

ВОЙНА ЗА КЕМ ОСТАЛОСЬ ПОЛЕ БОЯ – НАША ВСЕЛЕННАЯ? ЧАСТИЦ И АНТИЧАСТИЦ

Текст: Алексей Левин

На самом деле утверждение о том, что взаимодействие частиц и античастиц неизменно влечет за собой рождение фотонов, неверно даже по отношению к электронам и позитронам. Свободная электронно-позитронная пара аннигилирует с образованием электромагнитных квантов лишь в том случае, если ее энергия не слишком велика. Очень быстрые электроны и позитроны способны порождать положительные и отрицательные пи-мезоны (они же пионы), плюс- и минус-мюоны, протоны и антипротоны, и даже еще более тяжелые частицы – хватило бы только энергии. Медленные протоны и антипротоны при аннигиляции дают начало заряженным и нейтральным пионам (а быстрые – и другим частицам), которые распадаются на гамма-кванты, мюоны и нейтрино. В принципе, столкновение частицы и ее антикопии может дать на выходе любую из комбинаций частиц, не запрещенных принципами симметрии и законами сохранения.

В СООТВЕТСТВИИ С УРАВНЕНИЕМ ДИРАКА ВСТРЕЧА ЭЛЕКТРОНА С ПОЗИТРОНОМ ИМЕЕТ ДЛЯ НИХ ФАТАЛЬНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ – ОБЕ ЧАСТИЦЫ ИСЧЕЗАЮТ. Столь удивительный прогноз и его экспериментальные подтверждения произвели сильное впечатление и на физиков, и на нефизиков – как-никак это был первый пример полной трансформации вещества в излучение. Новооткрытый эффект назвали аннигиляцией, что по латыни означает полное уничтожение



Может показаться, что аннигиляция ничем не отличается от прочих межчастичных взаимодействий, однако одна принципиальная особенность у нее имеется. Чтобы стабильные частицы, такие как протоны или электроны, при встрече породили ливень из экзотических обитателей микромира, их нужно как следует разогнать. Медленные протоны при встрече просто изменяют свою скорость – этим дело и закончится. А вот протон и антипротон, сблизившись, либо претерпят упругое рассеяние и разойдутся, либо аннигилируют и произведут на свет вторичные частицы.

Все вышеописанное относится к аннигиляции свободных частиц. Если хотя бы одна из них входит в состав квантовой системы, в принципе ситуация остается прежней, но альтернативы изменяются. Например, аннигиляция свободного электрона и свободного позитрона никогда не может породить всего один квант – не позволяет закон сохранения импульса. Это легче всего увидеть, если работать в системе центра инерции сталкивающейся пары, – тогда начальный импульс будет равен нулю и потому никак не сможет совпасть с импульсом единичного фотона, куда бы тот ни улетел. Если же позитрон встретится с электроном, входящим, скажем, в состав атома водорода, возможна и однофотонная аннигиляция – в этом случае часть импульса передастся атомному ядру.

КАК НАСЧЕТ АНТИГРАВА?

Английский физик Артур Шустер полагал, что антиматерия гравитационно отталкивается от обычной материи, но современная наука считает это маловероятным. Из самых общих принципов симметрии законов микромира следует, что античастицы должны притягиваться друг к другу силами тяготения, подобно частицам без приставки "анти". Вопрос о том, каково гравитационное взаимодействие частиц и античастиц, до конца еще не решен, однако ответ на него почти очевиден.

Для начала обратимся к эйнштейновской общей теории относительности. Она основана на принципе строгого равенства гравитационной и инертной масс, причем для обычного вещества это утверждение экспериментально подтверждено множеством точнейших измерений. Поскольку инертная масса частицы точно равна массе ее античастицы, представляется очень вероятным, что их гравитационные массы тоже равны. Однако это все-таки предположение, пусть и очень правдоподобное, и средствами ОТО оно недоказуемо.

Еще один аргумент против гравитационного отталкивания между веществом и антивеществом следует из квантовой механики. Вспомним, что адроны (частицы, принимающие участие в сильных взаимодействиях) сложены из кварков, склеенных глюонными связями. В состав каждого бариона входят три кварка, в то время как мезо-

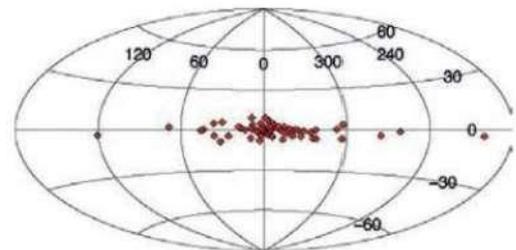
АНТИМАТЕРИЯ В КОСМОСЕ

ОСНОВНЫЕ ПУТИ ПОИСКА АНТИМАТЕРИИ

Это регистрация излучения с энергией, характерной для аннигиляции, либо непосредственно регистрация античастиц по массе и заряду. Поскольку антипротоны и ядра антигелия не могут проле-

теть сквозь атмосферу, их регистрация возможна лишь с помощью инструментов, поднятых в высокие слои атмосферы на аэростатах, или орбитальных инструментов, таких как магнитный альфа-спектро-

метр AMS-01, доставленный на станцию "Мир" в 1998 году, или его значительно усовершенствованный собрат AMS-02 (на фотографии), который начнет свою работу на МКС в 2010 году.



АНТИМАТЕРИЯ И МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ В 1970-х годах астрономы при помощи гамма-телескопов, установленных на высотных аэростатах, обнаружили гамма-кванты с энергией 511 кэВ, приходящие из самого центра нашей Галактики – Млечного Пути. Именно такая энергия характерна для аннигиляции свободных электронов и позитронов, что позволило предположить наличие облака антиматерии размерами около 10 000 световых лет.

AMS НА МКС

Во время одной из последних миссий шаттлов (STS-134) в 2010 году на МКС будет доставлен новый научный прибор – магнитный альфа-спектрометр (AMS-02, Alpha Magnetic Spectrometer). Его прототип AMS-01 был доставлен на борт космической станции "Мир" в 1998 году и подтвердил работоспособность концепции. Основной целью научной программы будет изучение и измерение с высокой точностью состава космических лучей, а также поиск экзотических форм материи – темной материи, странной материи (частиц, в составе которых есть странные (s) кварки), а также антиматерии – в частности, ядер антигелия.



ны состоят из парных комбинаций кварков и антикварков, причем не всегда одних и тех же (мезон, в состав которого входят кварк и его собственный антикварк, является истинно нейтральной частицей в том смысле, что он полностью тождественен своему антимезону). Однако эти кварковые структуры нельзя считать абсолютно стабильными. Протон, например, скомпонован из двух u-кварков, каждый из которых несет элементарный электрический заряд $+2/3$, и одного d-кварка с зарядом $-1/3$ (поэтому заряд протона равен $+1$). Однако эти кварки в результате взаимодействия с глюонами могут на очень короткое время менять свою природу – в частности, превращаться в антикварки. Если частицы и античастицы гравитационно отталкиваются, вес протона (а также, естественно, нейтрона) должен



КОСМИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ
Миссия AMS-02 продлится около трех лет. Семитонный модуль, пристыкованный к МКС, как ожидается, зарегистрирует более 1 млрд ядер гелия и несколько ядер антигелия. Предшественник этого детектора, AMS-01, зарегистрировал около 1 млн ядер гелия, но антигелия не обнаружил

ПОКА НИКОМУ НЕ УДАЛОСЬ ОБНАРУЖИТЬ КОСМИЧЕСКИЙ АНТИГЕЛИЙ И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ СО СПЕЦИФИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ АННИГИЛЯЦИЕЙ НА ГРАНИЦАХ СКОПЛЕНИЙ МАТЕРИИ И АНТИМАТЕРИИ

давать слабые осцилляции. Однако до сих пор ни в единой лаборатории подобный эффект не обнаружили.

Можно не сомневаться, что когда-нибудь на этот вопрос ответит Его Величество Эксперимент. Нужно-то немного – накопить побольше антивещества и посмотреть, как оно поведет себя в поле земного тяготения. Однако технически эти измерения невероятно сложны, и трудно предсказать, когда их удастся осуществить.

ТАК В ЧЕМ ЖЕ РАЗНИЦА?

После открытия позитрона в течение четверти века почти все физики были уверены, что природа не видит различий между частицами и античастицами. Конкретнее, считалось, что любому физическому процессу с участием частиц соответствует точно такой же процесс с участием античастиц и осуществляются они оба

с одинаковой вероятностью. Наличные экспериментальные данные свидетельствовали, что этот принцип соблюдается для всех четырех фундаментальных взаимодействий – сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного.

А потом как-то сразу все резко изменилось. В 1956 году американские физики Ли Дзун-дао и Янг Джень-нин опубликовали удостоенную Нобелевской премии работу, в которой они обсуждали затруднения, связанные с тем, что две, казалось бы, одинаковые частицы, тэта-мезон и тау-мезон, распадаются на разное число пионов. Авторы подчеркнули, что эту проблему можно разрешить, если предположить, что такие распады связаны с процессами, характер которых изменяется при переходе от правого к левому, иначе говоря, при зеркальном отражении (чуть позже физики поняли, что в общем виде нужно говорить об отражениях в каждой из трех координатных плос-

костей – или, что то же самое, о смене знаков всех пространственных координат, пространственной инверсии). Это означает, что зеркально отраженный процесс может оказаться под запретом или происходить с иной вероятностью, нежели до отражения. Годом позже американские экспериментаторы (принадлежащие двум независимым группам и работавшие разными методами) подтвердили, что такие процессы действительно существуют.

Это было только начало. Тогда же физики-теоретики из СССР и США осознали, что нарушение зеркальной симметрии делает возможным и нарушение симметрии относительно замены частиц на античастицы, что тоже было неоднократно доказано в экспериментах. Стоит отметить, что незадолго до Ли и Янга, но все в том же 1956 году возможность нарушения зеркальной симметрии обсуждали физик-экспериментатор Мартин Блок и великий теоретик Ричард Фейнман, но они так и не опубликовали этих соображений.

Физики традиционно обозначают зеркальное отражение латинской буквой P , а замену частиц на их античастицы – буквой C . Обе симметрии нарушаются только в процессах с участием слабого взаимодействия, того самого, что несет ответственность за бета-распад атомных ядер. Отсюда следует, что именно благодаря слабым взаимодействиям существуют различия в поведении частиц и античастиц.

Странное нарушение зеркальной симметрии вызвало к жизни попытки чем-то ее компенсировать. Уже в 1956 году Ли и Янг и независимо от них Лев Ландау предположили, что природа не делает различий между системами, которые получаются друг из друга совместным применением преобразований C и P (так называемая CP -симметрия). С точки зрения теории эта гипотеза выглядела очень убедительной и к тому же хорошо ложилась на экспериментальные данные. Однако всего через восемь лет сотрудники Брукхейвенской национальной лаборатории обнаружили, что один из незаряженных K -мезонов (или, как их еще называют, каонов) может распадаться на пионную пару. При строгом соблюдении CP -симметрии такое превращение невозможно – и следовательно, эта симметрия не универсальна! Правда, доля вроде бы запрещенных распадов не превышала 0,2%, но они все же имели место! Это открытие принесло руководителям брукхейвенской команды Джеймсу Кронину и Вэлу Фитчу Нобелевскую премию по физике.

СИММЕТРИЯ И АНТИМАТЕРИЯ

Нарушения CP -симметрии непосредственно связаны с отличием материи от антиматерии. В конце 1990-х годов в ЦЕРН провели очень красивый эксперимент с нейтральными каонами K^0 , каждый из которых состоит из d -кварка и более массивного странного антикварка. Законы природы позволяют антикварку потерять часть энергии и превратиться в анти- d . Высвободившаяся

энергия может пойти на распад каона, однако не исключено, что соседний d -кварк поглотит ее и превратится в странный кварк. В результате этого возникнет частица, состоящая из анти- d -кварка и странного кварка, то есть нейтральный антикаон. Формально это превращение можно описать как результат применения к каону CP -преобразования!

Таким образом, если CP -симметрия соблюдается абсолютно строго, то нейтральные каоны K^0 переходят в свои античастицы с точно такой же вероятностью, с какой те претерпевают обратные превращения. Любое нарушение CP -симметрии повлечет за собой изменение одной из этих вероятностей. Если приготовить пучок из равного числа нейтральных каонов и антикаонов и проследить динамику концентрации тех и других частиц, можно выяснить, уважают ли их квантовые осцилляции CP -симметрию.

Именно это и сделали физики из ЦЕРН. Они выяснили, что нейтральные антикаоны становятся каонами чуть-чуть быстрее, чем превращаются в антикаоны. Иначе говоря, был обнаружен процесс, в ходе которого антиматерия превращается в материю быстрее, чем материя – в антиматерию! В смеси с изначально равными долями вещества и антивещества со временем образуется пусть небольшой, но все же поддающийся измерению избыток вещества. Такой же эффект был выявлен в экспериментах и с другими тяжелыми нейтральными частицами – D^0 -мезонами и B^0 -мезонами.

Таким образом, к концу XX века экспериментаторы убедительно доказали, что слабые взаимодействия по-разному влияют на частицы и античастицы. Хотя эти различия сами по себе очень малы и выявляются лишь в ходе некоторых превращений весьма экзотических частиц, они все совершенно реальны. Это и означает наличие физической асимметрии между материей и антиматерией.

Для полноты картины стоит отметить еще одно обстоятельство. В 1950-х годах было доказано важнейшее положение релятивистской квантовой механики – CPT -теорема. Она гласит, что частицы и античастицы строго симметричны по отношению к CP -преобразованию, за которым следует обращение времени (строго говоря, эта теорема верна лишь без учета гравитации, в противном случае вопрос остается открытым). Следовательно, если в каких-то процессах не соблюдается CP -симметрия, их скорость в "прямом" и "обратном" направлениях (что считать тем и другим, конечно, вопрос соглашения) должна быть неодинаковой. Именно это и доказали эксперименты в ЦЕРН с нейтральными каонами.

ГДЕ ЖЕ АНТИМИРЫ?

В 1933 году Поль Дирак был уверен, что в нашей Вселенной существуют целые острова антивещества, о чем и упомянул в своей нобелевской лекции. Однако современные ученые считают, что таких островов нет ни в нашей Галактике, ни за ее пределами.

Конечно, антиматерия как таковая существует. Антинейтронные частицы порождаются многими высокоэнергетическими процессами – скажем, термоядерным горением звездного топлива и взрывами сверхновых звезд. Они возникают в облаках замагниченной плазмы, окружающих нейтронные звезды и черные дыры, во время столкновений быстрых космических частиц в межзвездном пространстве, при бомбардировке земной атмосферы космическими лучами и, наконец, в экспериментах на ускорителях. Кроме того, распад некоторых радионуклидов сопровождается образованием антинейтронов – а именно антинейтронов. Но все это лишь антинейтронные частицы, а отнюдь не антивещество. До сих пор никому не удалось обнаружить даже космический антинейтрон, не говоря уж об элементах потяжелее. Не увенчался успехом и поиск гамма-излучения со специфическим спектром, обусловленного аннигиляцией на границах космических скоплений материи и антиматерии.

Блази, этот процесс вполне может дать именно такую концентрацию позитронов, которую выявила PAMELA. Подобный механизм генерации позитронов выглядит абсолютно естественно, однако почему-то до сих пор он никому не приходил в голову. Блази показал также, что эти же процессы должны генерировать и избыточные антинейтроны. Однако поперечное сечение их рождения много меньше соответствующей величины для позитронов, из-за чего их можно зарегистрировать лишь при более высоких энергиях. Думаю, что со временем это станет возможным”.

В общем, пока все говорит за то, что в космосе нет ни антинейтронных звезд, ни антинейтронных планет, ни даже самых крохотных антинейтронных метеороидов. С другой стороны, общепринятые модели Большого взрыва утверждают, что вскоре после рождения наша Вселенная содержала одинаковое количество частиц и антинейтронных частиц. Так почему же первые сохранились, а вторые исчезли? Ответ на этот вопрос читайте в следующем номере “ПМ”.

ПМ

АНТИЧАСТИЦЫ МОГУТ ПОРОЖДАТЬСЯ, НАПРИМЕР, ТЕРМОЯДЕРНЫМ ГОРЕНИЕМ ЗВЕЗДНОГО ТОПЛИВА ИЛИ ВЗРЫВАМИ СВЕРХНОВЫХ ЗВЕЗД

В научной литературе периодически появляются сообщения об открытии нестандартных первичных источников космических антинейтронных частиц непонятного происхождения. В апреле 2009 года были опубликованы данные о загадочном избытке чрезвычайно быстрых позитронов, зарегистрированном детекторным комплексом PAMELA. Эта аппаратура размещена на борту российского спутника “Ресурс-ДК1”, 15 июня 2006 года отправленного на околоземную орбиту с космодрома Байконур. Некоторые эксперты интерпретировали этот результат как возможное свидетельство аннигиляции гипотетических частиц темной материи, но вскоре появилось и не столь экзотическое объяснение. Эту гипотезу прокомментировал для “ПМ” известный специалист по космическим лучам Вениамин Березинский из Национальной лаборатории Гран-Сассо, входящей в состав итальянского Национального института ядерной физики: “Стандартная модель рождения галактических космических лучей покоится на трех положениях. Первым и основным источником заряженных частиц считают остатки сверхновых. Вторая идея – частицы ускоряются до ультрарелятивистских скоростей на фронтах послевзрывных ударных волн, причем в этом ускорении очень велика роль их собственного магнитного поля. Третье положение заключается в том, что космические лучи распространяются диффузионно. Мой бывший студент, а ныне профессор Национального института астрофизики Паскуале Блази показал, что избыток позитронов, обнаруженный комплексом PAMELA, вполне согласуется с этой моделью. Разогнанные в ударных волнах протоны сталкиваются с частицами космического газа и именно в этой зоне своего ускорения превращаются в положительные пионы, которые распадаются с образованием позитронов и нейтрино. Согласно вычислениям

МИР ИЛИ АНТИМИР?

Вообразим, что мы летим на межзвездном корабле, который приближается к планете с разумной жизнью. Как узнать, из чего сделаны наши братья по разуму – из вещества или антивещества? Можно отправить разведывательный зонд, но если он взорвется в атмосфере, нас могут считать за космических агрессоров, как в фантастическом романе Кшиштофа Боруня “Антимир”. Этого можно избежать с помощью все тех же нейтральных каонов и антикаонов. Как уже говорилось, они способны не только превращаться друг в друга, но и распадаться, причем разными способами. В подобных распадах могут рождаться нейтрино в сопровождении либо положительных пионов и электронов, либо отрицательных пионов и позитронов. В силу асимметрии между материей и антиматерией темпы таких реакций несколько различны. Это обстоятельство и можно использовать в качестве “лакмусовой бумаги”. Для проверки планеты на антиматериальность удобно взять не чистые каоны и антикаоны, а их смешанные состояния; их обозначают как K_S и K_L (S – short, a L – long). Дело в том, что в состоянии L жизненный срок частицы в 570 раз длиннее, чем в состоянии S ($5,12 \times 10^{-8}$ с против $8,95 \times 10^{-11}$ с). В долгоживущей версии каонов симметрия материи и антиматерии проявляется гораздо сильнее – на каждые 10 000 распадов нужного типа примерно 5015 производят позитроны, а 4985 – электроны. Кстати, исторический эксперимент Кронина и Финча тоже сделан на K_L -мезонах. А теперь начнем беседу. Каоны обладают характерной массой, чуть превышающей половину массы протона. Давайте объясним братьям по разуму, что нам нужна нестабильная нейтральная частица, масса которой немного больше массы ядра простейшего из атомов. Инопланетные физики изготовят K_L -мезоны и определят характеристики их распадов. Мы спросим, совпадает ли знак электрического заряда самой легкой из заряженных частиц, порождаемой в этих распадах чуть чаще, чем аналогичная частица противоположного знака, со знаком частиц, входящих в атомы их мира. В случае положительного ответа нам станет ясно, что в состав их атомов входят позитроны и, следовательно, инопланета состоит из антиматерии. А если ответ будет отрицательным – можно готовиться к посадке!