

## Роджер Пенроуз и черные дыры

**Аннотация:** В статье обсуждается, предложенный Роджером Пенроузом, революционный метод «схлопывания» коллапсирующих тел, различной формы, и роль сингулярности -некоторой особой поверхности внутри черной дыры, обладающей бесконечной кривизной пространства-времени, вблизи которых разрушаются практически любые физические тела .

В статье указано, что в свете последних открытий галактической темной материи и межгалактической темной энергии, образующих 95% масс-энергии Вселенной, выводы Роджера Пенроуза выглядят не так однозначно. После открытия темной материи, дальнейшее развитие теории зарождения и эволюции черных дыр, лежит на пути отказа от геометрической теории гравитации ОТО Эйнштейна и признания пятого фундаментального взаимодействия между темной и барионной материей в качестве структурообразующего фактора внутри черных дыр.

**Ключевые слова:** темная материя; гало; коллапс; черная дыра

**PACS:** 01.10.Fv, 04.50.-h, 12.10.Kt, 95.36.+x, 98.80.-k

### 1. Вступление

В формулировке Нобелевского комитета написано, что премия присуждается Пенроузу за «открытие того, что формирование черных дыр является надежным предсказанием общей теории относительности». Эта формулировка отражает тот факт, что и до работ Пенроуза было известно, что достаточно плотный объект (например, газовое облако, звезда или скопление звезд) может сжаться (говорят, сколлапсировать) в черную дыру. Однако, предыдущие расчеты были основаны на многих предположениях, наиболее важными из которых были сферическая форма рассматриваемых объектов и различные упрощающие предположения о свойствах коллапсирующей материи. Пенроузу удалось предложить новый революционный метод, который позволяет установить возможность коллапса без каких-либо особых предположений о природе и геометрии «схлопывающегося» тела при выполнении нескольких простых условий. Основы этого метода были сформулированы в классической работе Пенроуза 1965 года: «Гравитационный коллапс и пространственно-временные сингулярности» опубликованной в *Phys. Rev. Lett.* 14, 57. [1]. В статье он показал, что если выполняются условия, которые ожидаются внутри черной дыры (а именно: фронт излучения, испущенный наружу некоторой замкнутой поверхностью, начинает сжиматься), а также выполнены некоторые другие, вполне ожидаемые требования, внутри черной дыры некоторые световые лучи не могут быть продолжены и должны оборваться, проделав конечный путь. В таких случаях говорят, что световой луч упирается в сингулярность — некоторую особую поверхность, служащую границей пространства-времени. В настоящее время мы уверены, что физически сингулярности совпадают с поверхностями, обладающими формально бесконечной кривизной пространства-времени, вблизи которых разрушаются практически любые физические тела, хотя теорема Пенроуза никак не определяет их физический смысл, а просто гарантирует их присутствие внутри черных дыр. Эта работа давно вошла в учебники по общей теории относительности (ОТО), она послужила началом ее совершенно нового и нетривиального развития, в котором приняли участие Пенроуз, Стивен Хокинг и другие известные ученые. Возникшая в результате ее новая область исследований иногда называется «глобальной лоренцевской геометрией». Обсудим некоторые важные предположения и основную идею доказательства теоремы Пенроуза. Во-первых, предполагалось, что пространство-время является «предсказуемым» в следующем смысле: где-то в прошлом, в какой-то момент времени можно задать некоторые начальные параметры, которые полностью определяют последующую эволюцию как материи, так и самого пространства-времени. В январе 1965 года, спустя всего 10 лет после смерти Эйнштейна, Пенроуз обнаружил, что черные дыры могут образовываться и образуются, подробно описав их в статье, которая даже сегодня является важнейшим вкладом в науку. Пенроуз выяснил, что в основе черных дыр лежит бесконечно плотное ядро, называемое

сингулярностью, где действуют неведомые нам законы. Роджер Пенроуз с помощью изящных математических моделей показал, что само существование черных дыр является прямым следствием теории относительности Альберта Эйнштейна. Фактически, Эйнштейн не верил, что такие тяжеловесы - объекты, пожирающие все, даже свет, попадающий в их пределы, - вообще существуют.

Даже в таком случае, его общая теория относительности предсказывает, что гравитация является результатом искривления пространства-времени. Согласно этой теории, массивные объекты (например, черные дыры) оставляют космические вмятины в этой пространственно-временной ткани, так что другие близлежащие объекты не могут не упасть в эти гравитационные ямы. Одно из предсказаний общей теории относительности состоит в том, что у черных дыр есть горизонт событий, граница, за которой ничто, даже свет, не может уйти.

В свете последних открытий галактической темной материи и межгалактической темной энергии, образующих 95% масс-энергии Вселенной [2] выводы Роджера Пенроуза выглядят не так однозначно:

Во-первых вращающееся массивное ядро черной дыры, как было экспериментально доказано 30 января 2020 астрофизиком Вивек Венкатраман Кришнан, может увлекать ореол темной материи, окружающий не только вращающийся белый карлик, но и иной объект Вселенной [3]. При этом образуется гравитационная воронка, подобная гравитационной воронки Эйнштейна, которая у него образуется, за отсутствием темной материи, еще не открытой в его время, тканью пространства- времени. Это предположение выглядит гораздо правдоподобней, чем вращение пространства времени. Ведь гало темной материи, это реальный объект, а ткань пространства-времени это эфирный материал, в который был одет король, в сказке Андерсена «Голый король». Отсюда следует, что геометрическая природа гравитации Альберта Эйнштейна должна быть заменена на полевую. Сегодня исследователей природы гравитационных сил можно условно разделить на две группы - тех, кто продолжает поиски в русле геометрического подхода, лежащего в основе общей теории относительности и тех, кто отказывается связывать гравитационное поле с геометрией пространства-времени и развивает полевую концепцию гравитации. Полевая концепция гравитации позволяет описывать гравитационные взаимодействия тел аналогично электрическому и магнитному взаимодействию и не противоречит другим экспериментально обоснованным подходам к описанию явления гравитации и инерции, в частности, некоторым моделям с участием квантового вакуума (темной материи), как сверхтекучая космическая среда. Кстати, за открытие вращающегося ядра сверхчерной дыры в центре нашей галактики, лауреатами Нобелевской премии 2020 стали, вместе с Роджером Пенроузом, два других физика- немец Рейнхард Генцель и американка Андреа Гез.

Во-вторых наличие внутри черной дыры сингулярности — некоторой особой поверхности, служащей границей пространства-времени теорема Пенроуза никак не определяет их физический смысл, а просто гарантирует их присутствие внутри черных дыр. Общая теория гравитации, а следом за ней и теория Роджера Пенроуза не способна описывать поведение системы и в частности черной дыры в динамике, поскольку образование новых частиц и объектов в процессе развития черной дыры приводит к нарушению симметрии во времени. Прав был Дж. Уиллер, когда писал по этому поводу: «Объект, который является центральным для всей классической общей теории относительности, «четырёхмерной геометрии пространства-времени» просто не существует, если мы выйдем за рамки классического приближения. Этот аргумент показывает, что концепции пространства-времени и времени не являются основными в структуре физической теории Эйнштейна. Нет ни пространства-времени, ни времени; нет ничего до и после. Вопрос в том, что произойдет в следующий момент, спрашивать в ОТО бессмысленно» [4]. Для того, чтобы ОТО Эйнштейна обладала нарушением симметрии во времени, поскольку рождение частиц соответствует необратимому процессу, Лауреат Нобелевской премии Илья Пригожин предложил дополнить число переменных входящих в стандартную модель. Давление  $P$ , плотность массы-энергии  $\sigma$  и радиус Вселенной  $R(t)$  он предложил дополнить переменной  $n$  - плотностью частиц и дополнительным уравнением, которое связало бы функцию Хаббла с радиусом Вселенной  $R(t)$  и рождением частиц  $n$ . В этом случае появляется член, который мы,

сравнивая с ньютоновской физикой, идентифицируем с давлением. К обычному давлению  $P$  мы прибавляем дополнительное давление  $P_{add.}$ , обусловленное рождением частиц [5]. Таким образом, пространство-время в черной дыре в теории Пенроуза является «предсказуемым», то есть в какой-то момент времени можно задать некоторые начальные параметры, которые полностью определяют последующую эволюцию как черной дыры, так и самого пространства-времени. Этому состоянию системы соответствует понятие временного горизонта в течении которого мы можем предсказать поведение системы, ее траекторию развития, а далее начальное состояние системы уже не может служить основанием для предсказания. Переход системы на качественно новый уровень, в процессе которого система становится неинтегрируемой, в ней преобладают необратимые процессы, а время теряет свойство инвариантности и его поведение носит вероятностный, векторный характер требует отказаться от инвариантных уравнений ОТО и теории Роджера Пенроуза [6].

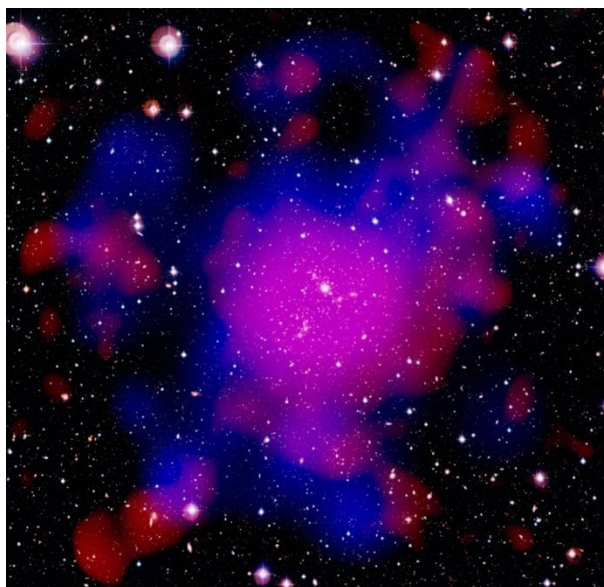
В-третьих через 55 лет после появления статьи Роджера Пенроуза «Гравитационный коллапс и пространственно-временные сингулярности» на страницах того же журнала *Phys. RevLett.*125.181301 была опубликована статья профессора Фрэнка Зауэрсига и трех его коллег «Конечные Амплитуды Квантовой Гравитации: Никаких Привязок» с отказом от теории струн и ОТО Эйнштейна, лежащей в основе М-теории струн и других вариантов этой теории [7]. Авторы предлагают при описании черных дыр использовать гравитационно-опосредованное рассеяние скалярных полей, основанное на параметризации лоренцева квантового эффективного действия. При этом авторы заявляют: "Наша конструкция позволяет избежать введения нелокальностей или массивных частиц с более высоким спином, характерных для теории струн." [7].

## 2. Гало темной материи

Гетерогенная среда квантового вакуума - темная материя, является неоднородной поляризационной средой, которая из-за гравитационных свойств образует вакуумные домены и темное гало галактик. Темная материя в астрономии и космологии, а также в теоретической физике является гипотетической формой материи, которая не излучает электромагнитное излучение и не взаимодействует с ним напрямую [8]. Это свойство усложняет и, возможно, даже делает невозможным непосредственное наблюдение темной материи. Вывод о существовании темной материи сделан на основании многочисленных; соответствуют друг другу, но косвенные признаки поведения астрофизических объектов и гравитационных эффектов, которые они создают. Выяснение природы темной материи поможет решить проблему скрытой массы, которая, в частности, состоит из аномально высокой скорости вращения внешних областей галактик. По результатам астрономических наблюдений космического телескопа «Планк»:

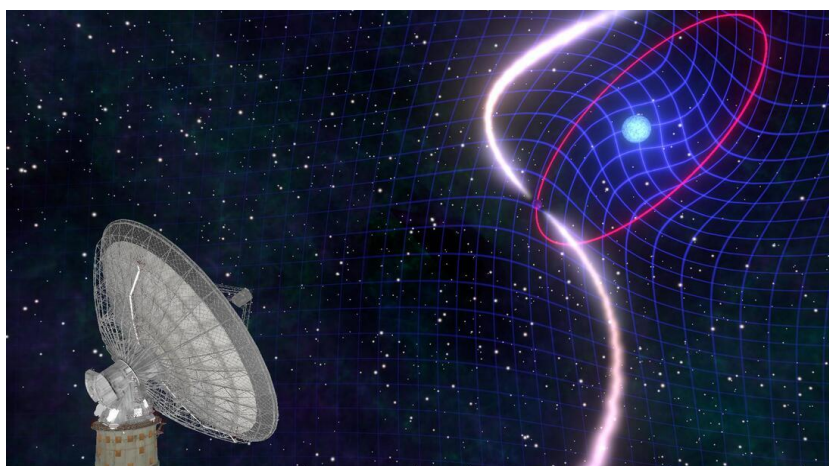
- Темная энергия (68,3%);
- Темная материя (26,8%);
- «Обычная» (барионная) материя (4,9%) [2].

Темная материя образует гало вокруг галактик и заполняет пятую часть галактического пространства. Из приблизительно 5% барионного вещества, 4/5 массы приходится на межзвездную среду и только 0,5% средней плотности Вселенной сосредоточено в звездах [2]. Установлено, что гало темной материи образует сферы вокруг галактик, звезд, планет и черных дыр, которые вращаются вместе с ними (рис.1) [8].



*Рисунок 1. Компоненты скопления галактик Abell 2744. Белый цвет - галактики, красный цвет - горячий газ и синий цвет - темная материя.*

В статье я предлагаю новую интерпретацию недавних астрофизических открытий в рамках новой космологической модели. Так последнее открытие доктора Вивека Венкатрамана Кришнана, астрофизика из Института радиоастрономии Макса Планка в Бонне, (Германия), вращения пространства-времени вокруг белого карлика в двойной звездной системе PSR J1141-6545 (рис 2) можно интерпретировать, как вращение гало темной материи [9].



*Рисунок 2. Иллюстрация перетаскивания кадра Лизер-Турринга в результате вращения белого карлика с двойной звездной в системе PSR J1141-6545.*

Ученые Гарвардского и Смитсоновского центра астрофизики в США провели детальное моделирование загадочной темной материи, чтобы раскрыть ее предположительные свойства. О неожиданных результатах сообщает издание Universe Today. Исследователи предположили, что темная материя состоит из слабо взаимодействующих массивных частиц (WIMP) с массой, которая примерно в сто раз больше, чем у протона. В модели такая темная материя сформировала ореолы вокруг галактик. Однако оказалось, что ореолы могут иметь совершенно различные массы: от массы планеты до масс галактических скоплений. Они имеют характерную структуру, становясь более плотными от краев к центру. В начале 2020 года ученым удалось зарегистрировать малые сгустки темной материи – всего в 1/10 000 и даже 1/100 000 от массы Млечного пути. И для темной материи это действительно очень мелкие значения. Обнаружение стало возможным благодаря гравитационному линзированию света. В случае наличия в галактике, лежащей на переднем плане, или на линии наблюдения даже небольших сгустков темной материи наблюдаемая картина искажается. На основе этих искажений и можно сделать вывод о размере сгустков. Как известно, массивные объекты могут преломлять лучи света. Не сильно, но на

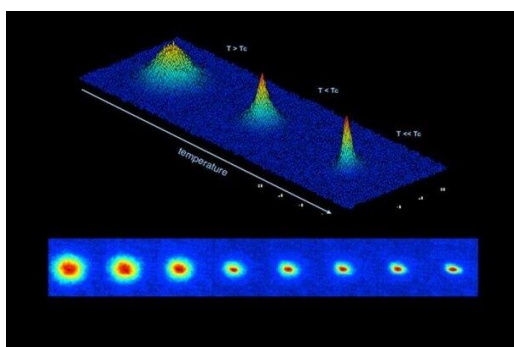
больших расстояниях в миллионы световых лет отклонения будут заметны. Такая характеристика и порождает эффект гравитационного линзирования, благодаря которому мы можем видеть свет от далеких звезд, которые находятся позади галактик или других массивных объектов (Рис. 3)



*Рисунок 3. Эффект гравитационного линзирования*

Наблюдение Хаббла дает новое понимание природы темной материи и ее поведения. «Мы сделали очень убедительный наблюдательный тест для модели холодной темной материи, и она прошла с летающими цветами», - сказал Томмазо Треу из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе (UCLA), член группы наблюдателей [10]. Ученые Гарвардского и Смитсоновского центра астрофизики в США провели детальное моделирование загадочной темной материи, чтобы раскрыть ее предположительные свойства. О неожиданных результатах сообщает издание Universe Today. Согласно одному из предположений, когда частицы темной материи сталкиваются, они испускают гамма-излучение. Большая часть гамма-излучения, создаваемого темной материей, будет исходить от гало малого размера. Поскольку масштаб ореола может влиять на энергетический спектр гамма-лучей, эта модель позволяет делать конкретные прогнозы об избытке гамма-лучей, который наблюдается в центре Млечного Пути. Квантовый вакуум, как космологическая среда в новой модели, по аналогии с сверхтекучим  ${}^3\text{He-V}$ , имеет две фазы: темную энергию и темную материю. Фазовое состояние квантового вакуума, характеризующего темную энергию, обладающую антигравитационными свойствами, обеспечивающими ускоренно расширяющейся пространства межгалактической Вселенной, рассматривается в сверхтекучей космологической модели квантового вакуума как аналог сверхпроводящей  $\alpha$ -фазы  ${}^3\text{He-V}$ , при этом предполагается, что темная материя может рассматриваться как аналог спонтанно ферромагнитной  $\beta$ -фазы  ${}^3\text{He-V}$ , образовавшейся в сильных гравитационных и электромагнитных полях галактик и черных дыр, и приобретшей гравитационные свойства с увеличением массы и плотности темной материи [8]. Авторы статьи «Фундаментальная диссипация из-за связанных фермионов в пределе нулевой температуры» физик Самули Аутти и др. установили, что частицы в сверхтекучей жидкости прилипают к объекту, защищая его от взаимодействия с объемной сверхтекучей жидкостью, таким образом, предотвращая распад сверхтекучей жидкости [11]. «Сверхтекучий гелий-3 ощущается как вакуум для движущегося через него стержня, хотя это относительно плотная жидкость. Сопротивления нет, никакого сопротивления», — сказал физик Самули Аутти из Ланкастерского университета в Великобритании. «Я нахожу это очень интригующим». Сверхтекучая жидкость — это жидкость, которая имеет нулевую вязкость и нулевое трение и поэтому течет без потери кинетической энергии. Их относительно легко сделать из бозонов изотопа гелия-4, которые при охлаждении до уровня чуть выше абсолютного нуля замедляются достаточно, чтобы перекрываться и образовывать кластер атомов с высокой плотностью, действующих как один «суператом». Однако эти «суператомы» образуют только один тип сверхтекучей жидкости. Поведение темной материи в таком энергетическом состоянии аналогично поведению атомов в конденсате Бозе-Эйнштейна (квантовое пятое состояние

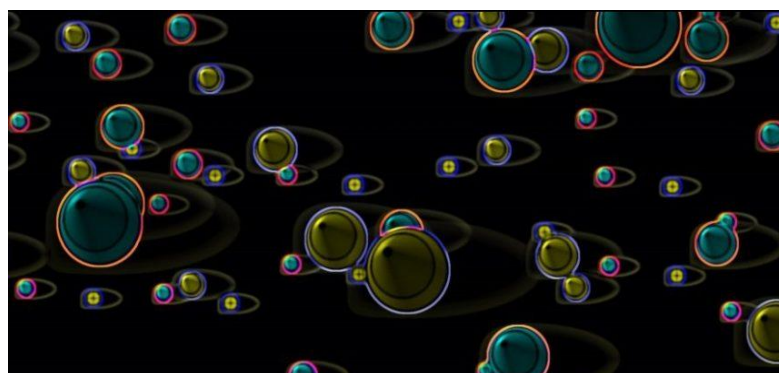
вещества), полученном, при температуре материи близком к абсолютному нулю - 273.5 по Цельсию или 0 Кельвинов (Рисунок 4).



*Рисунок 4. Конденсат Бозе-Эйнштейна*

Теперь физики говорят, что вместо изучения пустого пространства они могут создавать конденсат Бозе-Эйнштейна и изучать квантовый вакуум. В нем звуковые частицы и фотоны становятся слышны в фоне вакуума. Звук не создается детектором, но он слышим за счет ускорения. Эффект Унру создает тепловой отклик ускоренного детектора при его движении в вакууме. Исследователь из Ноттингемского Университета Себастьян Эрн считает, что напрямую этот эффект наблюдать невозможно. Требуется особое измерительное устройство, которое может ускориться за микросекунду до скорости света. И тогда в таких условиях можно будет наблюдать минимальное значение эффекта Унру. Но в реальности этого сделать невозможно. Физики считают, что можно использовать для наблюдений за предполагаемым эффектом, так называемые, квантовые стимуляторы. Возможно, что таким способом объясняются разные квантовые системы [12]. Моделирование одной системы с помощью другой облегчит понимание черных дыр. Аналоговые модели черных дыр можно будет создавать в лабораторных условиях.

Другой тип сверхтекучей жидкости основан на родном брате бозона, фермионе. Фермионы — это частицы, которые включают атомные строительные блоки, такие как электроны и кварки. При охлаждении ниже определенной температуры фермионы связываются в так называемые куперовские пары, каждая из которых состоит из двух фермионов, которые вместе образуют составной бозон. Эти куперовские пары ведут себя точно так же, как бозоны, и поэтому могут образовывать сверхтекучую жидкость. Команда создала свою фермионную сверхтекучую жидкость из гелия-3, редкого изотопа гелия, в котором отсутствует один нейтрон. При охлаждении до одной десятитысячной градуса выше абсолютного нуля (0,0001 Кельвина, или - 273,15 градусов Цельсия) гелий-3 образует пары Купера (Рис. 5) [11].



*Рисунок 5. Среда сверхтекучей жидкости гелий-3*

Макроскопический подход, при котором гидродинамическое присоединение массы к сферическим телам любой природы (включая заряженные кластеры) в сверхтекучий  $^3\text{He-B}$  (аналог темной материи), был обозначен Стоксом еще в позапрошлом веке позволяет говорить о

нарушении принципа эквивалентности, который лег в основу геометрической теории гравитации ОТО Эйнштейна. Речь идет о комплексной силе  $F(\omega)$ , действующей со стороны жидкости на сферу радиуса  $R$ , совершающую периодические колебания с частотой  $\omega$ . В пределах малых чисел Рейнольдса имеем [13]:

$$F(\omega) = 6\pi\eta R \left(1 + \frac{R}{\delta(\omega)}\right) V(\omega) + 3\pi R^2 \sqrt{\frac{2\eta\rho}{\omega}} \left(1 + \frac{2}{9} \frac{R}{\delta(\omega)}\right) i\omega V(\omega), \quad (1)$$

$$\delta(\omega) = (2\eta/\rho\omega)^{1/2}$$

где  $\rho$  - плотность жидкости,  $\eta$  - вязкость,  $V$  - амплитуды скорости сферы,  $\delta(\omega)$  - так называемая вязкая глубина проникновения, которая увеличивается с увеличением вязкости и уменьшением частоты колебаний.

Действительная часть выражения (1) - это известная сила Стокса, полученная из движения сферы в жидкости. Мнимая составляющая (коэффициент при  $i\omega V$ ) естественным образом отождествляется с эффективной массой добавляемого кластера:

$$M_{eff}(\omega R) = \frac{2\pi\rho R^3}{3} \left[1 + \frac{9}{2} \frac{\delta(\omega)}{R}\right] \quad (2)$$

Начало добавленной (присоединенной) массы  $M_{eff}(\omega R)$  в зависимости от частоты  $\omega$  и радиуса  $R$  сферы кластера связано с возбуждением поля вокруг движущегося кластера с гидродинамической скоростью  $v_i(r)$  и появлением в связи с этим дополнительной кинетической энергии. В сверхтекучей добавочной массе есть две составляющие: сверхтекучая и нормальная [13]. Лауреат Нобелевской премии профессор И. Пригожин назвал этот эффект «активным воздействием на систему извне с переходом системы в неравновесное состояние» [5]. Участие квантового вакуума (темной материи) во всех взаимодействиях вызывает отказ от парадигмы эволюции замкнутой системы и требует пересмотра всех законов сохранения и симметрии. На протяжении десятилетий мы знали о четырех фундаментальных силах: гравитации, электромагнетизме, а также сильных и слабых ядерных взаимодействиях. Экспериментальное открытие пятой силы связано с участием квантового вакуума (темной материи) во всех взаимодействиях, присущих барионной материи [8]. Новое скалярное поле может принадлежать гипотетической частице темной материи, протофобному Х-бозону, который, как и бозон Хиггса, создает скалярное поле, ответственное за пятое взаимодействие между темной материей и обычной (барионной) материей [14]. Именно темная материя вращается вокруг ядра черной дыры, из барионной материи, образуя гравитационную воронку и обеспечивая, благодаря пятому взаимодействию структуры Роджера Пенроуза и другие структуры, еще неизвестные нам, внутри черной дыры. В 2019 году, благодаря телескопу Event Horizon было получено изображение M87 — первая в мире фотография черной дыры. Эта дыра расположена в центре одноименной галактики, также известной как NGC 4486, она примерно в 6,5 миллиардов раз массивнее Солнца, и испускает в космос потоки раскаленного «полупереваренного» звездного вещества (Рисунок 6).

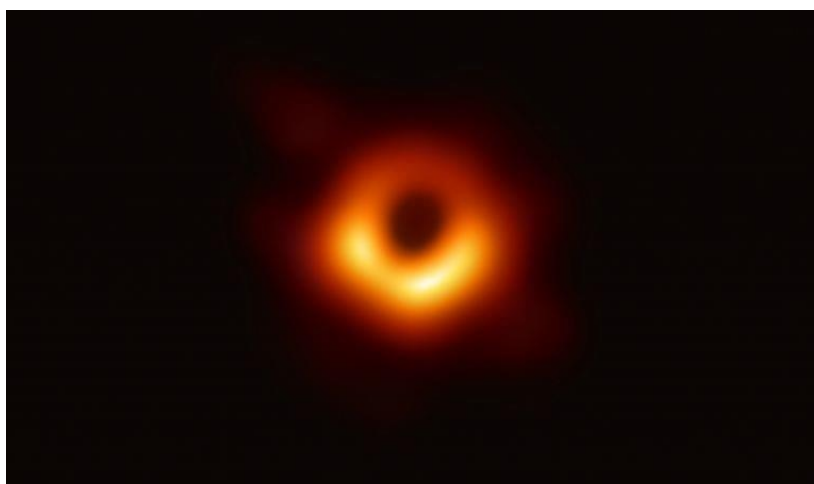
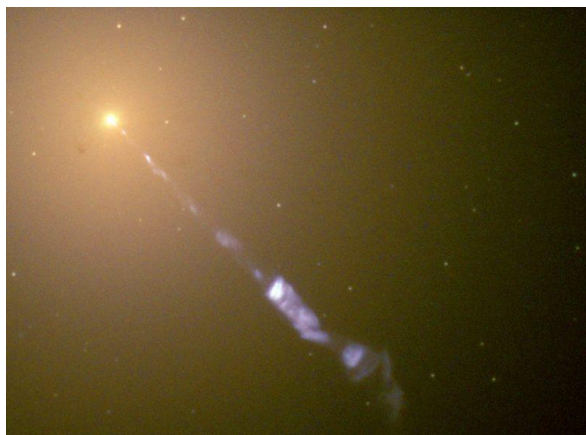


Рисунок 6. Знаменитая фотография черной дыры в галактике M87

Вещество извергается из черной дыры со скоростью, значительно превышающей скорость света. Хотя извергаемая субстанция и принимает форму вытянутого луча, она не похожа на равномерный поток — это скорее комковатые, неоднородные сгустки раскаленной материи, летящие на гребне продольной гравитационной волны (Рис.7). Результаты последнего исследования представлены в работе, опубликованной в *Astrophysical Journal* [15].



*Рисунок 7. Поток вещества, извергаемого из черной дыры NGC 4486 со скоростью в 6.3 раза превышающей скорость света*

### 3. Заключение

Таким образом, высоко ценя вклад Лауреата Нобелевской премии Роджера Пенроуза в теорию черных дыр и его революционный метод, позволивший установить возможность коллапса без каких-либо особых предположений о природе и геометрии «схлопывающегося» тела, приходится констатировать, что после открытия темной материи, дальнейшее развитие теории зарождения и эволюции черных дыр, лежит на пути отказа от геометрической теории гравитации ОТО Эйнштейна и признания пятого взаимодействия между темной и барионной материей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Roger Penrose "Gravitational Collapse and Space-Time Singularities" published in *Phys. Rev. Lett.* 14, 57. (1965)
2. Jean – Loup Puget, "The sight on the relic background" *Scientific American*, No.9, (2014)
3. V. Venkatraman Krishnan et al., "Lense–Thirring frame dragging induced by a fast-rotating white dwarf in a binary pulsar system," *Science* (January 30, 2020). [science.sciencemag.org/cgi/doi ...1126/science.aax7007](https://science.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.aax7007)
4. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. «Гравитация Том 3», М.: Издательство «Мир», (1977) 447 с
5. Пригожин И.Р., Стенгерс И. «Время, хаос, квант», - Москва: «Прогресс», (1994).
6. Konstantinov S.I., "Epistemological Dualism between Einstein's Relativity and Quantum Mechanics in the Five-Dimensional Continuum for Universe", *Global Journals Inc. (USA) GJSFR-A*, Volume 20, Issue 6, Version 1.0, pp 31-38, (2020)
7. Tom Draper, Benjamin Knorr, Chris Ripken, and Frank Saueressig "Finite Quantum Gravity Amplitudes: No Strings Attached" *Phys. Rev. Lett.* 125, 181301 – (Published 27 October 2020)
8. Konstantinov S.I. "Dark Matter is an Extreme State of Dark Energy (Fifth Interaction)." *GJSFR-A*, Volume 19 Issue 9 Version 1.0, pp 1-10 (2019)
9. Konstantinov S.I., "Halo" of dark matter and gravitational waves", *Global Journals Inc. (USA) GJSFR-A*, Volume 20, Issue 4, Version 1.0, pp 5-11, (2020)
10. Tommaso Treu. "Hubble detects smallest known dark matter clumps". by ESA/Hubble Information Centre, *Home Astronomy & Space* JANUARY 9, 2020
11. S. Autti and other "Fundamental dissipation due to bound fermions in the zero-temperature limit" *Nature Communications* volume11, Article number: 4742 (2020)



12. Дж. М. Пейта, М. Горячева и др. "Пружина Казимира и разбавление в оптомеханике макроскопической полости" - *Nature Physics*, (3 августа 2020), DOI: 10.1038 / s41567-020-
13. Шикин В. «Низкочастотные аномалии эффективной массы заряженных кластеров в жидком гелии», - *Физика низких температур*, Том 39, № 10, (2013).
14. Feng Jonathan L., "Protophobic Fifth Force Interpretation of the Observed Anomaly in  $^8\text{Be}$  Nuclear Transitions", arXiv: 1604.07411v2 [hep-ph], (15 Aug. 2016)
15. Bradford Snios, Paul EJ Noulson, Ralph P. Kraft, KS Chung, Eileen T. Meyer, William R. Foreman, Christine Jones, Stephen S. Murray. "Detection of superluminal motion in an X-ray jet M87", arXiv: 1905.04330 [astro-ph.HE] (2019) DOI: 10.3847 / 1538-4357 / ab2119