

Ключ к загадке «Эффект ПАМЕЛА»

Аннотация: «Эффект ПАМЕЛА» уже 10 лет остается загадкой для астрофизиков. В связи с обнаружением в ЦЕРНе на Большом адронном коллайдере эффекта влияния зависимости констант взаимодействия и массы элементарных частиц от энергии, при которой проводятся измерения, стало возможным разгадать эту загадку.

Ключевые слова: темная материя; электрон; позитрон; протон; масса; энергия.

1. Вступление

«Эффект ПАМЕЛА» заключается в необъяснимом росте количества позитронов по отношению к электронам в общем количестве регистрируемых магнитным спектрометром ПАМЕЛА вторичных электронов и позитронов, с ростом энергии космического излучения и релятивистских протонов начиная с 5ГэВ [1,2]. Этот же эффект наблюдается при регистрации электрон-позитронного отношения в экспериментах АМС-02 при энергии космического излучения и релятивистских протонов начиная с 20ГэВ [3]. Решение головоломки «Эффект ПАМЕЛА» находится на стыке трех областей физики: физики элементарных частиц, теории электродинамики и астрофизики. В качестве возможных объяснений эффекта PAMELA излучение высокоэнергетических позитронов близкими пульсарами считалось наивысшим приоритетом [4]. Профессор А. У. Абейсекара и соавт. (Университет Юты, США) с помощью телескопа HAWC Cherenkov изучил расширенное гамма-излучение гало с энергиями 8-40 ТэВ вокруг пульсаров Geminga и PSRB0656 + 14. Гипотеза о том, что этот гало создается теми же потоками позитронов, которые производят избыточные позитроны, обнаруженные детектором PAMELA, не были подтверждены. Оказалось, что в наблюдаемом спектре гамма-излучения зарегистрировано гораздо больше позитронов, чем могло бы достигнуть околоземного космического пространства, и форма энергетического спектра высокоэнергетических позитронов (формирование пиков) отличается от спектра, наблюдаемого в детекторе PAMELA (спектр с экспоненциальной степенью) [4]. Таким образом, исследователи пришли к выводу, что избыточные позитроны должны иметь другой источник. Рассмотрим эксперименты PAMELA и АМС-02.

2. Эксперименты

2.1 Эксперимент ПАМЕЛА

Магнитный спектрометр ПАМЕЛА был запущен на борту спутника «Ресурс-ДК» на эллиптическую околополярную орбиту с высотой 350 – 600 км для изучения потоков частиц и античастиц космического излучения в широком энергетическом диапазоне от десятков МэВ до сотен ГэВ (Рис1).



Рис. 1. Детектор «ПАМЕЛА» в контейнере на спутнике Ресурс-ДК

С июля 2006г. по январь 2016г. проводились непрерывные измерения потоков космических лучей. Прибор ПАМЕЛА состоит из магнитного спектрометра на основе постоянного магнита $\sim 0,4$ Тл, окруженного детекторами антисовпадений, электромагнитного калориметра, времяпролетной системы, ливневых сцинтилляционных счетчиков и нейтронного детектора. Магнитный спектрометр имеет шесть стриповых кремниевых плоскостей, которые измеряют координаты трека с точностью до 3 мкм, что позволяет определить знак заряда частицы и их жесткость по отклонению в магнитном поле. Электромагнитный калориметр позволяет проводить разделение электромагнитных и адронных каскадов и измерять энергию электронов и позитронов с точностью не хуже 10% от нескольких ГэВ до сотен ГэВ. Времяпролетная система обладает разрешением около 300 пс и дает возможность отделить низкоэнергетические протоны от позитронов вплоть до 0,8-1 ГэВ. Создатели прибора ПАМЕЛА утверждают, что «применение полного набора критериев обеспечивает коэффициент отсеивания протонов на уровне 10^{-5} , что позволяет надежно выделять электроны и позитроны на фоне протонов.» [1,2]. Обратим внимание на то, что до энергии 0,8-1 ГэВ в отделении низкоэнергетических протонов от позитронов участвовала времяпролетная система, обладающая разрешением около 300 пс., а далее разделение позитронов и релятивистских протонов осуществлялось без ее участия, с помощью других систем. Именно с этого момента начинает появляться «эффект ПАМЕЛА» (Рис.2).

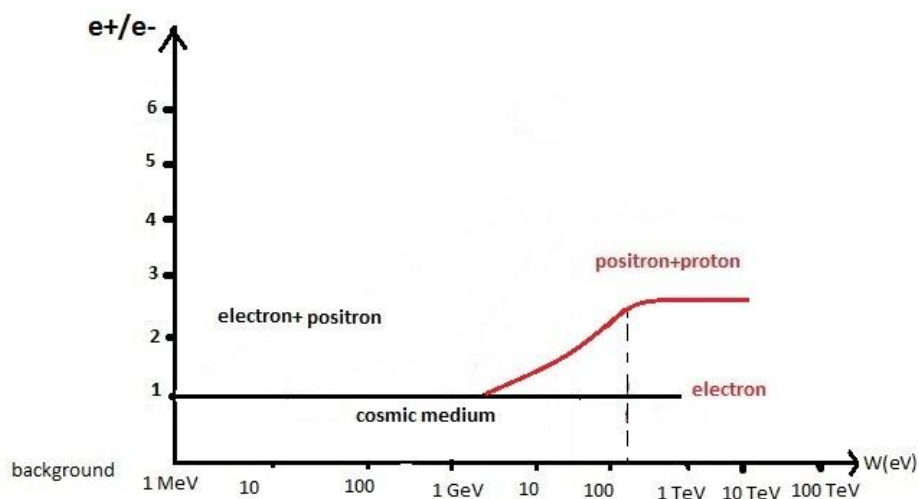


Рис.2 График позитрон-электронных отношений ($e+ / e-$) в экспериментах ПАМЕЛА

2.2 Эксперимент АМС-02

Альфа-магнитный спектрометр АМС предназначен для измерения высокоэнергетичных заряженных частиц с набором большой статистики (в среднем на 2-3 порядка больше «стандартных» измерений в космических лучах). Величина электрического заряда в детекторе АМС измеряется независимо координатным детектором (Tracker), черенковским детектором (RICH), счетчиком времени полета (TOF), знак заряда и импульс частицы измеряются по траектории в магните с помощью девяти плоскостей двухстороннего координатного кремниевого детектора. Скорость частицы измеряется времяпролетной системой (TOF) с временным разрешением 160 пс, детектором переходного излучения (TRD) и черенковским детектором (RICH). Энергия электромагнитных частиц измеряется в калориметре (ECAL). Аппаратура детекторов АМС-01 и АМС-02 разрабатывалась на основе ускорительных экспериментов, ранее не использовавшихся в космических установках. Координатный детектор АМС-02 (трекер) в настоящее время является самым большим трековым детектором (площадь 6,7 м²), построенным для космических исследований. Достигнутые точности были бы очень высокими даже для наземных установок [3]. Детектор АМС-02 был размещен на Международной космической станции (МКС) и в течении 2011-2015 годов на нем проводился широкий спектр исследования космического излучения в околоземной среде. (Рис.3).

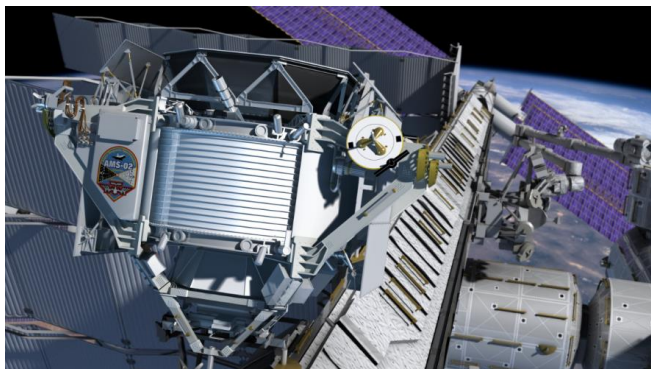


Рис. 3. Детектор AMS-02 на Международной космической станции (МКС)

С помощью АМС-02 были проведены прецизионные измерения спектров электронов и позитронов в диапазоне энергий 0,5-700ГэВ для электронов и 0,5- 500 ГэВ для позитронов. Анализируя результаты исследований, сотрудник Массачусетского технологического института Ю.В.Галактионов отмечает, что «ни электронный, ни позитронный спектры не могут быть описаны степенным законом с единым показателем степени во всем исследуемом интервале энергий» [3]. Прецизионные данные АМС-02 подтвердили, что при высоких энергиях релятивистских протонов отношение количества позитронов к электронам увеличивается с увеличением энергии протонов, т.е. имеет место эффект ПАМЕЛА. Однако, обратим внимание на то, что временное разрешение времяпролетной системы детектора АМС почти в два раза выше, чем у времяпролетной системы детектора ПАМЕЛА (160пс против 300пс) и координатный детектор АМС-02 (трекер) в настоящее время является самым большим трековым детектором (площадь 6,7 м²), построенным для космических исследований. Возможно, это позволяло отодвинуть границу обнаружения «эффекта ПАМЕЛА» с 5 ГэВ до 20 ГэВ. «Прецизионные данные АМС-02 подтвердили, что при высоких энергиях релятивистских протонов в диапазоне 20-200 ГэВ электронный спектр уменьшается с уменьшением энергии быстрее, чем позитронный спектр, то есть электронный спектр более мягкий. Это может указывать либо на первичную природу происхождения позитронов, либо на вторичную природу происхождения электронов»[3 стр 55]. Самое замечательное, что по данным АМС-02 удалось зафиксировать наличие экстремума (резонансный максимум) в суммарном спектре электронов и позитронов при энергии внешнего излучения и релятивистских протонов $W_p \approx 15-20\text{ГэВ}$ Рис.16,21,22 [3]. Это может указывать на генерацию вторичных электрон-позитронных пар в околоземной космической среде (темной материи). По утверждению Ю.В.Галактионова «одной из важнейших целей физической программы исследований АМС-02 являлось обнаружение темной материи в околоземной среде в ее негравитационных проявлениях» [3]. Одним из таких негравитационных проявлений и могла бы быть генерация вторичных электрон-позитронных пар в квантовом вакууме (темной материи) при его поляризации под воздействием космического излучения и релятивистских протонов [5].

3. Ключ к решению «эффекта ПАМЕЛА»

Сегодня появилось большое количество работ, объясняющих рост позитронов в эффекте ПАМЕЛА, их число превысило несколько сотен. Само число указывает на то, что до сих пор нет убедительных объяснений. В то же время исследователи полностью исключают объяснение роста позитронов как экспериментальные ошибки, однако такая системная ошибка может существовать, поскольку все детекторы основаны на общих физических принципах, которые игнорируют последние данные из ЦЕРН. В экспериментах на Большом адронном коллайдере в сентябре 2019 г. было обнаружено с вероятностью 95%, что величина констант взаимодействия и масса элементарных частиц могут быть «бегущими», т.е. зависеть от энергии, при которой проводятся измерения. Этот эффект объясняется поляризацией вакуума и может относиться не только к сильным взаимодействиям, но и к электромагнитным взаимодействиям [6]. Максвелл по ошибке применил теорему Остроградского-Гаусса не только для покоящихся зарядов, но и для движущихся (теорема Гаусса является одним из уравнений Максвелла). В результате этого произвольного предположения динамическое состояние движущихся электрических зарядов просто заменяется их статическим состоянием. В связи с этим в статье предлагается рассмотреть

вероятность появления релятивистских протонов в роли позитронов в эффекте PAMELA, которые ошибочно суммируются в детекторах PAMELA и AMS-02 с позитронами. Это также может быть подтверждено тем фактом, что спектр вторичных позитронов становится более жестким с увеличением энергии, а спектр электронов изменяется мало. По словам Ю.В. Галактионов, «Механизм ускорения космических лучей при расширении нерелятивистских ударных волн, возникающих при взрывах сверхновых, предсказывает степенной закон с обрезанием при высоких энергиях для энергетических спектров протонов, который точно соответствует спектру источника первичных позитронов в эффекте ПAMEЛА в диапазоне энергий 20-200 ГэВ» (1) [3 стр. 58].

$$\Phi = C \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\gamma} \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right), \quad (1)$$

Спектральный индекс γ обычно оказывается приблизительно равным 2.

Заключение Ю.В. Галактионова может указывать, что вместе с позитронами детекторы PAMELA и AMS-02 фиксируют релятивистские протоны. Причину этого следует искать в способе измерения энергии заряженных частиц в магнитном спектрометре. Магнитные спектрометры используются для измерения энергетического спектра постоянных и импульсных пучков заряженных частиц и их разделения в постоянном магнитном поле. Устройство основано на зависимости радиуса циклотронной орбиты от кинетической энергии частицы. Равенство силы Лоренца и центростремительной силы, когда частица движется по кругу в однородном магнитном поле, приводит к уравнению:

$$qv\mathbf{B} = \frac{mv^2}{r} \quad (2)$$

где q – заряд частицы, v – ее скорость, \mathbf{B} – индукция магнитного поля,

r – радиус циклотронной орбиты, $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$, m_0 = масса покоя, c – скорость света.

По известным значениям q , r , B можно вычислить кинетическую энергию частицы:

$$W = m_0c^2 \left\{ \sqrt{\frac{q^2B^2r^2}{(m_0c^2)^2} + 1} - 1 \right\} \quad (3)$$

В современных спектрометрах, для оценки кинетической энергии ультрарелятивистских заряженных частиц в магнитном поле, когда $qBr \gg m_0c^2$, используют приближенное соотношение [7]:

$$W \approx qBr \quad (4)$$

где q – заряд частицы,

B – индукция однородного магнитного поля,

r – радиус окружности, описываемой частицей в однородном магнитном поле.

Из выражения (4) видно, что кинетическая энергия заряженной частицы в магнитном спектрометре прямо пропорциональна величине заряда, который в классической электродинамике не зависит от скорости частицы, и радиусу циклотронной орбиты, который определяется в спектрометре экспериментально. Однако, когда скорость частицы приближается к скорости света, влияние магнитного поля на заряженную релятивистскую частицу уменьшается [6]. Этот эффект приводит к тому, что радиус циклотронной орбиты релятивистского протона в спектрометре может быть близок к радиусу позитрона (Рис. 4). В результате заявленный коэффициент экранирования протонов на уровне 10^{-5} [1] не выполняется, что не позволяет надежно выделять позитроны на фоне протонов.

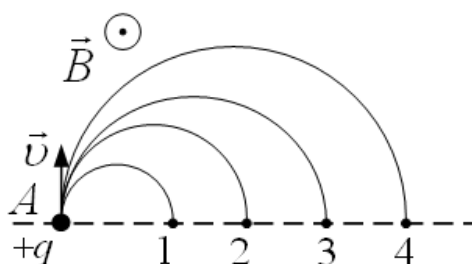


Рис. 4. Радиусы траекторий позитронов и протонов в магнитном спектрометре

4. Заключение

Таким образом, достоверность выводов о наличии эффекта ПАМЕЛА и полном отделении ультрарелятивистских протонов от вторичных позитронов как по данным детектора ПАМЕЛА так и по данным детектора АМС-02 вызывает сомнение. Согласно последним данным, оказалось, что в детекторе PAMELA как информации от калориметра, так и информации от магнитного спектрометра недостаточно для полного удаления фона протона. [8]. Эксперимент, способный подтвердить или опровергнуть выдвинутое в статье утверждение об отсутствии «Эффекта PAMELA» и наличии конструктивной ошибки в аппаратуре регистрации детекторов ПАМЕЛА и АМС, требует исключения релятивистских протонов на входе детектора. При этом генерация вторичных электрон-позитронных пар должна быть реализована только фотонами космического излучения. Это несложно сделать, и ПАМЕЛА и АМС-02 могут работать как гамма телескопы. Если верхний счетчик включить в антисовпадения, протоны полностью исключаются, а регистрируются электрон-позитронные пары от фотонов. Результаты этого эксперимента могли бы полностью исключить предположение об аппаратной ошибке при обнаружении «Эффекта ПАМЕЛА», связанной с неполным отсевом протонов.

Разумеется, представленное в статье мнение требует тщательной проверки, поскольку оно выражает отказ от использования магнитных спектрометров в экспериментах, связанных с измерением энергетического спектра постоянных и импульсных пучков ультрарелятивистских заряженных частиц и их разделением в постоянном магнитном поле.

Литература

1. Михайлов В.В.и др., *Вторичные позитроны и электроны в околоземном космическом пространстве по данным эксперимента ПАМЕЛА*, - М.: Известия РАН, Серия Физическая, Том 81, №2, (2017)
2. Михайлов В.В.и др., *Модуляция электронов и позитронов в 2006-2015 по данным эксперимента ПАМЕЛА* - М.: Известия РАН, Серия Физическая, Том 81, №2, (2017)
3. Галактионов Ю.В. *Поиски антивещества и темной материи и прецизионные исследования потоков космических лучей на Международной космической станции. Эксперимент АМС. Результаты четырех лет экспозиции.* - М: УФН, Том 187, №1 (2017).
4. Abeyssekara A.U. and others. *Extended gamma-ray sources around pulsars constrain the origin of the positron flux at Earth.* Science , 358, 911–914 (2017)
5. Konstantinov S.I. *Generation of secondary electrons and positrons in the near-Earth space environment from the data of experiments PAMELA, FERMI and AMS (2006-2016).* Global Journals Inc. (US) GJSFR-A, Volume 17, Issue 2. (2017)
6. Бегущая масса τ -кварка. Новости физики. УФН, Том 189, №11, с.1172
7. Кудасов Ю.Б., *Электрофизические измерения*, - М.: Физматлит, (2010)
8. В. В. Михайлов и другие. *Галактические электроны и позитроны космических лучей за десятилетие наблюдений в эксперименте ПАМЕЛА.* Известия РАН, серия физическая, Том 83, №8, стр. 1073- 1076.(2019).