, оказывается есть некоторый научный смысл — смысл не столько физический, сколько *биофизический*. Известно, что все меры — меры длины, веса, времени — связаны с удобством человеческой практики; все общепринятые меры *соизмеримы* с параметрами homo sapiens. Примечательно, что все первоначальные эталоны длины прямо определялись через параметры человека: фут (от англ. foot — нога) — длина ступни, дюйм (от голл. duim — большой палец), ярд, вершок, сажень, пядь, локоть, аршин, миля (от лат. milia — тысяча) — тысяча двойных человеческих шагов и т. д. Таким образом, практические меры и параметры homo sapiens *равны с точностью до порядка*. Это означает, что нахождение неких гипотетических закономерностей, определяющих соотношения между мировыми постоянными и практическими единицами измерения (с точностью до порядка), на самом деле означало бы установление закономерности между параметрами Земли, Солнечной системы и Вселенной и характерными параметрами высокоорганизованной органической материи (геометрические размеры, скорость перемещения и т. п.), что теоретически не только возможно, но и весьма вероятно (см.: Press, Lightman, 1983).

## Глава 4.4

### Программа переменных “констант”

Анализируя параметры нашего мира, ученые в XIX в. и в начале XX в. открыли так называемые *большие числа* — числа, имеющие огромные, “безмерные”, с точки зрения современной физики, значения порядка  $10^{20}$ ,  $10^{40}$ ,  $10^{60}$ ,  $10^{80}$ ,  $10^{120}$  и т. д.

Основная проблема, связанная с большими числами, заключается в том, что ни в одной математической теории не появляются такие огромные числа в качестве неких решений. Это обстоятельство неоднократно подчеркивали многие ученые, такие как Г. Вейль, П.А.М. Дирак, В. Гейзенберг, Р. Фейнман и др. Наиболее красивое решение проблемы объяснения больших чисел было предложено в 1937 г.

П.А.М. Дираком, просто предположившим не независимость, а *связь всех больших чисел друг с другом*, что оказалось достаточным для их объяснения (с точностью до порядка): так как одним из больших чисел является современное космологическое время, выраженное в атомных единицах, то все остальные большие числа оказывались такими потому, что они зависели от космологического времени. Эта замечательная идея Дирака дала мощный импульс развитию целого ряда программ — скалярно-тензорных теорий гравитации с переменной гравитационной постоянной, геофизической теории расширяющейся Земли, исследованию изменения физических констант с космологическим временем, а также альтернативной антропной программе. Важнейшим аргументом против гипотезы Дирака является отсутствие на данный момент каких-либо хорошо установленных экспериментальных подтверждений изменения силы гравитационного взаимодействия. Вместе с тем, ученым не удалось до сих пор предложить иные физические объяснения появлению больших чисел, столь же простые и красивые, как идея Дирака.

Поскольку разные авторы анализировали разные большие числа и соотношения между ними (обычно произвольно выбирались два-три), целесообразно рассмотреть их совокупность целиком. При этом, поскольку гипотеза Дирака носила характер качественного объяснения, мы для простоты будем указывать большие числа с точностью до порядков, тем более, что пока еще существует большая неопределенность в значениях основных космологических параметров.

**4.4.1. “Большие числа” и соотношения между ними.** К большим числам относятся следующие параметры, которые сведены в таблицу и сгруппированы по нескольким типам (значения приводятся с точностью до 1–2 порядков) (см. табл. 4.4.1).

“Большие числа” являются эмпирическими параметрами современной физической картины мира и отражают свойства Вселенной в целом, звезд и соотношение между гравитационным и остальными взаимодействиями. Современная физика (за исключением астрофизики) и в конце XX в. пока еще не работает с величинами типа “больших чисел”. Это отражается, в частности, в согласованной терминологии кратных и дольных величин. В 1930–50 гг. диапазон этих величин составлял всего от  $10^{-12}$  (пико-, от исп. *pico* — малая величина) до  $10^{12}$  — (тера-, от греч. *teras* — чудовище). Если числа порядка  $10^{12}$  расценивались в 1930-х гг. как “чудовищные”, то что можно сказать о числах, имеющих значительно большие порядки! В 1960–1970-х гг. диапазон наименований дольных величин был увеличен до  $10^{-15}$  (фемто-, от дат. *femten* — пятнадцать) и  $10^{-18}$  (атто-, от дат. *atten* — восемнадцать), а кратных — до  $10^{15}$  (пета-, пятая степень тысячи) и  $10^{18}$  (экса-, от греч. *hex* — шесть, шестая степень тысячи). В отличие от остальной физики теоретическая астрофизика столкнулась с большими числами еще в начале XX в. Для наименования таких чисел английскими

Таблица 4.4.1. Большие числа в физике и астрофизике

## Большие числа

(A) параметры, характеризующие Вселенную в целом:

(A1) Радиус наблюдаемой Вселенной:  $R/r_e \approx 10^{40}$ , где  $r_e$  — т. н. классический радиус электрона  $r_e = k_e e^2 / m_e c^2$  ( $k_e$  — постоянная в законе Кулона).

(A2) Возраст Вселенной:

$$T/t_o \approx 10^{40},$$

где  $t_o$  — т. н. атомное время  $t_o = \hbar / m c^2$ ,  $m$  — характерная масса элементарных частиц (обычно — электрона или протона).

(A3) Масса Вселенной, выраженная в массах протона:

$$M/m_p \approx 10^{80} = (10^{40})^2.$$

(A4) Средняя плотность Вселенной, выраженная в единицах “плотности” частицы:

$$\rho/\rho_o \approx 10^{-40}$$

(A5) Постоянная Хаббла  $H$ , характеризующая скорость расширения Вселенной  $H = \dot{R}/R$ :

$$Ht_o \approx 10^{-40}$$

(B) Большие числа, характеризующие параметры звезд:

(B1) Массы звезд, выраженные в массах протона:

$$M_*/m_p \approx 10^{60} = (10^{40})^{3/2}.$$

(C) Большие числа, характеризующие “силу” гравитационного взаимодействия (точнее ее слабость по отношению к остальным взаимодействиям)

(C1) Соотношение между электромагнитным и гравитационным взаимодействием двух частиц, например, протона и электрона:

$$F_{эл}/F_{гр} = k_e e^2 / G m_e m_p \approx 10^{40}$$

То же соотношение в форме отношения “классического” и гравитационного радиуса частицы:

$$r_e/r_g = k_e e^2 / 2Gm^2 \approx 10^{40}$$

**(C2) Соотношение между характерными масштабами гравитационного взаимодействия и параметрами элементарных частиц**

а) гравитационная константа связи:

$$\alpha_g^{-1} = \hbar c / G m_p^2 \approx 10^{40}$$

б) отношение комптоновской длины к гравитационному радиусу частицы

$$\lambda_e / r_g = \hbar c / 2 G m^2 \approx 10^{40}$$

с) отношение комптоновской длины частицы к планковской длине

$$\lambda_e / l_{pl} = (\hbar c / G m^2)^{1/2} \approx 10^{20}$$

д) отношение планковской массы к массе протона:

$$m_{pl} / m_p \approx 10^{20}$$

**(C3) Соотношение между масштабом гравитационного и слабого взаимодействий (планковской массой и вакуумным средним):**

$$\lambda_{gw} = \frac{m_{pl}}{\eta} = \frac{1}{\hbar c} \sqrt{\frac{\sqrt{2} G_F}{G}} = 4,9586(10) \times 10^{16}$$

**(D) Характеристики элементарных частиц**

**(E) Эмпирические соотношения между параметрами, в которых большие числа присутствуют в скрытом виде:**

**(D1) Предполагаемое в моделях великого объединения время распада протона:**

$$t / t_o \approx 10^{60}$$

**(E1) Радиус Вселенной равен ее гравитационному радиусу:**

$$R \approx R_g,$$

где  $R_g = 2GM/c^2$  — гравитационный радиус Вселенной и др

То же соотношение в другой форме: **(a)**  $GM/Rc^2 \approx 1$ ,

**(E2) Постоянная Хаббла обратно пропорциональна современному космологическому времени:  $H \approx T^{-1}$ ,**

Соотношения между гравитационной постоянной и космологическими параметрами

$$\mathbf{(E3)} \quad G\rho \approx H^2,$$

$$\mathbf{(E4)} \quad G\rho \approx T^{-2},$$

$$\mathbf{(E5)} \quad GM \approx c^3 T$$

Другие соотношения.

$$\mathbf{(E6)} \quad GR \approx \hbar^2 / m^3,$$

$$\mathbf{(E7)} \quad G/\rho \approx \hbar^4 / m^6 c^2,$$

**(E8)  $R/r_e \approx r_e/r_{ge}$ ,** где гравитационный радиус заряда  $r_{ge} = e\sqrt{G}/c^2$ ,  $e$  — в электростат единицах

и др

астрофизиками применялась та же мультипликативная система числовых обозначений. Так, например, септиллион означал миллион в 7-ой степени, т.е.  $10^{42}$ . Аналогично, окталлион означал  $10^{48}$  и т.д. Для общего обозначения различных огромных астрофизических параметров английские астрофизики (А Эддингтон, Э. Милн и др) начали применять термин “большие числа” (“large numbers”).

Вслед за ними и П.А.М. Дирак в статье 1937 г также использовал этот термин, сначала в сравнительной степени — большие и меньшие числа (“the larger numbers” — “the smaller numbers”), а затем уже прямо — “вышеупомянутые большие числа” (“the large numbers”) (Dirac, 1937a) Идея Дирака, развитая им в трех статьях 1937–1938 гг. (Dirac, 1937b, 1938), получила общепринятое наименование “гипотезы больших чисел Дирака” (“Dirac’s large numbers hypothesis”). Сам Дирак никогда не употреблял в названии этой своей гипотезы свое собственное имя, называя ее просто “гипотеза больших чисел” (“the large numbers hypothesis”).

С чем связано появление таких больших чисел в Природе? Среди больших чисел особое место занимает время существования Вселенной. В принципе само по себе оно не нуждается в объяснении — время постоянно увеличивается и таким образом достигло своего нынешнего значения. Чтобы измерять время нам приходится пользоваться некой единицей времени. В отличие от таких физических величин, как скорость, электрический заряд и др., в настоящее время у нас нет столь же фундаментальной естественной единицы времени. Для измерения времени используются две различные шкалы — макрошкала (период вращения Земли и т.д.) и микрошкала, где в качестве единицы времени выбираются атомные единицы — время прохождения светом отрезка, равного комптоновской длине или “классическому” радиусу электрона или какой-либо другой частицы. В атомных единицах время существования Вселенной оказывается одним из больших чисел.

Параметры Вселенной, такие как ее наблюдаемый радиус, плотность, параметр Хаббла, также изменяются с течением времени. Поскольку они не являются случайными, а определяются космологическими законами, то большие числа, связанные с ними, оказываются таковыми *просто из-за их связи с таким большим числом как время*. Таким образом, наблюдаемый радиус Вселенной оказывается таким большим, а наблюдаемая плотность вещества столь малой, просто потому, что прошло достаточно много времени.

Наряду с изменяющимися параметрами, стандартные космологические модели предполагают наличие некоторых неизменных параметров, таких как масса Вселенной и сила гравитационного взаимодействия, что приводит к необходимости объяснения больших чисел, связанных с ними, а также ряда соотношений между ними и параметрами, изменяющимися со временем.

Постоянная Хаббла  $H$ , характеризующая скорость расширения Вселенной  $\dot{R} = HR$  длительное время также считалась постоянной. Позже



была признана ее обратная пропорциональность от космологического времени. С другой стороны, для некоторых астрофизических задач, связанных с описанием современного состояния Вселенной, постоянная Хаббла, действительно, можно рассматриваться как постоянная величина, поскольку скорость ее изменения в настоящее время очень мала:  $H \sim T^{-1} \approx 7,3 \cdot 10^{-11} \text{ год}^{-1}$ . Таким образом, постоянная Хаббла это постоянная 2-го рода, т. е. параметр, который в принципе меняется, но настолько в настоящий момент времени медленно, что в целом классе задач может считаться постоянным с большой точностью.

В период, когда  $H$  считалась константой, соотношение (E2)  $H \approx 1/T$ , в котором изменяющееся время приравняется некой постоянной, рассматривалось как случайное совпадение, характерное только для данного момента космологического времени и показывающее его "избранность". Ныне признано, что постоянная Хаббла (более правильно, параметр Хаббла) является функцией космологического времени и уменьшается примерно пропорционально времени  $H \sim T^{-1}$ . Таким образом, оказалось, что соотношение (E2) просто характеризует закон уменьшения постоянной Хаббла. Это соотношение ныне используется для оценки времени существования Вселенной  $T \approx H^{-1} \approx 1,37 \cdot 10^{10}$  лет.

Соотношение  $G\rho \approx H^2$  также рассматривалось некоторое время как случайное совпадение, характерное лишь для современного космологического момента времени. В самом деле, в правой части стоит некая постоянная (напомним, что параметр Хаббла  $H$  рассматривался как постоянный), а в левой, наряду с гравитационной постоянной, — зависящая от времени плотность вещества во Вселенной (масса Вселенной в стандартных моделях расширяющейся Вселенной считается неизменной, поэтому плотность вещества уменьшается со временем). В дальнейшем выяснилась непостоянность "постоянной" Хаббла и соотношение (E3) потеряло "случайный" характер.

Закон для масс звезд (B1) был обоснован Э. Стонером в 1930 г. (Stoner, 1930). В дальнейшем его анализировали Р. Дикке, Б. Картер, М. Рис, И.Л. Розенталь и др. <sup>1)</sup>

Анализируя соотношения (A–E), мы видим, что некоторые из них не являются независимыми. Подлинно независимыми большими числами в рамках современной физической картины мира являются время существования Вселенной (A2), масса Вселенной (A3) (вместо массы можно рассматривать ее среднюю плотность A4) и соотношение между силами гравитационного и элементарных взаимодействий (например, (C3), не зависящее от масс частиц). Из этих трех чисел лишь последние два нуждаются в своем обосновании. Почему, в самом деле, масса Вселенной столь велика, а гравитация столь слаба? В рамках какой теории можно получить такие большие числа?

<sup>1)</sup> Dicke, 1961, p 440, Картер, 1973, с. 370; Рис, Руффини, Уилер, 1974, с 325, Розенталь, 1980, с 255–256

Многие физики, среди них — П.А.М. Дирак, Г. Вейль, В. Гейзенберг, Р. Фейнман, Р. Дикке, П. Девис и др., справедливо отмечали, что ни в одной современной физической теории такие большие числа не фигурируют, что “загадочно”. Вместе с тем колоссальная слабость гравитации по сравнению с другими “нормальными” взаимодействиями должна быть каким-то образом теоретически объяснена в рамках единой теории поля.

Вот как писал об этой проблеме Герман Вейль: “Сила притяжения двух электронов составляет в естественных единицах величину  $\varepsilon/r^2$ , где безразмерное число равно примерно  $10^{-41}$ . Оно является еще более загадочным, чем постоянная  $\alpha$  (постоянная тонкой структуры  $1/137$ . — К.Т.). В самом деле, простая математическая теория может привести к числам типа  $1/2$  или  $8\pi$ , но чтобы получилось безразмерное число экстравагантного порядка  $10^{41}$  представить себе трудно!” (Вейль, 1949, с. 349).

В 1965 г. Р. Фейнман писал: “Тяготение относится к электрическому отталкиванию, как единица к числу с 42 нулями. Это вызывает глубочайшее недоумение. Откуда могло взяться такое огромное число? Если бы у нас когда-нибудь появилась общая теория для двух этих явлений, то как она давала бы такую диспропорцию для двух электронов:

$$\frac{\text{сила тяготения}}{\text{сила отталкивания}} = \frac{1}{4,17 \cdot 10^{42}}.$$

Каким должно быть общее уравнение, если, решая его для двух видов сил — гравитационного притяжения и электрического отталкивания, мы приходим к такому фантастическому отношению?” (Фейнман, 1965, с. 28).

Также говорил об этом П. Девис: “В физических теориях числа типа  $4\pi$  или  $3$  появляются часто, и это не вызывает удивления. Однако число  $10^{40}$ , которое полностью составлено из фундаментальных постоянных природы и поэтому, вероятно, имеет фундаментальный смысл, невероятно велико по сравнению с любым из этих более привычных значений” (Девис, 1982, с. 97).

В лекциях 1975 г. Дирак еще раз отметил нетипичность больших чисел для теоретической физики: “Можно ли хотя бы надеяться придумать теорию, которая объяснит это число? Его нельзя разумно построить, например, из  $4\pi$  и других простых чисел, которыми оперирует математика! Единственная возможность объяснить это число — связать его с возрастом Вселенной” (Дирак, 1975/78, с. 69). В этом и состояло одно из наиболее простых и оригинальных решений проблемы больших чисел, предложенное П.А.М. Дираком в 1937 г.

**4.4.2. “Большие числа”: от открытия к совпадениям.** Исторически первым открытым большим числом было  $(C1)$  — отношение силы электромагнитного и гравитационного взаимодействий. Достоверно неизвестно, кто первым сравнил эти две силы. Можно ожидать, что

это и другие большие числа появились впервые в единых теориях, прежде всего — в электромагнитных теориях тяготения. Однако, в пионерской работе 1836 г. итальянского физика О.Ф. Моссотти какое-либо конкретное численное значение еще отсутствовало (*Mossotti*, 1836). В дальнейшем “большое число”  $1/(6 \cdot 10^{42})$  фигурировало в работах И. Цельнера, развивавшего идеи В. Вебера (см. *Розенбергер*, 1882/90, ч. 3(2), с. 230–231). Однако оно вводилось в теорию “руками”, т.е. выступало в виде некоего эмпирического параметра. Подробно историю электромагнитных теорий тяготения исследовал В.П. Визгин (*Визгин*, 1981, с. 43–63), а “дальнодействующие” электромагнитные теории Б.В. Булюбаш (1987, 1995).

Основная идея “единой теории”, получившая название гипотезы Моссотти–Цельнера, заключалась в том, что предполагалось, что электростатическая сила между двумя разнородными притягивающимися частицами материи на очень малую величину  $1/(6 \cdot 10^{42})$  превышает силу двух однородных отталкивающихся частиц. Это давало возможность рассматривать тяготение как вторичный эффект электромагнетизма. Однако объяснение, почему эти потенциалы отличаются и почему они отличаются именно на такую малую величину, выходило за рамки предложенной ими теории. Цельнер попытался обосновать эту интересную научную идею с помощью философской гипотезы одушевленности материи, уходящей корнями в античное представление о природе. Материи, согласно Цельнеру, имманентно присущи ощущения и чувства, которые и возбуждают притягательные или отталкивательные стремления. И притягательные “чувства” превышают на небольшую величину “чувства” отталкивающие (*Розенбергер*, там же).

Возможно, что первые оценки соотношения электромагнитных и гравитационных сил были сделаны учеными, работавшими в области электролиза — Дж. Стони и Г. Гельмгольцем. По крайней мере, масштаб Стони определяется из равенства этих сил (см. п. 3.4.5). Гельмгольц привел численную оценку соотношения между этими силами в Фарадеевской лекции (*Гельмгольц*, 1881, с. 129–130).

Длительное время отношение силы электромагнитного и гравитационного взаимодействия было единственным известным большим числом. Следующие большие числа появились в 1910–1920-х годах, когда с развитием космологии после создания общей теории относительности, были произведены оценки параметров Вселенной, прежде всего — ее радиуса и средней плотности. Первым это сделал в рамках общепринятой тогда модели стационарной Вселенной в 1917 г. де Ситтер (*De Sitter*, 1917, р. 3). Он получил следующие оценки:  $R \sim 10^{27}$  см,  $\rho \sim 10^{-27}$  г/см<sup>3</sup>.

В рамках программы единой теории поля, развиваемой рядом физиков на рубеже 1910–1920-х гг. большие числа неизбежно должны были стать предметом обсуждения, как в связи с соотношением гравитации и электромагнетизма, так и в связи с космологией, как основным приложением релятивистской теории гравитации. По-видимому первым,

кто сопоставил большие числа между собой были А. Эйнштейн и Г. Вейль. А. Эйнштейн в письме А. Зоммерфельду 1 февраля 1918 г. привел соотношение (E1a):  $\frac{G}{c^2} \cdot \frac{M}{R} = \text{числу порядка единицы}$ . В рамках концепции стационарной Вселенной Эйнштейн считал, что масса  $M$  определяет радиус Вселенной  $R$  (Эйнштейн, 1918, с. 198).

Подробное исследование работ Г. Вейля в связи с большими числами выполнил Г.Е. Горелик (Горелик, 1982/83; 1989). После открытия электрона — источника электромагнитного поля, некоторое время существовали надежды, что гравитация отвечает за его стабильность. Камнем преткновения для этих представлений стали именно большие числа. В статье “К теории гравитации” (1917 г.) Вейль показал, что гравитация слишком слаба для этого. Он сопоставляет характерные длины, связанные с электроном — гравитационный радиус массы  $r_{gm} = \frac{Gm_e}{c^2}$ , гравитационный радиус заряда  $r_{ge} = \frac{e\sqrt{G}}{c^2}$  — та самая единица длины, введенная впервые еще Дж. Стони (Stoney, 1874/81), по сути это планковская длина, умноженная на корень из постоянной тонкой структуры:  $r_{ge} = \ell_{pl}\sqrt{\alpha}$  и классический радиус электрона  $r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$ . Получив  $r_e/r_{ge} = 10^{20}$  (квадратный корень из отношения силы электромагнитного и гравитационного взаимодействий), Вейль заключает, что гравитационное поле заряда следует учитывать только на расстояниях порядка  $r_g \sim 10^{-33}$  см (т.е. на планковских расстояниях) (Weyl, 1917, S. 145). Против объяснения устойчивости частиц действием гравитации, также возражал В. Паули в “Теории относительности” (1921), на основе аргументации, связанной именно с большими числами (Паули, 1921, с. 229, с. 273).

Единая теория Вейля при отсутствии электромагнитного поля не давала в точности уравнения тяготения Эйнштейна (подробнее о теории Г. Вейля см.: Визгин, 1985, с. 73–108, с. 123–129). Касаясь этого, Г. Вейль в статье “Гравитация и электричество” (1918 г.) писал: “Но и действительно, крайне маловероятно, чтобы уравнения Эйнштейна для гравитационного поля выполнялись строго, и прежде всего потому, что входящая в них гравитационная постоянная совершенно не вписывается в ряд других естественных констант, так что гравитационные радиусы заряда и массы электрона оказываются, например, совершенно иного порядка величины, чем радиус самого электрона (они меньше последнего, первый в  $10^{20}$ , а второй в  $10^{40}$  раз)” (Вейль, 1918, с. 525).

В статье “Новое обобщение теории относительности” (1919 г.) Вейль отмечает “факт, состоящий в том, что для электрона имеются безразмерные числа, порядок величины которых чрезвычайно отличается от единицы; таково отношение радиуса электрона к гравитационному радиусу его массы, которое равно по порядку величины  $10^{40}$ ; отношение радиуса электрона к мировому радиусу может быть такого

же порядка величины”<sup>1)</sup>. По сути Вейль сопоставляет два больших числа. Это соотношение в аналитическом виде выглядит так:

$$r_e/r_{ge} \sim R/r_e.$$

“Трудно с уверенностью сказать, — комментирует это высказывание Вейля Г. Горелик, — что именно Вейль в [этой] статье впервые обнаружил факт “совпадения больших чисел”. Исходя из того, что Вейль пишет об этом факте как-то вскользь, нельзя исключить, что он был уже известен (возможно, только в устной форме и как курьез) в окружении Вейля и до его статьи. Но во всяком случае этот факт не мог родиться до астрономических оценок радиуса Вселенной, сделанных де Ситтером в 1917 г.” (Горелик, 1982/83, с. 313; 1989, с. 383).

Таким образом, в своих основополагающих работах 1918–1919 гг. по единой теории поля Вейль, столкнувшись с проблемой больших чисел, отметил, что они совершенно выпадают из современных теорий, и указал на факт соответствия двух больших чисел — отношения сил электромагнитного и гравитационного взаимодействия электрона и отношения “мирового радиуса” и “радиуса электрона” (в рамках концепции стационарной Вселенной). По-видимому, Вейль размышлял над этим соотношением, но обосновать его в рамках своей теории ему не удалось. В приложении к своей книге “Пространство. Время. Материя” (5 изд., 1923) Г. Вейль также указал на это соотношение: “Следует заметить, что отношение оцененного таким образом радиуса мира к радиусу электрона имеет тот же порядок ( $10^{40}$ ), что и отношение радиуса электрона к гравитационному радиусу его массы. Это наводит на мысль, что огромное значение постоянной  $\kappa$  (эйнштейновская гравитационная постоянная  $\kappa = 8\pi G/c^4$ . — *К.Т.*) связано с разницей в размерах электрона и Вселенной или, в конечном счете, с большим числом существующих электронов” (Вейль, 1923, с. 406).

Впоследствии — в приложении “Основные черты физического мира” к своей книге “Философия математики и естественных наук” — Вейль приводит еще одно большое число — отношение массы Вселенной к массе электрона (“число частиц во Вселенной  $N = 10^{80}$ ”) и высказывает идею, что гравитационное взаимодействие, возможно, определяется массой Вселенной: “Таким образом, мистический числовой фактор  $10^{40}$  (отношение гравитационного взаимодействия к электромагнитному. — *К.Т.*) оказывается связанным с этим числом  $N$  (которое можно принять как случайное) зависимостью типа  $\sqrt{N}$ . Если сказанное принять всерьез, то отсюда следует, что сила притяжения двух частиц зависит от величины общей массы Вселенной! Эта идея является не столь уж странной, какой она кажется на первый взгляд. Э. Мах давным-давно попытался представить инерционную массу тела как результирующую всех масс, находящихся во Вселенной. Теория гравитации Эйнштейна не удовлетворяет постулату Маха, хотя последний исторически и

<sup>1)</sup> Weyl, 1919, S. 129; цит. по: Горелик, 1982/83, с. 313.

сыграл определенную роль в разработке этой теории. Постулат Маха все еще ждет своей теории (не будет ли это статистическая теория гравитации, на которую вроде бы указывает квадратный корень в законе  $\sqrt{N}$ ?)” (Вейль, 1949, с. 349).

Упоминание Вейлем эмпирического соотношения между большими числами привело к ошибочному восприятию, что Вейль *объяснил* его в рамках своей единой теории. Так, А. Эддингтон в 1920 г. прямо писал: “Теория (Вейля) <...> дает объяснение того, почему гравитационная сила так ничтожно мала в сравнении с электрической силой. <...> Теория приводит к заключению, что отношение гравитационного радиуса к электрическому должно быть величиной того же порядка, что и отношение последнего к радиусу кривизны мира. Это бы значило, что радиус пространства должен быть порядка  $6 \cdot 10^{29}$  см <...> это немного больше, чем дают предварительные расчеты де Ситтера, но лежит в пределах возможного” (Эддингтон, 1920, с. 178). В дальнейшем, когда Эддингтон понял, что единая теория Вейля не дает ни связи больших чисел, ни значений безразмерных констант, он попытался построить свою теорию, основываясь на умозрительных предположениях о целочисленности постоянной тонкой структуры и числе частиц во Вселенной равного точно  $2 \cdot 136 \cdot 2^{256}$  ( $\approx 3,16 \cdot 10^{79}$ ).

В 1920-е годы произошел один из крупнейших поворотов во взглядах на устройство Вселенной — выяснилась ее нестационарность. В этих условиях идеи Эйнштейна и Вейля о возможной связи между большими числами, которые были выдвинуты ими в рамках теории стационарной Вселенной, представлялись уже не соответствующими реальности, ибо большие числа, связанные со Вселенной в целом — ее радиус и плотность, оказались зависящими от космологического времени. Эмпирические соотношения Эйнштейна и Вейля стали выглядеть случайными и выпали из поля зрения физиков вместе с концепцией стационарной Вселенной. Однако уже тогда их можно было переинтерпретировать в рамках двух различных исследовательских программ:

1. Эти соотношения выполняются не только для данного момента космологического времени, но всегда. Тогда неизбежен вывод о том, что гравитация ослабевает с космологическим временем (программа Дирака).

2. Эти соотношения характерны только для данного времени и, следовательно, современное космологическое время выделено тем, что наблюдаются эти совпадения (антропная программа).

Такие интерпретации уже могли появиться в 1920-е годы, но они были предложены значительно позже.

**4.4.3. Генезис программы переменных “констант”.** В 1920–30-е гг. появились идеи о зависимости некоторых фундаментальных физических постоянных от космологического времени. В 1927 г. Дж. де Брей, приведя сводку данных по измерению скорости света с 1902 г., отметил, что наблюдается постоянное линейное уменьшение

численного значения скорости света, которое выходит за рамки погрешностей проведенных экспериментов (*Bray, 1927*). В статье “Nature” в 1931 г. на основе данных новых опытов Дж. де Брей вновь повторил гипотезу об уменьшении скорости света со временем (*Bray, 1931*).

Теперь уже очевидно, что кажущееся монотонное изменение экспериментальных результатов часто не отражает какие-то природные закономерности, а связано с тем, что влияние на результаты опытов оказывают не только природные факторы, но и результаты предшествующих опытов. Дело в том, что экспериментатор, учитывая влияние тех или иных факторов на результат проведенного им опыта, бессознательно переоценивает те факторы, которые приближают его результат к результатам других экспериментаторов, и стремится пренебречь теми факторами, которые отдаляют его результат от результатов других опытов. Возможно, это же наблюдалось и по данным опытов по измерению скорости света в период первой трети XX века, что и привело к гипотезе М. де Брея.

В мае 1934 г. Ф.К. Эдмонсон на основе экспериментальных данных с 1870 г. по 1930 г. предположил, что существует закон периодических флуктуаций скорости света:  $V = 299885 + 115 \sin(2\pi(t - 1901)/40)$ , а Дж. де Брей сопоставил на графике этот закон с экспериментальными значениями (*Edmonson, 1934; Bray, 1934*). Гипотезы об изменении скорости света со временем обсуждалась на страницах центральных научных журналов и рассматривались как возможные (см.: *Birge, 1934*), однако, в конце концов, не получили подтверждения и были благополучно забыты.

В эти же годы английским астрофизиком Э. Милном в рамках оригинальной “кинематической теории относительности” была выдвинута гипотеза о зависимости от времени гравитационной постоянной (*Milne, 1933*). Э. Милн, следуя “принципу научной экономии (scientific economy) сохранять кинематическое объяснение настолько, насколько это возможно” (там же, р. 10), обосновал явление расширения Вселенной чисто кинематическими аргументами, дополнив постулаты специальной теории относительности принципом универсальности картины мира, наблюдаемой в любой точке Вселенной (“космологический принцип Эйнштейна”). Гравитацию Э.Милн описывал с помощью ньютоновского закона тяготения и рассматривал как независимый фактор, действующий в расширяющейся Вселенной. При этом Милн получил ряд интересных следствий — закон расширения  $\dot{r} = r/t$  (фактически он первым предположил уменьшение постоянной Хаббла с космологическим временем), и соотношение  $GM \sim c^3 t$ , которое приводило к увеличению гравитационной постоянной  $G \sim t$ , так как массу Вселенной Милн считал неизменной. В статье “Структура мира и расширение Вселенной” (1933) Милн, анализируя полученные им соотношения, отметил в сноске: “Из этих соотношений следует, что “постоянная гравитации  $G$ ” — не постоянна, а пропорциональна времени  $t$ , измеренному с естественного начала времени. Это настолько революционное

предположение, что я отложу обсуждение этого и множества связанных с ним следствий до отдельной статьи” (там же, р. 82). Дальнейшая разработка кинематической теории была продолжена Милном в фундаментальной монографии “Относительность, гравитация и структура мира” (1935) и последующих статьях, в которых он обосновал, в частности, принципиальное различие между применяемыми шкалами в астрофизике и атомной физике (это Дирак считал основной заслугой Милна) (Milne, 1935, 1937). В этих работах Милн, говоря о гравитационной постоянной, слово “постоянная”, как правило, заключал в кавычки, предполагая ее увеличение со временем.

Гипотезы об изменении фундаментальных постоянных с космологическим временем, выдвигавшиеся в 1920–30-е гг. на совершенно разных экспериментальных и теоретических основаниях, подготовили почву для гипотезы Дирака объяснения “больших чисел” — выводы, к которым приводила гипотеза Дирака, уже не казались абсурдными.

**4.4.4. Гипотеза больших чисел Дирака.** К своей идее П.А.М. Дирак, по-видимому, пришел, размышляя над “пифагорейскими” идеями А. Эддингтона, который пытался связать количество частиц во Вселенной с числом  $2^{256}$ . На фоне развития физики в 1930-е годы (в том числе открытие распадов частиц) спекулятивные построения Эддингтона выглядели абсурдными. Не оспаривая правильность (“probably substantially correct”) обоснования Эддингтоном физических постоянных, имеющих небольшие порядки (постоянной тонкой структуры, отношения масс протона и электрона), Дирак отметил, что “большие числа — отношение электрических и гравитационных сил, действующих между электроном и протоном, порядка  $10^{39}$ , и отношение массы Вселенной к массе протона, порядка  $10^{78}$ , — столь огромны, что заставляют задумываться, что для них требуется какой-то совершенно иной способ объяснения. Согласно современным космологическим теориям Вселенная возникла около  $2 \cdot 10^9$  лет тому назад <...>. Если выразить срок  $2 \cdot 10^9$  лет в единицах, определяемых атомными постоянными, например, в единицах  $e^2/mc^3$ , то мы получим число, близкое к  $10^{39}$ . Это может означать, что указанные выше большие числа следует рассматривать не как константы, а как простые функции времени нашей эпохи (junctions of our present epoch), принять, что все большие числа



П.А.М. Дирак



порядка  $10^{39}$ ,  $10^{78}$  и т. д., встречающиеся в общей физической теории, с точностью до простых числовых множителей равны  $t$ ,  $t^2$  и т. д., где  $t$  — время в современную эпоху, выраженное в атомных единицах. Упомянутые простые числовые множители должны определяться теоретически, когда будет создана полная теория космологии и атомизма. При этом отпадает необходимость в теории, которая давала бы числа порядка  $10^{39}$ " (Dirac, 1937a, p. 323, рус. пер.: Дирак, 1937a, с. 335).

Таким образом, Дирак выдвинул принцип, согласно которому все большие числа определяются временем существования Вселенной и изменяются вместе с ним. Эта замечательная идея, высказанная в небольшой заметке в "Nature", сразу решала проблему происхождения больших чисел и впервые красиво и просто их объясняла. С объяснением больших чисел оказалась объясненной поразительная слабость гравитации по сравнению с остальными взаимодействиями, а также огромность массы Вселенной, что ни до, ни после Дирака не смогла сделать ни одна из теорий. Принцип Дирака, объясняя большие числа, одновременно вел к совершенно иным представлениям о физических постоянных. Идея нестационарности Вселенной, выдвинутая А. Фридманом, развитая Ж. Леметром, Э. Хабблом и Э. Милном, доводилась Дираком до окончательной завершенности — все основные мировые параметры оказывались нестационарными — Вселенная не только расширялась пространственно, но и росла ее масса, а гравитационное притяжение одновременно ослабевало.

Гипотеза Дирака дала импульс для развития ряда релятивистских теорий гравитации на основе различия инертной и гравитационных масс, что означало "измену" эйнштейновскому принципу их эквивалентности (опыт Этвеша, как известно, доказывает универсальность пропорциональности инертной и гравитационной масс, оставляя возможность для их понятийного различия). Гравитационная постоянная в таких теориях выступает как уменьшающийся с космологическим временем коэффициент пропорциональности между инертной и гравитационной массами. Сам Дирак считал, что такой подход "неудовлетворителен", поскольку означает и отказ от достижений общей теории относительности Эйнштейна, прежде всего — объяснения движения перигелия Меркурия (Дирак, 1975/78, с. 73).

Дирак предпочитал развивать свою гипотезу на основе модернизации эйнштейновской теории путем введения дополнительного скалярного поля. В 1970-е гг. ему удалось оформить свои идеи в конформно-инвариантную скалярно-тензорную теорию гравитации. Ранее — в 1950–60-е гг. были созданы и другие варианты скалярно-тензорных теорий, например, скалярно-тензорная теория Бранса-Дикке <sup>1)</sup>, основанная на привлечении принципа Маха для объяснения

<sup>1)</sup> Brans, Dicke, 1961, Dicke, 1963, Дикке, 1964

силы гравитационного взаимодействия, как обусловленной массой и размерами Вселенной. В этом направлении работали П Йордан, Дж Нарликар, К.П Станюкович, В Н Мельников и ряд других физиков <sup>1)</sup> Новые варианты такого рода теорий появляются вплоть до последнего времени Несмотря на "оживление" гравитационного направления, скалярно-тензорной программе в гравитации не удалось до сих пор серьезно поколебать позиции эйнштейновской теории тяготения, прежде всего из-за отсутствия экспериментального подтверждения вариативности гравитационной постоянной (в печати было опубликовано несколько работ, например, Ван Фландерном, об экспериментальном подтверждении изменяемости гравитационной постоянной со временем, но ни одна из этих работ не получила статус общепризнанного достижения <sup>2)</sup>

Проверить гипотезу больших чисел Дирака непосредственно изменением гравитационной и других постоянных трудно, поскольку их предполагаемое изменение в современный период должно составлять всего лишь ок.  $10^{-11}$  в год (а точность определения гравитационной постоянной всего лишь  $10^{-4}$ ), но можно исследовать следствия из этой гипотезы Одним из проверяемых макроэффектов является изменение расстояний между небесными телами и изменение скорости вращения небесных тел. Для расстояния до Луны Дираком было подсчитано, что эффект должен составлять ок 2 см/год. Причем его теория допускала два разных варианта — уменьшения расстояния в случае *аддитивного* рождения вещества (т.е. рождения вещества во всем пространстве) и увеличения расстояния в случае *мультипликативного* рождения вещества (т.е. размножения частиц). Дирак допускал комбинацию аддитивного и мультипликативного рождения, но отдавал предпочтение чисто аддитивному рождению, считая его совершенно новым процессом, аналогичным радиоактивности. Существенно большие изменения (ок 10 м/год) предсказывались для орбит планет. Дирак возлагал особые надежды на исследования группы ученых под руководством И. Шапиро, но, несмотря на значительные усилия, никакими экспериментальными исследованиями эффект Дирака так и не был обнаружен <sup>3)</sup>

Однако гипотеза Дирака оказалась плодотворной Благодаря ей в геофизике возникла программа "растущей Земли", продолжающая активно развиваться <sup>4)</sup> Раскол праматерика в отдаленном прошлом интерпретируется в рамках этой программы как неизбежное следствие увеличения объема Земли

<sup>1)</sup> Jordan, 1937, 1955, Narlikar, 1974 Станюкович, 1962, 1971, Станюкович, Мельников, 1983

<sup>2)</sup> Van Flandern, 1975a,b, 1976, Алешкина и др 1987

<sup>3)</sup> Shapiro et al, 1971, Reasenberg, Shapiro, 1976, Hellings et al, 1983

<sup>4)</sup> Йордан, 1962, Jordan, 1966, The expanding earth, 1981, Кэри, 1987, Проблемы расширения и пульсации Земли, 1984

Гипотеза Дирака дала импульс развитию программы исследования возможной зависимости физических постоянных от космологического времени, достигшей своего пика в середине 1970-х гг., и приведшей к установлению жестких ограничений на “переменность” физических постоянных.

**4.4.5. Постоянные изменяются?** Идея Дирака об изменении со временем гравитационной постоянной привела к формированию новой исследовательской программы анализа возможных изменений *всех физических постоянных*. Импульсом к этому, вероятно, послужила идея Г. Гамова изменения с космологическим временем элементарного заряда, выдвинутая им в 1967 г. (Gamov, 1967a,b,c). С конца 1960-х гг. число статей по исследованию гипотетической зависимости от времени физических постоянных неуклонно росло, достигнув своего пика в середине 1970-х гг. Только в центральных журналах было опубликовано более 150 статей, целиком посвященных только этой проблеме, причем 2/3 из них — в 1974–76 гг. В большинстве из них, исходя из тех или иных соображений (как правило, астрофизических наблюдений удаленных объектов), авторы обосновывали *ограничения* на переменность постоянных, тем самым подтверждая традиционную программу, в которой физические постоянные предполагаются неизменными. Ученые обращали свой взор на небо, но оказалось, что наиболее жесткие ограничения на переменность постоянных накладывает то, что лежало под ногами — естественный ядерный реактор в Окло (Габон), работавший ок. 1,8 млрд. лет назад, неожиданно открытый французскими специалистами Комиссии по атомной энергии в июне 1972 г. в результате расследования причин расхождения процентного состава изотопов урана, добытого в Окло, от обычного <sup>1</sup>). В 1976 г. отечественный физик-ядерщик А.И. Шляхтер (ЛИЯФ) предложил использовать факт существования естественного ядерного реактора для оценки ограничений на изменение констант взаимодействий (Shlyakhter, 1976; Шляхтер, 1976). Если бы физические постоянные, характеризующие силы взаимодействий, существенно отличались от современных значений — реактор не мог бы тогда функционировать. Ограничения, рассчитанные Шляхтером по содержанию изотопа <sup>149</sup>Sm, который при захвате нейтрона переходит в другой изотоп <sup>150</sup>Sm, оказались очень жесткими: относительное изменение постоянной тонкой структуры не превышает 10<sup>-17</sup> в год. В докладе 1982 г. Шляхтер дал следующие ограничения на изменение констант взаимодействий (Shlyakhter, 1982, p. 16):

$$|\dot{\alpha}_s/\alpha_s| < 5 \times 10^{-19} \text{ год}^{-1}, \quad |\dot{\alpha}_e/\alpha_e| < 1 \times 10^{-17} \text{ год}^{-1},$$

$$|\dot{\alpha}_w/\alpha_w| < 2 \times 10^{-12} \text{ год}^{-1}.$$

<sup>1</sup>) The Oklo Phenomenon, 1975; Natural Fission Reactors, 1977.

Это существенно убавило интерес ученых к теме постоянности число публикаций по этой проблеме с конца 1970-х гг. значительно уменьшается.

Интересно, что сам факт существования в далеком прошлом естественного ядерного реактора мог быть теоретически предсказан задолго до его обнаружения. Вплотную к этому подошли Я.Б. Зельдович и Ю.Б. Харитон, показавшие в 1940 г возможность протекания цепной реакции при небольшом обогащении обычного урана его легким изотопом (Зельдович, Харитон, 1940) Из этой статьи фактически вытекала (вследствие разных скоростей распада  $U^{235}$  и  $U^{238}$ ) возможность протекания на Земле цепных ядерных реакций в далеком прошлом, когда процентное содержание изотопа  $U^{235}$  было выше современного значения 0,72 % (ок 2 млрд лет назад — 3,68 %), однако такой вывод авторы не сделали — ясно, что условия мировой войны диктовали практическую направленность их мысли Только в 1956 г была высказана возможность протекания естественных ядерных реакций (Kuroda, 1956a,b)

В дальнейшем к теме “Окло”, как источнику ограничений на изменение констант, обращались различные ученые, как сам А.И Шляхтер в лекции в ноябре 1982 г в Венгрии, так и Ю В Петров, Т Дамур и Ф. Дайсон, Я Фуджи и др. <sup>1)</sup> Результат, который получили Т Дамур и Ф Дайсон.  $|\Delta\alpha_e/\alpha_e| < 1,2 \times 10^{-7}$  и  $|\dot{\alpha}_e/\alpha_e| < 6,7 \times 10^{-17} \text{ год}^{-1}$  с момента существования реактора Окло (т.е. за последние 2 миллиарда лет) Я. Фуджи пришел к еще более жесткому ограничению  $|\Delta\alpha_e/\alpha_e| < 1 \times 10^{-8}$

Наиболее подробно экспериментальные аспекты проблемы возможного изменения констант представлены в обзорах 1970-х–90-х гг. Ф. Дайсона, Я М. Крамаровского и В П Чечева, И Л Розенталя, Г.В. Клапдор–Клайнгротхауса и А. Штаудта, В.Н Мельникова, а исторические аспекты — в обзорах Х Крага и автора <sup>2)</sup>. Последний наиболее детальный обзор с указанием всех основных ограничений на фундаментальные постоянные, полученных различными учеными, опубликован Ж -Ф Узаном (Uzan, 2002)

В результате многочисленных исследований стало ясно, что на зависимость физических постоянных от космологического времени наложены достаточно жесткие ограничения Можно утверждать с достаточной обоснованностью о независимости или исключительно слабой зависимости атомных постоянных и констант связи от космологического времени в течение последних нескольких миллиардов лет Однако, накладываемые ограничения сохраняют возможность слабых флуктуаций констант, которые зависят от радиусов дополнительных сверну-

<sup>1)</sup> Петров, 1977, Damour, Dyson, 1996, Fuji et al , 2002, Fuji, 2003a,b

<sup>2)</sup> Dyson, 1971/72, Крамаровский, Чечев, 1972, Чечев, Крамаровский, 1978, Розенталь, 1980, Клапдор–Клайнгротхаус, Штаудт, 1997, Мельников, 1994, Краг, 1990, Томили, 1995/97

тых размерностей в многомерных теориях Калуцы–Клейна, претендующих на объединение всех взаимодействий (Кландор–Клайнротхаус, Штаудт, 1995, с. 463), а также “инфляционных” изменений констант связи в начальный момент возникновения Вселенной.

В 1999 г. появились сообщения, основанные на анализе спектров поглощения удаленных квазаров, о том, что постоянная тонкой структуры в ранней Вселенной была меньше современного значения на  $10^{-5}$ . Дж. Вебб, В. Флэмбаум (все — Австралия), К. Чарчилл (США), М. Дринкуотер и Дж. Барроу (Великобритания) на основе данных от телескопа Кекс-1 по 30 линиям поглощения квазаров получили следующие результаты <sup>1)</sup>:

$$\Delta\alpha_e/\alpha_e = (-1,09 \pm 0,36) \times 10^{-5} \quad (\text{для периода } 0,5 < z < 1,6).$$

Два года спустя относительное изменение  $\alpha$  было скорректировано в сторону уменьшения:  $\Delta\alpha_e/\alpha_e = (-0,72 \pm 0,18) \times 10^{-5}$  для  $0,5 < z < 3,5$  (Dzuba, Flambaum, Murphy, Webb, 2001).

В 2003 г. авторы подтвердили изменение постоянной тонкой структуры на основе анализа 78 линий поглощения, но с еще меньшим значением (Murphy, Webb, Flambaum, 2003):  $\Delta\alpha_e/\alpha_e = (-0,574 \pm 0,102) \times 10^{-5}$  для  $0,2 < z < 3,7$ .

В 2003 г. данные Вебба и др. были подвергнуты критике Дж. Бакалом, Ч. Стейнхардтом и Д. Шлегелем (Принстон), которые на основе линий излучения кислорода показали, что спектры накладывают менее жесткие ограничения на изменение постоянной тонкой структуры, чем утверждали другие авторы (Bahcall et al, 2003):

$$\Delta\alpha_e/\alpha_e = (-0,7 \pm 1,4) \times 10^{-4} \quad \text{для } 0,16 < z < 0,80;$$

$$\Delta\alpha_e/\alpha_e = (1,2 \pm 0,7) \times 10^{-4} \quad \text{для квазаров;}$$

$$\Delta\alpha_e/\alpha_e < 10^{-4} \quad \text{за } 10 \text{ млрд. лет.}$$

В связи с гипотезой Дж. Вебба и др. появились спекуляции о якобы возможном изменении с космологическим временем скорости света или элементарного заряда <sup>2)</sup>. На самом деле, как уже указывалось выше (см. Введение), изменение безразмерных постоянных (т.е. постоянных класса А) вовсе не приводит к изменению размерных констант класса С (т.е. метрологических независимых постоянных), а лишь к изменению размерных констант класса В. Поэтому нет никаких оснований считать, что гипотетическое изменение  $\alpha$ , должно обязательно вызывать изменение скорости света, постоянной Планка или элементарного заряда, так как все эти три постоянные в принципе являются метрологически независимыми. На самом деле, если такой эффект, действительно, будет открыт, то изменение  $\alpha$  следует отождествлять

<sup>1)</sup> Webb et al, 1999, Dzuba et al., 1999

<sup>2)</sup> Barrow, Magueijo, 1998; Albrecht, Magueijo, 1999; Moffat, 2001; Magueijo, Barrow, Sandvik, 2002; Davies, Davies, Lineveaver, 2002, p 602, Черепашук, Чернин, 2003, с 298; Das, Kunstatler, 2003, p 2016, Barrow, 2003, p. 651, Magueijo, 2003, p 7, Ignatiev, Carson, 2005 и др

просто с соответствующим изменением коэффициента в законе Кулона  $k_e \sim \alpha$  (т.е. силы электромагнитного взаимодействия), а не постоянных  $c$ ,  $h$  или  $e$ . Если же жестко фиксировать коэффициент  $k_e$ , как это делается в гауссовой системе или системе Лоренца–Хевисайда, то изменению  $\alpha$  будет соответствовать изменение  $e^2$ , так как в этих системах единиц величина заряда *определяется* как  $e^2 \sim \alpha$ .

## Глава 4.5

### Антропная программа

Ряд философских и религиозных учений был построен на том принципе, что человек находится в центре мироздания, как венец творения, поэтому в рамках таких учений ответ на вопрос "почему мир таков, каков он есть?" был очевиден: мир создан для человека. Развитие классической науки было прямо связано с тем, что исследователь начал относиться к окружающему миру как независимому от него объекту, подлежащему изучению. Это позволило выявить объективные физические закономерности и создать современную науку. Однако в XX в. выяснилось удивительное соответствие между значениями основных параметров нашего мира (трехмерностью пространства, расширением Вселенной, параметрами Земли и Солнечной системы, и, особенно, численными значениями физических постоянных) и условиями существования жизни. Это стало физической основой для возникновения в 1950–60-е гг. *антропной программы*, в рамках которой при всех ее самых различных интерпретациях (от редукционистской до телеологической) принимается следующее объяснение значений параметров мира (в том числе и безразмерных констант) — *они таковы, потому что обеспечивают условия существования наблюдателя, при других значениях этих параметров наблюдателя не было бы вообще*.

Открытие корреляции между физическими параметрами мира и условиями существования органической материи вновь привело к изменению места человека в мире, что сравнимо с изменением мировоззрения под влиянием коперниканского учения. Оказалось, что само существование наблюдателя в нашей Вселенной можно рассматривать тоже как экспериментальный факт и, основываясь на этом факте, с учетом жестких ограничений на физические параметры системы, внутри которой может существовать органическая материя, можно предсказать основные физические свойства системы. Таким образом, в основе антропного подхода лежит то, что *уже сам факт существования наблюдателя накладывает достаточно жесткие ограничения на параметры мира, включая численные значения констант*.

В данной главе мы не будем подробно представлять все самые разнообразные философские интерпретации антропного принципа, так как они уже неоднократно и подробно анализировались в научной литературе (Barrow, Tipler, 1986/88). Наша цель, учитывая направленность

книги, — рассмотреть физические основания антропного принципа — корреляцию численных значений основных параметров нашего мира и условий существования органической материи, и показать, как антропный подход можно применять для выявления взаимосвязей между фундаментальными физическими постоянными

**4.5.1. Генезис антропной программы.** Различные философские учения прошлого, ставящие человека в центр мироздания, очевидно, перекликаются с крайними интерпретациями антропного принципа. Поэтому их в некотором смысле можно рассматривать как предвосхищение антропных идей, хотя они и не опирались ни на какие физические закономерности. Начиная по крайней мере с XVII в., антропные аргументы время от времени привлекались учеными для отсева тех или иных космологических теорий. Сербский астроном М. Чиркович обратил внимание на антропную аргументацию Б.Фонтенеля, высказанную им еще в 1685 г. в связи с теорией происхождения комет, а также на антропные аргументы древнегреческих философов (Čirković, 2002, 2003). В XX в антропные аргументы использовал А. Эддингтон для критики оценки возраста Вселенной  $10^{13}$  лет, сделанной Дж. Джинсом. По мнению Эддингтона, возраст Вселенной вряд ли превышает  $10^{10}$  лет, так как “если бы были верны предположения о биллионах лет, астрономы должны были бы почитать за особое счастье тот факт, что они явились как раз вовремя, чтобы наблюдать спиральные туманности — эти интересные, но быстро исчезающие небесные объекты” (цит по: Бронштейн, 1931, с. 183).

В дальнейшем одним из истоков развития антропной программы стала критика космологических следствий из гипотезы больших чисел Дирака, из которой вытекало уменьшение гравитационной постоянной с космологическим временем. Так, в 1948 г. Э. Теллер использовал антропную аргументацию против гипотезы Дирака (Teller, 1948). Теллер, анализируя следствия из гипотезы Дирака, отметил, что изменение гравитационной постоянной  $G$  приводит к изменению светимости Солнца (и других звезд) пропорционально  $G^7$ , а радиуса земной орбиты  $G^{-1}$ . Это означало, что в геологически давние времена, когда на планете зарождалась жизнь, температура земной поверхности была бы гораздо выше допустимой для существования жизни. Это было серьезным вызовом теории Дирака. Хотя контраргументы Теллера были позже опровергнуты Г. Гамовым и др. — более плавное падение температуры при уменьшении  $G$  и больший возраст Вселенной, однако сама идея Теллера наглядно демонстрировала продуктивность антропного подхода в космологии.

Если в течение столетий антропная аргументация привлекалась эпизодически и *post hoc* для отсева нежизнеспособных космологических теорий и гипотез, то на рубеже 1950-х–60-х годов астрофизики перешли к решению обратной задачи, т. е. получению данных о физических параметрах системы просто исходя из факта существования

внутри системы высокоорганизованной органической материи, а затем и к философско-методологическому осмыслению тесной взаимосвязи наблюдаемых параметров Вселенной и физических условий существования жизни.

В 1957 г. советский астрофизик Г.М. Идлис, поняв односторонность редукционизма, сводящего живую материю к неживой, первым прямо поставил *обратный вопрос*, фактически инициировав антропную программу: “Интересно и принципиально важно поставить обратный вопрос: почему наблюдаемая нами часть Вселенной представляет собою расширяющуюся систему галактик, состоящих из звезд с обращающимися вокруг них планетами, на одной из которых обитаем мы? Нельзя ли решить этот вопрос исходя из самого факта нашего существования? Другими словами, не являются ли основные черты наблюдаемой астрономической Вселенной простым следствием того, что перед нами не произвольная часть бесконечной в своем многообразии Вселенной, а такая конкретная конечная область ее, в которой жизнь заведомо имела возможность возникнуть и существует в настоящее время налицо? Целью настоящей работы и является попытка последовательного решения этой проблемы: почему окружающий нас мир таков, как он есть? Философское значение соответствующих результатов заключается в обосновании того, что некоторые наблюдаемые закономерности природы (например, дифференциация материи на космические тела типа Галактики, звезд и планет, красное смещение внегалактических туманностей) должны быть, вообще говоря, типичными для обитаемых областей Вселенной (в пространстве и во времени), в то время как для всей Вселенной в целом эти закономерности могут и не быть типичными” (Идлис, 1958, с. 39)

Далее Идлис, опираясь на сопоставление данных биохимии и астрофизики, детально проанализировал ограничения, накладываемые на физические параметры обитаемых космических систем, и показал, что температурный диапазон должен соответствовать  $\pm 10\%$  от средней температуры  $T = 300$  К, источник энергии должен быть достаточно удален и его температура должна быть больше 1500 К и много меньше  $10^5$  К, так как в противном случае либо энергии недостаточно для развития жизни, либо источник энергии растратит ее быстрее, чем успеет развиться жизнь. “Поэтому, — делает вывод Идлис, — имеются все основания считать, что необходимый для эффективного развития жизни источник излучения действительно должен принадлежать к миру звезд” (там же, с. 45). Причем, для этого подходят не все звезды, а лишь звезды главной последовательности с массами  $M < 1,3M_{\odot}$ . Далее Идлис получает ограничения на массы планет и приходит к выводу, что “зарождение и эффективное развитие жизни возможно только на планетоподобных космических телах, с массами порядка массы Земли или несколько меньше:  $10^{28} - 10^{26}$  г, т.е.  $M_{\oplus} = 5 \times (10^{-6} \div 10^{-8})M_{\odot}$  (там же, с. 46). Помимо этого колебания температуры накладывают ограничения на эксцентриситет орбит планет:



$e \leq 0,2$ . Из оценки вероятности реализации таких условий как  $10^{-6}$ , Идлис получает, что масса типичной обитаемой звездной системы должна превышать  $10^6 M_c$ , что как раз соответствует массам галактик. Необходимость разнообразия химических элементов и слабого гравитационного влияния на планетные системы со стороны других звезд накладывают верхнее и нижнее ограничения на плотность обитаемых звездных систем:  $10^{-32} \text{ г/см}^3 < \rho \ll 2 \cdot 10^{-14} \text{ г/см}^3$ , которому удовлетворяют средние плотности Млечного Пути и других галактик, соответствуя среднему геометрическому из предельных значений. В последнем параграфе Идлис показывает, что обитаемая Метагалактика должна быть расширяющейся, поскольку в противном случае росли бы светимости и температура бы превысила предельно допустимую для конденсации материи, необходимую для образования планет, а также обсуждает различные ограничения на среднюю плотность и возраст Метагалактики (там же, с. 49).

Таким образом, Г.М. Идлис показал наличие прямой связи между существованием жизни и рядом характерных явлений и процессов, которые нами наблюдаются. Он подчеркнул, что *“основные черты наблюдаемой астрономической Вселенной (обращение планет вокруг звезд, объединенных в галактики, составляющие расширяющуюся Метагалактику) являются характерными свойствами для любой типичной обитаемой космической системы”*, при иных же условиях жизнь в известной нам форме отсутствует. “Это очень важное положение, — подчеркнул Идлис, — означающее, что мы наблюдаем заведомо не произвольную область Вселенной, а ту, особая структура которой сделала ее пригодной для возникновения и развития жизни” (там же, с. 52). К сожалению, исследовательская работа Г.М. Идлиса была опубликована в труднодоступном для западных ученых казахстанском астрофизическом журнале и ее значение было признано астрофизиками уже после выдвижения Картером антропного принципа, в частности, Я.Б. Зельдовичем, Дж. Барроу и Ф. Типлером.

Антропную аргументацию развивал в 1950-е–1960-е гг. А.Л. Зельманов. Еще в 1955 г. в докладе на 2-м съезде Всесоюзного астрономо-геодезического общества он отметил: “Может существовать связь между такой особенностью окружающей нас области, как наличие условий, допускающих развитие жизни, с одной стороны, и иными особенностями этой области, с другой. Так, например, при длительном взаимном сближении галактик или звезд в достаточно протяженной области плотность излучения в ней должна стать столь высокой, что жизнь в этой области будет невозможна. Напротив, достаточно быстрое и длительное взаимное удаление галактик в такой области заметно понижает плотность излучения и, таким образом, является одним из факторов, благоприятствующих появлению и развитию жизни” (Зельманов, 1955/60). На международном симпозиуме “Диалектика и современное естествознание”, состоявшемся в Москве в октябре 1966 г. Зельманов совершенно ясно выразил

суть того, что получило позже название антропного принципа: “В области космических, а тем более космологических масштабов самая возможность существования субъекта, изучающего Вселенную, определяется свойствами изучаемого объекта. Приведу пример. Мы живем в области, где по крайней мере в течение десяти миллиардов лет (или около того) происходит расширение Вселенной. Думаю, что нам не пришлось бы жить там, где в течение десяти миллиардов лет происходит сжатие: в такой области должна быть высокая плотность излучения с большой долей ультрафиолетовой радиации и жизнь в таких условиях была бы невозможна. Таким образом, *мы являемся свидетелями процессов определенного типа потому, что процессы другого типа протекают без свидетелей*” (Зельманов, 1966/70, с. 396; курсив мой — К.Т.). Фактически эта была точная и емкая формулировка антропного принципа, и сам Зельманов позже отметил, что “это положение представляет собой антропологический принцип в формулировке автора” (Зельманов, 1988, с. 77).

На рубеже 1950-х–1960-х годов Р. Дикке, развивавший идеи Дирака в сочетании с принципом Маха, пришел к осознанию “ограничений, накладываемых биологическими требованиями (biological requirements), связанными с эпохой человека (epoch of man)”, на космологические теории (Dicke, 1957; 1961, p. 440). Р. Дикке показал, что наблюдаемое время существования Вселенной должно соответствовать характерному времени развития звезд главной последовательности, иначе не успела бы развиться органическая форма жизни (там же). Таким образом, в 1950–60-е гг. антропное обоснование получил факт расширения наблюдаемой части Вселенной (Зельманов, Идлис), существования планетной системы, массы звезд и планет, плотность звездных систем (Идлис), и наблюдаемое время существования Вселенной (Дикке).

Те идеи, которые широко обсуждали астрофизики в 1950–60-е годы, сформулировал в виде *антропного (антропологического) принципа* английский математик и физик Б. Картер. Это он сделал на международной конференции в 1970 г. в Принстоне, посвященной памяти У. Клиффорда, и в докладе в сентябре 1973 г. на международном симпозиуме в Кракове по проблеме расхождения космологических теорий с данными наблюдений и приуроченном к 500-летию со дня рождения Н. Коперника (Картер, 1973, с. 369–380). Выдвижению принципа прямо предшествовали два препринта Картера, посвященные большим числам в астрофизике, с которыми познакомиться, к сожалению, не удалось (Carter, 1968; 1970). К идее этого принципа Картер, как он сам вспоминал, пришел после прочтения “Космологии” Г. Бонди (Bondi, 1960), в которой Бонди анализировал некоторые “совпадения больших чисел”, как основания для появления некоторых “экзотических” теорий (типа теорий Дирака, Йордана и др. с изменяющейся гравитационной постоянной  $G$ ). Б. Картер также сослался на работу Р. Дикке (Dicke,

1961), в которой он привлек биологические аргументы для обоснования современного момента космологического времени.

Размышляя над соотношениями между большими числами, Б. Картер пришел к обратному — “эти совпадения не только далеки от того, чтобы служить свидетельством в пользу таких экзотических теорий, скорее следует считать, что они подтверждают «обычную» (расширяющаяся Вселенная в общей теории относительности) физику и космологию”, в рамках которых можно было бы “заранее, до наблюдений, предсказать все эти соотношения”, если предположить справедливость “*антропологического принципа, согласно которому то, что мы ожидаем наблюдать, должно быть ограничено условиями, необходимыми для нашего существования как наблюдателей*” (Картер, 1973, с. 370). Подводя итог, Б. Картер прямо противопоставил антропную программу программе переменных констант Дирака и “пифагорейской” программе Эддингтона (там же, с. 375).

В дальнейшем антропная программа вышла далеко за рамки альтернативного подхода к объяснению больших чисел. Важнейшим фактором ее развития стало исследование *связи всех параметров нашего мира* (в том числе и значений безразмерных физических постоянных, имеющих “нормальные” порядки) *с условиями существования органической материи*. Осмысление этой взаимосвязи выразилось в появлении широкого спектра различных интерпретаций — от редуционистской до телеологической. Однако любая интерпретация основана прежде всего на корреляции между параметрами мира и условиями существования высокоорганизованной материи, поэтому кратко укажем основные корреляции, выявленные различными учеными.

**4.5.2. Фундаментальные параметры и условия существования жизни.** Фундаментальные параметры, характеризующие нашу Вселенную — размерность пространства, время существования Вселенной, средняя плотность Вселенной, численные значения констант связи, характеризующих “силы” взаимодействий, оказываются определенным образом связанными с условиями существования жизни.

1) *Трехмерность пространства и четырехмерность пространства–времени*, характерная для нашего мира, оказывается важным условием для существования высокоорганизованной материи.

Начиная с И. Канта, который, по-видимому, первым обратил внимание на связь закона всемирного тяготения с трехмерностью пространства, постепенно уясняется проявление размерности пространства во всех основных законах физики. В дальнейшем, уже в начале XX в. выяснилась связь классической электродинамики с четырехмерностью пространства–времени, что привело к переформулировке всей физики на основе четырехмерного формализма.

С точки зрения математики трехмерное пространство не является ничем особенно выделяющимся среди  $n$ -мерных пространств. Однако

с точки зрения законов физики оказалось, что 3-мерное пространство и 4-мерное пространство-время — это совершенное особое пространство, обладающие рядом уникальных свойств. Большое значение для исследования особенностей этих пространств имела работа П. Эренфеста 1917 г. (*Ehrenfest*, 1917, рус. пер.: *Эренфест*, 1917). В дальнейшем особенности 4-мерного мира обсуждались Г. Вейлем, А. Эддингтоном, Дж. Уитроу, М.В. и А.М. Мостепаненко, Ю.С. Владимировым <sup>1)</sup>. Наиболее подробное исследование этой проблемы выполнено в монографии Г.Е. Горелика <sup>2)</sup>. В результате исследований выяснилось, что

а) В центральном поле сил орбиты тел устойчивы только при  $n \leq 4$ , где  $n$  — размерность пространства-времени. При  $n > 4$  орбиты представляют собой спирали. Та же ситуация сохраняется не только для плоского, но и для искривленного  $n$ -мерного пространства,

б) Атомы устойчивы только при  $n \leq 4$ . При  $n > 4$  либо уровни энергии отсутствуют (нет связанных состояний), либо отрицательные уровни энергии простираются до минус бесконечности (т.е. электрон перескакивает постоянно все ниже и ниже, излучая при этом энергию);

в) Принцип Гюйгенса справедлив только в пространствах с нечетной размерностью (пространстве-времени с четной размерностью).

Кроме этого, максвелловская электродинамика является конформно инвариантной (т.е. не зависит от масштаба длин) только при  $n = 4$ ; квантовая электродинамика перенормируема только при  $n \leq 4$  и т.д.

Таким образом, четырехмерное пространство-время оказывается *необходимым* для существования планетных систем и атомов, т.е. для формирования основных объектов макромира. Это позволяет сделать вывод, что высокоорганизованная материя возможна лишь в четырехмерном пространстве-времени.

Это, однако, не исключает, наряду с явной (3 + 1)-размерностью мира, возможности существования *скрытых* размерностей, что является важным для единой "теории всего"

2) *Время существования Вселенной* также накладывает определенные ограничения на возможность существования жизни. Если это время слишком мало, то высокоорганизованная материя просто не успевает развиваться (возраст нашей Вселенной — ок. 13,7 млрд лет, возраст Земли — 4,5 млрд лет, для эволюции органической материи от простейших микроорганизмов до *homo sapiens* потребовалось ок. 3 млрд лет). Таким образом, одно из больших чисел — *наблюдаемое время существования Вселенной* отнюдь не случайно — оно определяется законами эволюции органической материи.

<sup>1)</sup> Вейль, 1918, с 522, Эддингтон, 1924, с 50–51, *Eddington*, 1949, p 107–126, *Whitrow*, 1955, Мостепаненко, 1966, с 47–109, с 152–162, Владимиров, 1982, 1987, с 5–8, 1988, с 40–47, с 55

<sup>2)</sup> Горелик, 1983, с 57–62, популярное изложение см. Горелик, 1982

3) *Плотность Вселенной* по крайней мере с точностью до одного порядка соответствует критической плотности, а скорее всего равна:

$$\rho \sim \rho_0 = \frac{3H^2}{8\pi G}.$$

Поскольку эволюция Вселенной определяется гравитационным взаимодействием, масса и плотность Вселенной оказываются важными параметрами, определяющими ее эволюцию.

Если бы плотность Вселенной была значительно меньше критического значения  $\rho \ll \rho_0$ , то расширение было бы столь быстрым, что галактики не были бы устойчивыми. В противном случае  $\rho \gg \rho_0$ , время жизни Вселенной было бы слишком малым для развития высокоорганизованной материи.

4) *Константа гравитационной связи*. Если бы не выполнялось условие

$$\alpha_g^{1/4} < \alpha_e^2 \frac{m_e}{m_p},$$

то отсутствовали бы галактики и звезды (Розенталь, 1980, с. 248).

5) *Постоянная тонкой структуры*. Если бы постоянная тонкой структуры была больше или меньше на два порядка (в  $10^2$  раз), то атомы, как устойчивые связанные состояния не существовали бы в принципе. Если бы постоянная тонкой структуры была больше или меньше на порядок (в 10 раз), это привело бы либо к отсутствию сложных ядер, либо к отсутствию нейтральных атомов (там же, с. 243).

Устойчивость  $\alpha$ -частицы (энергия связи ок. 7 МэВ) накладывает ограничения на постоянную тонкой структуры, как константу электромагнитного взаимодействия. Если бы постоянная  $\alpha$  была больше в 7–8 раз, это привело бы к увеличению во столько же раз электромагнитного отталкивания протонов, которое составляет почти 1 МэВ, следовательно,  $\alpha$ -частицы потеряли бы устойчивость и ядра с атомным номером  $A > 4$  отсутствовали. Таким образом:

$$\alpha_e^{-1} > 20.$$

Еще более жесткие ограничения накладываются на постоянную тонкой структуры некоторыми вариантами единой теории поля. Так, И.Л. Розенталь рассматривает наиболее простой вариант такой теории, объединяющий КХД и теорию электрослабого взаимодействия на основе группы SU(5) (там же, с. 251–252). Ограничения, которые она накладывает на постоянную тонкой структуры:

$$80 < \alpha_e^{-1} < 170.$$

Причем, если допустить, что Вселенная закрыта и время распада протона больше, чем характерное время существования звезд главной последовательности, то должно осуществляться следующее соотношение

$$\alpha_e^{-1} \geq \ln \alpha_g^{-1},$$

которое и выполняется в нашей Вселенной (там же, с. 252).

б) *Константа слабого взаимодействия.* Существует согласованность между значениями константы слабого взаимодействия, гравитационного взаимодействия и отношением масс протона и электрона (Розенталь, 1980, с. 244):

$$\alpha_w \sim \alpha_g^{1/4} \gamma^{3/2}, \quad \text{где } \gamma = m_p/m_e.$$

Это эмпирическое соотношение и каких-либо теоретических обоснований его нет (в следующем параграфе предлагается его возможное объяснение как скрытая формула для массы электрона). Если бы это соотношение сильно нарушалось, это бы также вело к катастрофическим последствиям для Вселенной. Так, если бы константа слабого взаимодействия была значительно меньше этого критического значения:  $\alpha_w \ll \alpha_g^{1/4} \gamma^{3/2}$ , то весьма эффективно протекала бы реакция синтеза  $n + p \rightarrow d + \gamma$  и все нуклоны превратились бы в гелий, т. е. во Вселенной отсутствовал бы водород. В случае выполнения обратного соотношения  $\alpha_w \gg \alpha_g^{1/4} \gamma^{3/2}$  гелий вообще не возникал бы.

Соотношение между константами слабого и гравитационного взаимодействий определяет и строение звезд (там же, с. 244).

Таким образом, должно выполняться соотношение  $0,1\alpha_g^{1/4} < \alpha_w \gamma^{-3/2} < 10\alpha_g^{1/4}$ .

7) *Константа сильного взаимодействия.* Цепь нуклеосинтеза во Вселенной тесно связана с параметрами сильного взаимодействия. Если рассмотреть такие системы, как дейтрон (протон+нейтрон), для которого условие устойчивости выполняется на пределе, и ядро  $\text{He}^2$ , для которого условие устойчивости едва не выполняется (энергия связи  $-92$  кэВ), то это накладывает жесткие ограничения на численное значение константы сильного взаимодействия (обычно оценивается на характерном масштабе ядерных взаимодействий  $1$  ГэВ). Превышение этих ограничений приводит к "катастрофическим последствиям" (Чечев, Крамаровский, 1978; Розенталь, 1980). Если бы константа сильного взаимодействия была бы меньше на 9%, то дейтрон, как устойчивая система, перестал бы существовать (Чечев, Крамаровский, 1978, с. 153). Это привело бы к нарушению цепи нуклеосинтеза и ядра с атомными номерами  $A > 1$  во Вселенной просто бы отсутствовали, т. е. Вселенная была бы на 100% из водорода.

С другой стороны, если бы сильное взаимодействие было "сильнее" на 4%, то существовал бы устойчивый бипротон. Как было отмечено Ф. Дайсоном (Dyson, 1971), это привело бы вместо термоядерной реакции  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$  к реакции, определяемой электромагнитным взаимодействием  $p + p \rightarrow \text{He}^2 + \gamma$ , которая протекала бы настолько быстро (в виде взрыва), что весь водород выгорел бы на ранних стадиях расширения Вселенной (Розенталь, 1980, с. 242). То, что такого взрыва не было, одновременно накладывает и ограничения на изменение с космологическим временем константы сильного взаимодействия — она не могла измениться более, чем на 9% за время

существования Вселенной. Это приводит к следующим ограничениям численного значения  $\alpha_s$  (для энергий  $\sim 1$  ГэВ):

$$0,91 < \alpha_s < 1,04,$$

$$|\dot{\alpha}_s/\alpha_s| < 5 \cdot 10^{-12} \text{ год}^{-1}.$$

Таким образом, основные параметры нашего мира, в том числе значения констант связи физических взаимодействий оказываются тесно связанными с условиями существования жизни в той ее форме, в которой мы ее знаем.

**4.5.3. Антропный принцип как методологический принцип физики.** В данном параграфе мы хотели бы, не вдаваясь в анализ широкого спектра интерпретаций антропного принципа, отметить его сильные и слабые места в связи с фундаментальными физическими постоянными и показать, что антропный принцип можно включить в систему методологических принципов физики.

Длительный период физика развивалась, как уже указывалось, стараясь выделить и отторгнуть антропоморфные элементы. Физика стала наукой, изучающей внешний мир, сознательно отделяя его от человека. Такой подход, действительно, оказался плодотворным для изучения многих природных объектов, но не Природы в целом. На самом деле, человек находится не вне, где-то отдельно от изучаемой Природы, а *внутри* нее, т.е. внутри того объекта, который сам же изучает. И уже это само может расцениваться как некий экспериментальный факт, характеризующий нашу Вселенную. Чтобы пояснить данную ситуацию, представим себе “черный ящик”. Мы не знаем ничего ни о его содержимом, ни о условиях внутри него. Но если мы вдруг каким-то образом получаем информацию, что там находится какое-либо живое существо, например, кошка, то это сразу обеспечивает нас целым комплексом чисто *физической* информации о границах температуры, давления, силы тяжести, газового состава и т.д. Точно также и факт существования живых существ внутри нашей Вселенной накладывает определенные ограничения на параметры и законы эволюции Вселенной. Таким образом, само наблюдение мира (точнее факт существования наблюдателя) оказалось не столь тривиальным фактом, каким оно всегда казалось наблюдателю.

Существование наблюдателя (высокоорганизованной органической материи) хотя бы на какой-то стадии эволюции Вселенной накладывает жесткие условия на саму Вселенную. Таким образом, вывод, который прямо следует из представленных выше ограничений: *Вселенная, обладающая другими параметрами — принципиально ненаблюдаема*. Этому антропному постулату можно дать разные физические интерпретации в зависимости от того, насколько случайными или детерминированными рассматриваются параметры Вселенной.

1. При принятии параметров Вселенной как абсолютно случайных, вероятность совпадения всех их с условиями существования жизни столь ничтожно мала, что вряд ли может рассматриваться всерьез. Эту вероятность можно, однако, повысить почти до 1, если предположить либо последовательную многократную реализацию случайной “игры в кости”, либо “выкидывание” сразу множества костей.

Так, И.Л. Розенталь, А.Л. Зельманов и др. видят выход в идее *множественности миров*, которые существуют параллельно наряду с нашим, но ненаблюдаемы из-за своих параметров. При этом Зельманов подчеркивал, что “говорить о реальном существовании других вселенных имеет смысл лишь в случае, если сам факт их существования в принципе допускает проверку — непосредственную, эмпирическую, или косвенную, теоретическую”. По его мнению, новая теория должна оказаться такой, что будет предсказывать какие-то реальные свойства других вселенных, которые должны проявляться и в нашей вселенной и по изучению которых можно будет понять и общую картину.

Другая возможность заключается в *идее случайной реализации параметров* при периодическом последовательном прохождении нашей Вселенной через сингулярность — при этом наблюдаемой оказывается только та Вселенная, параметры которой оказались приемлемыми для существования наблюдателя. Против такого сценария высказался А.Д. Сахаров в письме Дж.А. Уилеру: “Мне мало симпатична идея о многократном творении в разных вариантах с различными “случайными” значениями безразмерных характеристик  $\frac{e^2}{\hbar c}$ ,  $\frac{M_p}{m_e}$  и т. п. Как в этом случае обеспечить наблюдаемую изотропию по этим характеристикам?” (Сахаров, 1969/70, с. 418).

2. Другой более широкий класс интерпретаций основан на признании *неслучайности* факта совпадения параметров нашей Вселенной и условий существования органической материи. Двумя крайними интерпретациями являются: а) редукционистская, рассматривающая жизнь как нечто производное от закономерностей эволюции неживой Вселенной. Ей противоположна позиция: б) Вселенная устроена так, чтобы на определенном этапе возникала жизнь. Такая Вселенная напоминает дом, который строится, чтобы в нем жили люди. “Вселенная должна содержать жизнь”, — постулирует Дж. Барроу (Barrow, 1983а, р. 149).

Редукционистская точка зрения обладает, несмотря на кажущуюся ограниченность, определенным потенциальным ресурсом для объяснения различных параметров живых существ. Ясно, например, что размеры живых существ в определенной мере ограничиваются именно параметрами нашей планеты: массы живых существ растут пропорционально кубу линейного размера, в то время как сечения мышц, которые должны удерживать эту массу — пропорционально квадрату. Следовательно, живые существа выше определенной критической высоты не смогут не только передвигаться, но и будут раздавлены под собственной тяжестью. Это же касается и растений. Очевидно, что на



какой-нибудь другой планете с подходящими для жизни условиями, но с меньшим или с большим ускорением свободного падения на поверхности, органические тела могли бы приобретать соответственно немного большие или немного меньшие размеры. Другой пример — человеческий глаз. Почему глаз “видит” в определенном узком диапазоне спектра электромагнитных колебаний? Максимум восприятия электромагнитного излучения человеческим глазом приходится на узкий оптический диапазон и соответствует максимуму излучения Солнца. Ясно, что это неслучайно, а было зафиксировано в ходе эволюции Солнца и органической материи на Земле. Развивая редукционистское направление, В. Пресс и А. Лайтман из тех или иных рациональных соображений выразили (с точностью до 1–2 порядков) характерные параметры различных макрофизических явлений и процессов, связанных с живой материей, через комбинации фундаментальных постоянных (Press, 1980; Press, Lightman, 1983).

На этих разнообразных физических интерпретациях основывается еще более широкий спектр различных философских интерпретаций, зависящих от натурфилософских взглядов их авторов. В дискуссиях о различных интерпретациях антропного принципа и его значении для физики и философии высказывались разные, часто противоположные точки зрения. Причем грань между негативными и позитивными оценками этого принципа проходит не между физиками и философами. И среди физиков, и среди философов есть достаточно много ученых, поддерживающих ту или иную интерпретацию антропного принципа — Дж. Барроу, А.Л. Зельманов, Г.М. Идлис, Б. Картер, И.Л. Розенталь (“принцип целесообразности”), Ф. Типлер, Дж. Уилер (“принцип участия”) и др., однако не меньшее число как физиков, так и философов отказывает антропному принципу в конструктивном содержании.

Философы В.В. Казютинский и В.В. Балашов считают, что “антропные аргументы не столько объясняют реальное положение дел в физическом мире, сколько представляют собой уклонение от прямого объяснения. <...> Если оставить в стороне телеологические взгляды и «версию участия», то с «антропным фактором» не связан никакой действительный отбор физической конституции нашего мира. Однако, нельзя ли взглянуть на антропные аргументы с иной стороны, считать их не столько ответами, сколько конкретными вопросами, на которые естественно ожидать ответа от физической науки в форме прямых причинно-следственных связей и в рамках строгой теории? Иными словами, не действует ли во Вселенной некий реальный (но не связанный с человеческим существованием) механизм отбора, отсеивающий в ходе эволюции «неблагоприятные» для морфогенеза обстоятельства?” (Казютинский, Балашов, 1989, с. 31).

Наиболее подробно различные интерпретации антропного принципа исследованы в фундаментальной монографии Дж. Барроу

и Ф. Типлера<sup>1)</sup>). Однако, на наш взгляд, было бы преждевременно стремиться дать ту или иную интерпретацию антропному принципу до тех пор, пока не будут выявлены все взаимосвязи между физическими постоянными и доказано существование случайных корреляций между численными значениями независимых констант, нарушение которых приводит к отсутствию высокоорганизованной органической материи. Дело в том, что многие физические постоянные выглядят в современной картине мира как независимые, однако мы находимся в настоящее время лишь на промежуточной станции к конечному пункту познания Природы, в котором все размерные постоянные физики окажутся сведенными к нескольким наиболее фундаментальным постоянным. Представим себе, что вы едете в другой город на научную конференцию, в дороге вы беседуете с вашими попутчиками на разные темы и вдруг обнаруживаете их осведомленность в научных вопросах, которыми вы занимаетесь. Вы поражаетесь случайности того совпадения, что в одном купе оказались люди с близкими научными интересами. Затем вы обнаруживаете, что ваши попутчики едут с вами в одном и том же автобусе, выходят на той же остановке и селятся с вами в одной и той же гостинице. Если вы будете исходить из случайности этих совпадений и оценивать их вероятность, вы придете к тому, что это совершенно невероятное совпадение. И, наконец, когда вы, придя на заседание конференции, увидите среди ее участников ваших попутчиков, то тогда для вас станет очевидным, что вы ехали на одну и ту же научную конференцию, а билеты на поезд вам забронировали ее организаторы. Таким образом, то, что казалось совершенно невероятной случайностью, получает простое и естественное объяснение. С численными значениями “независимых” постоянных точно такая же ситуация. *Чем более невероятным нам представляется факт корреляций численных значений “независимых” физических постоянных, тем более вероятной оказывается взаимосвязь между ними.* Таким образом, в данный момент антропные ограничения следует применять как инструмент поиска скрытых от нас физических закономерностей. Ясно, что для этой цели наиболее подходят антропные ограничения типа  $A \gg B$  и  $A \ll B$ , приводящие к фатальному разрушению мира. Вместо рассмотрения корреляции типа  $A \sim B$  как невероятной случайной реализации совпадения численных значений “независимых” постоянных, необходимо прежде всего исходить из закономерности этой взаимосвязи. Пока не будет доказана независимость постоянных, входящих в обнаруженное соотношение, любые интерпретации будут напоминать замки из песка, которые в любой момент могут быть разрушены набежавшей волной нового знания.

<sup>1)</sup> Barrow, Tipler, 1986/88; библиографию см.: Balashov, 1991; см также Глобальный эволюционизм, 1994; <http://www.anthropic-principle.com>.

В качестве конструктивного примера рассмотрим соотношения Розенталя, указанные в предыдущем параграфе. Как было им показано, соотношения  $\alpha_w \gg \alpha_g^{1/4} \gamma^{3/2}$  и  $\alpha_w \ll \alpha_g^{1/4} \gamma^{3/2}$ , где  $\gamma = m_p/m_e$ , приводят к катастрофическим последствиям, исключающим существование даже необходимых для жизни химических элементов (Розенталь, 1980, с. 244). Поэтому, в силу высказанных выше аргументов, необходимо исходить прежде всего не из случайности, а из закономерности соотношения  $\alpha_w \cong \alpha_g^{1/4} \gamma^{3/2}$ . Поскольку все три безразмерные постоянные входящие в это соотношение являются *специфическими* и привязанными к конкретной массе (у Розенталя — к массе протона:  $\alpha_w = \frac{G_F m_p^2 c}{\hbar^3}$  и  $\alpha_g = \frac{G m_p^2}{\hbar c}$ ), очевидно, следует преобразовать эту формулу к более *универсальному* виду. Как уже указывалось выше (см. 2.2.4) эти специфические безразмерные постоянные можно записать в виде:  $\alpha_w = \frac{m_p^2}{\sqrt{2} \eta^2}$  и  $\alpha_g = \frac{m_p^2}{m_{pl}^2}$ , где  $\eta$  — вакуумное среднее, а  $m_{pl}$  — планковская масса. Следовательно, соотношение  $\alpha_w \cong \alpha_g^{1/4} \gamma^{3/2}$  в универсальной форме выглядит следующим образом:

$$\eta^4 \cong m_{pl} m_e^3.$$

Если это соотношение выполняется точно, то оно связывает три фундаментальные постоянные — вакуумное среднее  $\eta$ , определяемое слабым взаимодействием, планковскую массу, определяемую гравитационным взаимодействием, и массу электрона. Поэтому его следует рассматривать как *формулу для массы электрона*:

$$m_e^3 = \text{const} \frac{\eta^4}{m_{pl}}. \quad (4.5.1)$$

Оценим, далее, безразмерную постоянную которая фигурирует в этом соотношении; используя значения  $\eta = 246,218(1)$  ГэВ,  $m_{pl} = 1,22090(9) \cdot 10^{19}$  ГэВ/с<sup>2</sup>,  $m_e = 0,510998918(44)$  МэВ, получаем, что константа равна 0,44326. Нетрудно заметить, что к этой эмпирической константе наиболее близка величина  $\frac{\sqrt{\pi}}{4} = 0,44311$ . Таким образом, если эта формула выполняется точно и если постоянная в ней равна точно  $\frac{\sqrt{\pi}}{4}$ , то формула для массы электрона должна иметь следующий вид (в системе  $c = 1$ ,  $\hbar = 1$ , массы и вакуумное среднее измеряются в электрон-вольтах):

$$m_e = \frac{1}{2} \left( \frac{2\sqrt{\pi}\eta}{m_{pl}} \right)^{1/3} \eta.$$

Отметим, что структура этой формулы соответствует современным представлениям о виде формулы для массы электрона:  $m_e = \frac{1}{2} \lambda \eta$ , где

$\eta$  — вакуумное среднее, а  $\lambda$  — некоторая специфическая безразмерная постоянная. Также следует отметить, что формально множитель  $\sqrt{4\pi}$  можно включить в модифицированное определение планковской массы как  $m_{pl}^* = \sqrt{\frac{\hbar c}{4\pi G}}$  (т.е. если применять систему единиц  $c = 1$ ,  $\hbar = 1$ ,  $4\pi G = 1$ ). Таким образом, наше предположение заключается в том, что масса электрона  $m_e = \frac{1}{2}\lambda\eta$ , где  $\lambda = \left(\frac{\sqrt{4\pi\eta}}{m_{pl}}\right)^{1/3} = \left(\frac{\eta}{m_{pl}^*}\right)^{1/3} = \left(\frac{\pi G}{G_F}\right)^{1/6}$  (если выбрать  $c = 1$ ,  $\hbar = 1$  и все постоянные измерять в электрон-вольтах). В обычных единицах (например, гауссовых) эта формула имеет более сложный вид:

$$m_e = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{4\pi\eta}}{m_{pl}c^8}\right)^{1/3} \quad \eta = \frac{1}{2} \left(\frac{4\pi G}{\hbar c}\right)^{1/6} \left(\frac{(\hbar c)^3}{\sqrt{2}G_F c^4}\right)^{4/6} = \frac{\hbar^2}{2c} \left(\frac{\pi G c}{G_F^4 \hbar}\right)^{1/6}$$

Отметим, что основную неточность в эту формулу вносит значение гравитационной постоянной, которая известна лишь с точностью до 3-х знаков (существует большой разброс экспериментальных значений  $G$  в 4-м знаке в разных экспериментах). При этом более точный результат был бы, если бы  $m_{pl} = 1,2205 \cdot 10^{19}$  ГэВ/ $c^2$ , что соответствует  $G = 6,6786 \cdot 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/( $\text{г} \cdot \text{с}^2$ ). Это значение гравитационной постоянной хорошо укладывается в доверительный интервал значения  $G = (6,673 \pm 0,010) \cdot 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/( $\text{г} \cdot \text{с}^2$ ), принятого в 1998 г., но отстоит на 4 доверительных интервала от значения, принятого в 2002 г.  $G = (6,6742 \pm 0,0010) \cdot 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/( $\text{г} \cdot \text{с}^2$ ), что ставит под сомнение точность этой формулы. Однако ряд поставленных опытов дает более высокие значения, чем принятое ныне значение  $G$ :  $6,6873(94) \times 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/кг · с<sup>2</sup> (Swarz et al., 1999),  $6,683(11) \times 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/кг · с<sup>2</sup> (Richman et al., 1999),  $6,67556(27) \times 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/кг · с<sup>2</sup> (Quinn et al., 2001). Существенный разброс значений различных современных опытов, возможно, свидетельствует о переоценке точности принятого в 2002 г. значения  $G$ , что оставляет некоторую надежду на справедливость вышеуказанной формулы.

Несомненно, лишь соответствующая физическая теория сможет дать точный ответ, действительно ли реализуется точно эта формула и действительно ли безразмерный коэффициент в ней оказывается равным именно этому значению. Если формула  $m_e = \text{const} \left(\frac{\eta}{m_{pl}}\right)^{1/3} \eta$ , действительно, реализуется, то она позволит продвинуться по пути более точного определения значения гравитационной постоянной. В ее пользу говорит то, что она соответствует современному представлению об общей структуре формул для масс частиц и одновременно позволяет объяснить почему мир является таким, каким мы его наблюдаем, без

прибегания к дополнительным гипотезам о множественности миров с другими наборами физических констант.

Таким образом, методологическая роль антропного принципа заключается в целенаправленном поиске антропных ограничений типа *A* не может быть ни много больше, ни много меньше, чем *B*, опираясь на которые можно предполагать существование физической взаимосвязи  $A \sim B$ .

И только в случае опровержения такой взаимосвязи, не останется ничего иного, как прибегать к той или иной интерпретации случайного совпадения независимых констант.

## Заключение

Появление фундаментальных постоянных явилось закономерным результатом развития физики. Классическая физика, которая в конце XIX в. казалась завершённой “теорией всего”, оказалась лишь предельным случаем более общей физической теории, построенной на существовании в Природе абсолютных масштабов, таких как скорость света  $c$  и постоянная Планка  $h$ . Открытие и осознание фундаментального статуса таких постоянных, как  $c$  и  $h$ , привело в первой трети XX века к квантово-релятивистской перестройке всей физики, а классические теории сохранили свою значимость в качестве предельных случаев более общих теорий, основанных на фундаментальности постоянных  $c$  и  $h$  (специальной и общей теории относительности и квантовой механики).

Напомним кратко обстоятельства появления этих двух фундаментальных постоянных в физике, а также элементарного заряда  $e$ , постоянной Больцмана  $k$  и гравитационной постоянной  $G$ , которые могут получить в будущем такой же статус как  $c$  и  $h$ .

Постоянная  $c$  была открыта в конце XVII–начале XVIII вв. как специфическая характеристика света — ее скорость распространения. Идея ее экспериментального определения была высказана Г. Галилеем, который, по-видимому, первым попытался оценить ее численное значение. Наблюдательные доказательства конечности скорости света были даны О. Рёмером и Дж. Брадлеем, как интерпретации эффектов Доплера и абберации, связь между которыми стала ясной только после создания СТО. Статус  $c$  существенно вырос после опыта В. Вебера и Р. Кольрауша (1856) и последовавшем затем объединении электричества и магнетизма и создании электромагнитной теории света (Максвелл, 1860-е). Дальнейшее развитие физики (открытие релятивистских преобразований, отрицательные результаты опытов по обнаружению абсолютного движения) закономерно привело к отказу от абсолютности пространства и времени, к установлению фундаментальности скорости света, операциональному определению одновременности, реабилитации принципа относительности с учетом фундаментальности  $c$  (принцип релятивистской инвариантности), открытию связи пространства и времени и переформулировке классической механики и других теорий на этой основе (Г. Лоренц, А. Пуанкаре, А. Эйнштейн, Г. Минковский). В то же время прогресс физики мог быть существенно ускорен (в частности, открытие группы Пуанкаре) при исследовании математических свойств волновых уравнений.

Постоянные Планка  $h$  и Больцмана  $k$  появились в 1900 г. в результате исследования взаимодействия теплового излучения с веществом как размерные коэффициенты в законе теплового излучения. Постоянные, введённые другими учеными в 1890-е гг. в связи с предлагавшимися ими законами теплового излучения, являются комбинациями постоянных  $h$ ,  $k$  и  $c$  и математических постоянных. В дальнейшем выяснилась эвристическая роль постоянной Планка в объяснении фотоэффекта (Эйнштейн) и теории строения атома (Бор). Дальнейшее развитие физики закономерно привело к пересмотру основ классической механики и созданию в 1925-27 гг. квантовой механики, в которой постоянная Планка играет фундаментальную роль.

Постоянная  $e$  (элементарный заряд) появилась в результате открытия законов электролиза с учетом концепции атомарного строения вещества. Роль элементарного заряда выросла в связи теорией атома и атомного ядра (квантование заряда ядра в единицах  $e$ ) и с развитием физики элементарных частиц (все свободные частицы имеют заряды, кратные  $e$ ). Квантование заряда в единицах  $e$  ставит элементарный заряд в один ряд с постоянными  $c$  и  $h$  в связи с их ролью естественных масштабов физических величин. В то же время, появление  $e$ , в отличие от постоянных  $c$  и  $h$ , не привело к пересмотру оснований физических теорий и их модификации.

Гравитационная постоянная в законе всемирного тяготения появилась не ранее начала XIX в., по-видимому, только после реформы системы мер во Франции в конце XVIII в. Возможно, первым ее ввел С.Д. Пуассон в "Трактате по механике" (1811), по крайней мере наличие гравитационной постоянной в законе всемирного тяготения в каких-либо работах до этого пока не проявилось. Опыт Кавендиша был поставлен с целью определения средней плотности Земли, а не гравитационной постоянной, понятия которой в то время еще не существовало. Однако этот опыт открыл возможность определения численного значения гравитационной постоянной, а также масс Солнца и планет, в практических единицах. Гравитационная постоянная рассматривается ныне как такая же фундаментальная постоянная, как  $c$  и  $h$ , в связи с ролью планковских величин как границ применимости основных физических теорий, хотя она и не является естественной единицей какой-либо физической величины.

Начиная с 1930-х гг. были открыты новые взаимодействия (слабое и сильное) со своими константами связи и множество элементарных частиц. Лишь в 1960-70-е гг. удалось создать составные модели элементарных частиц и описать все три элементарных взаимодействия на основе стандартной модели. Ключевым моментом объединения взаимодействий стало открытие сближения констант связи при росте энергии с перспективой их объединения в одной точке. Однако схема включения тяготения остается пока не ясной.

Одним из важнейших свойств фундаментальных постоянных с точки зрения теории является то, что они выступают в качестве границ

применимости тех или иных физических теорий Развитие теоретической физики идет по направлению объединения теорий, с включением фундаментальных постоянных, фигурирующих в объединяемых теориях, в более общую Единую физическую теорию, очевидно, будет включать в себя полный набор фундаментальных постоянных ( $c$ ,  $h$ ,  $e$ ,  $k$  ), одна из которых пока еще не открыта или не получила такого статуса (возможные кандидаты —  $G$ ,  $\eta$ ,  $\Lambda_0$ ) Частные теории получаются из единой физической теории путем предельного перехода по той или иной постоянной Исходя из этих представлений строились различные модели взаимоотношения физических теорий, наибольшее распространение из которых получил “куб физических теорий”, построенный на единой физической теории как  $cSh$ -теории

Еще одним важнейшим свойством фундаментальных постоянных является то, что они выступают в качестве *абсолютных эталонов Природы* (т е эталонов, имеющих абсолютную собственную точность) На этой основе предлагались различные естественные системы единиц (Максвеллом, Стони, Планком, Хартри, Руарком, Штилле и др), которые были теоретически предпочтительнее практических систем единиц, но переход к которым в метрологии был не целесообразен до тех пор, пока не были открыты макроскопические квантовые эффекты, позволяющие эталонировать физические величины с требуемой точностью Это стало основой для перехода к квантовой метрологии, первый шаг к которой был сделан в 1983 г, когда некоторое значение скорости света было принято *точным* (т е скорость стала измеряться в долях от скорости света, а длина — в световых отрезках) Следующий шаг будет осуществлен в ближайшие годы, когда будут приняты точными такие постоянные как постоянная Планка  $h$  и элементарный заряд  $e$ , что позволит квантово-метрологически эталонировать механические и электромагнитные величины

После квантово-релятивистской революции в XX в сформировалось несколько научно-исследовательских программ, основной из которых была (и остается) программа фундаментальных констант (и как ее дополняющая часть — редукционистская программа), сутью которой были попытки введения новых фундаментальных постоянных Кроме этого, возникли альтернативные ей программы “пифагорейская” программа обоснования численных значений постоянных, основанная на стремлении подобрать формулы для безразмерных постоянных без всякого теоретического обоснования, программа переменных “констант”, возникшая из проблемы объяснения больших чисел в физике, антропная программа, основанная на корреляции численных значений констант и условий существования органической материи (т е наблюдателя) Возникновение альтернативных программ связано с трудностями программы фундаментальных постоянных и основано на ослаблении критериев, предъявляемых к физической теории — теоретической корректности и точного соответствия экспериментальным данным Основной ресурс для дальнейшего развития физики видится в программах,



основанных на жесткости теоретического критерия и на видоизменении остальных программ в сторону жестких критериев. Такой пример с антропной программой был рассмотрен выше: антропные ограничения необходимо прежде всего использовать для поиска скрытых природных закономерностей.

Попытки “насильственного” введения новых размерных фундаментальных постоянных, связанных с полем, длиной, массой, плотностью и т. д. пока не привели к реальному прогрессу физического знания. Развитие физики достаточно успешно осуществлялось без введения новых размерных фундаментальных постоянных. Однако в квантовой хромодинамике появилась размерная постоянная — энергия конфайнмента кварков  $\Lambda$ , естественная мера энергии, рассматриваемая некоторыми учеными как фундаментальная постоянная; а в физике элементарных частиц естественной мерой массы выступает вакуумное среднее  $\eta$ . В то же время в результате открытия квантования магнитного потока и квантового эффекта Холла были открыты фундаментальные магнитный поток  $\Phi_0$ , проводимость  $\sigma_H$  и сопротивление  $R_H$ , являющиеся комбинациями уже известных фундаментальных постоянных  $c$ ,  $h$  и  $e$ .

До сих пор еще не открыта (или открыта, но не имеет такого же фундаментального статуса как  $c$  и  $h$ ) еще одна фундаментальная постоянная, являющаяся метрологически независимой константой от этих постоянных. Наиболее популярно среди ученых причислять к этому классу ( $C$ -классу) гравитационную постоянную  $G$ . Тогда в качестве фундаментальных масштабов выступают планковские масштабы, введенные М.Планком в 1899 г. Другие возможные варианты — вакуумное среднее  $\eta = 246$  ГэВ — размерный параметр, определяемый постоянной Ферми, определяющий массы частиц, и энергия конфайнмента кварков  $\Lambda^{(5)} = 0,22(1)$  ГэВ — фундаментальная размерная постоянная квантовой хромодинамики (КХД), однако есть еще несколько таких масштабов, соответствующих разным типам кварков. В пользу энергии конфайнмента (в случае, если будет выделена из набора  $\Lambda$  одна наиболее фундаментальная) говорит то, что при объединении теории электрослабого взаимодействия (ТЭСВ) и КХД эта размерная постоянная должна сохранить свой статус и в объединенной теории. Так или иначе, по-видимому, только после объединения ТЭСВ и КХД станет окончательно ясным статус масштабов  $\Lambda$  и  $\eta$ , а также статус планковского масштаба. Это приведет, очевидно, и к установлению последней фундаментальной размерной постоянной.

Какие же основные проблемы, на наш взгляд, стоят перед современной физикой по отношению к фундаментальным физическим постоянным?

1. Открытие еще одной фундаментальной размерной постоянной класса  $C$  (метрологически независимой от констант  $c$ ,  $h$ ,  $e$  и  $k$ ). Прояснение подлинной роли постоянной Больцмана.

2. Объяснение численных значений безразмерных констант типа  $\alpha_e$  — постоянной тонкой структуры.

3. Открытие формул, описывающих массы простейших частиц (лептонов и кварков). Исходя из анализа размерностей можно предположить, что эти формулы должны выглядеть так:  $m_i = \lambda(\alpha_e, \alpha_s, \alpha_{wg})\eta$ , где  $\alpha_e$  — постоянная тонкой структуры,  $\alpha_s$  — постоянная сильного взаимодействия,  $\alpha_{wg} = \eta/m_{pl}$  — отношение вакуумного среднего  $\eta$  к планковской массе,  $\lambda$  — некоторая неизвестная функция. Вышеуказанные возможные формулы для массы электрона и Z-бозона (см. с. 155 и с. 306) имеют аналогичную структуру.

4. Открытие формул масс составных частиц (барионов, мезонов). Очевидно, что формулы для них будут иметь более сложную структуру, чем формулы для простейших частиц, так как требуют учета масс кварков и межкварковых сил. Возможно именно этим объясняется, что не удалось подобрать простые математические соотношения для отношений масс  $m_p/m_e$  и т. п.

5. Исследование возможных новых макроскопических квантовых эффектов и использование их для дальнейшего продвижения по пути квантовой метрологии, первым шагом на котором стало принятие в 1983 г. значения скорости света как точного. В ближайшее время необходимо перейти к выбору таких постоянных, как  $h$  и  $e$  как точных, и эталонировать на их основе килограмм и ампер (а, следовательно, вместе с выбором эталона частоты и все механические и электродинамические величины).

6. Открытие простой группы симметрии, объединяющей три элементарных взаимодействия, и точных законов объединения констант взаимодействий. Выяснение подлинной роли гравитации и способа ее объединения с другими взаимодействиями.

7. Обобщение физических принципов с учетом фундаментальных постоянных  $h$ ,  $e$  и  $k$  аналогично тому, как был обобщен принцип относительности с учетом фундаментальности скорости света. Возможно, таким же образом могут быть обобщены с учетом фундаментальных постоянных  $h$ ,  $e$  и  $k$ , соответственно, принцип наименьшего действия, принцип калибровочной инвариантности и принцип возрастания энтропии. В этом случае удалось бы получить еще три методологических принципа равного класса принципу релятивистской инвариантности и, таким образом, превратить основы физики в систему методологических принципов, применение которых позволяет получать все существующие физические законы.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- Adler S L* (1983) Einstein gravitation as a long wavelength effective field theory // *Phil Trans R Soc London A* 310, p 273–278
- Albrecht A, Magueijo J* (1999) A time varying speed of light as a solution to cosmological puzzles // *Phys Rev D* 59, 043516, astro-ph/9811018
- Alexanian M* (1975) Fine-structure constant and entropy in the early universe // *Phys Rev D* 11, p 722–723
- Amaldi U, Boer W de, Furstenau H* (1991) Comparison of grand unified theories with electroweak and strong coupling constants measured at LEP // *Phys Lett B* 260, 3–4, p 447–455
- Ambarzumian V, Iwanenko D* (1930) Zur Frage nach Vermeidung der unendlichen Selbststruckwirkung des Elektrons // *Zeit Phys*, 64, S 563–567
- Anderson P W, Rowell J M* (1963) Probable observation of the Josephson superconducting tunnel effect // *Phys Rev Lett*, 10, p 230–232
- Anderson P W* (1970) How Josephson discovered his effect // *Phys Today*, 23, № 11, p 23–29
- Ando T, Matsumoto Y, Uemura Y* (1975) Theory of Hall effect in a two-dimensional electron system // *J Phys Soc Japan*, 39, 2, p 279–288
- Aspden H* (1966) *The theory of gravitation* 2-ed Sabberton, Southampton, 1966, 132 p
- Aspden H* (1986) Fundamental constants from two-dimensional harmonic oscillations // *Spec Sci Tech*, 9, № 5, p 315–323
- Aspden H, Eagles D M* (1972) Aether theory and the fine-structure constant // *Phys Lett*, 41A, № 5, p 423–424
- Aspden H, Eagles D M* (1975) Calculation of the proton mass in a lattice model for the aether // *Nuovo Cimento*, 30A, p 235–238
- Avogadro* (1956) Congresso internazionale sulle constanti fondamentali della fisica e XLII congresso nazionale di fisica (Societa italiana di fisica, 6–11 Sept 1956) // *Nuovo Cimento Suppl*, 6, 1, p 1–419
- Babbage Ch* (1832) Letter to Sir D Brewster, on the advantage of a collection of the constants of nature and art // *Edinburgh J Sci*, 6, p 334 (1832)
- Bahcall J N, Steinhardt Ch L, Schlegel D* (2003) Does the fine-structure constant vary with cosmological epoch? // *ArXiv astro-ph/0301507*
- Balashov Yu V* (1991) The anthropic principle // *Am J Phys* 59(12), p 1069–1076
- Ball Rouse W W* (1893/1972) *An essays on Newton's "Principia"* N Y Johnson Reprint Corp, 1972, 175 p
- Barrow J D* (1983a) Anthropic definitions // *Quart J Roy Astron Soc*, 24, 2, p 146–153
- Barrow J D* (1983b) Dimensionality // *Phil Trans R Soc London A* 310, p 337–346

- Barrow J D* (2002) *The Constants of Nature From Alpha to Omega* London Jonathan Cape, 2002 N Y Pantheon, 2003, 353 p
- Barrow J D* (2003) Constants and variations from alpha to omega // *Astrophys and Space Sci* 283, p 645–660
- Barrow J D, Tipler F J* (1986/88) *The Antropic Cosmological Principle* Oxford, N Y Oxford Univ Press, 1986 2 ed 1988 706 p
- Barrow J, Magueijo J* (1998) Varying- $\alpha$  theories and solutions to the cosmological Problems // *Phys Lett B* 443, 104 astro-ph/9811072
- Bates H E* (1988) Recent measurements of the speed of light and the redefinition of the meter // *Am J Phys*, 56(8), p 682–687
- Bay Z, White J A* (1972) Frequency dependence of the speed of light in space // *Phys Rev D* 5, № 4, p 796–799 (1972) (16 Aug 1971)
- Bay Z, Luther G G, White J A* (1972) Measurement of an optical frequency and the speed of light // *Phys Rev Lett*, 29, № 3, p 189–192 (12 May)
- Benford F* (1943) The probable accuracy of the general physical constants // *Phys Rev*, 63, № 5–6, p 212
- Bethke S* (2002)  $\alpha_s$  2002 // arXiv hep-ex/0211012
- Bethke S* (2004)  $\alpha_s$  at Zinnowitz 2004 // arXiv hep-ex/0407021
- Bethke S* (2004a) QCD Studies at LEP // arXiv hep-ex/0406058
- Birge R T* (1929) Probable values of the general physical constants // *Rev Mod Phys*, 1, № 1, p 1–73, p 241
- Birge R T* (1932) The calculation of errors by the method of least squares // *Phys Rev*, 40, p 207–227
- Birge R T* (1934) Velocity of light // *Nature*, 134, p 771–772 (17 Nov)
- Birge R T* (1935) The value of the electronic charge // *Phys Rev*, 48, p 918
- Birge R T* (1937) On the values of fundamental atomic constants // *Phys Rev*, 52, p 241
- Birge R T* (1941) A new table of values of the general physical constants (as of August, 1941) // *Rev Mod Phys*, 13, p 233–239
- Birge R T* (1943) Comments on “The probable accuracy of the general physical constants” // *Phys Rev*, 63, p 213
- Boltzmann L* (1884) Ableitung des Stefan'schen gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Warmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie // *Ann Phys Chem*, 1884, Bd 22, S 291–294 *Рус пер Больцман*, 1884
- Bond W N* (1930) The values and inter-relationships of  $c$ ,  $e$ ,  $h$ ,  $M_p$ ,  $m_o$ ,  $G$  // *Phil Mag*, 10, p 994–1003
- Bond W N* (1931) The electronic charge // *Phil Mag*, 12, p 632–640
- Bondi H* (1960) *Cosmology* 2 ed Cambridge Cambridge Univ Press, 1960, 182 p
- Borie E* (1986) The role of the fine-structure constant in QED // *Metrologia* 22, p 140–145
- Born M* (1933) Modified field equations with a finite radius of the electron // *Nature*, 132, p 282 (19 Aug)
- Born M* (1933/34) On the quantum theory of the electromagnetic field // *Proc Roy Soc*, A143, p 410–437 (1934)

- Born M* (1934) Cosmic rays and the new field theory // *Nature*, 133, p. 63–64 (13 Jan).
- Born M.* (1938) A suggestion for unifying quantum theory and relativity // *Proc. Roy. Soc. London A* 165, p. 291–303.
- Born M, Infeld L.* (1933a) Electromagnetic mass // *Nature*, 132, p. 970 (23 Dec).
- Born M., Infeld L.* (1933b) Foundations of the new field theory // *Nature*, 132, p. 1004 (30 Dec).
- Born M., Infeld L.* (1934a) Foundations of new field theory // *Proc. Roy. Soc., A*144, p. 425–451.
- Born M, Infeld L.* (1934b) On the quantisation of the new field equations // *I. Proc. Roy. Soc., A*147, p. 522–546.
- Born M, Schrödinger E.* (1935) The absolute field constant in the new field theory // *Nature*, 135, p. 342 (28 Jan).
- Born M.* (1935) The mysterious number 137 // *Proc. Indian Acad. of Sciences A*2, p. 533–561. Рус. пер.: *Борн*, 1935.
- Boys C.V.* (1894) On the Newtonian constant of gravitation // *Proc. Roy. Soc. London* 56, p. 131–132.
- Boys C.V.* (1895) On the Newtonian constant of gravitation // *Phil. Trans. Roy Soc A*182, p. 1–72.
- Bradley J.* (1729) Account of a new discovered motion of the fixed stars // *Phil. Trans. Roy. Soc., 35, № 406*, p. 637–661; репринт. переизд.: *ISIS*, 16, № 49, p. 241–265 (1931).
- Bradt H.E* (1983) Maximal proper acceleration relative to the vacuum // *Lettere al Nuovo Cimento*, 38, № 15, p. 522–524.
- Brans C., Dicke R.H.* (1961) Mach's principle and relativistic theory of gravitation // *Phys. Rev.*, 124, № 3, p. 925–935.
- Bray, Gh. de M.E.J.* (1927) The velocity of light // *Nature*, 120, № 3025, p. 602–604 (22 Oct).
- Bray, Gh. de M.E.J.* (1931) The velocity of light // *Nature*, 127, № 3205, p. 522 (4 April).
- Bray, Gh de M.E.J.* (1934) Velocity of light // *Nature*, 133, p. 948–949 (23 June).
- Bronstein M.P.* (1936) Quantentheorie schwacher Gravitationsfelder // *Phys. Zeit d. Sowjetunion*, 6, S. 145–157.
- Burger T.J.* (1978) Calculating the fine structure constant // *Nature*, 271, p. 402.
- Byers N., Yang C.N.* (1961) Theoretical considerations concerning quantized magnetic flux in superconducting cylinders // *Phys. Rev Lett.*, 7, № 2, p. 46–49 (15 July).
- Cabibbo N.* (1963) Unitary symmetry and leptonic decays // *Phys. Rev. Lett.*, 10, № 12, p. 531–533.
- Caianiello E.R* (1981) Is there a maximal acceleration? // *Lettere al Nuovo Cimento*, 32, № 3, p. 65–70.
- Caianiello E.R., Landi G.* (1985) Maximal acceleration and Sakharov's temperature // *Lettere al Nuovo Cimento*, 42, № 2, p. 70–72.
- Carter B.* (1968; 1970) Large numbers in astrophysics and cosmology. Cambridge Preprint. ITA 1968; Princeton Preprint. N. J. Princeton Univ. 1970.
- Carter B* (1973) Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology // *Confrontation of cosmological theories with observational data / ed M.S. Longair. Dordrecht: Reidel, 1974, p. 291–298. Reprinted in Modern*

- Cosmology & Philosophy, J Leslie ed, 2nd ed Amherst, NY Prometheus Books, 1998, p 131–139
- Carter B* (1983) The anthropic principle and its implications for biological evaluation // *Phil Trans R Soc London A* 310, p 347–363
- Cassani P* (1882) Paolo Sarpi e le scienze naturali // *L'Ateneo veneto* (6), p 310–311
- Cavendish H* (1798) Experiments to determine the density of the earth // *Phil Trans Roy Soc London*, 88, p 469–526
- Ćirković M* (2002) On the first anthropic argument in astrobiology // *Earth, Moon and Planets* 91, p 243–254  
<http://www.anthropic-principle.com/preprints/MilanFirst.pdf>
- Ćirković M* (2003) Ancient origins of a modern anthropic cosmological argument // *Astron and Astrophys Trans*, 22, № 6, p 879–886, December 2003  
<http://www.anthropic-principle.com/preprints/Cirk2003.pdf>
- Clotfelter B E* (1987) The Cavendish experiment as Cavendish knew it // *Amer J Phys*, 55, № 3, p 210–213
- Cohen E R, Crowe C M, Dumond J W M* (1957) Fundamental constants of physics N Y, L, 1957, 287 p
- Cohen I B* (1944) Roemer and the first determination of the velocity of light N Y, 1944, 63 p
- Cohen I B* (1965) Introduction to Newton's "Principia" Cambridge MA, Harvard Univ, 380 p
- Cohn I* (1972) Quantum theory in the classical limit // *Amer J Phys*, 40, 3, p 463–467
- Cook A H* (1972) Quantum metrology – standards of measurement based on atomic and quantum phenomena // *Rep Prog Phys*, 35, 5, p 463–528
- Cook A H* (1987) Experiments on gravitation // *Three hundred years of gravitation* Cambridge, 1987
- Dahl P F* (1997) Flash of the cathode rays A history of J J Thomson's electron Bristol Institute of Physics Publishing, 1997, 526 p
- Damour Th, Dyson F* (1996) The Oklo bound on the time variation of the fine-structure constant revised // *Nucl Phys B* 480, p 37–54
- Danby J M A* (1983) Gravitation // *McGraw-Hill Encyclopedia of physics* Ed S P Parker, N Y, 1983, p 400–407
- Das S, Kunstatter G* (2003) Varying fine structure constant and black-hole physics // *Class Quantum Grav*, 20, p 2015–2023
- Davies P C V, Davies T M, Lineweaver C H* (2002) Cosmology black holes constrain varying constants // *Nature*, 418, p 602–603
- De Sitter W* (1917) On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences // *Mon Not R Astron Soc*, 78, p 3–28
- Deaglio R* (1957) Significato delle costanti fondamentali in fisica // *Nuovo Cimento Suppl*, 6, 1, p 28–34
- Deaver B S, Fairbank W M* (1961) Experimental evidence for quantized flux in superconducting cylinders // *Phys Rev Lett*, 7, № 2, p 43–46 (15 July)
- Delaney W* (1974) A new semiclassical elementary particle model // *Int J Theor Phys*, 10 (4), p 239–251

- DeWitt B.* (1962) in Gravitation: an introduction to current research. / Ed L Witten N Y. J Wiley&Sons, 1962, 481 p
- DeWitt B.* (1964) Gravity a universal regulator? // Phys. Rev. Lett, 13, № 3, p. 114–118 (1 June).
- Dicke R.H.* (1957) Principle of equivalence and weak interactions // Rev. Mod Phys 29, p 355–362.
- Dicke R.H.* (1961) Dirac's cosmology and Mach's principle // Nature, 192, № 4801, p. 440–441
- Dicke R.H.* (1963) Stellar evolution with varying G // Stellar Evolution Proc. Int. Conference 13–15 Nov. 1963 R. F. Stein, A. G. W. Cameron (eds.). N Y: Plenum Press, 1966, p. 319–329.
- Dirac P.A.M.* (1931) Quantized singularities in the electromagnetic field // Proc. Roy. Soc. A, 133, p 60–72. Pyc. пер. Дирак, 1931
- Dirac P.A.M.* (1937a) The cosmological constants // Nature, 139, № 3612, p 323. Pyc. пер.: Дирак, 1937a.
- Dirac P.A.M.* (1937b) A reply to Dr. H.Dingle // Nature, 139, p 1001–1002 Pyc. пер.: Дирак, 1937b.
- Dirac P.A.M.* (1938) A new basis for cosmology // Proc. Roy. Soc. (A), 165, p. 199–208 Pyc. пер.: Дирак, 1938.
- Dirac P.A.M.* (1948) The theory of magnetic poles // Phys. Rev., 74, p 817–830 Pyc. пер. Дирак, 1948.
- Dirac P.A.M.* (1978) The monopole concept // Int. J. Theor. Phys., 17, № 4, p. 235–247. Pyc. пер. Дирак, 1978.
- Doll R., Näbauer M.* (1961) Experimental proof of magnetic flux quantization in a superconducting ring // Phys. Rev. Lett, 7, № 2, p 51–52 (15 July).
- Duff M.J., Okun L.B., Veneziano G.* (2001) Dialogue on the number of fundamental constants: // ArXiv. physics/0110060.
- Duff M.J.* (2002) Comment on time-variation of fundamental constants // hep-th/0208093
- Duhamel M.* (1862) Cours de mécanique. Paris, 1862. T.1–2.
- Dyson F.* (1971) Energy in the Universe // Sci. Am., 225, № 3, p. 51–59.
- Dyson F.J.* (1971/72) The fundamental constants and their time variation // Aspect of quantum theory. A. Salam, E.P. Wigner (eds). Cambridge: Camb. Univ. Press, 1972, p 213–236.
- Dzuba V.A., Flambaum V.V., Webb J.K.* (1999) Space-time variation of physical constants and relativistic corrections in atoms // Phys. Rev. Lett 82(5), p 888–891
- Dzuba V.A., Flambaum V.V., Murphy M.T., Webb J.K.* (2001) Relativistic effects in Ni II and the search for variation of the fine-structure constant // Phys Rev A 63, 042509, 5 p.
- Eagles D.M.* (1976) A comparison of results of various theories for four fundamental constants of physics // Int. J. Theor. Phys, 15 (4), p. 265–270.
- Eddington A.S.* (1918) Report on the relativity theory of gravitation. London Fleetway press, 1920, 91 p
- Eddington A.S.* (1928) A symmetrical treatment of the wave equation // Proc. Roy. Soc London A 121, p. 524–542.
- Eddington A.S.* (1929) The charge of an electron // Proc. Roy. Soc London A 122, p. 358–369

- Eddington A S* (1930) The interaction of electric charges // *Proc Roy Soc London A* 126, p 696–728
- Eddington A S* (1932) On the mass of the proton // *Proc Roy Soc London A* 134, p 524–532
- Eddington A S* (1935) *New pathways in science* N Y The Macmillan company, Cambridge, Eng Camb Univ Press, 1935, 333 p
- Eddington A S* (1936) *Relativity theory of protons and electrons* Cambridge Camb Univ Press, 1936, 336 p
- Eddington A S* (1940a) A new derivation of the quadratic equation for the masses of the proton and electron // *Proc Roy Soc London (A)*, 174, № 956, p 16–41
- Eddington A S* (1940b) The masses of the neutron and mesotron // *Proc Roy Soc London A* 174, № 956, p 41–49
- Eddington A S* (1949) *Fundamental theory* Cambridge Camb Univ Press, 1949, 292 p
- Edmonson F K* (1934) Velocity of light // *Nature*, 133, p 759–780 (19 May)
- Ehrenfest P* (1906a) Bemerkung zu einer neuen Ableitung des Wienschen Verschiebungsgesetzes // *Phys Zeit*, 7, № 15, S 527–528
- Ehrenfest P* (1906b) Zur Planckschen Strahlungstheorie // *Phys Zeit*, 7, № 15, S 528–532 Рус пер *Эренфест*, 1972, с 40–57
- Ehrenfest P* (1906c) Bemerkung zu einer neuen Ableitung des Wienschen Verschiebungsgesetzes // *Phys Zeit*, 7, № 23, S 851
- Ehrenfest P* (1917) In what way does it become manifest in the fundamental laws of physics that space has three dimensions? // *Proc Amsterdam Acad*, 20, p 200–209 Рус пер *Эренфест*, 1917
- Einstein A* (1905a) Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt // *Ann Phys*, 17, S 132–148 (1905) Рус пер *Эйнштейн*, 1905a
- Einstein A* (1905b) Zur Elektrodynamik der bewegter Körper // *Ann d Phys*, 17, S 891–921 Рус пер *Эйнштейн*, 1905b
- Einstein A* (1909) Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblem // *Phys Zeit*, 10, S 185–193
- Einstein A* (1916) Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation // *Sitzungsber preuss Akad Wiss*, 1916, 1, S 688–696 Рус пер *Эйнштейн*, 1965/67, т 1, с 514–523
- Einstein A* (1918) Über Gravitationwellen // *Sitzungsber preuss Akad Wiss*, 1918, 1, S 154–167 Рус пер *Эйнштейн*, 1965/67, т 1, с 631–646
- Electron A centenary volume* (1997) Ed by M Springford Cambridge Cambridge Univ Press, 1997, 300 p
- Electrons et photons* (1927) *Rapports et discussions du cinquième conseil de physique, tenu à Bruxelles du 24 au 19 oct 1927* Sous les auspices de l'institut international de physique Solvay Paris Gauthier-Villars, 1928, 289 p
- Ellis J* (1983) Unification and supersymmetry // *Phil Trans R Soc Lond A* 310, p 279–292
- Englert T, von Klitzing K* (1978) Analysis of  $\sigma_{xx}$  minima in surface quantum oscillations on (100)-n type silicon inversion layers // *Surf Sci* 73, p 70–80
- Euler H, Kockel B* (1935) Über die Streuung von Licht an Licht nach der Diracschen Theorie // *Naturwissenschaften*, 23, № 15, S 246–247



- Everett J D* (1875) Illustrations of the C G S system of units L, 1875
- Everett J D* (1879) Units and physical constants 1879 Pyc nep *Эверетт*, 1888
- Falconer I* (1997) J J Thomson and the discovery of the electron // *Physics Education*, 32, № 1, p 226–231
- Fermi E* (1933) Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi  $\beta$  // *Ricerca Scientifica*, 4(2), S 491–495
- Fermi E* (1934a) Versuch einer Theorie der  $\beta$ -Strahlen I // *Zeit Phys*, 88, S 161–171 Pyc nep *Ферми*, 1934
- Fermi E* (1934b) Tentativo di una teoria dei raggi // *Nuovo Cimento*, 11, p 1–19
- Feynman R*, *Gell-Mann M* (1958) Theory of Fermi interaction // *Phys Rev*, 109, № 1, p 193–198
- Flowers J*, *Petley B W* (2001) Progress in our knowledge of the fundamental constants of physics // *Rep Prog Phys*, 64, p 1191–1246
- Flowers J* (2004) The route to atomic and quantum standards // *Science* 306, № 5700, p 1324–1330
- Frieden B R* (1986) A probability law for the fundamental constants // *Found Phys*, 16, № 9, p 883–903
- Friesen S von* (1937) On the values of fundamental atomic constants // *Phys Rev*, 52, p 886
- Fritzsche H* (1986) The constants of nature // *Metrologia*, 22, p 134–139
- Fritzsche H*, *Minkowski P* (1975) Unified interactions of lepton and hadrons // *Annals of Physics (New York)*, 93, p 193–266
- Frohlich J* (2001) Ein Blick zuruck, ein Blick nach vorn // *Phys Blatter* 57, № 7/8, p 53–58
- Froome K D*, *Essen L* (1969) The velocity of light and radio waves L, N Y Academic Press, 1969, 157 p
- Fuji Y*, *Iwamoto A*, *Fukahori T*, *Ohnuki T*, *Nakagawa M*, *Hidaka H*, *Oura Y*, *Moller P* (2002) Nuclear data in Oklo and time-variability of fundamental coupling constants // *ArXiv hep-ph/0205206*
- Fuji Y* (2003a) Time-variability of the fine-structure constant expected from the Oklo constraint and the QSO absorption lines // *Phys Lett B* 573, p 39–45, *astro-ph/0307263*
- Fuji Y* (2003b) Oklo constraint on the time-variability of the fine-structure constant // *ArXiv hep-ph/0311026*
- Fundamental constants in physics and metrology [70-th PTB-Symposium (1985, 21–22 October, Braunschweig, FRG)] // *Metrology*, 22, № 3 (1986)
- Furth R* (1929a) Uber das Massenverhältnis von Proton und Electron // *Naturwissenschaften*, 17, № 35, S 688–689
- Furth R* (1929b) Uber die Massen von Proton und Elektron // *Ibid*, 17, № 37, S 728–729
- Furth R* (1929c) Uber einen Zusammenhang zwischen quantenmechanischer Unschärfe und Struktur der Elementarteilchen // *Zeit Phys*, 57, S 429–446
- Gamow G*, *Ivanenko D*, *Landau L* (1928) World constants and limiting transitions // *Physics of atomic nuclei*, 65, 7, p 1373–1375 (2002)
- Gamow G* (1939) *Mr Tompkins in Wonderland, or stories of c, G, h* Cambridge, 1939, 62 p 2nd ed, 1965 Pyc nep *Гамов*, 1939

- Gamow G* (1949) Any physics tomorrow? // *Physics Today*, 2(1), p 16–20
- Gamow G* (1967a) Does gravity change with time? // *Proc Nat Acad Sci USA*, 57, № 2, p 187–193
- Gamow G* (1967b) Electricity, gravity, and cosmology // *Phys Rev Lett*, 19, № 13, p 759–761
- Gamow G* (1967c) Variability of elementary charge and quasistellar objects // *Phys Rev Lett*, 19, № 16, p 913–914
- Gamow G* (1968) Numerology of the constants of nature // *Proc Nat Acad Sci USA*, 59(2), p 313–318 (1968)
- Gauss K F* (1809) *Theoria Motus corporum coelestium in sectionibus conicis solem ambientium* Hamburg F Perthes et J H Besser, 1809, 228 S
- Gauss K F* (1813) *Theoria attractionis corporum sphaeroidicorum ellipticorum homogeneorum* (1813) // *Gauss K F Werke B 5* Gottingen, 1877, S 1–22
- Gauss K F* (1820/21) *Theoretische Astronomie gehort bei Gauss in Gottingen von May 1820 bis Marz 1821* *Рус неп Гаусс*, 1820/21
- Gauss K F* (1832) Intencitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata // *Gauss K F Werke*, B 5, S 79–118
- Gauss K F* (1840) Allgemeine Lehrzätze in Beziehung auf die im verkehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung wirkenden Anziehungs und Abstossungskräfte // *Gauss C F Werke B 5* S 195–242
- Georgi H, Glashow S* (1974) Unity of all elementary-particle forces // *Phys Rev Lett*, 32, № 8, p 438–441
- Georgi H, Quinn H R, Weinberg S* (1974) Hierarchy of interactions in unified gauge theories // *Phys Rev Lett*, 33, № 7, p 451–454
- Gerwar L, Cousins Chr* (1997) The discovery of the electron A Centenary // *Physics Education*, 32, № 1, p 219–225
- Gillies G T* (1983) The Newtonian gravitational constant Sevres (Frances) Bureau Intern Poids et Mesures, 1983, 135 p
- Gillies G T* (1997) The Newtonian gravitational constant recent measurements and related studies // *Rep Prog Phys*, 60, № 2, p 151–226
- Glashow S* (1961) Partial-symmetries of weak interactions // *Nucl Phys*, 22, p 579–588
- Goldberg S* (1970a) Poincare's silence and Einstein's relativity // *Brit J Hist Sci*, 5, p 73–84
- Goldberg S* (1970b) The Abraham theory of the electron the symbiosis of experiment and theory // *Archive for History of Exact Sciences*, 7, p 7–25
- Goldberg S* (1984) *Understanding relativity Origin and impact of a scientific revolution* Oxford Clarendon, 1984, 494 p
- Goldhaber M* (1983) The search for proton decay and other rare phenomena // *Phil Trans R Soc London A* 310, p 225–226
- Good I J* (1970) The proton and neutron masses and a conjecture for the gravitational constant // *Phys Lett*, 33A, № 6, p 383–384
- Gorelik G E* (1992) First steps of quantum gravitation and the Planck values // *Einstein Studies Vol 3*, Boston, 1992, p 364–379
- Gorelik G E, Frenkel V Ja* (1994) *Matvei Petrovich Bronstein and soviet theoretical physics in the thirties* Basel, Boston, Berlin Birkhauser Verlag, 1994, 208 p

- Gravitational measurements, fundamental metrology, and constants [Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Gravitational Measurements, Fundamental Metrology, and Constants (10th Course of the International School of Cosmology and Gravitation of the Ettore Majorana Centre for Scientific Culture) Erice, Italy, 2–12 May 1987] / ed. by V. de Sabbata and V.N. Melnikov. Dordrecht; Boston: Kluwer Acad. Publ., 1988, 552 p.
- Gretsky A.T.* (1959) Universal units of magnetism, mechanics and temperature // *J. Frank. Inst.*, 268, № 5, p. 388–400.
- Gross D.J., Wilczek F.* (1973) Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories // *Phys. Rev. Lett.*, 30, p. 1343–1346.
- Haas A.E.* (1906) Die Beziehungen zwischen dem Newtonschen und dem Coulombshen Gesetze // *Phys. Zeit.*, 7, № 19, S. 659.
- Haas A.E.* (1910) Über eine neue theoretische Methode zur Bestimmung des elektrischen Elementarquantums und des Halbmessers des Wasserstoffatoms // *Phys. Zeit.*, 11, S. 537–538.
- Hall A.R., Hall Boas M.* (1978) Unpublished papers of Isaac Newton. Cambridge: Camb Univ Press, 1978, 415 p
- Hartree D.R.* (1928) The wave mechanics of an atom with a non Coulomb central field // *Proc. Phil. Soc. (Cambridge)*, 24, p. 89–110.
- Hawking S.* (1971) Gravitational collapsed objects of very low mass // *Month. Notic. Roy. astron. Soc.*, 152, p. 75–78.
- Hawking S.W.* (1972) Black holes in general relativity // *Comm. Math. Phys.*, 25, p. 152.
- Hawking S.W.* (1974) Black holes explosions // *Nature*, 248, p. 30–31.
- Hawking S.W.* (1975) Quantum particle creation by black hole // *Comm. Math Phys.*, 43, p. 199.
- Hawking S.W.* (1983) The cosmological constant // *Phil. Trans. R. Soc. London. A* 310, p 303–310.
- Heisenberg W., Euler H.* (1936) Folgerungen aus der Diracshen Theorie des Positrons // *Zeit. Physik*, 98, S. 714–732.
- Heisenberg W.* (1966) Introduction to the unified field theory of elementary particles. L., N.Y., S.: Interscience, 1966, 177 p. Рус. пер.: *Гейзенберг*, 1966.
- Hellings R.W., Adams P.J., Anderson J.D., Keesey M.S., Lau E.L., Standish E.M., Canuto V.M., Goldman I.* (1983) Experimental test of the variability of  $G$  using Viking lander ranging data // *Phys. Rev. Lett.*, 51, № 18, p. 1609–1612.
- Helmholtz H.* (1881) On the modern development of Faraday's conception of electricity // *J. Chem. Soc.*, 39, p. 277–304. Рус. пер.: *Гельмгольц*, 1881.
- Helmholtz H.* (1882) Ueber absolute Maassysteme für electrische und magnetische Grössen // *Wiedemann's Annalen*, 17, S. 42–54, Wissenschaftliche Abhandlungen. B. 2, 1883, S. 993–1005.
- Herivel J.W.* (1965) The background to Newton's "Principia" Oxford: Clarendon Press, 1965, 337 p.
- Hermann A.* (1969) Frühgeschichte der Quantentheorie (1899–1913). Mosbach in Baden, 1969, 181 S. The genesis of quantum theory (1899–1913) Cambridge, Mass.: MIT Press, 1971, 165 p.

- Hinchliffe I.* (1998): Quantum chromodynamics, in: *Caso C. et al. Review of particle physics* // *Eur. Phys. J. C3*, 1.
- Holton G.* (1960) On the origins of the special theory of relativity // *Am. J. Phys.*, 28, 7, p. 627–636. *Рус. пер.: Холтон, 1960.*
- Holton G.* (1969a) Einstein and the “crusial” experiment // *Am. J. Phys.*, 37, 10, p. 968–982. *Рус. пер.: Холтон, 1969а.*
- Holton G.* (1969b) Einstein, Michelson, and the “crusial” experiment // *ISIS*, 60, № 212, p. 133–197. *Рус. пер.: Холтон, 1969b.*
- Holton G.* (1988) *Thematic origins of scientific thought: Kepler to Einstein.* Cambridge, MA: Harvard University Press, 1988, 499 p.
- Hund F.* (1967) *Geschichte der Quantentheorie.* Mannheim. 239 S. *Рус. пер.: Хунд, 1967.*
- Hutton Ch.* (1821) On the mean density of the Earth // *Phil. Trans. Roy. Soc. London* 111, p. 276–292.
- Huygens Chr.* (1677) *Oeuvres complètes.* T. 1–22. La Haye, 1888–1950. T. 8. *Correspondence 1676–1684*, p. 30–56.
- Ignatiev A.Yu., Carson B.J.* (2005) *Evolving fundamental constants and metrology* // *ArXiv: hep-ph/0509255.*
- Ignatovskiy W.* (1910) Einige allgemeine Bemerkungen zum Relativitätsprinzip // *Phys. Zeit.*, 11, S. 972–975.
- International conferences:
- (NM 1956) *Nuclear masses and their determination: proceedings of the conference held in the Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz, 10–12 July 1956* / ed. by H. Hintenberger. N.Y., London: Pergamon Press, 1957, 267 p.
- (NM 1960) *Nuclidic masses: proceedings of the International conference on nuclidic masses* / ed. by H.E. Duckworth. Toronto: University of Toronto Press, 1960, 539 p.
- (NM 1963) *Nuclidic masses: proceedings of the Second International conference on nuclidic masses (Vienna, Austria, 15–19 July 1963)* / ed. by W.H. Johnson. Wien–N.Y.: Springer–Verlag, 1964, 473 p.
- (AM 1967) *Atomic masses: proceedings of the Third International conference on atomic masses (28 Aug. – 1 Sept. 1967)* / ed. by R.C. Barber, Winnipeg: University of Manitoba Press, 1968, 901 p.
- (AMCO 1971) *Atomic masses and fundamental constants, 4: proceedings of the 4th International conference on atomic masses and fundamental constants* / ed. by J.H. Sanders and A.H. Wapstra. London; N.Y.: Plenum, 1971, 571 p.
- (AMCO 1975) *Atomic masses and fundamental constants, 5: proceedings of the 5th International conference on atomic masses and fundamental constants (Paris, June 1975)* / ed. by J.H. Sanders and A.H. Wapstra. London; N.Y.: Plenum, 1976, 681 p.
- (AMCO 1979) *Atomic masses and fundamental constants, 6: proceedings of International conference on atomic masses and fundamental constants (East Lansing, Mich., 1979)* / ed. by Jerry A. Nolen, Jr. and Walter Benenson. New York: Plenum Press, 1980, 572 p.
- (AMCO 1984) *Atomic masses and fundamental constants, 7: proceedings of International conference on atomic masses and fundamental constants (Darmstadt-Seeheim, Germany, 3–7 September 1984)* / ed. O. Klepper, 1984, 756 p.

- (AMCO 1988?): Atomic masses and fundamental constants, 8: Jerusalem, 1990.
- (AMCO 1992) Nuclei far from stability/atomic masses and fundamental constants 1992: proceedings of the 6th International conference on nuclei far from stability and the 9th International conference on atomic masses and fundamental constants held at Bernkastel-Kues, Germany, 19–24 July, 1992 / ed. R. Neugart and A. Wöhr. Bristol [England]; Philadelphia Institute of Physics Pub., 1993, 1006 p.
- (ENAM 1995) Exotic nuclei and atomic masses: first International conference on exotic nuclei and atomic masses (merger of earlier conferences, NFFS (Nuclei Far From Stability) and AMCO (Atomic Masses and Fundamental Constants). Arles, France, June 19–23, 1995, 884 p.
- (ENAM 1998) Exotic nuclei and atomic masses: Bellaire, Michigan, June 1998 / eds. B.M. Sherrill, D.J. Morrissey, C.N. Davids. Woodbury, N.Y.: American Institute of Physics, 1998, 1054 s.
- (ENAM 2001): Exotic nuclei and atomic masses : proceedings of the Third International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses, ENAM 2001, Hèameenlinna, Finland, 2–7 July 2001 / Berlin : Springer, 2003, 540 s.
- Irvine J.M.* (1983) Limits on the variability of coupling constants from the Oklo natural reactor // *Phil. Trans. R. Soc. London A* 310, p. 239–244
- Ivanenko D.* (1957) Non-linear generalizations of the field theory and the constant of minimal length // *Nuovo Cimento Suppl.*, 6, 1, p. 349–355.
- Ives H.E., Stilwell G.R.* (1937) Light signals on moving bodies as measured by transported rods and clocks // *J. Opt. Soc. Amer.*, 27, p. 177–180.
- Ives H.E., Stilwell G.R.* (1938) Experimental study of the rate of a moving atomic clock // *J. Opt. Soc. Amer.*, 28, p. 215–226
- Ives H.E., Stilwell G.R.* (1941) An experimental study of the rate of a moving atomic clock // *J. Opt. Soc. Amer.*, 31, p. 369–374.
- Jammer M.* (1966) The conceptual development of quantum mechanics. N.Y.: McGraw-Hill, 1966, 399 p. Рус. пер.: *Джеммер*, 1966.
- J Jeans J.* (1913) Bericht über den Stand der Strahlungstheorie // *Phys. Zeit.*, 14, № 25, S. 1297–99.
- Jordan P.* (1937) Die physikalischen Weltkonstanten // *Naturwissenschaften*, 25, № 32, S. 513–517.
- Jordan P.* (1944) Über die Entstehung der Sterne // *Phys. Zeit.*, 45, S. 183–190.
- Jordan P.* (1955) *Schwerkraft und Weltall. Grundlagen der theoretischen Kosmologie.* 2 Aufl. Braunschweig: F. Vieweg, 1955, 277 S.
- Jordan P.* (1966) Die Expansion der Erde. Folgerungen aus der Diracschen Gravitationshypothese. Braunschweig: F. Vieweg, 1966, 182 S
- Josephson B.D.* (1962) Possible new effects in superconductive tunneling // *Phys. Lett.*, 1, p. 251–253.
- Josephson B.D.* (1973) The discovery of tunnelling supercurrents. Nobel Lecture. December 12, 1973 // *Science*, 184, p. 527 (1974). Рус. пер.: *Джозефсон*, 1973.
- Jungnickel Chr., McCormack R.* (1996) *Cavendish.* Philadelphia, Pa.: Am. Phil. Society, 1996, 414 p.
- Kangro H.* (1970) *Vorgeschichte des Planckschen Strahlungsgesetzes.* Gmbh-Wiesbaden: F. Steiner Verlag, 1970, 271 S.

- Keswani G H.* (1965/66) Origin and concept of relativity // Brit. J. Phil. Sci., 15, № 60, p. 286–306, 16, № 61, p. 19–32 (1965); 16, № 64, p. 273–294; 17, № 2, p. 149–152, 17, № 3, p. 234–236 (1966). Рус. пер.: *Кесуани*, 1965/66.
- Kibble T W B* (1983) Phase transitions in the early Universe and their consequences // Phil Trans. R Soc. London A 310, p 293–302.
- Kibble B.P., Robinson I A.* (2003) Replacing the kilogram // Meas. Sci. Technol. 14(8), p. 1243–1248.
- Kirchhoff G.* (1860) Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht // Ann. Phys., 19, S. 275–301. Рус. пер.: *Кирхгоф*, 1860.
- Kirchner F.* (1939) Die Atomaren Konstanten  $e$ ,  $m$ , und  $h$  // Ergebnisse der Exakten Naturwiss. 18, S. 66
- Klein M.J., Needell A.* (1977) Some unnoticed publications by Einstein // ISIS, 68, p. 601–604.
- Klein O.* (1954) Actual problems of small and big numbers in physics // Kosmos (Sweden), 32, p 33.
- Klein O.* (1955) // Niels Bohr and the Development of Physics /Ed. W.Pauli, L.: Pergamon Press, 1955, p. 96. Рус. пер.: *Клейн*, 1955.
- Klein O.* (1956) Generalisations of Einstein's theory of gravitation considered from the point of view of quantum field theory // Helv phys. acta suppl., 1956, 4, p. 58.
- Klein O.* (1957) Some remarks on general relativity and the divergence problem of quantum field theory // Nuovo Cimento Suppl., 6, 1, p 344–348.
- Klitzing K.v., Dorda G., Pepper M.* (1980) New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance // Phys Rev. Lett., 45, p. 494–497 (1980). Рус. пер.: Квантовый эффект Холла, 1986, с. 10–17.
- Kobayashi M, Maskawa K.* (1972) CP-Violation in the normalizable theory of weak interaction // Progr. Theor. Phys. 49, 2, p. 652–657
- König A., Richarz F.* (1884/85) Eine Neue Methode zur Bestimmung der Gravitations-Constant // Sitzungsberichte der Berl. Akad., p 1203 (1884), Wied. Ann. d. Physik. Chem. 24, 664–668 (1885).
- Köveslighthety R.v.* (1890) Grundzüge einer theoretischen Spektralanalyse. Halle, 1890, 327 S
- Kopal Z.* (1975) Romer, Ole Christensen // Dictionary of scientific biography. Ed Ch.C.Gillispie. Vol. XI. N.Y: Charles Scribner's sons, 1975, p. 525–527.
- Kose V., Woger W.* (1986) Fundamental constants and the units of physics // Metrologia 22, p. 177–185
- Kox L.A J.* (1997) The discovery of the electron. II. Zeeman effect // The electron (born 1897): Centenary of a star in physics and chemistry. Eur. J. Phys., 18, № 3, p. 139–144.
- Kragh H.* (2003a) Magic number: a partial history of the fine-structure constant // Arch. Hist. Exact Science 57, p. 395–431 (2003).
- Kragh H.* (2003b) The fine-structure constant before quantum mechanics // Eur J. Phys 24, p. 169–173 (2003).
- Krat V.A., Gerlovin I L* (1974) On the constant of gravitation // Astrophys. Space Sci, 26, p 521–524.

- Kuhn T.S.* (1978) Black-body theory and the quantum discontinuity. 1894–1912. Oxford, N.Y.: Clarendon Press, Oxford Univ. Press, 1978, 356 p.
- Kulikov K.A.* (1964) Fundamental constants of astronomy. Jerusalem, 1964, 211 p.
- Kuroda P.K.* (1956a) On the nuclear stability of uranium minerals // *J. Chem. Phys.* 25, p. 81–82.
- Kuroda P.K.* (1956b) On the infinite multiplication constant and age of U minerals // *J. Chem. Phys.* 25, 781, p. 1295–96.
- Lambert J.H.* (1895) Theorie der Parallellinien // Die Theorie der Parallellinien von Euklid bis auf Gauss. Leipzig: Teubner, 1895, S. 152–207
- Langacker P.* (2003) Recent developments in precision electroweak physics // *J. Phys.*, G 29, p. 1–7.
- Larmor J.* (1900) Aether and Matter. A development of the dynamical relations of the aether to material systems. Cambridge: Camb. Univ. Press, 1900, 365 p. Рус. пер.: Лармор, 1900.
- Laue M.* (1907) Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip // *Ann. d. Phys.*, 23, S. 989–990. Рус. пер.: Лауэ, 1907.
- Laue M.* (1908) Das Additionstheorem der Entropie // *Phys. Zeit.*, 9, № 22, S. 778 (1 Nov.).
- Laughlin R.B.* (1981) Quantized Hall conductivity in two dimensions // *Phys. Rev.*, B 23, p. 5632–5633. Рус. пер.: Квантовый эффект Холла, 1986, с. 160–164.
- Lederman L.* (1986) Unification, grand unification, and the unity of physics // *Am. J. Phys.*, 54, 7, p. 594–600.
- Lenz F.* (1951) The ratio of proton and electron masses // *Phys. Rev.*, 82, p. 554 (5 Apr).
- Lévy-Leblond J.-M.* (1977) On the conceptional nature of the physical constants // *Rivista Nuovo Cimento*, 7 (2), p. 187–214.
- Lewis G.N., Adams E.Q.* (1914) Notes on quantum theory // *Phys. Rev.*, 3, № 2, p. 92–102
- Lewis G.N.* (1923) Valence and the structure of atoms and molecules. N.Y., 1923, 172 p
- Lewis G.N.* (1926) The conservations of photons // *Nature*, 118, p. 874–875.
- Likharev K.K., Zorin A.B.* (1984a) Bloch oscillations in the small Josephson junctions // *Proc. of the 17th International conference on low temperature physics. Contributed Papers.* Ed. by U. Eckern et al., p. 1153–1154
- Likharev K.K., Zorin A.B.* (1984b) A possible standard of current based on the secondary quantum macroscopic effects in superconductivity. Preprint № 7/1984, Department of Physics, Moscow State University.
- Likharev K.K.* (1985) Bloch oscillations in the small Josephson junctions: possible fundamental standard of DC current and other applications // *IEEE Trans Magn.*, 21, № 2, p. 943–946.
- LLewellyn Smith S.H.* (1983) The strong, electromagnetic and weak couplings // *Phil. Trans R. Soc. London A* 310, p. 251–252.
- London F.* (1948) On the problem of the molecular theory of superconductivity // *Phys. Rev.*, 74, № 5, p. 562–573 (предст. 25 апреля 1948).
- London F.* (1950) Superfluids. Vol 1.. Macroscopic Theory of Superconductivity. N.Y.: John Wiley&Sons, 1950, 161 p.

- Lorentz H.* (1892) The relative Motion of the Earth and the Ether // Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam, 1, p. 74–79 (1892); Collected Papers, 4, p. 219–223.
- Lorentz H.* (1895) Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern. Leiden: Brill, 1895. Collected Papers, 5, p. 1–137. Рус. пер. § 89–92.: *Лоренц*, 1895.
- Lorentz H.* (1899) Théorie simplifiée des phénomènes électriques et optiques dans des corps en mouvement // Traduit de Versl. K. Akad. Wetensch. Amsterdam 7, p. 507–522. Collected Papers, 5, p. 139–155
- Lorentz H.* (1902) The rotation of the plane of polarization in moving media // Versl. Akad. Amsterdam 10, p. 793, Collected Papers, 5, p. 156–166.
- Lorentz H.* (1904) Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity Less than that of Light // Proc. R. Acad. Amsterdam, 6, p. 809–831; Collected Papers, 5, p. 172–197. Рус. пер.: *Лоренц*, 1904.
- Lorentz H.* (1906/09) The Theory of Electrons. Leiden: Brill, 1909; rev. ed., 1916; New York: Dover, 1952. Рус. пер.: *Лоренц*, 1906/09.
- Lorentz H.* (1920) Das Relativitätsprinzip. Leipzig: Teubner, 1920.
- Ludovichi B.* (1956) New system of physical units and standards // Am. J. Phys., 5, p. 400–407.
- Lummer O., Pringsheim E.* (1897) Die Strahlung eines "schwarzen Körpers" zwischen 100 °C und 1300 °C // Wiedemannsche Ann. d. Phys., 63, S. 395–410.
- Lummer O., Pringsheim E.* (1899a) Die Vertheilung der Energie im Spectrum des schwarzen Körpers // Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 1, S. 23–41.
- Lummer O., Pringsheim E.* (1899b) (1) Die Vertheilung der Energie im Spectrum des schwarzen Körpers und des blanken Platins, (2) Temperaturbestimmung fester glühender Körper // Ibid, S. 215–235.
- Luo J., Hu Z.K., Fu X.H., Fan S.H., Tan M.X.* (1999) Determination of the Newtonian gravitational constant  $G$  with a nonlinear fitting method // Phys. Rev D59 042001
- Mach E.* (1913) Die Prinzipien der physikalischen Optik. Historisch und Erkenntnispsychologisch Entwickelt. Leipzig, 1921, 443 S.
- Magueijo J.* (2003) New varying speed of light theories // astro-ph/0305457.
- Magueijo J., Barrow J.D., Sandvik H.B.* (2002) Is it  $e$  or is it  $c$ ? Experimental Tests of Varying Alpha // Phys. Lett B 549, p. 284–289; astro-ph/0202374.
- Markov M.A.* (1965) Can the gravitational field prove essential for the theory of elementary particles? // Progr. Theor. Phys., Suppl. extra number. Commemoration Issue for 30th Anniversary of the Meson Theory by Dr.H. Yukawa, 1965, p. 85.
- Markov M.A.* (1983a) Asymptotic freedom and entropy in a perpetually oscillating Universe // Phys. Lett., 94A, № 9, p. 427–429. Марков, 2001, т. 2, с. 167–170.
- Markov M.A.* (1983b) Some remarks on the problem of very early Universe // The very early Universe. Cambridge: Camb. Univ press, 1983, p. 353–371; Марков, 2001, т. 2, с. 153–166.
- Massa C.* (1985) Ferrett's limit and Sakharov's temperature // Lettere al Nuovo Cimento, 32, № 3, p. 607–608.



- Maxwell J.C.* (1870) Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association, 1870 // *Maxwell J.C. The Scientific Papers* V1–2. Cambridge: Camb. Univ. Press, v 1, p. 45–60. Рус. пер.: *Максвелл*, 1968, с. 3–19.
- Maxwell J.C.* (1873) A treatise on electricity and magnetism. Vol.1–2. Oxford: Clarendon Press, 1873. Vol.1, 425 p.
- McCormach R.* (1968) John Michell and Henry Cavendish Weighting the stars // *Brit. J. Hist. Sci.*, 4, № 14, p. 126–155.
- McCormach R.* (1969) Henry Cavendish. A study of rational empiricism in eighteenth-century natural philosophy // *ISIS*, 60, pt. 3, № 203, p. 293–306.
- McCormach R.* (1971) Cavendish, Henry // *Dictionary of scientific biography*. Ed. Ch.C. Gillispie. Vol.3. N.Y.: Charles Scribner's sons, 1971, p. 155–159.
- Mehra J., Rechenberg H.* (1982/87) The historical development of quantum theory. N.Y.: Springer-Verlag, vol.1–5, 1982–1987.
- Mellen W.R.* (1975) Partial theoretical explanation of fine structure constant value // *Bulletin Am. Phys. Soc.*, 20, p. 492.
- Melnikov V.N.* (1994) Fundamental physical constants and their stability // *Int. J. Theor. Phys.*, 33, p. 1569–1579.
- Mendenhall C.E., Saunders F.A.* (1898a) The energy spectrum of an absolutely black body // *Johns Hopkins University Circulars*, 17, p. 55
- Mendenhall C.E., Saunders F.A.* (1898b) Das Energiespectrum eines absolut schwarzen Körpers // *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 13, S. 457–460.
- Mercereau J.E., Vant-Hall L.L.* (1961) Magnetic flux quantization in a superconducting ring // *Bulletin Am. Phys. Soc.*, 6, p. 121 (20 March).
- Mermin N.D.* (1984) Relativity without light // *Amer. J. Phys.*, 52, № 2, p. 119–124. Рус. пер.: *Мермин*, 1984.
- Metrology and fundamental constants [r.e. constants]* (1976) Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi", course 68 (1976 July 12–24: Varenna, Italy) / ed. by A. Ferro Milone and P. Giacomo and by S. Leschiutta. Amsterdam; N.Y.: North-Holland Pub. Co., 1980, 815 p.
- Mie G.* (1913) [Дискуссия после доклада А.Эйнштейна "Zum gegenwärtigen Stande des Gravitationsproblems"] // *Phys. Zeit.*, 14, № 25, S. 1262 (15 Dec)
- Miller A.I.* (1981) Albert Einstein's special theory of relativity. London, Amst.: Addison-Wesley Publ. Comp., 466 p.
- Millikan R.A.* (1913) On the elementary electrical charge and the Avogadro constant // *Phys. Rev.* 2, p. 109–143.
- Mills I.M., Mohr P.J., Quinn T.J., Taylor B.N., Williams E.R.* (2005) Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come // *Metrologia*, 42, p. 71–80.
- Milne E.A.* (1933) World-structure and the expansion of the Universe // *Zeit. Astrophysik*, 6, № 1–2, S. 1–95.
- Milne E.A.* (1935) Relativity, gravitation and world-structure. Oxford Clarendon press, 1935, 366 p.
- Milne E.A.* (1937) Kinematics, dynamics and the scale of time // *Proc Roy. Soc. London A* 158, p. 324; 159, p. 171–191; p. 526–547.
- Moffat J.W.* (2001) A model of varying fine structure constant and varying speed of light // *astro-ph/0109350*.

- Mohr P.J., Taylor B.N.* (2005) CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2002 // *Rev. Mod. Phys.*, 77, 1, p. 1–107.
- Mossotti O.F.* (1836) Sur les forces qui régissent la constitution intérieure des corps // *Mossotti O.F. Scritti*. Pisa, 1951. Vol. 2(1), p. 158–185.
- Murphy M.T., Webb J.K., Flambaum V.V.* (2003) Further evidence for a variable fine-structure constant from Keck/HIRES QSO absorption spectra // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 345, p. 609, astro-ph/0306483.
- Narlikar J.V.* (1974) Lepton creation and the Dirac relationship between fundamental constants // *Nature*, 247, № 5436, p. 99–100.
- Natural Fission Reactors (1977). Proceedings of a meeting on natural fission reactors. Paris, France, December 1977. IIAE. Vienna. 1978.
- Nernst W., Lindemann F.A.* (1911) Spezifische Wärme und Quantentheorie // *Zeit. Electrochemie*, 17, S. 821–827.
- Newcomb S.* (1895) The elements of the four inner planets and the fundamental constants of astronomy. Washington, 1895, 202 p
- Nielsen H.B.* (1983) Field theories without fundamental gauge symmetries // *Phil. Trans. R. Soc. London A* 310, p. 253–272 (1983).
- NIST (2005): согласованные численные значения фундаментальных физических постоянных: <http://physics.nist.gov/constants>; см. также: *Mohr, Taylor*, 2005; *Каршенбойм*, 2005; библиография статей по измерению значений фундаментальных постоянных физики: <http://physics.nist.gov/cuu>
- Nordtvedt K.L., Faller J.E., Beams J.W.* (1976) The gravitational constant, G // *The New Encyclopaedia Britannica*. 15 ed. Vol.8, p. 292–295.
- Okun L.B.* (1996) Fundamental constants of nature // *ArXiv: hep-ph/9612249*.
- Okun L.B.* (2001) Cube or hypercube of natural units // *ArXiv: hep-ph/0112339*.
- Okun L.B.* (2003) Fundamental units: physics and metrology // *ArXiv: physics/0310069*.
- Onsager L.* (1953) // Proceedings of the International conference on theoretical physics. Kyoto, Tokyo, September, 1953 (Science Council of Japan, Tokyo, 1954), p. 935–936.
- Onsager L.* (1961) Magnetic flux through a superconducting ring // *Phys. Rev. Letters*, № 2, p. 50 (15 July).
- Osborne M.F.M.* (1949) Quantum-theory restrictions on the general theory of relativity // *Phys. Rev.*, 75, № 10, p. 1579–1584. Рус. пер.: *Осборн*, 1949.
- Otting G.* (1939) Der quadratische Dopplereffect // *Phys. Zeit.*, 40, S. 681–687.
- Pais A.* (1997) The discovery of the electron // *Beam Line*, 27, 1, p. 5–16. <http://www.slac.stanford.edu/pubs/beamline/27/1/27-1-pais.pdf>.
- Palacios J.* (1957) Les constants universales de la fisica // *Nuovo Cimento Suppl.*, 6, 1, p. 403–412
- Pagel B.E.J.* (1983) Implications of quasar spectroscopy for constancy of constants // *Phil. Trans. R. Soc. London A* 310, p. 245–248.
- Parker S.P.* (ed) (1989) McGraw-Hill Dictionary of scientific and technical terms. 4-ed, N.Y., 1989, 2088 p.
- Paschen F.* (1896) Ueber Gesetzmässigkeiten in den Spectren fester Körper (Erste Mitteilung) // *Wied. Ann. d. Phys.*, 58, S 455–492
- Paschen F.* (1897) Über Gesetzmäßigkeiten in den Spektren fester Körper // *Wied. Ann. d. Phys.*, 60, S. 662–723.

- Pati J.C., Salam A.* (1973) Unified lepton-hadron symmetry and a gauge theory of the basic interactions // *Phys. Rev. D* 8, p. 1240–1251.
- Pauli W.* (1929) Letter to O.Klein, 18 Feb. 1929, in A.Hermann et al., eds., Wolfgang Pauli, Wissenschaftlicher Briefwechsel, vol.1. New York: Springer-Verlag, 1979, p. 491.
- PDG (2005) Particle Data Group: <http://pdg.lbl.gov/>; <http://pdg.hep.su/> То же. *Eidelman S. et al.* // *Physics Letters B* 592, 1 (2004).
- Petley B.W.* (1985/88) The fundamental physical constants and the frontier of measurement. Bristol; Boston: A. Hilger, 1985, 346 p. 2d ed., 1988.
- Petley B.W.* (1983a) Towards the next evaluation of the fundamental physical constants // *Phil. Trans. R. Soc. London A* 310, p. 221–224
- Petley B.W.* (1983b) The significance of the fundamental constants // *Quantum metrology and fundamental constants*, 1983, p. 343.
- Pippard A.B.* (1997) J.J.Thomson and the discovery of the electron // *Electron: A centenary volume*. Ed. by M.Springford. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997.
- Pivovarov A.A.* (2002) Running electromagnetic coupling constant: low-energy normalization and the value at  $M_z$  // *Ядерная физика*, т. 65, № 7, с. 1352–1373.
- Planck M.* (1899) Über irreversible Strahlungsvorgänge. 5 Mitteilung // *S.-B. Preuß. Akad. Wiss.*, 5, S. 440–480, 1899. *Planck*, 1958, B 1, S. 560–600.
- Planck M.* (1900a) Über irreversible Strahlungsvorgänge // *Ann. Phys.* 4(1), S. 69–122; *Planck*, 1958, B.1, S. 614–667. Рус. пер.: *Планк*, 1900a.
- Planck M.* (1900b) Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum // *Verh. d. Deuch. Phys. Ges.*, 2, S. 237–245; *Planck*, 1958, B.1, S. 698–706. Рус. пер.: *Планк*, 1900d.
- Planck M.* (1906/13) Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung. Leipzig, 1906; 2 Aufl. 1913, 208 S.
- Planck M.* (1909) Die Einheit des physikalischen Weltbildes // *Phys. Zeit.*, 10, S. 62–75. Рус. пер.: *Планк*, 1909.
- Planck M.* (1914) Das Verhältnis der Theorien zueinander // *Die Kultur der Gegenwart*. Leipzig: B.G. Teubner, 1914. Abt. 3, Bd. I. S. 714–731; *Planck*, 1958, Bd. 3, S. 102–107. Рус. пер.: *Планк*, 1914.
- Planck M.* (1958) *Physikalische Abhandlungen und Vorträge*. Band 1–3, Fried Vieweg: Braunschweig, 1958
- Poincaré H.* (1898) La mesure du temps // *Revue de Métaphysique et de Morale*, 6, p. 1–13 Рус. пер.: *Пуанкаре*, 1898.
- Poincaré H.* (1902) *La science et l'hypothèse*. Paris: Flammarion, 1902, 284 p. Рус. пер.: *Пуанкаре*, 1902.
- Poincaré H.* (1905a) Письмо Г.А. Лоренцу, фотокопия в кн.: *Miller*, 1981, p. 81.
- Poincaré H.* (1905b) Sur la dynamique de l'électron // *Comptes Rendus*, 140, p. 1504–1508. Рус. пер.: *Пуанкаре*, 1905b.
- Poincaré H.* (1905/06) Sur la dynamique de l'électron // *Rendiconti Circolo mat. Palermo*, 21, p. 129–176 (1906) Рус. пер.: *Пуанкаре*, 1905/06
- Pointing J.H.* (1894) The mean density of the Earth. L, 1894, 156 p.
- Poisson S.D.* (1811; 1833) *Traité de mecaniqué*. T.1–2. Paris, 1811; 2 ed: 1833, t 1, 696 p., t.2, 782 p.

- Politzer H.D* (1973) Reliable Perturbative Results for Strong Interactions? // *Phys. Rev. Lett.* 30, p. 1346–1349.
- Precision measurement and fundamental constants (1970): Proceedings of International conference on precision measurement and fundamental constants. National Bureau of Standards, 1970. / Ed by D N. Langenberg and B.N. Taylor. [Washington] U.S. National Bureau of Standards, U.S. Govt. Print. Off., 1971, 531 p.
- Precision measurement and fundamental constants II (1981): Proceedings of the Second International conference held at the National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, June 8–12, 1981 / ed by B.N. Taylor and W.D. Phillips. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1984, 696 p.
- Press W.H.* (1980) Man's size in terms of fundamental constants // *Am. J. Phys.*, 48, № 8, p. 597–598.
- Press W.H., Lightman A.P.* (1983) Dependence of macrophysical phenomena on the values of the fundamental constants // *Phil. Trans. R. Soc. London A* 310, p. 323–336.
- Quantum metrology and fundamental physical constants [NATO Advanced Study Institute on Quantum metrology and fundamental physical constants (1981: Erice, Italy)] / ed. by P.H. Cutler and A.A. Lucas, N.Y.: Plenum Press, 1983, 658 p.
- Quinn T.J., Speake C.C., Richman S.J., Davis R.S., Picard A.* (2001) A new determination of  $G$  using two methods // *Phys. Rev. Lett.*, 87, 11, 4 p.
- Raju Cv. Ch.* (2000) Is the Cabibbo angle a function of the Weinberg mixing parameter? // *Intern. J. Theor. Phys.*, 39, № 6, p. 1619–1628.
- Rayleigh (Strutt) J.W* (1900) Remarks upon the law of complete radiation // *Phil. Mag.* (5) 49, p. 539–540. *Рус. пер.: Шенф*, с. 164–166.
- Reasenberg R.D* (1983) The constancy of  $G$  and other gravitational experiments // *Phil. Trans. R. Soc. London A* 310, p. 227–238.
- Reasenberg R.D., Shapiro I.I.* (1976) Bound on the secular variation of the gravitational interaction. In: *Atomic Masses and Fundamental Constants*: 5, 1976, p. 643–649.
- Rechenberg H.* (1997a) Hundred years of electron in physics // *Fundamental problems of high energy physics and field theory. Proc. of the XX Workshop on high energy physics and field theory, Protvino, 1997*, p. 143–157.
- Rechenberg H.* (1997b) The electron in physics: Selection from a chronology of the last 100 years // *The electron (born 1897): Centenary of a star in physics and chemistry Eur. J. Phys.*, 1997, 18, № 3, p. 145–149.
- Rees M.J.* (1983) Large numbers and ratios in astrophysics and cosmology // *Phil. Trans. R. Soc. London A* 310, p. 311–322
- Regge T.* (1958) Gravitational fields and quantum mechanics // *Nuovo Cimento*, 7, № 2, p. 215–221.
- Richman S.J., Quinn T.J., Speake C.C., Davis R.S.* (1999) Preliminary determination of  $G$  using the BIPM torsion strip balance // *Meas. Sci. Tech.*, 10, p. 460–466.
- Robertson B* (1971) Wyler's Expression for the Fine-Structure Constant  $\alpha$  // *Phys. Rev. Lett.* 27, p. 1545–1547.

- Robotti N* (1997) The discovery of the electron // The electron (born 1897) Centenary of a star in physics and chemistry Eur J Phys, 18, № 3, p 133–138
- [*Romer O*] (1676) Demonstration touchant le mouvement de la lumiere trouve par M. Romer de l'Académie Royale des Sciences // Journal de Scavans du lundy 7 Decembre 1676, p 233–236 Рус пер *Ремер*, 1676
- [*Roemer O*] (1677) A demonstration concerning the Motion of Light // Phil Trans Roy Soc London, 12, p 893–894 (June 25)
- Roemer et la vitesse de la lumière Paris Libr Phil J Vrin, 1978, 304 p
- Rosen N* (1964) The relation between classical and quantum mechanics // Amer J Phys, 32, № 8, p 597–600
- Rosen G* (1976) Group-theoretical basis for the value of the fine-structure constant // Phys Rev D 13, p 830–831
- Rossini F D* (1974) Fundamental measures and constants for science and technology Cleveland CRC Press [1974], 132 p
- Ruark A E* (1931) Natural units for atomic problems // Phys Rev, 38, № 12, p 2240–2244
- Sakurai J J* (1958) Mass reversal and weak interactions // Nuovo Cimento, 7, № 5, p 649–660
- Salam A* (1968) Weak and electromagnetic interactions // Proc of the 8th Nobel Symposium on "Elementary particle theory, relativistic groups and analyticity", Stockholm, Sweden, 1968, ed by N Svartholm, p 367–377
- Saleker H, Wigner E P* (1958) Quantum limitations of the measurement of space-time distances // Phys Rev, 109, № 2, p 571–577 Рус пер *Салекер, Вигнер*, 1958
- Sanders J H* (1961, 1965) The fundamental atomic constants [London] Oxford Univ Press, 1961, 88 p 2d ed [London, N Y] Oxford Univ Press, 1965 vi, 98 p
- Sarton G* (1931) Discovery of the aberration of light // ISIS, 16, № 49, p 233–239
- Schopper H* (1991) Die Ernte nach einem Jahr LEP-Betrieb // Phys Blatter, 47, 10, p 907–913
- Schwinger J* (1966) Magnetic charge and quantum field theory // Phys Rev, 144, 4, p 1087–1093
- Schwinger J* (1975) Magnetic charge and the charge quantization condition // Phys Rev D12, № 10, p 3105–3111
- Shapiro J I, Smith W B, Ash M B, Ingalls R P, Pettengill G H* (1971) Gravitational constant experimental bound on its time variation // Phys Rev Lett, 26, p 27–30
- Shapiro S* (1963) Josephson currents in superconducting tunneling The effect of microwaves and other observations // Phys Rev Lett 11, p 80–82
- Shlyakhter A I* (1976) Direct test of the constancy of fundamental nuclear constants // Nature, 264, № 5584, p 340 (1976)
- Shlyakhter A I* (1982) Direct test of the time-independence of fundamental nuclear constants using the Oklo natural reactor // ATOMKI (Debrecen, Hungary) Report A/1 (1983), ArXiv physics/0307023
- SLD collaboration, Abe K et al (1995) Measurement  $\alpha_s(M_z^2)$  from hadronic event observables at the  $Z^0$  resonance // Phys Rev D51, p 962–984

- Smith K F* (1983) The measurement of the fundamental constants // *Phil Trans R Soc London A* 310, p 215–220
- Snyder H S* (1947a) Quantized space-time // *Phys Rev*, 71, № 1, p 38–41
- Snyder H S* (1947b) Electromagnetic field in quantized space-time // *Phys Rev*, 72, p 68–71
- Soldner J* (1801/04) // *Berliner Astron Jahrbuch 1804*, S 161 Пер на англ On the deviation of a light ray from its motion along a straight line through the attraction of a celestial body which it passes close by // *Found Phys*, 8, № 11–12, p 939–948 (1978)
- Sommerfeld A* (1911) Das Plancksche Wirkungsquantum und seine allgemeine Bedeutung // *Phys Zeit*, 12, № 24, S 1062
- Sommerfeld A* (1915) Die Feinstruktur der Wasserstoff- und der Wasserstoffähnlichen Linien // *Acad der Wissenschaften, Munchen, Sitzungsberichte*, S 459–500
- Sommerfeld A* (1916) Zur Quantentheorie der Spektrallinien // *Ann d Phys*, 51, S 1–94
- Sommerfeld A* (1919) *Atombau und Spektrallinien* Braunschweig Friedr Vieweg, 550 S
- Sommerfeld A* (1935) Über die Dimensionen der elektromagnetischen Größen // *Phys Zeit* 36, S 814–818
- Songaila A, Cowie L L* (1999) Fine-structure variable? // *Nature*, 398, p 667–668 (22 April)
- Spiridonov O P* (1986) *Universal physical constants* Moscow Mir Publishers, 1986, 203 p
- Squires G* (1997) J J Thomson and the discovery of the electron // *Physics World*, 10, № 2, p 33–36
- Stark J* (1908) Über die zerstaubende Wirkung des Lichtes und die optische Sensibilisation // *Phys Zeit*, 9, № 24, S 894–900
- Stefan J* (1879) Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur // *Wiener Berichte Sitzungsber Acad Wiss Wien, Abt II, Bd 79*, S 391–428
- Stille U* (1949) “Natürliche Messeinheiten” und Elektrodynamik // *Ann d Phys*, 6, № 5, S 208–212
- Stille U* (1955) *Messen und Rechnen in der Physik* Braunschweig, 1955, 416 S
- Stoner E C* (1930) The equilibrium of dense stars // *Phil Mag*, 9, p 944–963
- Stoney G* (1874/81) On the physical units of nature // *Phil Mag*, 11, p 381–390 (1881)
- Stoney G* (1891) On the cause of double lines and of equidistant satellites in the spectra of gases // *Sci Trans Roy Dublin Soc*, 4, p 563–608
- Stoney G* (1894) On the “Electron”, or atom of electricity // *Phil Mag*, 38, p 418–420
- Strauss M* (1967) Entwicklungsgesetze der Physik // *Dtsch Ztschr Philos*, 15, H 2, S 220–222 Англ пер *Strauss M* Evolutionary laws and perspectives for physics // *Strauss M* Modern physics and its philosophy Dordrecht Reidel, 1972, p 8–17
- Schwinger J* (1966) Magnetic charge and quantum field theory // *Phys Rev*, 144, p 1087–1093

- Schwinger J.* (1975) Magnetic charge and the charge quantization condition // Phys. Rev. D 12, p. 3105–3111.
- Sudarshan E.C.G., Marshak R.E.* (1958) Chirality invariance and the universal Fermi interaction // Phys. Rev., 109, p. 1860–1862.
- Swarz J.P., Robertson D.S., Niebauer T.M., Faller J.E.* (1999) A new determination of the Newtonian constant of gravity using the free fall method // Meas. Sci. Tech., 10, p. 478–86.
- Taylor B.N., Parker W.H., Langenberg D.N.* (1969) The fundamental constants and quantum electrodynamics. N.Y., L.: Acad. press, 1969, 353 p. Pyc. пер.: *Тейлор, Паркер, Лангенберг* (1969).
- Teller E.* (1948) On the change of physical constants // Phys. Rev., 73, № 7, p. 801.
- Tiesen M.* (1900) Ueber allgemeine Naturconstanten // Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 2, № 11, S. 116–121.
- The constants of physics (1983) // Phil. Trans. R. Soc. London A 310, p. 209–363.
- The electron (born 1897): Centenary of a star in physics and chemistry // Eur. J. Phys., 18, p. 131–168 (1997).
- The expanding earth (1981). Symposium. Earth Resources Foundation, Univ. of Sydney, Febr 10–14, 1981. Sydney: University, 1981, 423 p.
- The fundamental constants of physics, precision measurements and SI base units (2005, 14–15 Feb.) // Phil. Trans. R. Soc. London, A363, № 1834 (Sept. 15, 2005), p. 2099–2327.
- The Oklo Phenomenon (1975). Proc. Symposium on the Oklo phenomenon, 23–27 June 1975. IIAE. Vienna, 1975, 652 c.
- The Quest for the fundamental constants in cosmology (1989): Proceedings of the XXIVth Rencontre de Moriond. Les Arces (Savoie, France), March 5–12, 1989 / ed. by J.Audouze and J. Tran Thahn Van. Gif-sur-Yvette: Edition Frontières, 1990, 410 p.
- Thomson J.J.* (1897a) Cathode rays // Electrician, 39, p. 104–109.
- Thomson J.J.* (1897b) Cathode rays // Phil. Mag., 44, p. 293–316.
- Thomson J.J.* (1903) The magnetic properties of systems of corpuscles describing circular orbits // Phil. Mag., 6, p. 673–693.
- Thomson W.* (1902) Aepinus Atomized // Phil. Mag., 3, p. 257–283.
- Todhunter I.* (1873) History of the mathematical theories of attraction and the figure of the Earth 1873. N.Y., 1964., vol. 1–2, 476+508 pp. Pyc. пер.: *Тодхантер* (1873).
- Tomilin K.A.* (1999a) Fine-structure constant and dimension analysis // Eur. J. Phys., 20, № 5. <http://www.ihst.ru/personal/tomilin/papers/ej95n4.pdf>
- Tomilin K.A.* (1999b) Natural systems of units // Proc. of the XXII Internat. Workshop on high energy physics and field theory (Protvino, 23–25 June 1999) Protvino, 2000, p. 287–296. <http://dbserv.ihp.su/pubs/tconf99/ps/tomil.pdf>.
- Tonnellat M.A.* (1971) Histoire du principe de relativité. Paris: Flammarion, 1971, 561 p.
- Truesdell C.* (1968) Essays in the history of mechanics. N.Y.: Springer-Verlag, 1968, 383 p.

- Units (1991) Units and fundamental constants in physics and chemistry / H. Ahlers... [et al.]; ed. by J. Bortfeldt and B. Kramer. Berlin; N.Y.: Springer-Verlag, 1991.
- Uzan J.-Ph. (2002) The fundamental constants and their variation: observational status and theoretical motivations // *Rev. Mod. Phys.*, 75, 2, p. 403–455 (2003); ArXiv: hep-ph/0205340.
- Van Flandern T.C. (1975a) A determination of the rate of change of G // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 170, p. 333–342.
- Van Flandern T.C. (1975b) Recent evidence for variations in the value G // *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 262, p. 494–495.
- Van Flandern T.C. (1976) Is gravity getting weaker? // *Sci. Am.*, 234, № 2, p. 44–52.
- Van Helden A. (1983) Roemer's speed of light // *J. Hist. Astronomy*, 14, p. 137–141.
- Varičák V. (1910a) Anwendung der Lobachevskyschen Geometrie in der Relativitätstheorie // *Phys. Zeit.*, 11, S. 93–99.
- Varičák V. (1910b) Die Relativtheorie und die Lobatschevskijsche Geometrie // *Phys. Zeit.*, 11, S. 287–293.
- Voigt W. (1887; 1915) Über das Doppler'sche Prinzip // *Göttingen Nachr.*, 14, S. 41 (8 Jan. 1887). Репринтное воспр.: *Phys. Zeit.*, 16, 381–386 (1915).
- Voigt W. (1899) Neuere Untersuchungen über die optischen Wirkungen eines Magnetfeldes // *Phys. Zeit.*, 1, № 10, S. 119–120 (2 Dec).
- Waerden B.L., van der. (1967) *Sources of Quantum Mechanics*. Amsterdam, 1967.
- Watagin G. (1957) Causality in a non-local field theory and a covariant formulation of the interaction between fields based on the introduction of a universal length // *Nuovo Cimento Suppl.*, 6, 1, p. 399–400.
- Watanabe S. (1957) Chirality of K particle // *Phys. Rev.*, 106, p. 1306–1315.
- Watanabe I. (1960) On the quantization of physical space-time operators // *Prog. Theor. Phys.*, 24, p. 465–483.
- Webb J.K., Flambaum V.V., Churchill C.W., Drinkwater M.J., Barrow J.D. (1999) Search for time variation of the fine structure constant // *Phys. Rev. Lett.* 82(5), p. 884–887.
- Webb J.K., Murphy M.T., Flambaum V.V., Dzuba V.A., Barrow J.D., Churchill C.W., Prochaska J.X., Wolfe A.M. (2001) Further Evidence for Cosmological Evolution of the Fine Structure Constant // ArXiv: astro-ph/0012539.
- Weber H.F. (1888) Untersuchungen über die Strahlung fester Körper // *Sitzungsber. preuß. Akad. Wiss. Berlin*, 2, S. 933–957.
- Weber W. (1871) Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Über das Princip der Erhaltung der Energie // *Abh. d. Königl. Sächs. Ges. d. Wiss., math.-phys. Kl.*, 10, S. 1–61; *Weber W. Werke*. Bd. 4, Th.2. Berlin, 1894, S. 247–299.
- Weinberg S. (1967) A model of leptons // *Phys. Rev. Lett.*, 19, № 21, p. 1264–1266.
- Weinberg S. (1972) Mixing angle in renormalizable theories of weak and electromagnetic interactions // *Phys. Rev. D* 5, p. 1962–1967.



- Weinberg S. (1983) Overview of theoretical prospects for understanding the values of fundamental constants // *Phil. Trans. R. Soc. London A* 310, p. 249–250.
- Weinstock R. (1982) Dismantling a centuries-old myth: Newton's Principia and inverse-square orbit // *Amer. J. Phys.*, 50, № 7, p. 610–617. Рус. пер.: *Вейнсток*, 1982.
- Weisstein E.W. (2003) Личное сообщение С.Плюффе от 6 февр 2003 // <http://scienceworld.wolfram.com/physics/FineStructureConstant.html>
- Wess J., Zumino B. (1974a) A Lagrangian model invariant under supergauge transformations // *Phys. Lett.*, 49B, p. 52–54.
- Wess J., Zumino B. (1974b) Supergauge transformations in four dimensions // *Nucl. Phys.*, B70, p. 39–50.
- Wess J. (1987) Symmetrie, Supersymmetrie, Supergravitation // *Phys. Blätter*, 43(1), S. 2–6.
- Westfall R. (1983) Never at rest: a biography of Isaac Newton. Cambridge: Camb. Univ. Press, 1983, 908 p
- Weyl H. (1917) Zur Gravitations theorie // *Ann. d. Phys.*, 54, S. 117–145.
- Weyl H. (1919) Eine neue Erweiterung der Relativitätstheorie // *Ann. d. Phys.*, 59, S. 101–133.
- Weyl H. (1928/31) Gruppentheorie und Quantenmechanik. Leipzig, 1928 2 Aufl., 1931, 368 S. Рус. пер. со 2-го изд.: *Вейль*, 1931.
- Weyl H. (1949) Philosophy of mathematics and natural science. Appendix F. Princeton, Princeton Univ. Press, 1949.
- Weyl H. (1976) Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft. 4 Aufl., Munchen, Wien: R Oldenburg Verlag, 1976.
- Wheeler J.A. (1955) Geons // *Phys. Rev.*, 97, p. 511–536.
- Wheeler J.A. (1977) Genesis and observership // *Foundational problems in the special sciences*. Ed by R.E. Butts and J Hintikka. Dordrecht. D. Reidel, 1977, p. 3–33.
- Whitrow G Y. (1955) Why physical space has three dimensions // *Brit J. Phil. Sci.*, 6, № 21, p. 13–31.
- Whittaker E. (1910; 1953) A history of the theories of aether and electricity. Dublin, 1910, vol.1. London: Nelson, 1953, vol. 2, 319 p.
- Wiechert E. (1897) Experimentelles über die Kathodenstrahlen // *Schriften der Physikalisch-ökonomischen Gesellschaft zu Königsberg in Preußen*, 38, S 12–16.
- Wien W. (1893) Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie // *Sitzungsber. preuß. Akad. Wiss.* Berlin, 1893 (I), S. 55–62 Рус. пер.: *Вин*, 1893.
- Wien W. (1896) Ueber die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Körpers // *Wied. Ann. d. Phys.*, 58, S. 662–669.
- Witmer E.E. (1929) The relative masses of the proton, electron, and Helium nucleus // *Nature*, 124, № 3118, p. 180–181 (3 Aug.).
- Wroblewski A. (1985) de Mora Luminis: A spectacle in two acts with a prologue and an epilogue // *Am. J. Phys.*, 53(7), p. 620–630.
- Wyler A. (1969) L'espace symétrique du groupe des équations de Maxwell // *Comptes Rendus Acad. Sci Paris A* 269, p. 743–745.
- Wyler A. (1971) Les groupes des potentiels de Coulomb et de Yukawa // *Comptes Rendus Acad. Sci. Paris A* 272, p. 186–188

- Алексеев И.С.* (1981) К предыстории квантовой теории // ВИЕТ, 1981, № 2, с. 77–84, *Алексеев*, 1995, с. 352–365.
- Алексеев И.С.* (1984) От закона Вина к закону Планка // ВИЕТ, 1984, № 2, с. 57–60, *Алексеев*, 1995, с. 365–372.
- Алексеев И.С., Овчинников Н.Ф., Печенкин А.А.* (1984) Методология обоснования квантовой теории. М.: Наука, 1984, 232 с.
- Алексеев И.С.* (1995) Деятельностная концепция познания и реальности. Избранные труды по методологии физики. М.: Руссо, 1995, 527 с.
- Алешкина Е.Ю., Красинский Г.А., Питьева Е.В., Свешников М.Л.* (1987) Экспериментальная проверка релятивистских эффектов и оценка величины изменения гравитационной постоянной по наблюдениям внутренних планет и Луны // УФН, 151(4), с. 720–724.
- Андерсон Д.* (1964) Открытие электрона (Развитие атомных концепций электричества). М.: Атомиздат, 1968, 158 с.
- Андрюшин В.И., Фаустов Р.Н., Шелест В.П.* (1981) Фундаментальные физические константы и физика микромира // Квантовая метрология и фундаментальные константы. М.: Мир, 1981, с. 3–16.
- Аносов Д.В.* (2000) К истории вывода законов Кеплера из законов механики // Историко–математические исследования. Вып.5(40), М.: “Янус–К”, 2000, с. 9–25.
- Апокин И.А., Майстров Л.Е., Эдлин И.С.* (1981) Чарльз Бэбидж. М.: Наука, 1981, 127 с.
- Аракелян Г.Б.* (1981) Фундаментальные безразмерные величины. Ереван, 1981, 160 с.
- Ахиезер А.И.* (1988) Атомная физика. Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1988, 268 с.
- Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б.* (1981) Квантовая электродинамика М Наука, 1981, 432 с.
- Бартини Р.О.* (1965) Некоторые соотношения между физическими константами // ДАН СССР, 163, № 4, с. 861–864.
- Бартини Р.О.* (1966) Соотношения между физическими величинами // Проблемы теории гравитации и элементарных частиц. М.: Атомиздат, 1966, с. 249–266.
- Баскин Э.М., Магарилл Л.И., Энтин М.В.* (1978) Двумерная электрон-примесная система в сильном магнитном поле // ЖЭТФ, 75, с. 723–734.
- Блох А.М.* (2005) Советский Союз в интерьере Нобелевских премий 2-е изд. М.: Физматлит, 880 с.
- Болотовский Б.М.* (1985) Оливер Хевисайд. М.: Наука, 1985, 256 с.
- Больцман Л.* (1884) Вывод закона Стефана о зависимости теплового излучения от температуры из электромагнитной теории света // *Больцман*, 1984, с. 337–339. *Шёнф*, 1978, с. 144–148.
- Больцман Л.* (1904) О статистической механике // *Больцман*, 1984, с. 378–391.
- Больцман Л.* (1984) Избранные труды. М.: Наука, 1984, 589 с.
- Бор Н.* (1913) О строении атомов и молекул // *Бор*, 1970/71, т.1, с. 84–148
- Бор Н.* (1955) Открытие Ридбергом спектральных законов // *Бор*, 1970/71, т. 2, с. 470–478.

- Бор Н.* (1970/71) Избранные научные труды. М.: Наука, т.1, 1970, 583 с., т. 2, 1971, 675 с.
- Борн М.* (1933) Современная физика Л.–М.: ОНТИ, 1935, 264 с.
- Борн М.* (1935) Тайнственное число 137 // УФН, 16 (6), с 697–729
- Борн М.* (1935/63) Атомная физика 3–е изд. М.: Мир, 1970, 484 с
- Борн М.* (1955) Физика и относительность // Физика в жизни моего поколения М.: ИИЛ, 1963, с. 316–337.
- Борн М.* (1977) Размышления и воспоминания физика М.: Наука, 1977, 280 с.
- Бриджмен П.* (1920/31) Анализ размерностей. Л.–М.: ОНТИ ГТТИ, 1934, 120 с.
- Бронштейн М.П.* (1925) Об одном следствии гипотезы световых квантов // ЖРФХО. Часть физ., 57, вып. 3/4А, с. 321–325.
- Бронштейн М.П.* (1930) Электрон и целые числа (новые работы А.С. Эддингтона) // Человек и природа, 1930, № 2, с. 8–16
- Бронштейн М.П.* (1931) Современное состояние релятивистской космологии // УФН, 11(1), с 124–184.
- Бронштейн М.П.* (1933) К вопросу о возможной теории мира как целого // Успехи астрономических наук. Сб 3, с. 3–30.
- Бронштейн М.П.* (1934) К вопросу о возможной теории мира как целого // Основные проблемы космической физики. Л.–М.: ОНТИ, 1934, с 186–215.
- Бронштейн М.П.* (1935) Строение вещества. Л.–М.: ОНТИ, 1935, 244 с.
- Будрейко Е.А.* (1957) О двух малоизвестных работах Д. Стонея // Труды ИИЕТ, т.17, М.: Изд-во АН СССР, 1957, с 493–497.
- Булюбаш Б.В.* (1987) Концепция дальнего действия и развитие представлений об электрическом заряде в электродинамике XIX века. Диссертация М., 1987, 183 с.
- Булюбаш Б.В.* (1995) Электродинамика дальнего действия // Физика XIX–XX вв в общенаучном и социокультурном контекстах Физика XIX в М. Наука, 1995, с. 221–250.
- Бэкон Ф.* (1620) Новый Органон, или истинные указания для истолкования природы // Сочинения в 2-х т. Т.2. М.: Мысль, 1972, с 5–222.
- Вавилов С.И.* (1924) Действие света и теория квантов // УФН, 4(1), с 36–61, Вавилов, 1956, т. 4, с. 268–292.
- Вавилов С.И.* (1928а) Электрон // Наука XX века Физика Т 1. М.-Л. Госиздат, 1928, с 36–59; Вавилов, 1956, т. 4, с. 308–325.
- Вавилов С.И.* (1928b) Экспериментальные основания теории относительности М.-Л. Госиздат, 1928, 168 с. Вавилов, 1956, т 4, с. 9–110
- Вавилов С.И.* (1943) Галилей в истории оптики // Галилео Галилей 1564–1642 Сб., посв. 300–й годовщине со дня смерти Галилео Галилея 1642–1942 М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1943, с. 5–56. То же: Вавилов, 1956, т 3, с 235–277 <http://www.ihst.ru/projects/vavilov/papers/galilei.htm>.
- Вавилов С.И.* (1943/89) Исаак Ньютон М.-Л.: Изд. АН СССР, 1943, 216 с Цит. по 4-му изд М.: Наука, 1989, 271 с. Ibid: vavilov/books/newton/
- Вавилов С.И.* (1956) Собр. сочинений. Т.1-4. М. Изд. АН СССР, т 3, 871 с., т. 4, 471 с
- Вайнберг С.* (2001) Квантовая теория поля. М.: Физматлит, 2003, т. 1, 648 с., т. 2, 528 с.

- Вдовиченко Н В.* (1986) Развитие фундаментальных принципов статистической физики в первой половине XX века. М : Наука, 1986, 159 с
- Вебер В , Кольрауш Р.* (1856) О количестве электричества, которое протекает при гальваническом токе через поперечное сечение цепи // Пятьдесят лет радио Вып 1. Из предистории радио М –Л : Изд-во АН СССР, 1948, с 209–217
- Вейль Г* (1918) Гравитация и электричество // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М. Мир, 1979, с. 513–527.
- Вейль Г.* (1923) Пространство, время, материя М. “Янус-К”, 1996, 472 с.
- Вейль Г.* (1931) Теория групп и квантовая механика. М · Наука, 1986, 495 с.
- Вейль Г* (1949) Основные черты физического мира // *Вейль*, 1984, с 345–360
- Вейль Г* (1984) Избранные труды. М.· Наука, 1984, 512 с.
- Вейнберг Б П* (1903) Вероятнейшее значение скорости распространения возмущений в эфире. Одесса, 1903, ч 1-2 Ч 1. Определение наименее вероятнейшего значения скорости света из астрономических наблюдений, 716 с Ч 2. Определение наименее вероятнейшего значения скорости распространения возмущений в эфире на основании земных опытов, 640 с
- Вейнсток Р* (1982) Разоблачение вековой легенды: Ньютон и орбиты при движении в поле центральной силы, обратно пропорциональной квадрату расстояния // Физика за рубежом. Серия Б. Преподавание. М. Мир, 1984, с 178–209
- Веселовский И Н.* (1959) Христиан Гюйгенс М · Учпедгиз, 1959, 112 с
- Визгин В.П* (1981) Релятивистская теория тяготения. Истоки и формирование. 1900–1915 М.: Наука, 1981, 352 с
- Визгин В.П.* (1983) Галилеевский принцип относительности // Исследования по истории механики. М . Наука, 1983, 288 с.
- Визгин В П.* (1985) Единые теории поля в первой трети XX в М · Наука, 1985, 304 с.
- Визгин В П.* (1997) Математика в квантово-релятивистской революции // Физика XIX–XX вв в общенаучном и социокультурном контекстах Физика XX в. М : “Янус-К”, 1997, с. 7–30.
- Визгин В.П.* (2001) Об открытии уравнений гравитационного поля Эйнштейном и Гильбертом (новые материалы) // УФН, 171, № 12, с. 1347–1364.
- Вильчек Ф.А.* (2004) Асимптотическая свобода: от парадоксов к парадигмам // УФН, 175, № 12, с. 1325–1337 (2005).
- Вин В.* (1893) Новое о связи между излучением черного тела и вторым законом термодинамики // *Шенф*, 1978, с 149–157
- Владимиров Ю С.* (1982) Системы отсчета в теории гравитации. М.: Энергоиздат, 1982, 256 с
- Владимиров Ю С* (1987) Размерность физического пространства-времени и объединение взаимодействий. М.. МГУ, 1987, 214 с.
- Владимиров Ю С* (1988) Пространство–время явные и скрытые размерности М Наука, 1988, 190 с
- Владимиров Ю.С.* (2002) Метафизика М.· БИНОМ, Лаборатория знаний, 2002, 550 с.
- Волков В.П., Акулов Д.В* (1972) О возможном универсальном взаимодействии нейтрино // Письма в ЖЭТФ 16 (11), с 621–624.

- Воронель А В* (1962) Естественные системы единиц // Физический энциклопедический словарь М "Сов энциклопедия", 1962, т 2
- Вяльцев А Н* (1965) Дискретное пространство-время М Наука, 1965, 400 с
- Вяльцев А Н* (1981) Открытие элементарных частиц Электрон Фотоны М Наука, 1981, 241 с
- Галилей Г* (1632) Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой // *Галилей*, 1964, т 1, с 97–586
- Галилей Г* (1638) Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки // *Галилей*, 1964, т 2, с 108–410
- Галилей Г* (1964) Избранные труды М Наука, 1964, т 1, 640 с, т 2, 571 с
- Гамов Г, Иваненко Д Д, Ландау Л Д* (1928) Мировые постоянные и предельный переход // ЖРФХО, часть физическая, т LX, вып 1, с 13–17 То же Ядерная физика, 65, № 7, с 1406–1408 (2002)
- Гамов Г А* (1939) Приключения мистера Томпкинса М "Бюро Квантум", 1993, 224 с
- Гамов Г А* (1994) Моя мировая линия М Наука, 1994, 320 с
- Гаусс К Ф* (1820/21) Теоретическая астрономия Лекции, записанные Купфером // *Крылов А Н* Собр трудов Т 6, 1936, с 300–450
- Гаусс К Ф* (1824) Отрывки из писем и черновые наброски, относящиеся к неевклидовой геометрии // Об основаниях геометрии М Гостехиздат, 1956, с 101–120
- Гегель Г В Ф* (1817) Энциклопедия философских наук Т I Наука логики М Мысль, 1974, 454 с
- Гейзенберг В* (1927) О наглядном содержании квантовотеоретической кинематики и механики // *Гейзенберг*, 2001, с 209–228
- Гейзенберг В* (1929/30) Физические принципы квантовой теории Л -М ГТТИ, 1932, 146 с
- Гейзенберг В* (1938) Границы применимости современной квантовой теории // *Гейзенберг*, 2001, с 272–283
- Гейзенберг В* (1957) Квантовая теория полей и элементарных частиц // Нелинейная квантовая теория поля, с 221–247
- Гейзенберг В* (1959) Физика и философия М ИИЛ, 1963, 204 с
- Гейзенберг В* (1966) Введение в единую полевую теорию элементарных частиц М Мир, 1968, 239 с
- Гейзенберг В* (1968) Влияние работ Зоммерфельда на современную физику // *Зоммерфельд*, 1973, с 291–300
- Гейзенберг В* (2001) Избранные труды М "Эдиториал УРСС", 2001, 616 с
- Гельмгольц Г* (1881) Фарадзевская речь // Популярные речи 2-е изд Т 1 СПб, 1898, с 103–142
- Герловин И Л* (1973) Основы единой релятивистской квантовой теории фундаментального поля (ТФП) ВИНТИ 7084–73, 149 с
- Герловин И Л* (1990) Основы единой теории всех взаимодействий в веществе Л Энергоатомиздат, 1990, 431 с
- Герштейн С С, Берестецкий В Б* (1990) Квантовая механика // Физическая энциклопедия М "Сов энциклопедия", 1990 Т 2

- Гинзбург В.Л. (1974) Как и кто создал теорию относительности? // Эйнштейновский сборник. 1974. М.: Наука, 1976, с. 351–384; Вопросы философии, 1974, № 8, с. 125–140; Гинзбург, 1985, с. 256–288.
- Гинзбург В.Л. (1985) О физике и астрофизике. М.: Наука, 1985, 400 с.
- Гинзбург В.Л. (2003) О науке, о себе и о других. 3-е изд. М.: Физматлит, 2003, 544 с.
- Гирвин С. (1987) Коллективные возбуждения // Квантовый эффект Холла. М.: Мир, 1989, с. 341–367. Общие итоги, упущения и нерешенные вопросы // там же, с. 368–384.
- Глобальный эволюционизм (Филос. анализ). Отв. ред. Л.В. Фесенкова. М.: ИФ РАН, 1994, 150 с.
- Голин Г.М., Филонович С.Р. (1989) Классики физической науки М.: Высшая школа, 1989, 575 с
- Голубева О.Н., Суханов А.Д. (2005) Методологическая роль фундаментальных констант и универсальных представлений в современной физике // Тезисы докладов 4-го Росс. филос. конгресса “Философия и будущее цивилизации”. Т.1. М.: Изд-во “Совр. тетради”, 2005, с. 478–479.
- Гольфанд Ю.А. (1959) О введении “элементарной длины” в релятивистскую теорию элементарных частиц // ЖЭТФ, 37, вып. 2(8), с. 504–509.
- Гольфанд Ю.А., Лихтман Е.П. (1971) Расширение генераторов группы Пуанкаре и нарушение р-инвариантности // Письма в ЖЭТФ, 13, № 8, с. 452–455.
- Горелик Г.Е. (1978/79) Первые шаги квантовой гравитации и планковские величины // Эйнштейновский сборник. 1978–1979. М.: Наука, 1983, с. 334–364. Пер. на англ.: *Gorelik*, 1992.
- Горелик Г.Е., Френкель В.Я. (1980/81) М.П. Бронштейн и его роль в становлении квантовой теории гравитации // Эйнштейновский сборник. 1980–81. М.: Наука, 1985, с. 291–327.
- Горелик Г.Е. (1982) Почему пространство трехмерно? М.: Наука, 1982, 167 с.
- Горелик Г.Е. (1982/83) История релятивистской космологии и совпадение больших чисел // Эйнштейновский сборник. 1982–1983. М.: Наука, 1986, с. 302–322.
- Горелик Г.Е. (1983) Размерность пространства: историко-методологический анализ. М.: МГУ, 1983, 216 с.
- Горелик Г.Е. (1988)  $c \times G \times h = ?$  // Знание–сила, 1988, № 2, с. 21–27.
- Горелик Г.Е. (1989) Совпадение больших чисел в космологии XX в. // Вейль Г. Математическое мышление. М.: Наука, 1989, с. 378–385.
- Горелик Г.Е., Френкель В.Я. (1990) Матвей Петрович Бронштейн. М.: Наука, 1990, 272 с. Пер. на англ. с доп.: *Gorelik, Frenkel*, 1994.
- Горелик Г.Е. (1996) Лидия Чуковская и Матвей Бронштейн // Знание — сила, 1996, № 1, с. 127–133.
- Гречаный П.П., Попов П.А. (2003) Сто лет дороги в никуда. Конец специальной теории относительности. М.: Новый Центр, 2003, 56 с.
- Гросс Д.Дж. (2004) Открытие асимптотической свободы и появление КХД // УФН, 175, № 12, с. 1306–1318 (2005).
- Гротц К., Кландор-Клайнгротхаус Г.В. (1990) Слабое взаимодействие в физике ядра, частиц и астрофизике. М.: Мир, 1992, 451 с.
- Гюйгенс Х. (1678/90) Трактат о свете. М.-Л.: ОНТИ, 1935, 172 с.

- Девис П* (1982) Случайная Вселенная М Мир, 1985, 160 с
- Джеммер М* (1966) Эволюция понятий квантовой механики М Наука, 1985, 378 с
- Джозефсон Б* (1973) Открытие туннельных сверхпроводящих токов // УФН, 116(4), с 597–603 (1975)
- Дикке Р* (1964) Влияние переменного во времени гравитационного взаимодействия на Солнечную систему // Гравитация и относительность М Мир, 1965, с 251–294
- Дирак П А М* (1930) Основы квантовой механики // М -Л ГТТИ, 1932, 323 с
- Дирак П А М* (1931) Квантованные сингулярности в электромагнитном поле // *Дирак*, 2002/05, т 2, с 388–398
- Дирак П А М* (1937a) Космологические постоянные // Альберт Эйнштейн и теория гравитации М Мир, 1979, с 538–539, *Дирак*, 2002/05, т 4, с 335–336
- Дирак П А М* (1937b) Дополнение к заметке “Космологические постоянные” (ответ Г Динглю) // *Дирак*, 2002/05, т 4, с 337–338
- Дирак П А М* (1938) Основы новой космологии // *Дирак*, 2002/05, т 4, с 339–349
- Дирак П А М* (1948) Теория магнитных полюсов // *Дирак*, 2002/05, т 3, с 155–178
- Дирак П А М* (1963) Эволюция физической картины природы // *Дирак*, 2002/05, т 4, с 568–582
- Дирак П А М* (1972) Изменчивость гравитационной постоянной // *Дирак*, 2002/05, т 4, с 351–354
- Дирак П А М* (1973) Фундаментальные константы и их развитие во времени // *Дирак*, 2002/05, т 4, с 365–378
- Дирак П А М* (1974) Магнитный монополю // Большая Советская Энциклопедия 3-е изд Т 15 С 186–187 *Дирак*, 2002/05, т 3, с 179–180
- Дирак П А М* (1975/78) Пути физики М Энергоатомиздат, 1983, 88 с
- Дирак П А М* (1976) Теория магнитных полюсов // *Дирак*, 2002/05, т 3, с 181–188
- Дирак П А М* (1978) Концепция монополя // *Дирак*, 2002/05, т 3, с 189–200
- Дирак П А М* (2002/05) Собрание научных трудов Т 1–4 М Физматлит, т 2, 2003, 848 с , т 3, 2004, 720 с
- Долинский Е Ф*, *Пилипчук Б И* (1965) Естественные системы единиц // Энциклопедия измерений, контроля и автоматизации Вып 4 М -Л , 1965, с 3–8
- Дорфман Я Г* (1974) Всемирная история физики с древнейших времени до конца XVIII века М Наука, 1974, 352 с
- Дуков В М* (1966) Электрон М Просвещение, 1966, 236 с
- Ефремов А В* (1983) Квантовая хромодинамика // Физический энциклопедический словарь М “Сов энциклопедия”, 1983, с 269
- Ефремов А В* (1990) Квантовая хромодинамика // Физическая энциклопедия, т 2, М “Сов энциклопедия”, 1990, с 313
- Жаботинский М Е* (1983) Об измерении скорости электромагнитных волн и их применении для измерения расстояний в СССР // Дополнение к кн Фрум, Эссен, 1969, с 183–193

- Заказчиков А.И. (2001) Возвращение эфира: Фундаментальные вопросы физики М.: "Компания Спутник+", 2001, 228 с.
- Зельдович Я.Б., Харитон Ю.Б. (1940) Кинетика цепного распада урана // ЖЭТФ, 10(5), с. 477–482.
- Зельдович Я.Б. (1981) Рождение закрытой Вселенной и антропогенный принцип // Письма в Астрономический журнал, 7, № 10, с. 579–581
- Зельманов А.Л. (1955/60) К постановке космологической проблемы // Труды 2-го съезда ВАГО (25–31 января 1955 г.). М., 1960, с. 72–84.
- Зельманов А.Л. (1964) О бесконечности материального мира // Диалектика в науках о неживой природе. М.: Мысль, 1964, с. 227–269.
- Зельманов А.Л. (1966/70) Некоторые философские аспекты современной космологии и смежных проблем физики // Диалектика и современное естествознание М.: Наука, 1970, с. 395–400.
- Зельманов А.Л. (1967) Космология // Развитие астрономии в СССР. М.: Наука, 1967, с. 320–390.
- Зельманов А.Л. (1969) Многообразие материального мира и проблема бесконечности Вселенной // Бесконечность и Вселенная М.: Мысль, 1969, с. 274–324
- Зельманов А.Л. (1988) Проблема экстраполябельности, антропологический принцип и идея множественности вселенных // Вселенная. Астрономия. Философия М.: МГУ, 1988, с. 77–79.
- Зельманов А.Л., Агаков В.Г. (1989) Элементы общей теории относительности М.: Наука, 1989, 236 с.
- Зоммерфельд А. (1924) Основы квантовой теории и модели атома Бора // Зоммерфельд, 1973, с. 8–15
- Зоммерфельд А. (1925) Значение рентгеновских лучей для современного познания природы // Зоммерфельд, 1973, с. 85–88
- Зоммерфельд А. (1926) Письмо А. Эйнштейну 31 октября 1926 г. // Зоммерфельд, 1973, с. 236–237.
- Зоммерфельд А. (1929) Возникновение квантовой теории систем со многими степенями свободы // Зоммерфельд, 1973, с. 15–20
- Зоммерфельд А. (1936) Пути познания в физике // Зоммерфельд, 1973, с. 109–116.
- Зоммерфельд А. (1937) Письмо А. Эйнштейну 30 декабря 1937 г. // Зоммерфельд, 1973, с. 242–243
- Зоммерфельд А. (1940) Тонкая структура водородных линий История и современное состояние теории // УФН, 24 (4), с. 514–526.
- Зоммерфельд А. (1949) Понятие функции в физике // Зоммерфельд, 1973, с. 124–126.
- Зоммерфельд А. (1950) Оптика. М.: ИИЛ, 1953, 487 с.
- Зоммерфельд А. (1951) Строение атома и спектры. Т. 1–2 М.: ГИТТЛ, 1956.
- Зоммерфельд А. (1973) Пути познания в физике М.: Наука, 1973, 319 с
- Зотов А.Ф. (1975) Принцип соответствия // Методологические принципы физики. М.: Наука, 1975, с. 343–384
- Иваненко Д.Д. (1959) Попытка построения единой нелинейной спинорной теории материи // Нелинейная квантовая теория поля, с. 5–40



- Иваненко Д.Д.* (1994) Эпоха Джорджа Гамова глазами современника // Гамов Дж. Моя мировая линия, неформальная автобиография. М.: Наука, 1994, с. 231–291
- Идельсон Н.И.* (1975) Этюды по истории небесной механики. М.: Наука, 1975, 494 с.
- Идлис Г.М.* (1957/59) Структурная бесконечность Вселенной и Метагалактика как типичная обитаемая космическая система // Труды 6-го совещания по вопросам космогонии (5–7 июня 1957 г.). М., 1959, с. 270–271.
- Идлис Г.М.* (1958) Основные черты наблюдаемой астрономической Вселенной как характерные свойства обитаемой космической системы // Известия Астрофизического ин-та АН КазССР, Т VII, с. 40–53
- Иоффе А.Ф.* (1913) Элементарный фотоэлектрический эффект // Избранные труды. Т.2. Л.: Наука, 1975, с. 26–83.
- Иоффе А.Ф.* (1949) Основные представления современной физики. Л.-М.: Гостехтеориздат, 1949, 368 с.
- Исаак Ньютон (1943). Исаак Ньютон. 1643–1727 Сборник статей к 300-летию со дня рождения М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1943, 440 с.
- История математики с древнейших времен до начала XIX столетия. / Ред. А.П. Юшкевич. Т. I М.: Наука, 1970.
- Йордан П.* (1962) Геофизические следствия гипотезы Дирака // Гравитация и топология. М.: Мир, 1966, с. 293–301.
- Кавендиш Г.* (1798) Опыты по определению плотности Земли // *Голин, Филонович*, 1989, с. 255–268.
- Каган В.Ф.* (1944) Лобачевский. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1944, 347 с.
- Кадышевский В.Г.* (1961a) К теории дискретного пространства-времени // ДАН СССР, 136, № 1, с. 70–73.
- Кадышевский В.Г.* (1961b) К теории квантованного пространства-времени // ЖЭТФ, 41, Вып. 6(12), с. 1885–1894.
- Казютинский В.В., Балашов Ю.В.* (1989) Антропный принцип: история и современность // Природа, 1989, № 1, с. 23–32.
- Капица С.П.* (1966) Естественная система единиц в классической электродинамике и электронике // УФН, 88 (1), с. 191–194.
- Кард П.Г.* (1975) Принцип несоответствия // Методологические вопросы физики. Т.2. Тарту, 1975, с. 21–26.
- Картер Б.* (1973) Совпадение больших чисел и антропологический принцип в космологии // Космология. Теория и наблюдение. М.: Мир, 1978, с. 369–380.
- Каршенбойм С.Г.* (2005a) Фундаментальные физические константы. роль в физике и метрологии и рекомендованные значения // УФН, 175, № 3, с. 271–298.
- Каршенбойм С.Г.* (2005b) On a natural definition of the kilogram and the ampere // arXiv. physics/0507200.
- Квантовая метрология и фундаментальные константы (1981). Сб. статей М.: Мир, 1981, 368 с.
- Квантовый эффект Холла (1986). Сб. статей. М.: Мир, 1986, 232 с.
- Квантовый эффект Холла (1989). М.: Мир, 1989, 404 с.
- Кесуани Дж.* (1965/66) Возникновение теории относительности // Принцип относительности, 1973, с. 244–270.

- Киношита Т* (1978) Новейшие достижения квантовой электродинамики // Квантовая метрология и фундаментальные константы, с 351–364, пер с изд Kinoshita T Report presented of the XIX International Conference on High Energy Physics, Tokyo, Japan, August 1978
- Киржниц Д А* (1966) Нелокальная квантовая теория поля // УФН, 90 (1), с 129–142
- Киржниц Д А* (1998) Фундаментальная длина (элементарная длина) // Физическая энциклопедия Т 5 М “Большая российская энциклопедия”, 1998, с 380
- Кирсанов В С* (1987) Научная революция XVII в М Наука, 1987, 342 с
- Кирсанов В С* (1993) Ранние представления Ньютона о тяготении // ВИЕТ, 1993, № 2, с 42–52
- Кирсанов В С* (1996) Переписка Исаака Ньютона с Робертом Гуком 1679–1680 гг // ВИЕТ, 1996, № 4, с 3–39
- Кирсанов В С* (1999) Ранняя история “Математических начал натуральной философии” Исаака Ньютона Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук М, 1999, 48 с
- Кирхгоф Г* (1860) Об отношении между испускающей и поглощающей способностями тел для тепла и света // *Шенф*, 1978, с 124–143
- Кирхнер Ф* (1939) Методы определения атомных констант // УФН, 24(3), с 309–357 (1940)
- Кландор-Клайнротхаус Г В, Штаудт А* (1995) Неускорительная физика элементарных частиц М Физматлит, 1997, 528 с
- Клейн О* (1955) Квантовая теория и относительность // Нильс Бор и развитие физики М ИИЛ, 1958, с 129–156
- Клеро А* (1743) Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики М -Л Изд-во АН СССР, 1947, 358 с
- Кобзарев И Ю* (1974) Доклад А Пуанкаре и теоретическая физика накануне создания теории относительности // УФН, 113 (4), с 679–694
- Кобзарев И Ю* (1975) О принципе относительности // УФН, 115 (3), с 545–549
- Кобзарев И Ю* (1991/97) Частная теория относительности // Физика XIX–XX вв в общенаучном и социокультурном контекстах Физика XX в М “Янус-К”, 1997, с 31–55
- Кольман Э* (1938) Возрождение пифагорейства в теоретической физике // Под знаменем марксизма, 1938, № 8, с 139–160
- Коперник Н* (1543) О вращениях небесных сфер М Наука, 1964, 653 с
- Корухов В В* (2002) Фундаментальные постоянные и структура пространства-времени Новосибирск Новосибир гос у-т, 2002, 186 с
- Коулмен С* (1981) Магнитный монополь пятьдесят лет спустя // УФН, 144(2), с 277–340 (1984)
- Козн Э, Тэйлор Б* (1973) Согласование значений фундаментальных констант с помощью метода наименьших квадратов по данным на 1973 г // Квантовая метрология и фундаментальные константы 1981, с 174–350, пер с изд *Cohen E R, Taylor B N* // J Phys Chem Ref Data, 2, № 4, p 663 (1973)
- Козн Э* (1976) Определение наилучших значений фундаментальных постоянных // Квантовая метрология и фундаментальные константы 1981, с 122–173, пер с изд *Cohen E R* Preprint SC-PP-76-120, prepared for

- “Enrico Fermi Summer School”, Course Entitled “Metrology and Fundamental Constants”, North-Holland, 1976
- Краг Х.* (1990) Поль Дирак и космологическая теория // Поль Дирак и физика XX века. М.: Наука, 1990, с. 78–91
- Крамаровский Я.М., Чечев В.П.* (1972) Постоянны ли физические постоянные? // Природа, 1972, № 5, с. 46–51
- Крат В.А., Герловин И.Л.* (1974) О гравитационной постоянной // ДАН СССР, 215, № 2, с. 305–306
- Кричевец А.Н.* (1999) В какой математике возможны стили математического мышления? // Стили в математике. социокультурная философия математики Под ред. А.Г. Барабашева, СПб., РХГИ, 1999, с. 49–59
- Кудрявцев П.С., Конфедератов И.Я.* (1965) История физики и техники. 2-е изд. М.: Просвещение, 1965, 571 с.
- Кузнецов А., Ляхов И.* (1964) Константа // Философская энциклопедия. М. “Сов. энциклопедия”, 1964, т. 3, с. 48
- Кузнецов И.В.* (1948) Принцип соответствия в современной физике и его философское значение. М.: Гостехиздат, 1948, 116 с.
- Кук А.* (1972) Эталоны, основанные на атомных и квантовых явлениях // Квантовая метрология и фундаментальные константы 1981, с. 17–121; пер. с изд.: Сook, 1972.
- Куликов К.А.* (1956) Фундаментальные постоянные астрономии М. Гостехиздат, 1956, 340 с.
- Куликов К.А.* (1969) Новая система астрономических постоянных. М. Наука, 1969, 89 с.
- Купер Л.* (1968) Физика для всех. Введение в сущность и структуру физики М., 1973
- Кэри У.* (1987) В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной М.: Мир, 1991, 448 с
- Лагранж Ж.* (1788) Аналитическая механика Т.1–2. М.–Л.: Гостехиздат, 1950
- Лакатос И.* (1970) Фальсификация и методология научно-исследовательских программ. М.: “Медиум”, 1995, 236 с
- Ландау Л.Д., Абрикосов А.А., Халатников И.М.* (1954) Асимптотическое выражение для гриновской функции фотона в квантовой электродинамике // ДАН СССР, 95, с. 1177–1180 (1954); Ландау, 1969, т. 2, с. 206–211.
- Ландау Л.Д.* (1969) Собрание трудов. М. Наука, 1969 Т. 1–2.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* (1988) Теория поля 7-е изд. М. Наука, 1988, 509 с
- Ландсберг Г.С.* (ред.) (1973) Элементарный учебник физики Т. 3. М. Наука, 1973, 640 с
- Ланцош К.* (1962) Эйнштейн и строение космоса М.. Наука, 1967, 160 с
- Лаплас П.С.* (1796) Изложение системы мира. Л. Наука, 1982, 374 с.
- Лармор* (1900) Эфир и материя (главы X и XI) // Принцип относительности, 1973, с. 48–64.
- Лауэ М.* (1907) Увлечение света движущимися телами с точки зрения принципа относительности // Лауэ М. Статьи и речи. М. Наука, 1969, с. 30–31.
- Лауэ М.* (1950) История физики М. ГИТТЛ, 1956, 230 с

- Лафлин Р.* (1998) Дробное квантование // УФН, 170(3), с. 292–303 (2000).
- Леонтович М.А.* (1964/2003) О системах мер // Вестник АН СССР, 1964, № 6, с. 123–126. То же в кн.: Академик М.А. Леонтович: Ученый. Учитель. Гражданин. М.: Наука, 2003, с. 481–485.
- Липсон Г.* (1968) Великие эксперименты в физике. М.: Мир, 1972, 215 с.
- Лобачевский Н.И.* (1946) Полное собрание сочинений. Т. 1. М.-Л.: Гостехтеориздат, 415 с.
- Лоренц Г.А.* (1895) Опыт одной теории электрических и оптических явлений движущихся тел (§ 89–92. Интерференционный опыт Майкельсона) // Принцип относительности, 1973, с. 8–12. *Лоренц*, 1970, с. 3–8.
- Лоренц Г.А.* (1904) Электромагнитные явления в системе, движущейся с произвольной скоростью, меньшей скорости света // Принцип относительности, 1973, с. 67–87. *Лоренц*, 1970, с. 28–54.
- Лоренц Г.А.* (1906/09) Лоренц Г.А. Теория электронов. 2-е изд. М.: Гостехиздат, 1953, 472 с.
- Лоренц Г.А.* (1914) Две статьи Анри Пуанкаре о математической физике // *Лоренц*, 1970, с. 155–170. То же: Принцип относительности, 1973, с. 189–196.
- Лоренц Г.А.* (1970) Старые и новые проблемы физики. М.: Наука, 1970, 371 с.
- Льоцци М.* (1965) История физики. М.: Мир, 1970, 464 с.
- Максвелл Дж.К.* (1873/91) Трактат об электричестве и магнетизме. Т. 1-2. М.: Наука, 1989.
- Максвелл Дж.К.* (1952) Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 687 с.
- Максвелл Дж.К.* (1968) Статьи и речи. М.: Наука, 423 с.
- Мандельштам Л.И.* (1972) Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: Наука, 1972, 349 с.
- Марков М.А.* (1965) Может ли гравитационное поле оказаться существенным в теории элементарных частиц? // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979, с. 467–478; *Марков*, 2001, т. 2, с. 11–22.
- Марков М.А.* (1966) Элементарные частицы максимально больших масс (кварки, максимоны) // ЖЭТФ, т. 51, вып. 3(9), с. 878–890; *Марков*, 2001, т. 1, с. 266–279.
- Марков М.А.* (1969) Замкнутость вселенной и законы сохранения электрического, барнионного и лептонного зарядов. Препринт Д2–4534/ ОИЯИ. Дубна. 1969.
- Марков М.А.* (1970) К теории фридмонов (о роли гравитации в теории элементарных частиц) // Препринт Р2–5289/ ОИЯИ. Дубна. 1970; *Марков*, 2001, т. 2, с. 41–58.
- Марков М.А., Фролов В.П.* (1970) Метрика закрытого мира Фридмана, возмущенная электрическим зарядом (к теории электромагнитных “фридмонов”) // Теорет. и мат. физика, 3, № 1, с. 3–16; *Марков*, 2001, т. 2, с. 24–41.
- Марков М.А., Фролов В.П.* (1972) О минимальных размерах частиц в общей теории относительности // Теорет. и мат. физика, 13, № 1, с. 41–60; *Марков*, 2001, т. 2, с. 66–88.

- Марков М.А., Фролов В.П. (1979) Максимоны и гипотеза максимонных роев // Письма в ЖЭТФ, 29, вып. 6, с. 372–374; Марков, 2001, т. 2, с. 128–130.
- Марков М.А. (1982) Предельная плотность материи как универсальный закон природы // Письма в ЖЭТФ, 36, 6, с. 214–216 (1982); Марков, 2001, т. 2, с. 150–153.
- Марков М.А. (1986) Макро-микросимметрическая Вселенная // Теоретико-групповые методы в физике. М.: Наука, 1986, с. 7–41. Марков, 2001, т. 2, с. 209–240.
- Марков М.А. (1987) О возможном состоянии вещества на предпоследней стадии коллапса // Письма в ЖЭТФ, 46, 9, с. 342–345 (1987); Марков, 1993, с. 127–131, Марков, 2001, т. 2, с. 244–248.
- Марков М.А. (1993) Размышляя о физиках.. о физике... о мире. . М.: Наука, 1993, 256 с.
- Марков М.А. (1994) О возможном существовании в природе асимптотической свободы гравитационных взаимодействий // УФН, 164, № 1, с. 63–75; Марков, 2001, т. 2, с. 300–330.
- Марков М.А. (2001) Избранные труды. М.: Мир, 2001, т. 1-2.
- Марутаев М.А. (1990) Гармония как закономерность природы // Золотое сечение М. Стройиздат, 1990, с. 130–233.
- Матинян С.Г. (1980) На пути объединения слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий: SU(5) // УФН, 130 (1), с. 3–38.
- Мах Э. (1866) О скорости света // Популярно-научные очерки. СПб: Образование, 1909, с. 43–56.
- Медведев Б.В. (1955) К вопросу об унитарности S-матрицы в квантовой теории поля с нелокальным взаимодействием // ДАН СССР, 100, № 3, с. 433–435.
- Мермин Н.Д. (1984) Теория относительности без постулата о постоянстве скорости света // Физика за рубежом 1986. Серия Б М.: Мир, 1986, с. 173–192
- Милликен Р. (1935) Электроны (+ и –), протоны, фотоны, нейтроны и космические лучи. М.: ГОНТИ, 1939, 312 с.
- Милюков В.К., Сагитов М.У. (1985) Гравитационная постоянная в астрономии. М.: “Знание”. Сер. “Космонавтика Астрономия”, 1985, № 9, 57 с.
- Минковский Г. (1908a) Пространство и время // Принцип относительности, 1973, с. 167–182.
- Минковский Г. (1908b) Теория Лоренца, теорема, постулат, принцип относительности // Принцип относительности, 1973, с. 187–188.
- Монополь Дирака (1970) Сб. статей. М.: Мир, 1970, 332 с.
- Мостепаненко А.М., Мостепаненко М.В. (1966) Четырехмерность пространства-времени. М., Л.: Наука, 1966, 189 с
- Нелинейная квантовая теория поля. Сб. статей М.: ИИЛ, 1959, 464 с
- Новиков И.Д., Полнарев А.Г., Розенталь И.Л. (1982) Числовые значения фундаментальных постоянных и антропный принцип // Известия АН ЭССР, 31, № 3.
- Ньютон И. (1687/1725) Математические начала натуральной философии. М. Наука, 1989, 688 с.
- Ньютон И. (1704/30) Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. М –Л.. Госиздат, 1927, 373 с.

- Окунь Л Б* (1990) Лептоны и кварки 2-е изд М Наука, 1990, 345 с
- Окунь Л Б* (1991) Фундаментальные константы физики // УФН 161, 9, с 177-194
- Окунь Л Б* (1993) Проблема массы от Галилея до Хиггса / Пер Д Баяка // Вопросы истории естествознания и техники 1993, № 2, с 32-41
- Окунь Л Б* (2002) О книге Г Гамова, Д Иваненко и Л Ландау "Мировые постоянные и предельный переход" // Ядерная физика, 65, № 7, с 1403-1405
- Овчинников Н Ф* (1997) Методологические принципы в истории научной мысли М Эдиториал УРСС, 1997, 296 с
- Осборн М* (1949) Квантово-теоретические ограничения на общую теорию относительности // Эйнштейновский сборник 1982-1983 М Наука, 1988, с 271-284
- Пайс А* (1982) Научная жизнь и деятельность Альберта Эйнштейна М Наука, 1989, 567 с
- Паули В* (1921) Теория относительности 3-е изд М Наука, 1991, 328 с
- Паули В* (1934/36) Пространство, время и причинность в современной физике // Паули, 1975, с 7-20
- Паули В* (1948) Вклад Зоммерфельда в квантовую теорию // Паули, 1975, с 219-230
- Паули В* (1949) Философское значение идеи дополнительности // Паули, 1975, с 56-65
- Паули В* (1975) Физические очерки М Наука, 1975, 256 с
- Петров Ю В* (1977) Естественный ядерный реактор Окло // УФН, 123(3), с 473-486
- Планк М* (1900а) О необратимых процессах излучения // Планк, 1975, с 191-233
- Планк М* (1900b) Энтропия и температура лучистой энергии // Планк, 1975, с 234-248
- Планк М* (1900с) Об одном улучшении закона излучения Вина // Планк, 1975, с 249-250
- Планк М* (1900d) К теории распределения энергии излучения нормального спектра // Планк, 1975, с 251-257
- Планк М* (1901а) О законе распределения энергии в нормальном спектре // Планк, 1975, с 258-267
- Планк М* (1901b) Об элементарном кванте материи и электричества // Планк, 1975, с 268-270
- Планк М* (1901с) О необратимых процессах излучения Дополнение // Планк, 1975, с 271-281
- Планк М* (1909) Единство физической картины мира // Планк, 1966, с 23-50 Планк, 1975, с 613-633
- Планк М* (1914) Взаимоотношение физических теорий // Планк, 1966, с 115-122
- Планк М* (1928) Введение в теоретическую физику Ч 3 Теория электричества и магнетизма М -Л ОНТИ, 1934, 183 с
- Планк М* (1943) К истории открытия кванта действия // Планк, 1975, с 431-442

- Планк М. (1966) Единство физической картины мира. М.: Наука, 1966, 285 с
- Планк М (1975) Избранные труды. М.: Наука, 1975, 788 с
- Погребысская Е И. (1981) Оптика Ньютона М · Наука, 1981, 135 с
- Политцер Х Д. (2004) Нелегкая задача установления авторства // УФН, 175, № 12, с. 1319–1324 (2005)
- Пригожин И., Стенгерс И (1984) Порядок из хаоса М.: Прогресс, 1986, 431 с.
- Пригожин И, Стенгерс И (1994) Время, хаос, квант. М · Изд группа "Прогресс", 1994, 272 с.
- Принцип относительности. (1935) М –Л.: ОНТИ, 1935, 386 с
- Принцип относительности. (1973) М. Атомиздат, 1973, 332 с
- Принцип соответствия (1979) М · Наука, 1979, 317 с.
- Проблемы расширения и пульсации Земли. Сб. статей М Наука, 1984, 192 с
- Птолемей К. (II в. н э.) Альмагест Математическое сочинение в тринадцати книгах. М.. Наука. Физматлит, 1998, 672 с.
- Пуанкаре А. (1895) К теории Лармора [выдержки из статей] // Принцип относительности, 1973, с 7–8
- Пуанкаре А. (1898) Измерение времени // Пуанкаре, 1974, т. 3, с 419–428  
Принцип относительности, 1973, с. 12–21.
- Пуанкаре А (1899/1901) Оптические явления в движущихся телах // Принцип относительности, 1973, с. 21–22
- Пуанкаре А. (1902) Наука и гипотеза. М., 1904 В сб : Пуанкаре (1983/90, с. 5–152) Гл V–VII. в сб. Принцип относительности, 1973, с 22–44
- Пуанкаре А. (1904) Настоящее и будущее математической физики // Пуанкаре, 1974, т 3, с. 559–575
- Пуанкаре А. (1905) О динамике электрона // Пуанкаре, 1974, т. 3, с 429–432  
Принцип относительности, 1973, с. 90–93
- Пуанкаре А. (1905/06) О динамике электрона // Пуанкаре, 1974, т. 3, с 433–486  
Принцип относительности, 1973, с 118–161.
- Пуанкаре А. (1974) Избранные труды Т 3 М. Наука, 1974, 771 с
- Пуанкаре А (1983/90) О науке. М · Наука, 1983, 560 с 2–е изд. 1990, 746 с
- Раджабов У А. (1980) Принцип соответствия в физических теориях // Физическая теория (философско-методологический анализ). М Наука, 1980, с. 154–172.
- Райдер Л. (1985) Квантовая теория поля. М . Платон, 1988, 512 с
- Резерфорд Э. (1972) Избранные труды. Т,2 М . Наука, 1972, 532 с
- [Ремер О ] (1676) Доказательство, касающееся движения света // Голин, Филонович, 1989, с. 119–120.
- Риман Б (1948) Сочинения М –Л : Гостехиздат, 1948, 543 с
- Рис М., Руффини Р., Уилер Дж. (1974) Черные дыры, гравитационные волны и космология. М. Мир, 1977, 376 с
- Розенбергер Ф (1882/90) История физики. 2-е изд Ч.2. М –Л. ОНТИ, 1937, 312 с ; ч. 3(2), 1936, 448 с
- Розенталь И.Л (1980) Физические закономерности и численные значения фундаментальных постоянных // УФН, 131(2), с. 239–256
- Розенталь И.Л. (1980а) О численных значениях фундаментальных постоянных. Препринт ИКИ АН СССР, Пр-608, 19 с

- Розенталь И.Л.* (1981) Структура Вселенной и фундаментальные постоянные. Препринт ИКИ АН СССР, Пр-636, 12 с.
- Сагитов М.У.* (1969) Постоянная тяготения и масса Земли М : Наука, 1969, 188 с.
- Сагитов М.У., Милюков В.К.* (1981) Постоянная тяготения // Земля и Вселенная, 1981, № 3, с 37–42.
- Салекер Г., Вигнер Е.* (1958) Квантовые ограничения на измерение пространственно-временных расстояний // Эйнштейновский сборник. 1982–1983. М.: Наука, 1988, с 285–301
- Сахаров А.Д.* (1966а) О максимальной температуре теплового излучения // Письма в ЖЭТФ, 3, с 439–441 (1966). *Сахаров*, 1995, с 216–217.
- Сахаров А.Д.* (1966b) Самая высокая температура // Природа, 1966, № 11, с. 108. *Сахаров*, 1995, с. 361.
- Сахаров А.Д.* (1967а) Вакуумные квантовые флуктуации в искривленном пространстве и теория гравитации Препринт ИПМ АН СССР. М., 1967 *Сахаров*, 1995, с 157–162.
- Сахаров А.Д.* (1967b) Вакуумные квантовые флуктуации в искривленном пространстве и теория гравитации // ДАН СССР, 177, № 1, с. 70–71. *Сахаров*, 1995, с 155–157.
- Сахаров А.Д.* (1968) Существует ли элементарная длина? // Физика в школе, 1968, № 2, с. 6–15; *Сахаров*, 1995, с 384–396
- Сахаров А.Д.* (1969/70) Письмо Дж.А. Уилеру // *Сахаров*, 1995, с. 418
- Сахаров А.Д.* (1995) Научные труды. М.: “Центрком”, 1995, 524 с.
- Сивухин Д.В.* (1979) О Международной системе физических величин // УФН, 129(2), с 335–338.
- Сивухин Д.В.* (1990) Общий курс физики Т. 2 М.: Наука, 1990, 592 с.
- Сморodinский Я.А.* (1988) Спор, который не может окончиться // Нильс Бор и наука XX века Киев Наукова думка, 1988, с 191–196.
- Сморodinский Я.А.* (1990) Естественные системы единиц // Физическая энциклопедия. Т.1–5. Т. 2 М. “Сов. энциклопедия”, 1990, с 29
- Спасский Б.И.* (1977) История физики 2–е изд М : Высшая школа, 1977. Ч 1, 320 с Ч.2, 212 с.
- Спиридонов О.П.* (1984) Универсальные физические постоянные. М.: Просвещение, 1984, 160 с Пер на англ.: *Spiridonov*, 1986
- Спиридонов О.П.* (1991) Фундаментальные физические постоянные. М.: Высшая школа, 1991, 238 с
- Станюкович К.П.* (1962) К вопросу о возможности изменения гравитационной постоянной // ДАН СССР, 147, с 1348–1351
- Станюкович К.П.* (1971) К вопросу о теории связи космологических и квантовых “констант” // Теория относительности и гравитация. М.. Изд МОИП, 1971, с 3–19
- Станюкович К.П., Мельников В.Н.* (1983) Гидродинамика, поля и константы в теории гравитации М Энергоатомиздат, 1983, 256 с
- Субботин М.Ф.* (1958) Астрономические работы Леонарда Эйлера // Леонард Эйлер. Сб. статей в честь 250–летия со дня рождения М Изд-во АН СССР, 1958, 268–376



- Суханов А Д* (2005) Статистико-термодинамические идеи Эйнштейна в современной физической картине мира (к 100-летию ранних работ Эйнштейна) // Физика элементарных частиц и атомного ядра, 36 (6), с 1281–1342
- Тамм И Е* (1949) // Материалы Всесоюзного совещания физиков 1949 г ГАРФ Ф 9396, оп 1, д 259, л 160–172
- Тамм И Е* (1964) Доклад на 12-й Международной конференции по физике высоких энергий Дубна, 1964
- Тамм И Е* (1965) О кривом импульсном пространстве // Тамм, 1975, с 218–225 Пер с изд Proceedings of the International Conference on Elementary Particles Kyoto, 1965, p 314
- Тамм И Е* (1968) Эволюция квантовой теории // Вестник АН СССР, 1968, № 9, с 22, Тамм, 1975, с 478–486
- Тамм И Е, Вологодский В Б* (1972) Об использовании кривого импульсного пространства при построении нелокальной квантовой теории поля // Труды ФИАН СССР, 57, с 5, Тамм, 1975, с 226–253
- Тамм И Е* (1975) Собр научных трудов Т 2 М Наука, 488 с
- Таулесс Д Дж* (1987) Топологические соображения // Квантовый эффект Холла М Мир, 1989, с 113–126
- Творцы физической оптики М Наука, 1973, 352 с
- Тейлор Б, Паркер В, Лангенберг Д* (1969) Фундаментальные константы и квантовая электродинамика М Атомиздат, 1972, 327 с
- Тодхантер И* (1873) История математических теорий притяжения и фигуры Земли от Ньютона до Лапласа М Эдиториал УРСС, 2002, 672 с
- Толкачев Е А, Томильчик Л М* (1990) Исследования С А Богуславского периода 1920–1923 гг и современная теория магнитного заряда // ВИЕТ, 1990, № 4, с 71–73
- Томилиן К А* (1991) К истории появления гравитационной постоянной // XXXIII научн конф аспирантов и молодых специалистов по истории естествознания и техники М ИИЕТ АН СССР, 1991, с 63–64
- Томилиן К А* (1995) Научная терминология морально-этический императив // ИИЕТ РАН Годич научн конф 1995 М Янус, 1996, с 103–105 <http://www.ihst.ru/personal/tomilin/papers/imper.htm>
- Томилиן К А* (1995/97) Большие числа и гипотеза о зависимости от времени мировых констант // Исследования по истории физики и механики 1995–97 М Наука, 1999, с 141–159 Ibid tom99:ihpm.pdf
- Томилиן К А* (1996) Галилей и скорость света // ИИЕТ РАН Годич научн конф 1996 М “Янус-К”, 1997, с 196–202 Ibid galilei.htm
- Томилиן К А* (1997) Аналогия в появлении фундаментальных постоянных // ИИЕТ РАН Годич научн конф 1997, М “Янус-К”, 1997, ч 2, с 63–66 Ibid analogy.htm
- Томилиן К А* (1999) Опыт Г Кавендиша проблемы восприятия и интерпретации // ИИЕТ РАН Годич научн конф 1999 М ИИЕТ РАН, 1999, с 394–397 Ibid kavend.htm
- Томилиן К А* (2000а) Фундаментальные постоянные и модели эволюции физики // Исследования по истории физики и механики, 2000 М Наука, 2001, с 181–204 Ibid tom00:ihpm.pdf

- Томилин К.А. (2000b) Планковские величины // 100 лет квантовой теории. История. Физика. Философия. Труды межд конф., М.: НИИ-Природа, 2002, с. 105–113. Ibid. tom00iph.pdf
- Томилин К.А. (2001) К истории постоянных  $h$  и  $e$ : от попыток редукции к фундаментальному статусу // Исследования по истории физики и механики. 2001. М.: Наука, 2002, с. 238–276. Ibid: tom01iph.pdf
- Томилин К.А. (2003) Фундаментальные постоянные и “пифагорейские” попытки их обоснования // Исследования по истории физики и механики. 2003. М.: Наука, 2003, с. 314–342. Ibid. tom03ihpm.htm
- Томилин К.А. (2003а) Генезис и развитие концепции фундаментальных физических постоянных Диссертация М., ИИЕТ РАН, 2003, 295 с.
- Томилин К.А. (2004) К истории открытия квантования магнитного потока // ИИЕТ РАН. Годич. научн. конф. 2004. М.: Диполь-Т, 2004, с. 344–348.
- Тяпкин А.А. (1973) Об истории формирования идей специальной теории относительности // Принцип относительности, 1973, с. 271–330.
- Уиттекер Э. (1910/53) История теории эфира и электричества. Ижевск: НИЦ “РХД”, 2001, т. 1, 512 с., т. 2, 2004, 464 с.
- Умов Н.А. (1950) Избранные сочинения. М.–Л.: ГИТТЛ, 1950, 554 с.
- Фаддеев Л.Д. (1989) Математический взгляд на эволюцию физики // Природа, 1989, № 5, с. 11–16.
- Фарадей М. (1947) Экспериментальные исследования по электричеству, т. 1, М.: Изд. АН СССР, 1947.
- Фаустов Р.Н. (1998) Фундаментальные физические постоянные // Физическая энциклопедия. т. 5 М.: Большая российская энциклопедия, 1998.
- Фейнман Р. (1965) Характер физических законов. М.: Наука, 1968, 232 с.
- Фейнман Р. (1983/85) КЭД – странная теория света и вещества. М.: Наука, 1988, 144 с.
- Ферма П. (1657) Письмо де ла Шамбру // Вариационные принципы механики. М.: ГИФМЛ, 1959, с. 742–745.
- Ферма П. (1662) Синтез для рефракции // Там же, с. 6–10.
- Ферми Э. (1934) К теории  $\beta$ -лучей // Ферми, 1971, с. 525–541
- Ферми Э. (1971) Научные труды. Т.1. М.: Наука, 1971, 818 с.
- Физические величины. М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.
- Филонович С.Р. (1981) Генри Кавендиш // Квант, 1981, № 10, с. 17–22.
- Филонович С.Р. (1983) Самая большая скорость. М.: Наука, 1983, 176 с.
- Филонович С.Р. (1988; 1989) Физический эксперимент и его восприятие // Исследования по истории физики и механики, М.: Наука, 1988, с. 5–36 (I); там же, 1989, с. 38–69 (II).
- Франкфурт У.И. (1960) К истории определения скорости света // Из истории французской науки. М.: Изд-во АН СССР, 1960, с. 70–84.
- Франкфурт У.И. (1968) Специальная и общая теории относительности. Исторические очерки. М.: Наука, 1968, 330 с.
- Франкфурт У.И., Френк А.М. (1972) Оптика движущихся тел. М.: Наука, 1972, 212 с.
- Фредерикс В.К., Иваненко Д.Д. (1935) О статьях А. Пуанкаре, А. Эйнштейна, Г. Минковского // Принцип относительности, 1935, с. 365–370; Принцип относительности, 1973, с. 201–204.

- Френкель Я И (1927а) Кванты и радио // Телеграфия и телефония без проводов, т 8, № 43, с. 375; Френкель, 1970, с 27–54
- Френкель Я И (1927b) Механические и электромагнитные свойства световых атомов (квантов) // УФН, 7 (2), с 107; Френкель, 1970, с. 69–84.
- Френкель Я И (1932) О кризисе современной физики // Архив РАН Ф 1515, оп 2, д 104, л 1–32 Обсуждение (Бронштейн, Тамм): л. 32–41. Диспут о кризисе современной физики 31 марта 1932 года Л 42–49об.
- Френкель Я И (1933) Волновая механика. Т 1 Л, М : Гостехтеориздат, 1933, 388 с
- Френкель Я И (1970) На заре новой физики. Л : Наука, 1970, 384 с
- Фридман В Г (1957) Принципы относительности Ньютона // Труды ИИЕТ Т 17 М Изд АН СССР, 1957, с 425–449.
- Фролов В.П (1976) Черные дыры и квантовые процессы в них // УФН, 118(3), с. 473–503
- Фрум К., Эссен Л (1969) Скорость света и радиоволн М · Мир, 1973, 196 с. Фундаментальные постоянные астрономии. М · Мир, 1967, 382 с.
- Хакинг Я. (1983) Представление и вмешательство М.. Логос, 1998, 296 с
- Хвольсон О.Д. (1913) Основные положения термодинамики // Новые идеи в физике Сб. 6, “Природа теплоты”, СПб.: “Образование”, 1913, 158 с.
- Хвольсон О.Д. (1923) Физика и ее значение для человечества. Госиздат, Берлин, 1923, 230 с
- Хвольсон О.Д. (1933) История физики Т.1 Л -М.: ГТТИ, 1933, 656 с.
- Хелзен Ф., Мартин А. (1984) Кварки и лептоны М.: Мир, 1987, 456 с
- Холтон Д (1960) К генезису специальной теории относительности // Эйнштейновский сборник, М · Наука, 1966, с. 177–194
- Холтон Д (1969а) Эйнштейн и “решающий” эксперимент // УФН, 104, 2, с 297–316 (1971).
- Холтон Д (1969b) Эйнштейн, Майкельсон и “решающий” эксперимент // Эйнштейновский сборник. 1972 М Наука, 1974, с. 104–211.
- Храмов Ю.А. (1983) Физики Биографический справочник. 2-е изд. М.: Наука, 1983, 400 с
- Хунд Ф. (1967) История квантовой теории. Киев. Наукова думка, 1980, 244 с.
- Цуи Д (1998) Соотношение беспорядка и взаимодействия в двумерном электронном газе, помещенном в сильное магнитное поле // УФН, 170(3), с 320–324 (2000)
- Черепашук А М, Чернин А Д. (2003) Вселенная, жизнь, черные дыры Фрязино: “Век-2”, 2003, 320 с
- Чечев В П, Крамаровский Я М (1978) Радиоактивность и эволюция Вселенной. М Наука, 1978, 207 с.
- Шерк Дж. (1979) Расширенная суперсимметрия и теория расширенной супергравитации // Геометрические идеи в физике М · Мир, 1983, с 203–239 Пер из: Recent Developments in Gravitation, eds. M.Levy and S Deser, Plenum Publ Corp, 1979
- Шёнф Х.-Г (1978) От Кирхгофа до Планка М. Мир, 1981, 192 с.
- Широков К П (1983) Естественные системы единиц // Физический энциклопедический словарь М · “Сов. энциклопедия”, 1983, с. 187.

- Шляхтер А И* (1976) Прямая проверка постоянства фундаментальных констант Препринт ЛИЯФ № 280
- Шредингер Э* (1971) Новые пути в физике М Наука, 1971, 427 с
- Штермер Х* (1998) Дробный квантовый эффект Холла // УФН, 170(3), с 304–319 (2000)
- Штраус М* (1966/70) Законы развития и перспективы физики // Диалектика и современное естествознание М Наука, 1970, с 175–182
- Эверетт Дж* (1888) Единицы и физические постоянные СПб, 1888, 280 с
- Эддингтон А* (1920) Пространство, время и тяготение Одесса Матезис, 1923, 216 с
- Эддингтон А* (1924) Теория относительности М –Л ОНТИ, 1934, 508 с
- Эддингтон А* (1939) Селективный субъективизм // Вопросы философии 1997, № 9, с 126–132
- Эйнштейн А* (1905а) Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света // *Эйнштейн*, 1965/67, т 3, с 92–107
- Эйнштейн А* (1905b) К электродинамике движущихся тел // *Эйнштейн*, 1965/67, т 1, с 7–35
- Эйнштейн А* (1906) К теории возникновения и превращения света // *Эйнштейн*, 1965/67, т 3, с 128–133
- Эйнштейн А* (1907а) О возможности нового доказательства принципа относительности // *Эйнштейн*, 1965/67, т 1, с 49–50
- Эйнштейн А* (1907b) О принципе относительности и его следствиях // *Эйнштейн*, 1965/67, т 1, с 65–114 Принцип относительности, 1973, с 185–186
- Эйнштейн А* (1910) Принцип относительности и его следствия в современной физике // *Эйнштейн*, 1965/67, т 1, с 138–164
- Эйнштейн А* (1911) Теория относительности // *Эйнштейн*, 1965/67, т 1, с 175–186
- Эйнштейн А* (1918) Письмо А Зоммерфельду 1 февраля 1918 г // *Зоммерфельд*, 1973, с 197–198
- Эйнштейн А* (1926) Письмо А Зоммерфельду 28 ноября 1926 г // *Зоммерфельд*, 1973, с 237–238
- Эйнштейн А* (1949) Автобиографические наброски // *Эйнштейн*, 1965/67, т 4, с 350–356
- Эйнштейн А* (1965/67) Собрание научных трудов в 4-х тт М Наука, 1965–1967
- Эренфест П* (1917) Каким образом в фундаментальных законах физики проявляется то, что пространство имеет три измерения? Пер Г Е Горелика в кн *Горелик*, 1983, с 197–205
- Эренфест П* (1972) Относительность Кванты Статистика М Наука, 1972, 360 с
- Юшкевич А П* (1988) Логарифм // Математический энциклопедический словарь М Сов энциклопедия, 1988, с 327
- Янг Ч* (1961) Элементарные частицы М Госатомиздат, 1963, 68 с
- Янсон И К, Свистунов В М, Дмитренко И М* (1965) Экспериментальное наблюдение туннельного эффекта для куперовских пар с излучением фотонов // ЖЭТФ, 48, с 976–979

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абалакин В.К. 125  
Абрикосов А.А. 188, 214, 215, 240  
Авогадро постоянная 24, 92, 97, 102, 172  
Агаков В.Г. 197  
Адамс Э. 261  
Адлер С. 26  
Айвс Г. 48, 49  
Акулов Д.В. 153  
Алексамян М. 272  
Алексеев И.С. 82  
Алешкина Е.Ю. 289  
Амбарцумян 237  
Ампер А.-М. 145  
Ампера закон 16, 17, 181  
Андерсон В. 80  
Андерсон Д. 102  
Андерсон Ф. 251  
Андо Т. 252  
Андрюшин В.И. 27  
Аносов Д.В. 110  
Ансельм А.И. 186  
Апокин И.А. 21  
Аппель Я. 120  
Араго Ф. 51, 53, 120  
Аракелян Г.Б. 22, 273  
Аристотель 40  
Асколи Р. 234  
Аспден Г. 273  
Ахиэзер А.И. 160, 232  
Бабков В.В. 10  
Байерс Н. 250  
Бакал Дж. 292  
Балашов В.В. 304, 305  
Бальмер 94, 260  
Бардина-Купера-Шриффера теория 248, 249  
Барклай 57  
Барроу Дж. 26, 88, 126, 292, 293, 296, 303, 304, 305  
Бартини Р.О., ди 268–270  
Бартоли А. 83  
Баскин Э.М. 252  
Бейли Ф. 120  
Бекман И. 39  
Бергшtrand Э. 80  
Бёрдж Р.Т. 23, 107, 163, 169, 171, 264, 286  
Безанская В.М. 10  
Берестецкий В.Б. 161, 162, 232  
Бернулли И. 115  
Берри А. 121  
Берцелиус И. 97  
Бессо М. 74  
Био Ж.Б. 145  
Блох А.М. 250  
Боас Холл М. 110  
Богуславский С.А. 245  
Бойс К. 124  
Болотовский Б.М. 10, 61  
Больцман Л. 57, 76, 83, 84, 87, 102, 182, 184  
Больцмана постоянная 9, 18, 19, 24, 30, 83, 87–92, 96, 102, 124, 132, 164, 176, 186, 187, 198, 210, 220, 222, 227, 309, 310, 312  
Больцмана–Друде постоянная 168  
Больяи Я. 80  
Бонд В.Н. 23, 262  
Бонди Г. 297  
Бор Н. 82, 93–96, 131, 140, 160, 162, 167, 170, 181, 232, 255, 310  
Бора радиус 219–221, 223  
Бора теория атома 57, 82, 93–95, 104, 140, 170, 187  
Бора постулаты 93–95, 170  
Бора принцип дополнительности 170  
Борисова Г.Л. 10  
Борн М. 31, 95, 96, 103, 104, 130, 160, 165, 168, 218, 228–233, 264, 265  
Борна–Инфельда электродинамика 204, 228–232, 242  
Борна–Йордана перестановочные соотношения 95

- Брагинский В.Б. 125  
Брадлей Дж. 47–49, 54, 309  
Бранса–Дикке теория 288  
Брей Дж де 285, 286  
Бриджмен П.В. 18, 135, 160, 164, 221, 227  
Бройль Л, де 82, 95, 96, 170, 178  
Бронштейн М.П. 26, 103, 119, 127, 128, 130, 160, 161, 179, 184, 187–191, 193–195, 199, 200, 202, 239, 262, 266–268, 294  
Брюстер Д. 21  
Будрейко Е.А. 101, 102  
Булюбаш Б.В. 31, 53, 282  
Бургер Т. 272  
Буш 54  
Бэббедж Ч 21, 163  
Бэкон Ф. 32, 33, 36, 178, 274  
Вавилов С.И. 39, 102, 109, 160, 165, 172, 265  
Вайнберг С 25, 124, 143, 149–152, 154, 155, 162, 201, 237  
Вайнберга угол 150–153, 154  
Ван ден Брук А. 104  
Ван-дер-Ваальса силы 241  
Ван дер Варден Б.Л. 82  
Ван Хелден А. 42, 43, 46  
Вант-Холл Л. 249  
Варичак В. 68, 78, 79, 183  
Ватанабе И. 237  
Вдовиченко Н.В. 82  
Вебб Дж 292  
Вебер В. 53–56, 98, 211, 223, 282, 309  
Вебер Г.Ф. 73, 83–85  
Вейерштрасс К. 260  
Вейль Г. 146, 162, 165, 169, 184, 205, 215, 265, 275, 281–285, 299  
Вейнберг Б.П. 9, 22, 23, 30, 52, 53, 80, 81  
Вейнсток Р. 110, 112  
Венециано Г. 26  
Верховский Л.И. 10  
Веселовский И.Н. 39  
Весс Ю. 153, 202  
Вестфолл Р. 110  
Вигнер Е. 237, 240  
Виет Ф. 174  
Визгин В.П. 10, 70, 126, 146, 184, 186, 197, 203, 263, 282  
Вильсон Р. 242  
Вильчек Ф. 144, 153  
Вин В. 81, 84, 85, 102, 166  
Вина закон излучения 85–91, 215, 233  
Вина закон смещения 83–87, 91, 215  
Вина постоянная 82, 88, 89  
Вихерт Э. 102  
Владимиров Ю.С. 10, 195, 198, 299  
Волков В.П. 153  
Вологодский В.Б. 236  
Воронель А.В. 207  
Вроблевски А. 25  
Ву Ц 141  
Вяльцев А.Н. 101–103, 237  
Гааз А. 131, 160  
Галилей Г. 32, 33, 36–40, 50, 69, 70, 72, 73, 80, 112, 192, 193, 199, 309  
Галилея группа 78, 79, 181  
Галилея преобразования 62, 68, 70, 73  
Галлей Э. 112  
Гамов Г.А. 26, 127, 161, 184, 186–188, 190, 191, 194, 195, 200, 218, 239, 290, 294  
Гарвин Р 141  
Гаусс К.Ф. 114–116, 183, 211–213, 223  
Гаусса абсолютная система единиц 211–212  
гауссова система единиц 16, 20, 126, 129, 135, 136, 148, 254, 293  
гауссова постоянная 108, 109, 114  
Гегель Г.В.Ф. 166  
Гейзенберг В. 82, 95, 96, 143, 160, 168, 170, 176, 184, 187, 200, 218, 230–238, 263, 275, 281  
Гейзенберга принцип неопределенности 246  
Гейзенберга соотношение неопределенностей 95, 170  
Гелл-Манн М. 104, 141, 143  
Гельмгольц Г. 84, 101, 102, 166–168, 282  
Гельмгольца соотношение 101  
Герловин И.Л. 268–271  
Герштейн С.С. 161, 162

- Гибсон 57  
 Гиллес Г 25, 110, 111, 124, 125  
 Гильберт Д 184, 205  
 Гинзбург В Л 31, 170  
 Гинзбурга–Ландау теория 170  
 Гирвин С 252, 253  
 Глэдстоун 57  
 Глэшоу Ш 149, 151, 201, 237  
 Глэшоу–Вайнберга–Салама теория 201  
 Голин Г М 24, 41, 43  
 Голубева О Н 88  
 Гольдберг С 31  
 Гольдхабер М 25  
 Гольфанд Ю А 153, 236  
 Горелик Г Е 10, 26, 127, 128, 175, 184, 186–189, 197, 199, 215, 239, 240, 283–284, 299  
 Госсард А 253  
 Гречки А 226  
 Гречаный 69  
 Гросс Д 144  
 Гротгус Т 97  
 Гротц К 202  
 Гук Р 112  
 Гэлбрейт 55  
 Гюйгенс Х 36, 39–42, 44, 47, 50  
 Гюйгенса принцип 299  
 Давыдов А С 189  
 Дайсон Ф 291, 301  
 Даламбер Ж Л 115  
 Дамур Т 291  
 Дарлинг 237  
 Дафф М 14, 26  
 Де Витт 126, 240 218  
 Де ля Провосте 83  
 Де ля Рив 97  
 Девис П 162, 281, 292  
 Дейл П 102  
 Декарт Р 36, 39, 40, 174  
 Десэз 83  
 Джеммер М 25, 82, 89, 93–96, 167, 168, 178  
 Джермер Л 95  
 Джинс Дж 87, 103, 160, 189, 261, 266, 294  
 Джозефсона Б эффект 209, 250, 251, 256, 257  
 Джорджи Г 151, 152  
 Дивер Б С 248, 250  
 Дикке Р 280, 281, 288, 297  
 Дирак П А М 15, 18, 103, 104, 108, 126, 130, 160, 162, 169, 220, 230, 231 244–247, 250, 263–265, 271, 275 276, 279, 281, 287–289, 294, 297 298  
 Дирака гипотеза 201, 275–293  
 Дирака матрицы 262  
 Дирака спинор 235  
 Дирака уравнение 169, 262  
 Дмитренко И М 251  
 Долинский Е Ф 207, 219  
 Долл Р 248, 250  
 Доплер К 50  
 Доплера эффект 42, 48, 49, 59, 63, 67, 76, 84, 180  
 Дорда Ж 252, 253  
 Дорфман Я Г 42, 120  
 Дринкуотер М 292  
 Дуков В М 102  
 Дэви Х 97  
 Дэвиссон К 95  
 Дюамель М 118  
 Дюлонг П 83  
 Дюмонд Дж 23, 119, 124, 162, 169, 171  
 Дюрр Г 234  
 Евклида геометрия 80  
 Ефремов А В 144  
 Жаботинский М Е 81  
 Закачкиков А И 270, 271  
 Зельдович Я Б 204, 291, 296  
 Зельманов А Л 26, 127, 161, 162, 166, 173, 184, 187, 191, 194–202, 296, 297, 303, 304  
 Зилов П А 57  
 Зольднер И 116  
 Зоммерфельд А 9, 20, 50, 103, 131, 132, 134, 138, 160, 167, 177, 260–264, 282  
 Зоммерфельда постоянная 131, 259  
 Зорин А Б 258  
 Зотов А Ф 181  
 Зумино Б 153

- Иваненко Д Д 26, 31, 124, 127, 143,  
161, 184, 186–188, 190, 191, 194,  
195, 218, 237, 239
- Игглс Д 272, 273
- Игнатовский В 160
- Идельсон Н И 109
- Идлис Г М 10, 295–297, 304
- Инфельд Л 39, 204, 228–232
- Иоффе А Ф 104, 265
- Ирвин Дж 25
- Йордан П 95, 163, 165, 168, 289, 297
- Кабиббо Н 142
- Кабиббо угол 142, 154
- Кавендиш Г 24, 25, 110, 111, 118–  
123, 125, 310
- кавендишева постоянная 125
- Каган В Ф 182
- Кадышевский В Г 236, 237
- Казютинский В В 304
- Калуцы–Клейна теория 292
- Кальдиурола 237
- Кангро Г 82, 88, 92
- Кант И 298
- Кантор Г 260
- Капица С П 218, 219
- Кард П Г 181
- Карно С 72
- Каролус А 80
- Картер Б 26, 280, 296–298, 304
- Каршенбойм С Г 139, 210, 221, 226
- Кассани П 37
- Кассини Дж Д 45, 46
- Кениг А 122, 123
- Кеплер И 43, 112, 116, 181, 260
- Керр Дж 80
- Кесуани Дж 31
- Киббл Т В 26
- Киносита Т 27
- Киржниц Д А 168, 232, 237, 238, 243
- Кирсанов В С 10, 109
- Кирхгоф Г 54, 82
- Кирхнер Ф 169
- Клапдор–Клайнгротхаус Г В 202,  
291, 292
- Клаузиус Р 53
- Клебша–Гордона коэффициенты 152
- Клейн М 31, 67
- Клейн О 240, 266
- Клеро А 48, 115
- Клитцинг К, фон 251–253
- Клиффорд У 297
- Клотфелтер Б Е 25, 110, 111, 113,  
118, 120
- Кобаяши–Маскава матрица 142, 154,  
156
- Кобзарев И Ю 31
- Ковалевская С 79
- Коган В И 10
- Коккель Б 230
- Кокс Л 102
- Кольман Э 265
- Кольрауш Р 53–55, 309
- Комптон А 93, 96, 167, 178, 262
- Комптона соотношение 255, 257
- Кон И 181
- Конфедератов И Я 42, 43
- Копал З 42, 43
- Коперник Н 69, 114, 297
- Корню М А 53, 57
- Кортель Ф 234
- Корухов В В 26
- Коулмен С 104, 246
- Коши О 79
- Коэн И Б 24, 30, 41, 110
- Коэн Э Р 23, 27, 119, 124, 162, 169,  
171
- Коэффслигети Р 84
- Краг Х 131, 261, 266, 291
- Крамаровский Я М 163, 291, 301
- Крат В А 271
- Краузер Дж 121
- Крауфорд Ф 141
- Кричевец А Н 174
- Кронекер Л 260
- Крониг Р 160
- Кроу К М 23, 119, 124, 162, 169, 171
- Крылов А Н 109, 111, 114
- Кудрявцев П С 42, 43, 54, 120
- Кузнецов А 172
- Кузнецов И В 181, 182
- Кузнецова Н И 10
- Кук А 27, 119, 220, 223
- Куликов К А 22, 162
- Кулон Ш 24



- Кулона закон 16, 17, 19, 20, 55, 105, 129, 132, 137, 139, 181, 213, 215, 219–221, 231, 232, 244, 262, 293  
 Кулона постоянная 19, 106, 131, 132, 146, 148, 215, 220, 221, 226, 257  
 Кулона сила 53, 213  
 Кун Т 25, 82, 124, 167, 181  
 Купер Л 119, 123  
 Купфер 116  
 Курльбаум Ф 86, 87  
 Кэри У 289  
 Лаваузые А Л 72  
 Лагранж Ж 115  
 Лагранжа функция 230  
 Лайтман А 26, 275, 304  
 Лакатос И 202  
 Лакур П 120  
 Ламберт Г 183  
 Лангенберг Д 22, 163  
 Ландау Л Д 26, 127, 140, 141, 160, 161, 166, 170, 184, 186–188, 190, 191, 194, 195, 214, 215, 218, 239, 240, 250, 265  
 Ландсберг Г С 42  
 Ланжевен П 95  
 Ланцош К 165  
 Лапина И В 10  
 Лаплас П С 34, 110, 116, 117  
 Лармор Дж 34, 61–65, 68, 71, 102  
 Лармора–Лоренца преобразования 64  
 Лауэ М 42, 52, 94, 160  
 Лафлин Р 105, 253  
 Лебедев А А 81  
 Леви-Леблон Ж -М 26, 181  
 Ледерман Л 141, 202  
 Леметр Ж 288  
 Ленц Ф 272  
 Леонтович М А 137  
 Ли Т 141  
 Линдеман Ф А 168  
 Липсон Г 42  
 Лифшиц Е М 160, 166  
 Лихарев К К 258  
 Лихтман Е П 153  
 Лобачевский Н И 80,  
 Лобачевского геометрия 58, 79, 80, 182, 183  
 Лодж О 60  
 Ломоносов М В 50  
 Лондон Ф 247–250, 257  
 Лондона эффект 258  
 Лоренц Г А 31, 34, 51, 58–68, 71–74, 76, 77, 87, 102, 103, 160, 169, 175, 177, 192, 193, 218, 309  
 Лоренца группа 65–67, 78, 79, 169, 181, 235  
 Лоренца преобразования 58–69, 133, 169  
 Лоренца сила 133  
 Лоренца теория электронов 203  
 Лоренца–Фиджеральда сокращение 60, 61, 76  
 Лоренца–Хевисайда система единиц 16, 17, 126, 129, 135–138, 148–150, 155, 218, 221, 246, 293  
 Лоренца–Эйнштейна преобразования 68  
 Лошмидта постоянная 101, 168  
 Луммер О 83, 86, 87, 92  
 Льоци М 37, 52, 80, 120, 124  
 Льюис Г Н 93, 160, 261  
 Льюэлли Смит С 25  
 Лэмба–Резерфорда эффект 265  
 Людовичи Б 214  
 Ляхов И 172  
 Магарилл Л И 252  
 Майер Ю Р 72  
 Майкельсон А 53, 57, 58, 60, 71, 80, 81, 123  
 Майкельсона и Майкельсона–Морли опыты 52, 58–60, 67, 71, 79  
 Майорана Э медаль 199  
 МакКормак Р 25, 110, 119  
 Максвелл Дж К 21, 22, 52, 54–58, 75, 96, 98–100, 126, 132, 133, 145, 172, 181, 202, 207, 208, 212–214, 223, 309  
 Максвелла уравнения 34, 61–63, 76, 77, 133, 134, 170, 177, 230,  
 Максвелла электродинамика 206  
 Максвелла–Герца уравнения 76  
 Максвелла–Лоренца электродинамика 73, 192, 193,  
 Максвелла системы единиц 55, 212–214, 311  
 Мандельштам Л И 42, 81

- Манфреди Е 48  
Марков М А 161, 162, 168, 173, 215,  
237, 240–242  
Мартин А 220  
Марутаев М А 273  
Марх А 233  
Маршак Р 23, 141, 267  
Маскелайн Н 119, 120  
Матинян С Г 105  
Мах Э 39, 48, 50, 284  
Маха принцип 288, 297  
Маха число 176, 221  
Мацумото И 252  
Меглих 237  
Медведев Б В 236  
Мейер К 41  
Меллен В 272  
Мельников В Н 163, 273, 288, 291  
Менделеева система элементов 93,  
104, 267  
Менденхолл К 83  
Меркьюри Дж 249  
Мермин Н Д 36  
Мехра Я 25, 82  
Ми Г 9, 20, 160, 184, 228  
Мизнер Ч 124  
Миллер А 31, 60, 64  
Милликен Р 102–104, 162  
Милн Э 126, 279, 286–288  
Милюков В К 110, 125  
Минковский Г 31, 34, 59, 68, 77, 78,  
309  
Миттельштадт О 80  
Миттер Г 234  
Михельсон В А 83, 85  
Мозли Г 104  
Мопертюи 48  
Морли Э, см Майкельсона–Морли  
опыты  
Моссоти–Цельнера гипотеза 282  
Моссотти О Ф 282  
Мостепаненко А М 299  
Мостепаненко В М 299  
Нагаока Х 93  
Наполеон 117  
Нарликар Дж 288  
Небауэр М 248, 250  
Нейман К 53  
Нернст В 168  
Нестеренко В Г 10  
Нидел А 31, 67  
Никольсон Дж 93, 95  
Нильсен Г 25, 26  
Нобелевские премии 73, 80, 92, 103–  
105, 144, 250, 251, 253  
Нортон Дж 126  
Ньюкомб С 22, 53, 57, 80, 162  
Ньютон И 33, 36, 39, 40, 47, 50, 70,  
71, 73, 106, 109–114, 119, 123–  
125, 173, 181, 202  
ньютоновская механика 180, 192,  
193, 195  
Ньютона–Кавендиша постоянная 125  
ньютоновская постоянная 125, 132,  
146  
Овчинников Н Ф 10, 82, 181, 182  
Огурцов А П 10  
Ожегов С И 161  
Окунь Л Б 10, 26, 88, 105, 124, 128,  
144, 160, 163, 184, 196–199, 215,  
220  
Ольшки Л 80  
Ома система единиц 101  
Онсагер Л 247, 248, 250  
Орел В М 10  
Осборн М 127, 240  
Оттинг Г 48, 49  
Пайс А 31, 59, 60, 73, 77, 126  
Папалекси Н Д 81  
Паркер В 22, 162  
Паркер С 163  
Паули В 26, 31, 126, 127, 140, 160,  
163–165, 170, 184, 191–194, 200,  
202, 234, 260, 263, 266, 283  
Пашен Ф 83, 85, 92  
Пейджел Б 25  
Пензиас А 242  
Пеппер М 252, 253  
Перрен Ж 93  
Перротен 53  
Петли Б В 22, 25, 163  
Петров Ю В 291  
Печенкин А А 82  
Пикар Ж 45  
Пикеринг Э 95  
Пилипчук Б И 207, 219

- Пиппард А 102  
 Пиппард Б 251  
 Пифагор 260  
 Планк М 26, 82, 83, 85–90, 92, 93, 100, 102, 103, 126, 158–160, 163–170, 172, 180, 184–187, 189, 191, 194, 202, 215–217, 222, 223, 234, 240, 241, 255, 312  
 Планка закон излучения 88–91  
 Планка ин-т им 252  
 Планка масштабы 312  
 Планка медаль 198  
 Планка постоянные 8, 9, 12, 15, 17, 19, 25, 30, 57, 81–96, 103, 144, 162, 164, 170, 173, 174, 176, 178, 180, 191, 195, 203, 208, 220, 221, 226, 227, 246, 253, 258, 261, 309, 310  
 Планка–Больцмана постоянная 88, см Больцмана постоянная  
 Планка система единиц 209, 222, 223, 271, 311  
 планковские величины 126, 215–218  
 Плюффе С 273  
 Поггендорф И К 120  
 Погребысская Е И 50  
 Пойнтинг Дж 9, 24, 110, 119, 121, 125  
 Политцер Д 144  
 Понтекорво Б 268  
 Попов П А 69  
 Пресс В 26, 275, 304  
 Пригожин И 160, 172, 241  
 Прингсгейм Э 83, 86, 87, 92  
 Прозен Э 272  
 Пти А Т 83  
 Птолемей К 114  
 Пуанкаре А 33–36, 59–62, 64–68, 71–74, 76, 77, 79, 168, 175, 182, 184, 309  
 Пуассон С Д 118, 213, 310  
 Пушкин А С 273  
 Раджабов У А 166  
 Раджу Ч 154  
 Райдер Л 220  
 Раман Ч 229  
 Рамзауэр К 165  
 Редже Т 240  
 Резерфорд Э 93, 104, 142  
 Ремер О 24, 25, 30, 36, 37, 39–50, 309  
 Рен К 112  
 Рентген В 169  
 Рехенберг Г 25, 82, 102  
 Ридберг И Р 94, 260  
 Ридберга постоянная 94 95 115, 140, 145, 162 163, 272  
 Ризенберг Р 25, 289  
 Риман Б 54, 182  
 Рис М Дж 25, 280  
 Ритц 94, 260  
 Рихарц Ф 103, 122, 123  
 Рише Ж 45  
 Робертсон Б 272  
 Роботти Н 102  
 Рогинский С З 250  
 Роза Э Б 57  
 Розен Дж 272  
 Розен Н 181  
 Розенбергер Ф 42, 43, 120, 282  
 Розенталь И Л 26, 144, 280, 291, 300, 301, 303, 304, 306  
 Ромпе 237  
 Роски Р 272  
 Рослин 266  
 Россини Ф Д 22  
 Роуз-Болл М 110  
 Роуэлл Дж 251  
 Руарк А 219, 223  
 Руарка системы единиц 219, 220, 223, 311  
 Рубенс Г 87  
 Рунге 263  
 Руффини Р 280  
 Рэлей (Стретт) Дж У 86, 87  
 Рэлея закон излучения 86, 87, 92  
 Рэлея–Джинса закон излучения 86, 87, 92, 233  
 Савар Ф 145  
 Савин И А 10  
 Сагитов М У 9, 25, 110, 111, 114 125  
 Сагрето (персонаж) 32, 40, 70  
 Сакураи Дж 141, 142  
 Салам А 141, 149, 201, 237  
 Салекер Г 240  
 Сальвиати (персонаж) 32, 38 69, 70

- Сандерс Дж 22, 169  
Саньяка эффект 70  
Сарпи П 36, 37  
Сартон Дж 47, 48  
Саундерс Ф 83  
Сахаров А Д 128, 236–238, 242, 243, 303  
Свистунов В М 251  
Сергеев Д И 10  
Сиам Д 124  
Сивучин Д В 137 160  
Симпличио (персонаж) 32  
Сирл Дж 57  
Ситтер де 282, 284, 285  
Ситтера уравнение 242  
Смит К Ф 25  
Смородинский Я А 161, 163, 181, 207  
Снайдер Г 168, 232, 235–237  
Снеллиус В 40  
Сонин А С 10  
Спасский Б И 42, 93, 101, 120  
Спиридонов О П 23, 26, 114, 119, 163  
Станюкович К П 273, 288  
Steinhardt Ч 292  
Стенгерс И 160, 172, 241  
Стефан Й 83, 84  
Стефана–Больцмана закон 83–87, 91, 215,  
Стефана–Больцмана постоянная 82, 85, 88, 89  
Стилуэлл Д 48, 49  
Стокс Г 51, 52, 60  
Столотов А Г 57  
Стонер Э 280  
Стони (Стойей) Дж 93, 100–102, 126, 172, 188, 214, 215, 223, 256, 283  
Стони масштабы 204, 223, 240, 241  
Стони система единиц 214, 215, 223, 311  
Стэйчел Дж 126  
Субботин М Ф 115  
Сударшан Э 141, 267  
Суханов А Д 10 88, 96, 134  
Тамм И Е 168, 189 200, 232, 236, 265–266  
Татон Р 41  
Таулесс Д Дж. 253  
Тауринус Ф -А 183  
Тейлор Б 22, 27, 162  
Теллер Э 294  
Тизен М 86, 92, 163  
Типлер Ф 26, 293, 296, 304, 305  
Тодд 80, 81  
Тодлантер И 110  
Толкачев Е А 245  
Томилина Н К 10  
Томильчик Л М 245  
Томпкинс (персонаж Гамова) 188  
Томсон В (Кельвин) 56, 57 93  
Томсон Дж Дж 57, 93, 102, 103  
Тонелла М -А 31, 124  
Торн К 124  
Трусделл К 110  
Тяпкин А А 31  
Уайлер А 272  
Уайтсайд Д Т 110  
Уемура И 252  
Узан Ж -Ф 291  
Уилер Дж 124, 200, 240, 280, 303, 304  
Уитмер Э 266, 267  
Уитроу Дж 299  
Уиттекер Э 31, 51, 53, 54, 262  
Умов Н А 160  
Усов А Л 10  
Уэвелль В 120  
Фаддеев Л Д. 26, 128, 184, 199  
Фарадей М 54, 97, 98, 101, 166  
Фарадея закон 17, 97, 101, 102, 213 214  
Фарадея постоянная 97, 124, 132, 172  
Фаулер А 95  
Фаустов Р Н 27, 175, 210  
Фейерабенд П 181  
Фейнман Р 141, 162, 170, 273–275, 281  
Ферма П 36, 40 174  
Ферми Э 19, 140–142  
Ферми постоянная 9, 106, 140–142, 146 147, 194, 210, 222  
Физо И 48, 49, 51–56, 80, 178  
Филонович С Р 24, 25 30, 41, 43, 52, 110, 118, 119 161  
Филонне Ж 81

- Фицджеральд Дж 60, 66, 68,  
 см. Лоренца-Фицджеральда сок-  
 ращение  
 Фландерн Ван Т 289  
 Флеминг Дж А. 219  
 Флемстид Дж 46, 48  
 Флэмбаум В 292  
 Фогт (Фойгт) В 34, 58–60, 62, 68,  
 160  
 Фок В.А. 77, 124, 219, 265  
 Фонтенель Б 294  
 Фостер Г. 21  
 Франкфурт У.И. 30, 31, 126  
 Фредерикс В.К. 31, 189  
 Фрелих Й 198  
 Френель О. 50–52, 60, 67, 72  
 Френкель В.Я. 26, 127, 163, 186, 188,  
 189, 199, 239  
 Френкель Я И. 160, 165, 166, 178  
 Фриден Р. 271  
 Фридман А А. 242, 288  
 фридмоны 241  
 Фридман В.Г 71  
 Фролов В П. 241  
 Фрум К 23, 30, 42, 48, 81  
 Фуджи Я 291  
 Фуко Л. 52, 53, 55, 56, 70, 80,  
 Фэрбенк У.М 248, 250  
 Фюрт Р 237, 267–269  
 Хаббл Э 288  
 Хаббла постоянная 12, 277–280, 286  
 Хакинг Я 21  
 Халатников И М. 188, 214, 215, 240  
 Хансен Г.М 94  
 Харитон Ю Б. 291  
 Хартри Д 18, 175, 210, 219, 221, 223  
 Хартри система единиц 176, 219, 222,  
 223, 271, 311  
 Хаттон Ч. 120  
 Хвольсон О.Д 161, 165  
 Хевисайд О 61,  
 см. Лоренца-Хевисайда система  
 единиц  
 Хелзен Ф 220  
 Херивел Дж. 110  
 Херманн А 82  
 Хиггс П 199  
 Химстедт 57  
 Хокинг С 26, 124, 204, 240, 241  
 Холл А Р 110  
 Холла квантовый эффект 209, 244,  
 250–253, 256, 258, 312  
 Холтон Д 31, 67  
 Хоппе Э. 120  
 Хоутон 55  
 Храмов Ю А. 42, 267  
 Хунд Ф. 82, 176  
 Хюттель А 80  
 Цвейг Дж 104, 143  
 Цельнер И. 282  
 Цилзел 237  
 Цуи Д 105, 253  
 Чарчилл К. 292  
 Черепашук А.М. 292  
 Чернин А Д. 292  
 Чечев В.П 163, 291, 301  
 Чиркович М. 294  
 Чичерин Б Н. 93  
 Шамбр де ля 40  
 Шапиро И. 289  
 Шапиро С. 251  
 Швейкарт Ф.К. 183  
 Швингер Ю. 246  
 Шелест В.П 27  
 Шепф Х.-Г 25, 82, 163  
 Шерк Дж. 127  
 Шик А Я. 252  
 Шиллер Н И 57  
 Широков К П. 207  
 Шифф 237  
 Шлегель Д. 292  
 Шлидер С. 234  
 Шляхтер А.И. 290, 291  
 Шмарцев Ю.В 252  
 Шредингер Э. 160, 168, 169, 187, 229  
 Шредингера уравнение 169, 174, 210,  
 219, 261  
 Штарк И. 48, 95, 160, 255  
 Штаудт А. 291, 292  
 Штёрмер Х 105, 253  
 Штилле У 160, 163, 169, 171, 220,  
 223  
 Штилле система единиц 220–221, 311  
 Штраус М. 26, 184, 200, 201, 204  
 Эванс Э 95  
 Эверетт Дж 21, 22

- Эддингтон А. 127, 146, 162–164, 184, 187, 205, 239, 259, 261–267, 279, 285, 287, 294, 299
- Эдмонсон Ф.К. 286
- Эйкен А. 168
- Эйлер Г. 230
- Эйлер Л. 50, 114–116
- Эйнштейн А. 30, 31, 35, 36, 39, 48, 49, 59, 61, 66–77, 79, 82, 87, 92–96, 103, 123, 124, 126, 132, 146, 159, 160, 165, 169, 173–175, 178, 184, 187, 190, 202, 205, 239, 255, 263, 282, 283, 285, 286, 288, 309, 310
- Эйнштейна уравнение 169, 242;
- эйнштейновская постоянная 124, 126, 174, 191, 284
- Эллис Дж. 26
- Энглерт Т. 252
- Энтин М.В. 252
- Эренгафт Ф. 103, 104
- Эренфест П. 95, 160, 163, 164, 299
- Эссен Л. 23, 30, 42, 48, 81
- Этвеша опыт 16
- Юкава Х. 143
- Юнг Т. 50, 51
- Юнгникель К. 25, 110, 119
- Юшкевич А.П. 11
- Ямадзаки К. 234
- Янг Ч. 102, 141, 250
- Янке Э. 86, 92
- Янсон И.К. 251
- Albrecht A. 292
- Amaldi U. 153
- Bates H.E. 81
- Bay Z. 81
- Beams J.W. 119
- Benford F. 163
- Bethke S. 144, 145, 149, 156, 165
- Brandt H.E. 243
- Caianiello E.R. 243
- Carson B.J. 292
- Cousins Chr. 102
- Delaney W. 272
- Danby J.M.A. 119
- Das S. 292
- Davies T.M. 292
- Dzuba V.A. 292
- Falconer I. 102
- Faller J.E. 119
- Friesen S. 169
- Fritsch H. 151
- Gerwar L. 102
- Good I.J. 272
- Hellings R.W. 289
- Ignatiev A.Yu. 292
- Hinchliffe I. 143
- Kibble B.P. 226
- Kopal Z. 42
- Kunstatte G. 292
- Kuroda P.K. 291
- Landi G. 243
- Langacker P. 145, 155
- Lineweaver C.H. 292
- Luo J. 107
- Luther G.G. 81
- Magueijo J. 292
- Massa C. 243
- Mills I.M. 226
- Minkowski P. 151
- Moffat J.W. 292
- Murphy M.T. 292
- Nordtvedt K.L. 119
- Pati J.C. 151
- Pivovarov A.A. 134
- Quinn H.R. 152
- Quinn T.J. 107, 307
- Richman S.J. 107, 307
- Robinson I.A. 226
- Salam A. 151
- Sandvik H.B. 292
- Schopper H. 145
- Squires G. 102
- Swarz J.P. 107, 307
- Weisstein E.W. 273
- White J.A. 81

**ПРИЛОЖЕНИЕ**  
**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ <sup>1)</sup>**

**АБСОЛЮТНЫЕ МЕРЫ**

Скорость света в вакууме $c$	$2,997\,924\,58 \times 10^{10}$ см/с (СГС), $\times 10^8$ м/с (СИ) (точно)
Постоянная Планка $h$	$6,626\,069\,3(11) \times 10^{-27}$ эрг·с (СГС), $\times 10^{-34}$ Дж·с (СИ)
$\hbar = h/2\pi$	$1,054\,571\,68(18) \times 10^{-27}$ эрг·с (СГС), $\times 10^{-34}$ Дж·с (СИ)
Элементарный заряд $e$	$1,602\,176\,53(14) \times 10^{-19}$ Кл (СИ) $4,803\,204\,40(42) \times 10^{-10}$ г <sup>1/2</sup> см <sup>3/2</sup> с <sup>-1</sup> (esu — электростат ед.)
Квант магнитного потока $\Phi_o = hc/2e$ (СГС), $\Phi_o = h/2e$ (СИ)	$2,067\,833\,72(18) \times 10^{-15}$ Вб (СИ) $\times 10^{-7}$ гаусс·см <sup>2</sup> (esu)
Постоянная Дзозефсона $K_J = 2e/h$	$483597,879(41) \times 10^9$ Гц/В (СИ)
Квант проводимости $\sigma_o = 2e^2/h$	$7,748\,091\,733(26) \times 10^{-5}$ См (СИ)
Постоянная Клитцинга $R_K = h/e^2$	$25812,807449(86)$ Ом (СИ)
Холловское сопротивление $R_H = h/2e^2$	$12\,906,403\,725(43)$ Ом (СИ)
Постоянная Больцмана $k$	$1,380\,6505(24) \times 10^{-23}$ Дж/К (СИ), $\times 10^{-16}$ (эрг/К) (СГС)

<sup>1)</sup> Численные значения соответствуют NIST, 2005.

**КОНСТАНТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ**

Гравитационная постоянная	$G = 6,6742(10) \times 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$ (СГС), $\times 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ (СИ) $G = 1,327\ 124\ 40018(8) \times 10^{20} \text{ м}^3/(\text{Мс} \cdot \text{с}^2)$ (астроном.) $G = 3\ 986\ 004\ 418(8) \times 10^5 \text{ м}^3/(\text{Мз} \cdot \text{с}^2)$ (астроном.)
Постоянная тонкой структуры	$\alpha = 7,297352568(24) \times 10^{-3}$ $\alpha^{-1} = 137,035\ 999\ 11(46)$
Постоянная Кулона (размерная константа электромагнитного взаимодействия)	$k_e = \alpha \hbar c / e^2$ (в любых системах единиц) В практических системах постоянная $k_e$ выбирается равной точно $k_e = 1$ (СГС), $k_e = 1/4\pi$ (Лоренц-Хевисайд), в СИ $k_e = 1/4\pi\epsilon_0 =$ $= 8987551787,3681764 \text{ (Нм}^2/\text{А}^2\text{с}^2)$ (также точно с 1983 г.), при этом роль размерной константы электромагнитного взаимодействия переходит к $e^2 \sim \alpha \hbar c$
Постоянная Ферми	$G_F = 1,16639(1) \times 10^{-5} (\hbar^3 \text{с}^3) / \text{ГэВ}^2$
Постоянная сильного взаимодействия	$\alpha_s(M_z) = 0,1182(27)$

**ОСНОВНЫЕ МАСШТАБЫ МАСС (ЭНЕРГИЙ)**

Планковская масса, $m_{пл}$	$1,2209(1) \times 10^{19} \text{ ГэВ}/c^2$
Вакуумное среднее $\eta$	$246,218(1) \text{ ГэВ}$
Масса протона, $m_p$	$1,672\ 621\ 71(29) \times 10^{-27} \text{ кг}$ (СИ), $\times 10^{-24} \text{ г}$ (СГС) $938,272\ 029(80) \text{ МэВ}$
Конфайнмент, $\Lambda^{(5)}$	$0,22(1) \text{ ГэВ}$
Масса электрона, $m_e$	$9,109\ 382\ 6(16) \times 10^{-31} \text{ кг}$ (СИ), $\times 10^{-28} \text{ г}$ (СГС) $0,510\ 998\ 918(44) \text{ МэВ}$
Хартри (энергия)	$27,211\ 3845(23) \text{ эВ}$



### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ И СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НИМИ

Классический радиус электрона, $r_e$ $r_e = \frac{k_e e^2}{m_e c^2} = \alpha \frac{\hbar}{m_e c} = \alpha \lambda_e \approx \frac{\lambda_e}{137}$	$2,817940325(28) \times 10^{-15}$ м
Комптоновская длина волны электрона, $\lambda_e$ $\lambda_e = \frac{\hbar}{m_e c} = \alpha^{-1} r_e = \alpha a_o \approx \frac{a_o}{137}$	$386,1592678(26) \times 10^{-15}$ м
Радиус Бора, $a_o$ $a_o = \frac{\hbar^2}{m_e k_e e^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\hbar}{m_e c} = \alpha^{-1} \lambda_e \approx 137 \lambda_e$	$0,5291772108(18) \times 10^{-10}$ м
Постоянная Ридберга, $R_\infty$ $R_\infty = \alpha^2 \frac{m_e c}{2h} = \frac{\alpha}{4\pi \lambda_e} \approx \frac{1}{4\pi \cdot 137} \cdot \frac{1}{\lambda_e}$	$10973731,568525(73)$ м <sup>-1</sup>
Постоянная излучения $c_1$ $c_1 = 2\pi \hbar c^2$	$3,74177138(64) \times 10^{-16}$ Вт · м <sup>2</sup>
Вторая постоянная излучения $c_2$ $c_2 = \frac{\hbar c}{k}$	$1,4387752(25) \times 10^{-2}$ м · К
Постоянная Вина, $b$ $b = \lambda_{\max} T = \frac{c_2}{4,965114231\dots}$	$2,8977685(51) \times 10^{-3}$ м · К
Постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma$ $\sigma = \frac{\pi^2}{60} \cdot \frac{k^4}{\hbar^3 c^2}$	$5,670400(40) \times 10^{-8}$ Вт/м <sup>2</sup> · К <sup>4</sup>
Постоянная Авогадро, $N_A$	$6,0221415(10) \times 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Постоянная Фарадея, $F$ $F = e N_A$	$96485,3383(83)$ Кл · моль <sup>-1</sup>
Газовая постоянная, $R$ $R = k N_A$	$8,314472(15)$ Дж · моль <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>

12. If we also introduce the numerical value found above for  $C_1$ , which depends on  $E_1$  and is less accurately known, we obtain the following actual values for these units of Nature:—

$$L_1 = \frac{1}{XXXVII} \text{ of a metre; } \dots (13)$$

$$T_1 = \frac{1}{3} \frac{1}{XLV} \text{ of a second; } \dots (14)$$

$$M_1 = \frac{1}{VII} \text{ of a gramme. } \dots (15)$$

Or, in other words—

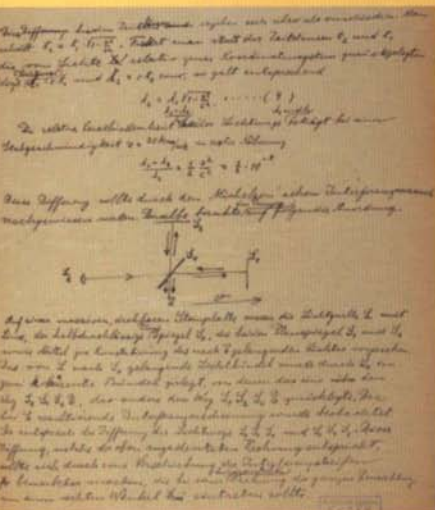
The natural unit of length approaches in value to the thirty-seventh metre (i. e. the metre divided by  $10^{27}$ ).

The natural unit of time approaches in value to one third of the forty-fifth second (i. e. one third of the second of time divided by  $10^{45}$ ); and

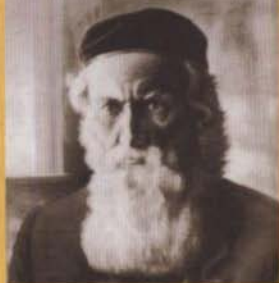
The natural unit of mass approaches to the seventh gramme (i. e. the gramme divided by  $10^7$ ).

Поиски законов, относящихся к абсолютному, представляются мне самой прекрасной задачей в жизни ученого.

Макс Планк.

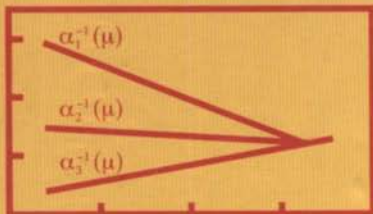


e



G

C

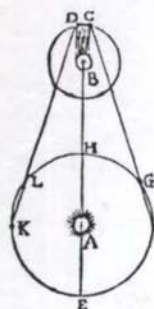


GF

$\alpha_s$

$$\alpha \approx \frac{1}{137}$$

234 ne seconde de temps.



Soit le pro dans l' fortir la Ter stance Or en L ture d mier mercic en D ron 4

prés, savoir après u tellite, la terre se trou

G

k

h

