

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

339,12.01

РАСПАД ПРОТОНА*)

С. Вайнберг

Известно, что время жизни протона по крайней мере в 10^{20} больше, чем возраст Вселенной, но теория говорит, что он не может жить вечно. Если протон не бессмертен, то и вся обычная материя когда-то должна распасться.

Открытие радиоактивности, сделанное Антуаном Анри Беккерелем в 1896 г., рассеяло веру в постоянность и неизменность атомов. Впоследствии было показано, что частицы, обнаруженные Беккерелем, излучаются в процессе самопроизвольного перехода ядер атомов радиоактивного вещества в другие атомные ядра. Интересно, что такая ядерная нестабильность оказалась редким свойством, присущим лишь некоторым тяжелым элементам, таким, как уран или радий. Ядра обычных элементов, таких, как водород или кислород, казались абсолютно стабильными.

В настоящее время имеются веские теоретические доводы в пользу того, что все атомные ядра в конце концов распадаются и что, следовательно, вся материя в какой-то степени является радиоактивной. При распаде такого типа частица атомного ядра, протон или нейтрон, спонтанно превращается в другие частицы, весьма отличные от тех, которые образуют обычные атомы. Даже наилегчайшее ядро водорода, состоящее из одиночного протона, тоже может распадаться.

Существует много данных, начиная с солидного возраста земного шара, что вещество не исчезает очень быстро. Если обычное вещество и распадается, это происходит очень медленно, так медленно, что требуются эксперименты гигантского масштаба, чтобы обнаружить этот распад. Беккерель обнаружил радиоактивный распад ядра урана в кристалле урановой соли весом в несколько граммов; для того чтобы наблюдать гораздо более слабую радиоактивность, связанную с распадом протона, понадобится проверка многих тонн вещества. Несмотря на это, эксперименты по поиску распада протона уже начаты.

Чтобы понять, в чем смысл подобных экспериментов, полезно сначала выяснить, почему что-либо в этом мире должно жить вечно. Предполагается, например, что электрон абсолютно стабилен. Какие физические принципы сохраняют его от распада на другие частицы? Понимание причин стабильности таких частиц, как электрон, позволяет судить, суще-

*) Weinberg S. The Decay of the Proton.— Scientific American, June 1981, v. 244, pp. 52—63.— Перевод Г. Г. Тахтамывшева.

Стивен Вайнберг — профессор физики в Гарвардском университете и старший научный сотрудник Смитсоновской Астрофизической лаборатории.

© Scientific American, Inc., 1981.

© Перевод на русский язык, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1982.

ствуют ли какие-либо физические принципы, не разрешающие распад обычного атомного ядра.

Опыт, накопленный физикой элементарных частиц, учит нас, что любой мыслимый процесс распада происходит самопроизвольно, если только он не запрещен каким-либо законом сохранения. Закон сохранения устанавливает, что полное количество некоторой величины, как, например, энергия или электрический заряд, никогда не меняется. Если какой-то распад и не является непосредственным результатом некоторого фундаментального взаимодействия элементарных частиц, все равно он будет происходить путем более или менее сложной последовательности излучений и поглощений частиц, если только он не запрещен законом сохранения. Таким образом, рассматривая вопрос стабильности любой частицы, мы должны выяснить, будет ли ее распад нарушать какой-то из законов сохранения.

Закон сохранения энергии несложен. Он требует, чтобы масса распадающейся частицы (или энергия, эквивалентная массе), была больше, чем сумма масс продуктов распада. (Равенства недостаточно, так как некоторое количество массы должно превратиться в кинетическую энергию продуктов распада.) Следовательно, обсуждая стабильность любой частицы, лучше всего начать с составления списка всех частиц меньшей массы, на которые она могла бы распасться.

□

Рассмотрим электрон. Насколько сейчас известно, существует лишь несколько видов частиц с массой меньше, чем у электрона. Наиболее известной из них является фотон, квант света, масса которого точно равна нулю. Есть веские теоретические доводы в пользу существования кванта гравитационного излучения — гравитона, — имеющего также нулевую массу. Наконец, существуют частицы, называемые нейтрино, которые в некотором смысле похожи на электрон; они излучаются при радиоактивном процессе, известном как бета-распад, одна из разновидностей которого была открыта Беккерелем в 1896 г. Ранее предполагалось, что все нейтрино имеют нулевую массу, однако в настоящее время определение их массы является объектом интенсивных теоретических и экспериментальных усилий. Тем не менее нет сомнений в том, что по крайней мере один вид нейтрино имеет массу менее чем одна тысячная массы электрона.

Почему же электрон не распадается, скажем, на нейтрино и фотоны? Ответ состоит в том, что, хотя такой распад удовлетворяет закону сохранения энергии, он нарушает другой закон — закон сохранения электрического заряда. Бенджамин Франклин первым установил, что суммарный заряд (положительный минус отрицательный) никогда не увеличивается и не уменьшается, хотя заряды разного знака могут разделяться или рекомбинировать. Электрон обладает определенным количеством отрицательного электрического заряда, однако все более легкие частицы, на которые он мог бы распасться (фотон, гравитон и нейтрино), оказываются, имеют нулевой электрический заряд. Распад электрона вызвал бы исчезновение определенного количества электрического заряда, и поэтому он строго запрещен.

Рассмотрим теперь, как можно применить эти законы сохранения к распаду двух видов частиц, образующих атомное ядро. Возьмем сначала более легкую из этих частиц — протон, а потом перейдем к нейтрону. Протон обладает положительным электрическим зарядом, равным заряду электрона по величине, но противоположного знака, и поэтому он также не может распасться на нейтрино, фотоны и гравитоны. Протон, однако, в 1820 раз тяжелее электрона, и существуют несколько частиц меньшей

массы, которые также обладают положительным зарядом. Протон может распадаться на эти частицы без нарушения сохранения энергии или заряда.

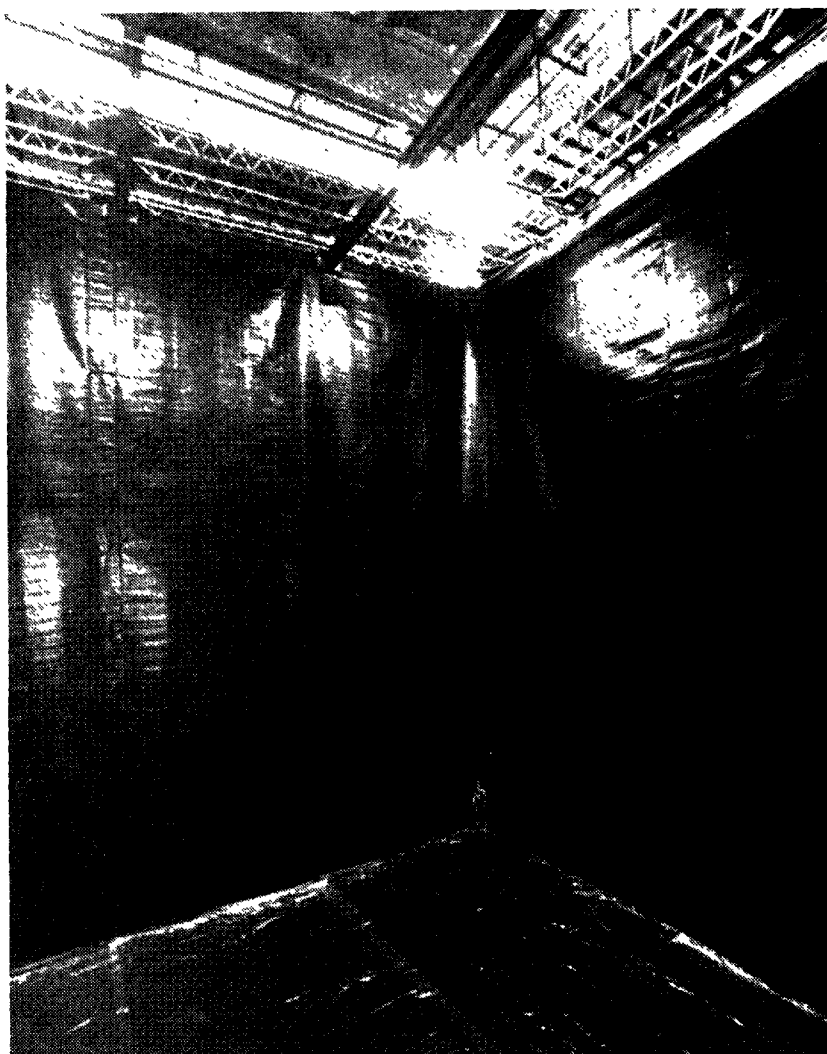


Рис. 1. Большая камера, расположенная на глубине около 1950 футов в соляной шахте Мортон к востоку от Кливленда, будет в ближайшие месяцы заполнена 10 000 т воды в процессе подготовки к поиску распада протона, связанного в атомном ядре.

Размер камеры 60 × 80 × 70 футов. Распад одного из $2.5 \cdot 10^{23}$ протонов и нейтронов в центральной части водяного объема вызовет образование частиц высокой скорости. При движении заряженных частиц через прозрачную среду со скоростью, большей скорости света в этой среде, испускается конус голубого света, называемого черенковским излучением. Это излучение представляет собой оптический удар, аналогичный звуковому удару, образуемому самолетом, движущимся в воздухе быстрее звука. Черенковский свет будет регистрироваться 2400 фотоумножителями, которые будут расположены на стенках камеры. Эксперимент проводится под землей, чтобы уменьшить число высокоэнергетических частиц, падающих из космоса, которые могут ошибочно быть приняты за продукты распада протона или связанного нейтрона. Сотрудничество, которое будет работать с этим детектором, включает исследователей из Калифорнийского университета в Ирвине, Мичиганского университета и Брукхэвской национальной лаборатории.

Например, у электрона есть античастица, называемая позитрон, с такой же самой массой, как у электрона, но с положительным электрическим зарядом, равным заряду протона. (У каждой частицы есть античастица

с той же самой массой, но с обратными величинами других параметров, таких, как электрический заряд. Кстати говоря, позитрон стабилен по тем же причинам, что и электрон). Ничто в законах сохранения энергии или заряда не запрещает протону распадаться на позитрон и любое количество фотонов и нейтрино.

Еще одним кандидатом в продукты распада протона является анти-мюон. Мюон во многих отношениях подобен электрону, имеет тот же самый заряд, но в 210 раз тяжелее. (Мюон распадается на электрон и нейтрино.) Антимюон имеет такой же заряд, как и протон, но масса его составляет лишь около одной девятой массы протона. Протон, следовательно, мог бы распадаться на антимюон плюс легкие нейтральные частицы, как фотон и нейтрино.

Еще одним возможным продуктом распада протона является мезон; представитель группы нестабильных частиц, занимающих по массе промежуточное положение, между электроном и протоном. Законы сохранения энергии и заряда позволяют протону распадаться, скажем, на положительно заряженный мезон и нейтрино, или на нейтральный мезон и позитрон. Любой из этих видов распада приведет к полному разрушению атома водорода. В случае более тяжелого ядра они вызовут изменение химической природы элемента и высвободят гораздо большее количество энергии, по сравнению с той, которая выделяется при обычной радиоактивности.



Почему, вообще, мы не наблюдаем повсеместного разрушения материи в результате таких процессов распада? Эта проблема впервые была, кажется, сформулирована Германом Вейлем в 1929 г. Позитроны, мюоны и мезоны еще не были открыты в то время, поэтому нельзя было и представить ту гипотетическую схему распада, которая описана выше. Тем не менее Вейль считал стабильность материи одной из загадок; почему бы, действительно, не мог протон в атоме поглотить электрон с орбиты, в результате чего атом водорода превратился бы в фотонный ливень. Вейль предполагал, что стабильность атома объясняется существованием двух типов электрического заряда, одним из которых обладает протон, а другим — электрон. Если каждый заряд сохраняется в отдельности, взаимная аннигиляция протона и электрона будет запрещена. Гипотеза Вейля не привлекла большого внимания в то время.

Вопрос этот был поднят опять в 1938 г. Э. Штюкельбергом и позднее, в 1949 г., Е. Вигнером (в сноске). Их предположение, ставшее впоследствии общепринятой точкой зрения, заключалось в том, что, кроме энергии и электрического заряда, существует еще одно сохраняющееся свойство материи, которое стали называть барионным числом. Барионы (от греческого барис, что значит тяжелый) — это семейство частиц, включающее протон и многие другие более тяжелые частицы, как, например, нейтрон, и нестабильные частицы, называемые гиперонами. Все барионы имеют барионное число $+1$, а все более легкие частицы, включая фотон, электрон, позитрон, гравитон, нейтрино, мюон и мезоны, имеют барионное число нуль. Для атома или другой составной системы, барионное число есть сумма барионных чисел составляющих частиц. Следовательно, любой набор частиц более легких чем протон, имеет барионное число нуль. Закон сохранения барионного числа заключается в утверждении, что полное барионное число не может измениться. Распад протона есть переход состояния с барионным числом $+1$ в состояние с барионным числом нуль, и поэтому распад запрещен.

Античастица имеет барионное число, противоположное по знаку барионному числу частицы. Антипротон, например, имеет барионное число -1 ; это антибариион. Протон и антипротон могут взаимно аннигилировать без нарушения сохранения барионного числа; протон и антипротон вместе имеют барионное число $+1$ плюс -1 , т. е. нуль, и поэтому они могут превратиться в ливень мезонов и фотонов. Таким образом, закон сохранения барионного числа не утверждает, что каждый протон живет вечно, а требует лишь, чтобы протон не распадался самопроизвольно в среде, не содержащей антипротонов.

До сих пор я обсуждал только распад протона, но, конечно, ядра большинства атомов сделаны не только из протонов, а также и из нейтронов. Что можно сказать о возможности нейтронного распада? Нейтрон — это барион с нулевым электрическим зарядом и массой несколько большей, чем у протона. Точнее говоря, масса нейтрона немного больше суммы масс протона и электрона. Это соотношение предполагает по крайней мере одну возможную моду распада нейтрона: он может перейти в протон, электрон и какую-либо безмассовую нейтральную частицу. Очевидно, в этом процессе закон сохранения энергии может быть выполнен. То же можно сказать и о законе сохранения электрического заряда, так как заряды протона и электрона компенсируют друг друга. Барионное число также сохраняется, поскольку протон и нейтрон имеют каждый барионное число $+1$, а остальные частицы — барионное число нуль.

Свободный нейтрон (не связанный в атомном ядре) распадается именно таким образом: на протон, электрон и антинейтрино. Время полураспада свободного нейтрона, которое определяется как время, в течение которого распадается половина любого достаточно большого набора нейтронов, равняется примерно 10 минутам. Нейтроны в некоторых атомных ядрах, как, например, ядро трития (тяжелый изотоп водорода с одним протоном и двумя нейтронами), тоже могут распадаться в протоны; этот процесс известен как β -распад. В большинстве ядер, однако, нейтроны не распадаются, потому что потребовалась бы слишком большая энергия для образования протона при наличии электростатических сил отталкивания, порождаемых другими протонами ядра. В таких ядрах нейтроны так же стабильны, как и протоны.

Остается возможность распада связанного в ядре нейтрона каким-нибудь другим способом, при котором барионное число не сохраняется. Например, он может распадаться на позитрон и отрицательно заряженный мезон или на электрон и положительно заряженный мезон. Обнаружение такого распада нейтрона в ядре, стабильном по отношению к другим распадам, было бы столь же значительным, как и наблюдение распада протона. В действительности в экспериментах по поиску распада протона ведется также и поиск распада связанного нейтрона. Однако поскольку распад свободного нейтрона хорошо известен, экспериментальные проверки закона сохранения барионного числа называются экспериментами по поиску распада протона

□

Согласно общепринятой в настоящее время точке зрения барионы и мезоны сделаны из более фундаментальных частиц, называемых кварками. Барион состоит из трех кварков, мезон — из кварка и антикварка. Электрон, мюон и нейтрино принадлежат к семейству частиц, называемых лептонами, которые не сделаны из кварков и нет каких-либо указаний на то, что они вообще имеют внутреннюю структуру. Таким образом, барионное число любой системы частиц есть одна треть кваркового числа,

т. е. одна треть разности числа кварков и антикварков. Сохранение кваркового числа эквивалентно сохранению барионного числа.

Скептически настроенный читатель, возможно, не будет удовлетворен тем, что стабильность протона и связанного нейтрона объясняется сохра-

нением барионного числа. И, на мой взгляд, такая точка зрения оправдана. Барионное число было придумано в качестве бухгалтерского инструмента, чтобы объяснить отсутствие наблюдаемого протонного распада и других подобных распадов; никакого другого значения это число не имеет. В этом отношении барионное число отличается от электрического заряда, который имеет также и динамический смысл: электрический заряд порождает электрическое и магнитное поля, которые в свою очередь воздействуют на заряды, следствием чего являются наблюдаемые эффекты в движении зарядов. Теория электричества и магнетизма не имела бы смысла, если бы электрический заряд не сохранялся, но для барионного заряда подобные аргументы динамического характера отсутствуют.

Действительно, имеются эмпирические данные против существования любого вида поля (назовем его баритропическим полем), которое соотносится с барионным числом, так же как электромагнитное поле соотносится с электрическим зарядом. Земля содержит около $4 \cdot 10^{51}$ протонов и нейтронов, следовательно, она имеет громадное барионное число. Если бы Земля была источником баритропического поля, можно было бы ожидать, что это поле притягивало или отталкивало бы протоны и нейтроны обычных тел,

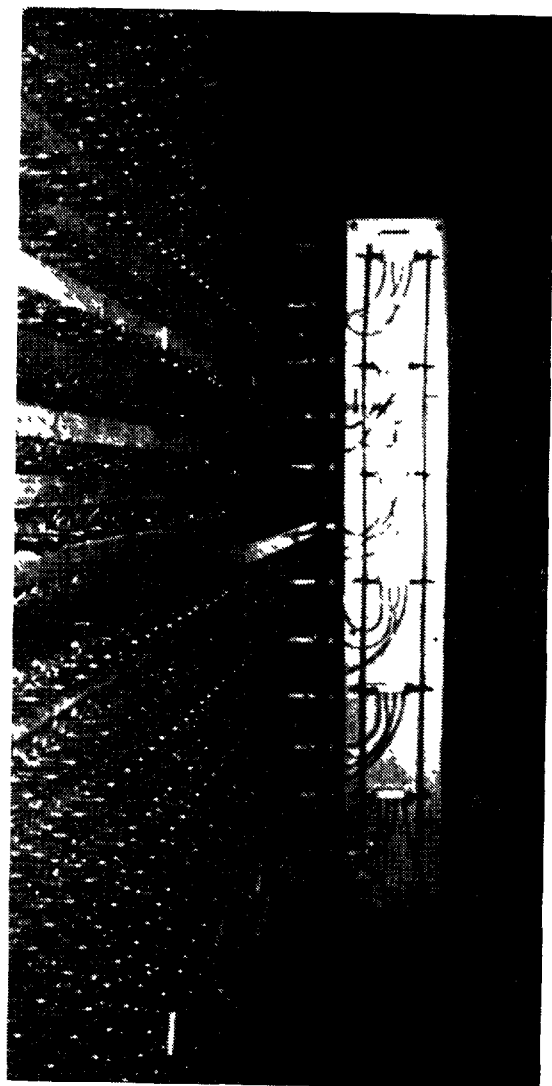


Рис. 2. Бетонный блок в шахте Судан в Миннесоте проверяется для поиска событий, похожих на распад протона.

Около 3450 счетчиков заключено в этом блоке, вес которого 31 тонна. Счетчики будут непосредственно регистрировать продукты распада протона. Эксперимент выполняется физиками из университета в Миннесоте и из Аргоннской национальной лаборатории.

находящихся на земной поверхности. Баритропическую силу можно было бы отличить от гравитационной, потому что воздействие гравитационной силы Земли на тело пропорционально массе тела, в то время как

баритропическая сила была бы пропорциональна барионному числу. Тела равной массы, состоящие из разных элементов, могут иметь барионные числа, отличающиеся на 1 процент. Несколько экспериментов, выполненных с высокой точностью (начиная с экспериментов Роланда фон Этвеша в 1889 г.), показывают, что притяжение тел к Земле в действительности пропорционально их массе, а не барионному числу. В 1955 г. Т. Д. Ли из Колумбийского университета и Ч. Н. Янг из Института высших исследований в Принстоне проанализировали эти эксперименты и сделали вывод, что любое баритропическое взаимодействие между двумя ядерными частицами должно быть намного слабее, чем гравитационное взаимодействие, которое само почти на 40 порядков величины слабее, чем электромагнитное взаимодействие. Разумеется, гипотезу о том, что барионное число играет динамическую роль подобно электрическому заряду, нельзя считать окончательно опровергнутой, однако аргументы Ли и Янга делают ее крайне маловероятной.

Сделанный вывод, что барионное число не имеет динамического смысла, не влечет за собой немедленного заключения, что барионное число не сохраняется. Действительно, начиная с середины тридцатых годов физики познакомились со многими величинами, которые хотя и не имеют динамического характера, как электрический заряд, однако тем не менее сохраняются, хотя бы в некотором ограниченном смысле. Среди них — величины, называемые странностью, изоспином и зарядовым сопряжением. Например, протоны и нейтроны имеют нулевую странность, некоторые гипероны имеют странность -1 , а некоторые мезоны, называемые К-мезонами, имеют странность $+1$. Сохранение странности было опять-таки введено как бухгалтерское правило для того, чтобы объяснить тот наблюдаемый факт, что К-мезон или гиперон не могут образоваться поодиночке при столкновении обычных атомных ядер, но может происходить их совместное рождение, потому что один К-мезон и один гиперон имеют суммарную странность, равную нулю. За все годы, прошедшие с того момента, когда было введено барионное число, не возникало сомнений в том, что закон сохранения этого числа не более чем еще одно из подобных нединамических бухгалтерских правил, которые почему-то выполняются.



Этот взгляд на законы сохранения претерпел радикальное изменение после того, как были построены современные теории взаимодействия элементарных частиц. Эти теории описывают все известные взаимодействия элементарных частиц (кроме гравитационного) способом, весьма похожим на тот, каким описывались чисто электромагнитные взаимодействия в старой теории; эта последняя, называемая квантовой электродинамикой, была развита в 30-х и 40-х годах. Теперь считают, что существуют 12 полей, похожих на электромагнитное поле квантовой электродинамики. Среди них восемь глюонных полей, которые обеспечивают сильное ядерное взаимодействие, удерживающее кварки внутри барионов и мезонов, и четыре электрослабых поля, которые создают одновременно и слабое ядерное взаимодействие, отвечающее за β -распад и электромагнитное взаимодействие. Соответственно имеется 12 законов сохранения, подобных закону сохранения электрического заряда, для величин, называемых цветом, электрослабым изоспином и электрослабым гиперзарядом. (Цвет — это свойство кварков, не имеющее ничего общего с видимым цветом; электрический заряд есть определенным образом скомбинированная смесь электрослабого гиперзаряда и электрослабого изоспина.) В отличие от барионного числа, эти сохраняющиеся величины имеют прямой физический смысл:

частицы — переносчики этих величин — порождают глюонные и электрослабые поля, и эти поля в свою очередь воздействуют на любую такую частицу. Сила взаимодействия зависит от конкретных значений всех 12 величин, переносимых частицей.

В то же самое время появление новых законов сохранения снизило, в некотором смысле, значение старых, нединамических законов. Например, современная теория сильных ядерных взаимодействий настолько жестко ограничена законом сохранения цвета (а также и другими принципами), что пока не видно, каким образом можно было бы включить в нее дополнительные условия, необходимые для учета несохранения странности. Конечно, можно попробовать ввести фундаментальное взаимодействие, нарушающее странность. Однако оказывается, что всегда существует возможность переопределить понятие странности таким образом, что она опять будет сохраняющейся величиной. Поэтому в настоящее время считают, что сохранение странности является не фундаментальным принципом, как сохранение энергии или сохранение заряда, а следствием теории сильных взаимодействий и, в частности, истинно фундаментального закона сохранения цвета. Поскольку сохранение странности не является фундаментальным принципом физики, не существует и причин, по которым это понятие имело бы смысл вне сферы сильных взаимодействий. Действительно, с момента открытия странности было известно, что она не сохраняется в слабых ядерных взаимодействиях.

Другие нединамические законы сохранения обладают теми же недостатками; они рассматриваются не как фундаментальные законы сохранения того же уровня, что сохранение энергии или заряда, а скорее как математическое следствие структуры существующей теории взаимодействия элементарных частиц. Список законов сохранения, которые в настоящее время можно считать фундаментальными, будет включать в себя 12 величин, связанных с сильными и электромагнитными взаимодействиями, сохранение таких величин, как энергия и импульс, которые подобным же образом связаны с гравитационным взаимодействием, и сохранение барионного заряда, который не связан с каким-нибудь известным взаимодействием.

Уже один этот факт может вызвать подозрение относительно сохранения барионного числа: барионное число не обязано сохраняться, в то время как сохранение энергии, заряда, цвета и других подобных величин необходимо для построения разумной теории взаимодействия элементарных частиц. Более того, существуют определенные указания на то, что сохранение барионного числа не является строгим правилом. Одно из таких указаний дает современная теория электрослабых взаимодействий. Джерард т'Хоофт из университета в Утрехте показал, что в рамках этой теории некоторые тонкие эффекты, которые не могут быть представлены в виде любого конечного числа излучений и поглощений элементарных частиц, ведут к процессам несохранения барионов, но интенсивность этих процессов исключительно мала. Эти процессы протекают слишком медленно, чтобы их можно было наблюдать, но интересно, что они появляются как раз из-за того, что сохранение барионного числа не связано с каким-либо видом баритропического поля; никакие подобные эффекты не могут вызвать несохранение таких величин, как, например, электрический заряд, который связан с полем взаимодействия.

□

Еще одно указание на возможное несохранение барионного числа идет из космологии. Можно предполагать, хотя бы на основе эстетических

Таблица I

Основные моды распада частиц определяются фундаментальными законами сохранения. Закон сохранения энергии требует, чтобы масса распадающейся частицы была не меньше, чем суммарная масса продуктов распада. Закон сохранения электрического заряда требует, чтобы заряд распадающейся частицы был равен полному заряду продуктов распада. Закон сохранения барионного числа устанавливает, что барионное число распадающейся частицы должно быть равно сумме барионных чисел продуктов распада. Протон и многие более тяжелые частицы имеют барионное число +1. Все частицы легче протона имеют барионное число нуль. В таблице частицы расположены в порядке возрастания массы. Массы указаны в энергетических единицах, в миллионах электрон-вольт (МэВ). Заряд дан в единицах заряда протона. Под каждой модой распада приведен баланс трех сохраняющихся величин. Распад протона на более легкие частицы означает переход из состояния с барионным числом +1 в состояние с барионным числом нуль, и поэтому этот распад запрещен законом сохранения барионного числа. Если будет найден распад протона, это будет означать, что закон сохранения барионного числа не всегда выполняется.

Частица	Масса, МэВ	Электрический заряд	Барионное число	Основная мода распада
Фотон (γ)	0	0	0	Неизвестна
Нейтрино (ν)	0?	0	0	»
Антинейтрино ($\bar{\nu}$)	0?	0	0	»
Электрон (e^-)	0,511	-1	0	»
Позитрон (e^+)	0,511	+1	0	»
Мюон (μ^-)	105,7	+1	0	$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$ Масса: $105,7 \rightarrow 0,511 + 0 + 0$ Заряд: $-1 \rightarrow -1 + 0 + 0$ Барионное число: $0 \rightarrow 0 + 0 + 0$
Антимюон (μ^+)	105,7	+1	0	$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$ Масса: $105,7 \rightarrow 0,511 + 0 + 0$ Заряд: $+1 \rightarrow +1 + 0 + 0$ Барионное число: $0 \rightarrow 0 + 0 + 0$
Пи-мезон (π^+)	139,6	+1	0	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ Масса: $139,6 \rightarrow 105,7 + 0$ Заряд: $+1 \rightarrow +1 + 0$ Барионное число: $0 \rightarrow 0 + 0$
(π^0)	135	0	0	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ Масса: $135 \rightarrow 0 + 0$ Заряд: $0 \rightarrow 0 + 0$ Барионное число: $0 \rightarrow 0 + 0$
(π^-)	139,6	-1	0	$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$ Масса: $139,6 \rightarrow 105,7 + 0$ Заряд: $-1 \rightarrow -1 + 0$ Барионное число: $0 \rightarrow 0 + 0$
К-мезон (K^+)	493,7	+1	0	$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ Масса: $493,7 \rightarrow 105,7 + 0$ Заряд: $+1 \rightarrow +1 + 0$ Барионное число: $0 \rightarrow 0 + 0$

Таблица I (продолжение)

Частица	Масса, МэВ	Электри- ческий заряд	Барии- онное число	Основная мода распада
(K_S^0)	497,7	0	0	$K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ Масса: $497,7 \rightarrow 139,6 + 139,6$ Заряд: $0 \rightarrow +1 + -1$ Бариионное число: $0 \rightarrow 0 + 0$
(K_L^0)	497,7	0	0	$K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ Масса: $497,7 \rightarrow 135 + 135 + 135$ Заряд: $0 \rightarrow 0 + 0 + 0$ Бариионное число: $0 \rightarrow 0 + 0 + 0$
(K^-)	493,7	-1	0	$K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$ Масса: $493,7 \rightarrow 105,7 + 0$ Заряд: $-1 \rightarrow -1 + 0$ Бариионное число: $0 \rightarrow 0 + 0$
Протон (p)	938,3	+1	+1	Неизвестна
Антипротон (\bar{p})	938,3	-1	-1	»
Нейтрон (n)	939,6	0	+1	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ Масса: $939,6 \rightarrow 938,3 + 0,511 + 0$ Заряд: $0 \rightarrow +1 + -1 + 0$ Бариионное число: $+1 \rightarrow +1 + 0 + 0$
Антинейтрон (\bar{n})	939,6	0	-1	$\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^+ + \nu$ Масса: $939,6 \rightarrow 938,3 + 0,511 + 0$ Заряд: $0 \rightarrow -1 + +1 + 0$ Бариионное число: $-1 \rightarrow -1 + 0 + 0$
Λ -гиперон (Λ^0)	1115,6	0	-1	$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ Масса: $1115,6 \rightarrow 938,3 + 139,6$ Заряд: $0 \rightarrow +1 + -1$ Бариионное число: $+1 \rightarrow +1 + 0$
Λ -антигиперон ($\bar{\Lambda}^0$)	1115,6	0	-1	$\Lambda^0 \rightarrow \bar{p} + \pi^+$ Масса: $1115,6 \rightarrow 938,3 + 139,6$ Заряд: $0 \rightarrow -1 + +1$ Бариионное число: $-1 \rightarrow -1 + 0$

принципов, что начальная вселенная содержала равные количества вещества и антивещества и, следовательно, равные числа барионов и антибарионов. Согласно этой гипотезе полное барионное число вселенной в начальный момент было равно нулю. Если бы барионное число сохранялось, полное барионное число оставалось бы равным нулю. Почти все протоны и нейтроны аннигилировали бы посредством соударений с анти-

протонами и антинейтронами и сегодняшняя вселенная содержала бы лишь жидкую кашу фотонов и нейтрино без звезд, без планет и без ученых.

Возможно, что вселенная с самого начала содержала избыток вещества над антивеществом, так что некоторое количество должно было остаться после взаимной аннигиляции частиц и античастиц. Возможно, также (хотя обычно считается маловероятным), что вещество и антивещество каким-то образом разделились и что мы живем в участке положительного барионного числа вселенной с нулевым полным барионным числом. Однако если барионное число не сохраняется, существует более привлекательная возможность, а именно, что вселенная началась с одинаковым количеством вещества и антивещества, и имеющийся сейчас избыток частиц с положительным барионным числом возник как следствие физических процессов, нарушающих сохранение барионного числа. (После эксперимента, который выполнили в 1964 г. Джеймс Кристиенсон, Джеймс Кронин, Вал Фитч и Рене Турле из университета в Принстоне, стало известно, что не существует точной симметрии вещество — антивещество, которая предполагает, что процессы с рождением антибарионов должны идти с такой же точно интенсивностью, как и процессы с рождением барионов.)

Эти соображения, а также отсутствие баритропического взаимодействия, что доказывается аргументами Ли и Янга, привели некоторых теоретиков (в том числе русского физика Андрея Сахарова и меня) в шестидесятые годы к предположению, что барионное число, возможно, не является точно сохраняющейся величиной. Космологические соображения стимулировали также проведение в те годы по крайней мере одного эксперимента по поиску протонного распада, который выполнили Т. Альвзгер, И. Мартинсон и Х. Райд из университета в Стокгольме и Побелевского института. За последние годы ряд теоретиков разработал схему образования барионов на ранней стадии вселенной.

Любое предположение о возможном несохранении барионного числа немедленно приходит в столкновение с тем фактом, что обычная материя весьма стабильна. Морис Гольдхабер из Брукхейвенской Национальной лаборатории заметил, что «мы знаем своими костями», что среднее время жизни протона больше чем 10^{16} лет. Если бы это время жизни было заметно меньше, 10^{28} протонов, образующих человеческое тело, распадались бы со средней скоростью больше, чем 10^{12} протонов в год или 30 000 распадов в секунду, и мы сами представляли бы угрозу для своего здоровья.

Разумеется, можно установить более строгую границу времени жизни протона, пытаясь обнаружить протонный распад. Первый эксперимент этого рода выполнили в 1954 г. Фредерик Райнес и Клайд Коуэн мл., которые работали тогда в Национальной лаборатории в Лос Аламосе, и Гольдхабер. Они использовали около 300 л жидкого сцинтиллятора, вещества, в котором энергичные заряженные частицы, образованные в протонном распаде, давали бы заметную вспышку света. Как и во всех последующих экспериментах с протонным распадом, аппаратура была помещена под землей, чтобы защитить ее от космических лучей. (Энергичные частицы этих лучей способны давать события, которые могут быть ошибочно приняты за распад протона.) При таких мерах предосторожности они наблюдали лишь несколько вспышек в секунду, почти все из которых могли быть приписаны космическим лучам, проникающим глубоко под землю. Райнес, Коуэн и Гольдхабер пришли к выводу, что среднее время жизни протона или связанного нейтрона должно быть больше чем 10^{22} лет.

□

Последующие эксперименты, выполненные несколькими физиками, постепенно поднимали эмпирическую нижнюю границу времени жизни протона. Наиболее продуманный поиск из всех, результаты которых опубликованы к настоящему времени, был выполнен сотрудничеством исследователей из университетов Кэйз Вэстерн Резерв, Витутерсрэнд и университета Калифорнии в Ирвине. Они исследовали 20 т жидкого сцинтиллятора на глубине 3,2 км в золотой шахте в Южной Америке с 1964 по 1971 г. Последний анализ их данных дал результат, что среднее время жизни протона или связанного нейтрона больше чем 10^{30} лет.

Это на самом деле долгое время жизни. Для сравнения возраст вселенной оценивается сейчас около 10^{10} лет. Надежда зарегистрировать распад частиц с таким большим временем жизни существует только потому, что процессы радиоактивного распада работают статистически: набор частиц со средним временем жизни t лет не будет весь существовать t лет с последующим синхронным распадом; скорее можно ожидать, что за первый год распадается доля $1/t$ от полного числа частиц, за следующий год распадается доля $1/t$ от оставшихся частиц и так далее. Нижняя граница времени жизни протона определяется не путем наблюдения за одним протоном в течение долгого времени и ожиданием его распада, а наблюдением за 10^{31} протонов и нейтронов в 20 тоннах сцинтиллятора в течение нескольких лет и ожиданием распада нескольких дюжин из них.

Долгое время жизни протона привело к мысли о сохранении барионного числа. Как может протон жить так долго, если нет закона сохранения, позволяющего ему жить вечно? Ответ на этот вопрос был получен в течение нескольких последних лет.

Напомним, что современные теории слабого, электромагнитного и сильного взаимодействий очень сильно ограничены — настолько, что, например, невозможно включить в теорию сильных взаимодействий несохранение величины, называемой странностью. Эта теория оказывается настолько ограниченной, что невозможно сделать ее достаточно сложной (не считая маленьких эффектов t' -Хоофта), чтобы разрешить любое нарушение сохранения барионного числа до тех пор, пока мы не введем новый вид частиц с экзотическими величинами заряда, цвета и так далее. Такие частицы должны качественно отличаться от любых известных сейчас частиц.

Если допустить существование экзотических частиц подходящего вида, распад протона становится возможным. Известные законы сохранения для заряда, цвета и так далее, говорят, что требуется частица с электрическим зарядом $+4/3$, $+1/3$ или $-2/3$ от заряда протона; частица должна также иметь внутренний спиновый угловой момент, равный 0 или 1, и цвет, как у антикварка. Такая экзотическая частица могла бы, например, образовываться, когда кварк переходит в антикварк, и затем исчезать, когда другой кварк переходит в антилептон (позитрон, антимюон или антинейтрино), таким способом три кварка, которые образуют протон, могут распасться на антилептон и мезон, образованный из оставшихся кварка и антикварка.

Любые экзотические частицы такого типа должны быть очень тяжелыми, иначе их бы уже обнаружили. Если они достаточно тяжелы, это создаст трудности для их испускания и поглощения и, следовательно, приведет к очень малой интенсивности протонного распада. Таким образом, появляется возможность объяснить долгое время жизни протона без предположения существования какого-то фундаментального закона сохранения, который обеспечил бы стабильность протона, и становится вероятной возможность того, что он не живет вечно.

Насколько же тяжелыми должны быть эти экзотические частицы, чтобы объяснить долгое время жизни протона? Если считать, что экзотические частицы взаимодействуют более или менее подобно фотонам, можно дать грубую оценку, что времени жизни протона больше чем 10^{30} лет соответствует масса экзотических частиц, превышающая 10^{14} протонных масс. Это

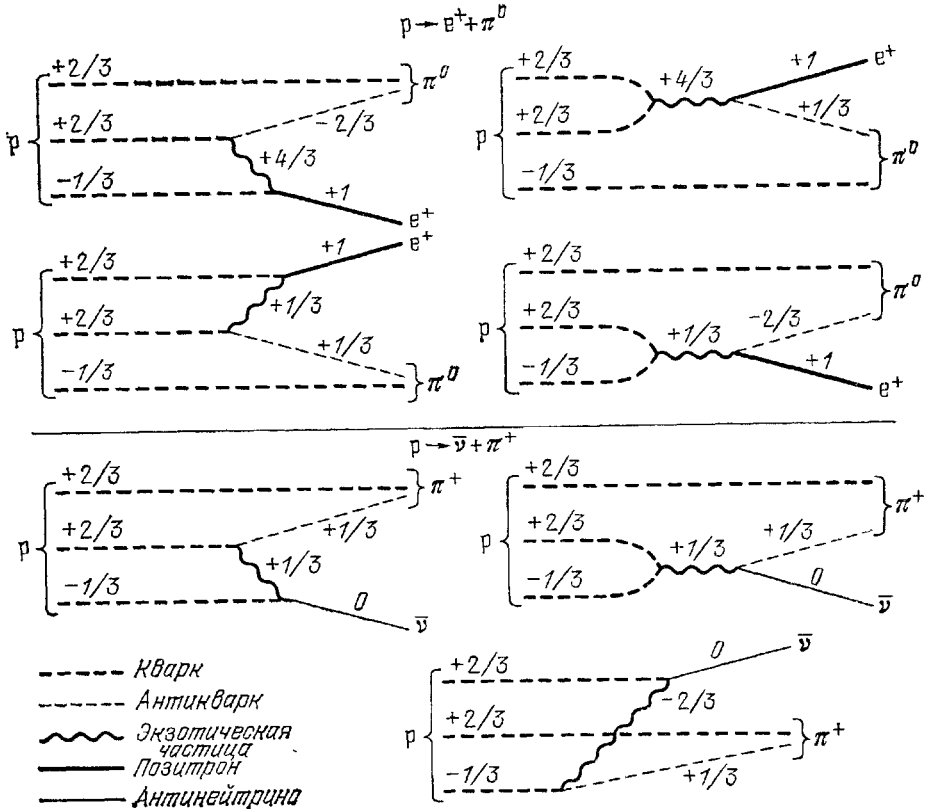


Рис. 3. Распад протона путем испускания и поглощения тяжелой экзотической частицы наиболее вероятно приводит к образованию позитрона (e^+) и нейтрального мезона (π^0) или антинейтрино ($\bar{\nu}$) и положительного мезона (π^0).

Протон считается составной частицей, в которой находятся три конститuenta, называемые кварками; мезон состоит из кварка и антикварка. Результатом излучения или поглощения экзотической частицы является преобразование двух кварков в антикварк и позитрон (четыре верхних реакции) или в антикварк и антинейтрино (три нижних реакции). На линиях, представляющих кварки, позитроны, антинейтрино и экзотические частицы, показан их электрический заряд. Заряд сохраняется во всех семи реакциях, которые представляют все основные возможные способы, путем которых испускание и поглощение одиночной экзотической частицы приводит к распаду протона на мезон и позитрон или на мезон и антинейтрино. Несколько видов экзотических частиц могут привести к распаду протона. Они различаются электрическим зарядом (плюс или минус $1/3$, плюс или минус $2/3$ и плюс или минус $4/3$) и внутренним угловым моментом-спином. Спин может быть равным нулю (как у π -мезона) или 1 (как у фотона).

потрясающе большая масса, большая, чем кто-либо может надеяться получить на любом ускорителе в обозримом будущем. И все же есть по крайней мере еще два соображения, заставляющие предполагать существование частиц с такой огромной массой.

Первое соображение связано с явлением гравитации, которое до сих пор оставалось вне поля нашего зрения. Эйнштейновская общая теория относительности дает разумное описание гравитационных взаимодействий частиц при всех экспериментально достижимых энергиях. Однако из-за квантовых флуктуаций, теория нарушается при очень высоких энергиях,

порядка 10^{19} протонной массы. Этот предел известен как планковская масса, так как Макс Планк в 1900 г. заметил, что эта масса естественным образом появляется при любой попытке комбинирования его квантовой теории с теорией гравитации. Приблизительно планковская масса эквивалентна энергии, при которой гравитационное взаимодействие между частицами становится сильнее, чем электрослабое или сильное взаимодействие. Чтобы избежать внутренних противоречий между квантовой механикой и общей теорией относительности, при энергии около 10^{19} протонных масс должны появиться некоторые качественно новые эффекты.

Вторая причина ожидать появления новых степеней свободы при сверхвысоких энергиях связана с электрослабым и сильным взаимодействиями. Современная теория этих взаимодействий содержит три параметра, известные как константы связи. Одна из этих констант, обозначаемая g_s , описывает интенсивность, с которой глюонные поля взаимодействуют с частицами, обладающими сохраняющимся числом, называемым цветом; две другие константы связи, обозначаемые g_1 и g_2 , описывают интенсивность взаимодействия электрослабых полей с частицами, обладающими электрослабым зарядом и электрослабым изоспином соответственно. Хотелось бы верить, что все эти взаимодействия имеют общую природу; в этом случае все константы связи должны быть одного порядка величины. Но это находится в очевидном противоречии с тем фактом, что сильное взаимодействие действительно является сильным, измерения показывают, что величина g намного больше, чем g_1 или g_2 .

□

Эта трудность была преодолена в Гарвардском университете в 1974 г. Ховардом Джорджи, Хэлен Р. Квинн и мной. После работы 1954 г. Мюррея Гелл-Манна из Калифорнийского технологического института и Фрэнсиса Е. Лоу из Массачусетского технологического института было известно, что константы связи каким-то образом зависят от энергии тех физических процессов, в которых они измеряются. В 1973 г. независимые расчеты Х. Дэвида Политцера из Гарварда и Дэвида Гросса и Фрэнка Вилчека из Принстона показали, что константа сильного взаимодействия g медленно уменьшается при увеличении энергии. Большая из двух электрослабых констант g_2 тоже уменьшается, но еще медленнее, в то время как меньшая электрослабая константа связи g_1 увеличивается с ростом энергии. Джорджи, Квинн и я высказали предположение, что масштаб энергий, при котором происходит объединение сильных и электрослабых взаимодействий, чудовищно велик, настолько велик, что очень слабое уменьшение сильной константы связи с ростом энергии и еще более медленное изменение с энергией двух электрослабых констант приводит их при этой сверхвысокой энергии к одной и той же величине. Говоря точнее, при довольно общих предположениях (в основном, что сильные и электрослабые взаимодействия объединены некоторого рода симметрией, известной в математике как «простая» группа, что отсутствуют промежуточные уровни унификации и что частицы с полуделым спином обладают свойствами, более или менее подобными известным свойствам лептонов и кварков) мы нашли, что сильные и электрослабые взаимодействия должны объединяться при энергии порядка 10^{15} – 10^{16} протонных масс.

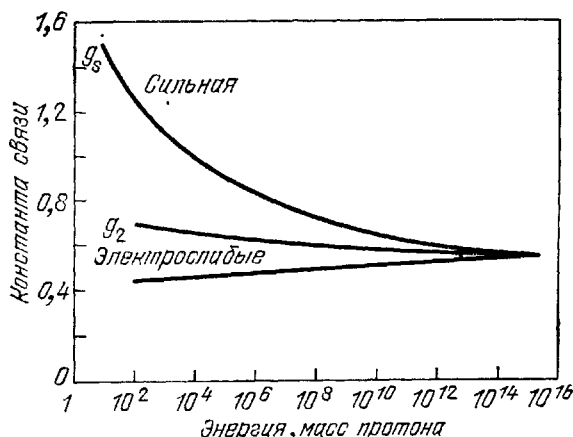
Любая теория, которая объединяет сильное и электрослабое взаимодействие и рассматривает лептоны и кварки одинаковым образом, должна включать новый тип частиц, чтобы картина была полной, и, как я показал выше, нет специальных причин думать, что взаимодействие этих новых частиц будет сохранять барионное число. (Масштаб энергий 10^{15} – 10^{16} массы протона, вычисленный Джорджи, Квинн и мной, достаточно высок для

того, чтобы несохраняющее барионное число взаимодействие, вызываемое экзотическими частицами такой массы, не приводило к времени жизни протона, противоречащему существующей экспериментальной нижней оценке 10^{30} лет. Мы оценили это время жизни около 10^{32} лет.)

Начиная с 1973 г. многие теоретики разработали теории такого рода, в том числе Иогенн Пати из Мэрилендского университета и Абдус Салам из Международного центра теоретической физики в Триесте, Джорджи и Шелдон Ли Глешоу из Гарварда, Гарольд Фриш и Питер Минковский из Калтеха и Феза Гюрзей, Пьер Рамон и Пьер Сикиви из Йельского университета. Эти модели обычно известны по типу математической группы

Рис. 4. Сила трех фундаментальных взаимодействий — сильного, электромагнитного и слабого — между элементарными частицами меняется в зависимости от энергии процесса, в котором она измеряется.

Электромагнитное взаимодействие действует между частицами с электрическими зарядами, сильное взаимодействие связывает вместе кварки, чтобы образовать протоны и другие частицы, и слабое взаимодействие ответственно за некоторые радиоактивные распады. Электромагнитное и слабое взаимодействия были объединены в одну теорию, которая постулирует существование двух типов электрослабого взаимодействия. Соотношение между сильным и электрослабым взаимодействиями дается тремя безразмерными константами связи (обозначаемыми g_s для сильного и g_1 и g_2 для электрослабых взаимодействий). Хотя эти величины называются константами, они слабо меняются с энергией. Если все эти взаимодействия имеют общую природу, тогда можно ожидать, что при некоторой энергии эти константы связи имеют одну и ту же величину; другими словами, ожидается, что три взаимодействия имеют одинаковую силу. Вычисленная при достаточно общих предположениях энергия объединения оказалась около 10^{16} массы протона.



симметрии, которая связывает различные взаимодействия, например $SU(4)^1$, $SU(5)$, $SO(10)$, E_6 , E_7 и $SU(7)$. Все эти модели включают экзотические частицы, при испускании или поглощении которых происходит превращение кварка в антикварк и лептон или антилептон; следовательно, как сказано в первой статье Пати и Салама, в которой предлагается объединение сильного и электрослабого взаимодействий, в них допускаются процессы с нарушением барионного числа. Далее, все эти модели или по крайней мере некоторые их версии, удовлетворяют общим предположениям, сделанным Джорджи, Квинн и мной, поэтому ожидаемая масса экзотических частиц должна быть порядка 10^{15} или 10^{16} масс протона и время жизни протона будет порядка нашей грубой оценки 10^{32} лет.

Сравнительно недавно многие теоретики проделали более детальные расчеты, в том числе Анджей Бурас, Джон Элис, Мэри К. Гайяр и Деметрес В. Нанопулос из Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН), Тэрэнс Голдман и Дуглас Росс из Калтеха, Уильям Марчиано и Альберто Сирлин из Рокфеллеровского университета и Нью-Йоркского университета, Цецилия Ярлскаг и Франческо Индурайн из ЦЕРНа и Лоуренс Холл из Гарварда. Новые расчеты дали улучшенную величину порядка 10^{15} массы протона для масштаба супертяжелой массы и время жизни протона около 10^{31} лет. К сожалению, расчет вероятности протонного распада осложнен наличием сильного ядерного взаимодействия между кварками и антикварками в протоне и в продуктах распада и

поэтому, если даже свойства экзотических сверхтяжелых частиц были бы точно известны, все равно было бы невозможно предсказать время жизни протона с точностью лучше чем порядок величины.

□

Экспериментальное исследование слабых взаимодействий уже дало некоторые подтверждения общего анализа, проделанного Джорджи, Квинн и мной. Было бы неудивительным обнаружить, что графики любых

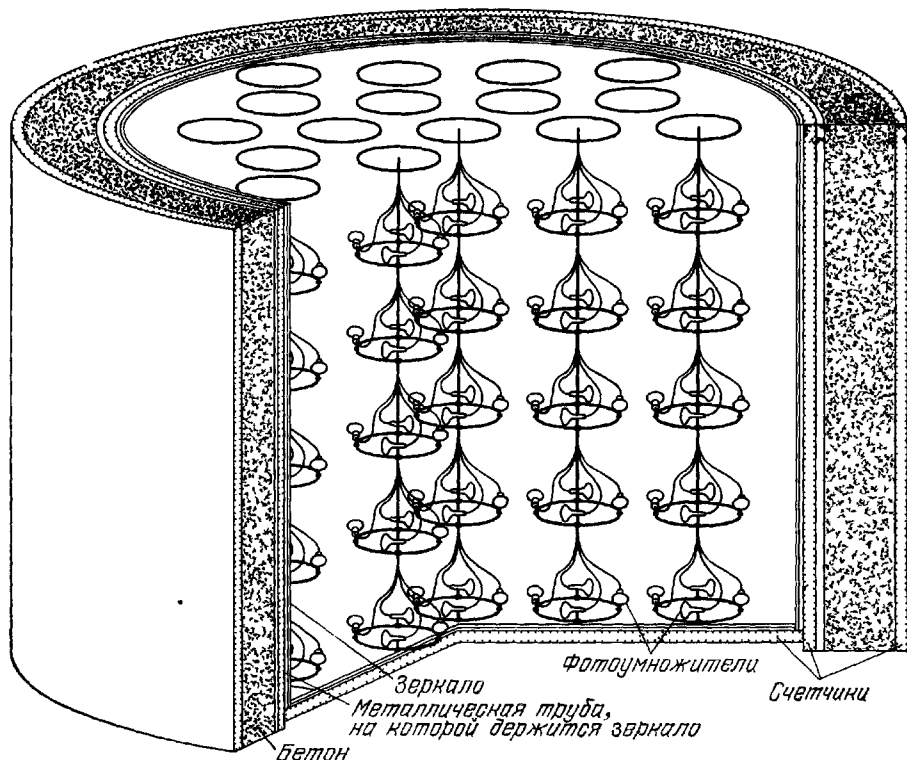


Рис 5. Тысячетонный детектор, который создается в шахте Сильвер Кинг близ Парк-Сити, штат Юта

Детектор содержит 800 фотоумножителей, распределенных в объеме воды. Фотоумножители держатся на проволочных кольцах, а вся камера окружена дополнительными счетчиками и толстой бетонной защитой. Контролируемый объем воды содержит приблизительно $6 \cdot 10^{32}$ протонов и нейтронов. Детектор создается физиками Гарвардского университета, Пардью и Висконсинского университета.

двух из трех констант связи где-то пересекаются, но, чтобы три кривых, представляющих зависимости трех констант связи от энергии пересекались в одной точке, необходимо наложить некоторое условие на их начальные точки, т. е. на величины констант связи при низких энергиях. Используя это условие, мы вычислили, что при наших общих предположениях некоторый параметр (связанный с отношением g_1 и g_2), который описывает объединение слабого и электромагнитного взаимодействий, имеет величину, близкую к 0,2. Эксперименты с взаимодействием электрона и нейтрино дают значение этого параметра между 0,2 и 0,23. Теоретическое и экспериментальное значения настолько близки, что это заставляет нас относиться серьезно к нашему анализу, хотя он и включает в себя экстраполяцию невиданного размера: 13 порядков величины по энергии.

Масса порядка 10^{16} протонных масс так велика, что излучение или поглощение таких тяжелых частиц почти невозможно при экспериментально достижимых энергиях и они могут вызывать только очень малые эффекты в любом реальном эксперименте. Единственная надежда обнаружить эти малые эффекты связана с тем, что они, возможно, нарушают некоторые законы сохранения и тем самым разрешают некоторые процессы, которые без этого были бы строго запрещенными. Один из этих законов сохранения есть закон сохранения барионного числа, который проверяется путем поиска протонного распада. Еще одним таким законом сохранения, который не требуется для непротиворечивости теорий взаимодействий частиц, является сохранение полного числа лептонов (нейтрино, электронов, мюонов и так далее) минус число антилептонов. Несохранение лептонного числа может проявиться в таких процессах как безнейтринный двойной β -распад: распад двух протонов в ядре в два нейтрона плюс два позитрона. Барионное число в этой реакции останется константой, а лептонное число уменьшится на 2. Эта реакция не нарушает закона сохранения энергии, так как нейтроны в конечном состоянии не свободны, а имеют отрицательную энергию связи в ядре. Еще одним признаком нарушения сохранения лептонного числа могла бы быть ненулевая масса нейтрино.

Несколько новых попыток определить время жизни протона делается в настоящее время. Уже ведутся эксперименты в шахте Судан в Миннесоте, в золотой шахте Колар в южной Индии, в туннеле под Монбланом между Францией и Италией и в Баксанской долине в районе Кавказа в СССР. К концу года начнут набор статистики еще три эксперимента: в соляной шахте Мортон в Огайо, в шахте Сильвер Кинг в Юте и еще в туннеле под Монбланом. Рассматривается возможность постановки новых экспериментов.



Техника всех этих экспериментов основана на том, чтобы скомпенсировать крайнюю медленность протонного распада тщательной проверкой очень большой массы вещества. Чем больше масса, тем больше число протонов и связанных нейтронов и, следовательно, тем больше вероятность наблюдения распада. Ожидается, что будет возможно зарегистрировать распад протона или связанного нейтрона при среднем времени жизни, превышающем существующую границу 10^{30} лет. Эксперименты различаются главным образом по составу и количеству проверяемого вещества, по типу и конструкции приборов, используемых для регистрации протонов, распадающихся в веществе, и мерами предосторожности, принятыми в эксперименте для подавления случайных сигналов от космических лучей, включая глубину под землей, на которой проводятся эксперименты.

Поскольку проверяться должна очень большая масса, эксперименты должны использовать сравнительно недорогое вещество, такое, как вода, бетон или железо. В экспериментах в шахте Судан, золотой шахте Колар и в туннеле Монблан, где используют железо или бетон, применяют такие детекторы, как пропорциональные трубки или стримерные трубки, которые способны непосредственно регистрировать энергичные заряженные частицы, образованные при распадах протонов. Эти заряженные частицы имеют короткий пробег в железе или бетоне, поэтому трубки детектора должны располагаться близко друг к другу по всему объему наблюдаемого вещества.

С другой стороны, эксперименты в соляной шахте Мортон, шахте Сильвер Кинг и золотой шахте Хомстейк, которые проверяют прозрачный материал, такой, как вода, используют другую стратегию. Энергия, высвобождаемая при распаде протона, достаточно велика для того, чтобы

электрон, позитрон, мюон или пи-мезон, излучаемые при распаде, имели очень высокую скорость, меньшую, конечно, чем скорость света в вакууме, но большую, чем скорость света в воде. Когда заряженная частица проходит через прозрачную среду со скоростью выше, чем скорость света в этой среде, происходит то, что известно как эффект Черенкова. Это похоже на звуковой удар, образуемый самолетом, летящим со скоростью больше скорости звука в воздухе, с той разницей, что эффект Черенкова это оптический удар, при котором частица излучает световой конус вместо звукового. Красивое голубое сияние черенковского света было замечено еще Марией Кюри в ранних экспериментах по радиоактивности, однако свойства его были детально исследованы в 30-х годах Н. А. Черенковым. Угол между лучами черенковского света и направлением заряженной

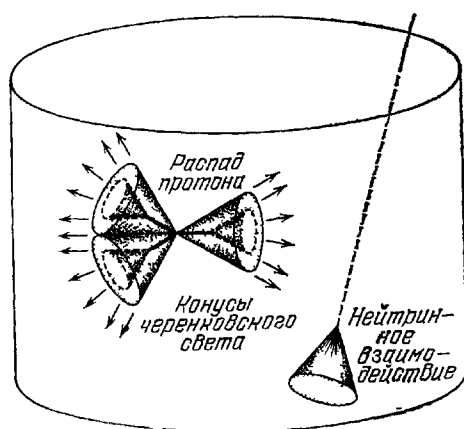


Рис. 6. Черенковское излучение — это не только сигнал о возможном распаде протона, но также о взаимодействии, вызванном частицей высокой энергии из космического пространства.

В действительности большинство вспышек света, регистрируемых фотоумножителями, оказывается не от продуктов распада протона. Число конусов света и их взаимная ориентация помогут отличить распад протона от других событий, таких, как столкновение нейтрино, рожденного космическими лучами в земной атмосфере, с протоном или нейтроном в детекторе. Например распад протона на позитрон и нейтральный пи-мезон образует три конуса черенковского света (одним из которых характерными углами. Позитрон дает один конус, а распаду нейтрального пи-мезона на два фотона, каждый из которых даст ливень электрически заряженных частиц будут соответствовать два других конуса света. При взаимодействии нейтрино образуется только один каскад электрически заряженных частиц и поэтому наблюдается только один конус черенковского излучения.

частицы зависит от отношения скорости заряженной частицы к скорости света в среде. Наибольший свет излучают частицы, идущие почти со скоростью света в вакууме, и в этом случае данный угол имеет характерную для воды величину около 42° .

Наблюдение конуса черенковского света служит сигналом, что в данной среде произошло что-то, в результате чего образовались быстрые заряженные частицы. Далее, для данной начальной скорости ширина конуса и количество излучаемого света зависят только от расстояния, которое проходит заряженная частица до того момента, когда ее скорость станет ниже скорости света в среде, что в свою очередь зависит от ее начальной энергии. Следовательно, зарегистрировав места, куда приходит свет и интенсивность этого света, можно вычислить начальную энергию и направление каждой заряженной частицы. В некоторых случаях движущаяся частица сама может распадаться, излучив другие частицы, которые образуют вторую вспышку черенковского света. Мюон или антимюон, рожденный в протонном распаде, может распадаться, образовав электрон, который излучит черенковский свет. Заряженный пи-мезон может распадаться на медленный мюон или антимюон, который в свою очередь распадается на быстрый электрон или позитрон, который и дает конус света. Нейтральный пи-мезон может распадаться на два фотона, каждый из которых даст ливень заряженных частиц с сопровождающим их черенковским светом. Использование черенковского света для регистрации протонных распадов представляет собой альтернативу прямому наблюдению заряженных частиц и дает возможность восстановить процесс распада и убедиться, что действительно наблюдается распад протона.

Одно из преимуществ использования черенковского света по сравнению с другими методами регистрации протонного распада заключается в том, что свет может проходить в воде большие расстояния, чем сами заряженные частицы. Следовательно, для какого-то заданного объема проверяемого вещества требуется меньше детекторов, чем в эксперименте с использованием непрозрачных веществ, как железо или бетон. С другой стороны, водяной черенковский детектор чувствителен лишь к заряженным частицам, идущим быстрее света в воде. К тому же сравнительно малая плотность воды требует создания большего объема под землей, чтобы разместить некоторую заданную массу проверяемого материала, и эта вода должна поддерживаться в очень чистом состоянии, чтобы она продолжала оставаться прозрачной по отношению к черенковскому свету. Как я уже говорил, продолжается энергичная работа как на экспериментах, использующих в качестве проверяемого вещества воду, так и на тех, которые используют более плотные вещества.

□

Какие вероятности протонного распада могут быть найдены в этих экспериментах? Возьмем в качестве примера планируемый эксперимент с самой большой проверяемой массой, который предлагается проводить в соляной шахте Мортон. Из полной проверяемой массы 10 000 т воды, наружный слой, возможно, около 5000 тонн, будет использован для защиты от фоновых космических лучей. Остающаяся масса 5000 тонн воды содержит $3 \cdot 10^{33}$ протонов и связанных нейтронов. Если среднее время жизни протона около 10^{31} лет, как указывает улучшенная версия анализа, сделанного Джорджи, Квинн и мной, должно происходить около 300 протонных распадов в год. Несколько лет наблюдения дадут несколько событий протонного распада, даже если время жизни составляет 10^{33} лет, но при такой малой вероятности распада уже становится опасным неизбежный фон ложных событий от космических нейтрино и дальнейшее улучшение эксперимента становится затруднительным.

Что мы узнаем, если будет обнаружен распад протона? Разумеется, немедленно будет сделан вывод, что барионное число не сохраняется, и это поддержит растущую уверенность в том, что все сохраняющиеся величины, подобно электрическому заряду, имеют динамический смысл. Далее, если распад протона будет обнаружен в ближайшем будущем, время его жизни будет в пределах от 10^{30} до 10^{33} лет, и это явится еще одним подтверждением тех общих предположений об единстве сильных и электрослабых взаимодействий, которые были использованы Джорджи, Квинн и мной. Существует, однако, множество теорий, которые удовлетворяют этим общим предположениям, включая по крайней мере некоторые версии вышеупомянутых моделей $SU(4)^4$, $SU(5)$, $SO(10)$ и так далее.

Будет затруднительно сказать, какая из этих теорий (если таковая есть) описывает физику при очень высоких энергиях.

Но в одном можно быть уверенным. Если будет обнаружен распад протона, большие усилия будут направлены на его изучение и в скором времени появится второе поколение экспериментов, в которых будет исследоваться не вопрос, распадается ли протон, а вопрос, как он распадается: каковы вероятности различных мод распада?

В качестве подготовки к этому этапу работы многие теоретики разрабатывают наиболее вероятные моды распада протона. (Замечания, сделанные ниже, базируются на двух независимых работах, одна из которых сделана Вилчеком, а вторая Антони Зи и мной.) Интересно то, что можно продвинуться довольно далеко в таком анализе, не делая никаких предположений относительно объединения сильных и электрослабых взаимо-

Таблица II

Таблица экспериментов по поиску протонного распада включает пять детекторов, которые уже действуют, три детектора, которые должны начать запись данных в этом году, и еще пять детекторов, сооружение которых обсуждается.

Эксперименты различны по типу и количеству проверяемого вещества. Помимо этого, они выполняются на разной глубине под землей. Глубина пересчитана на эквивалентную глубину воды, обеспечивающую такую же защиту от космических лучей

Местоположение	Статус	Глубина, м водяного эквивалента	Проверяемое вещество	Детекторы	Институты-участники
Золотая шахта Хомстейк, Южная Дакота	Уже работает	4400	150 т воды (будет увеличено до 900 т)	144 фотоумножителя в воде	Университет Пенсильвании
Золотая шахта Колар, Индия	То же	7600	150 т железа (1/2-дюймовые пластины)	Газовые пропорциональные счетчики между пластинами	Институт фундаментальных исследований Та-та, Бомбей, Университет Осака, Университет Токио
Долина Баксан СССР	» »	850	80 т жидкого сцинтиллятора	1200 фотоумножителей	Институт ядерных исследований, Москва
Шахта Судан, Миннесота	» »	1800	30 т бетона и железа (будет увеличено до 1000 т)	3456 газовых пропорциональных счетчиков в бетоне	Университет Миннесоты, Аргоннская национальная лаборатория
Туннель под Монбланом между Францией и Италией	» »	4270	30 т железа и жидкого сцинтиллятора (будет увеличено до 200 т)	Фотоумножители и стримерные камеры	Институт ядерных исследований, Москва, Туринский университет
Соляная шахта, Мортон, Огайо	Предположительно 1981	1670	10 000 т воды	2400 фотоумножителей в воде	Калифорнийский университет в Ирвине, Мичиганский университет, Брукхэвенская национальная лаборатория
Шахта Сильвер Кинг, Юта	То же	1700	1000 т воды	800 фотоумножителей в воде	Гарвардский университет, Университет Пардю, Висконсинский университет

Т а б л и ц а II (продолжение)

Местоположение	Статус	Глубина, м водяного жива- лента	Проверяемое вещество	Детекторы	Институты- участники
Туннель под Монбланом между Францией и Италией	Предполо- жительно 1981	5000	Первоначаль- но 150 т же- леза (пла- стины санти- метровой толщины)	Стримерные камеры между пла- стинами	Итальянская националь- ная синхро- тронная ла- боратория, Фраскати, Миланский университет, Туринский университет
Туннель Гранд Сас- со, Италия	Сооружа- ется	4000	10 000 т желе- за (трехмил- лиметровые пластины)	Газоразрядные камеры, управляе- мые стрим- мерными камерами	Итальянская националь- ная синхро- тронная ла- боратория, Фраскати Миланский университет, Туринский университет, Римский университет
Япония	Рассмат- ривается	2700	3400 т воды	1056 20-дюй- мовых фото- умножите- лей	Университет Токио, Япон- ская нацио- нальная ла- боратория физики вы- соких энер- гий, Универ- ситет Цуку- ба
Туннель Фре- жюс между Францией и Италией	То же	4500	1500 т железа (пластины от 3 мм до 4 мм тол- щиной)	Газоразрядные трубки и стримерные камеры	Эколь Поли- техник, Па- рижский университет в Орсе, Гор- ная школа в Саклэ
Япония	» »	2700	600 т железа	Неоновые га- зоразрядные трубки	Университет Осака, Уни- верситет Токио, Япон- ская нацио- нальная ла- боратория физики вы- соких энер- гий
Соляная шах- та в Арте- мовске, СССР	» »	600	100 т жидкого сцинтилля- тора	128 фотоумно- жителей	Институт ядерных исследова- ний, Москва

действий. Требуются только известные законы сохранения заряда, цвета и так далее, а также предположение о том, что экзотические частицы, ответственные за протонный распад, достаточно тяжелые, какими они и должны на самом деле быть, чтобы объяснить большое время жизни протона. В этом случае, хотя и можно получить великое множество мод распада, комбинируя излучение и поглощение этих частиц, более сложные моды оказываются подавленными сильнее по сравнению с более простыми модами за счет большой массы экзотических частиц. Если в игру не включаются какие-то специальные обстоятельства, доминирующими модами распада будут те, в которых протон, или связанный нейтрон, распадается на позитрон, или антимюон, или антинейтрино плюс некоторое количество мезонов, а не распады, скажем, на электрон, мюон и нейтрино плюс мезоны. Можно пойти дальше и сделать предсказания о соотношении вероятностей различных мод распада. Например, вероятность распада нейтрона на позитрон и одиночный π - или ρ -мезон в два раза больше вероятности распада протона по аналогичному каналу. Распад протона на позитрон плюс мезоны более вероятен, чем протонный распад на антинейтрино и мезоны.

□

Конечно, не существует абсолютной уверенности, что эти предсказания не будут опровергнуты экспериментом. Если они не подтвердятся, это будет означать, что существуют экзотические частицы намного более легкие, чем 10^{14} массы протона, которые отвечают за более сложные моды распада. Например, распад протона или связанного нейтрона на электрон и мезоны вместо позитрона и мезоны, мог бы идти с заметной вероятностью, если бы существовали экзотические частицы с массой, не больше 10^{10} массы протона. Распад на три электрона (или на любую другую комбинацию трех лептонов) мог бы наблюдаться, если бы существовали экзотические частицы с массой около 10^4 массы протона. Однако такие сравнительно легкие экзотические частицы должны были бы обладать специальными свойствами, чтобы не вызывать «обычного» распада протона (на мезон и позитрон, или антинейтрино) с гораздо большей вероятностью.

Подтверждение этих предсказаний, т. е. обнаружение протонных распадов на мезоны и позитрон или антинейтрино, и с вышеуказанными соотношениями между вероятностями распадов, будет свидетельством того, что распад протона действительно происходит вследствие существования экзотических частиц с массой больше 10^{10} массы протона, но не поможет в выборе какой-то одной теории. Для этой цели придется исследовать более тонкие детали процесса распада. (Например, измерение направления спина позитрона или антимюона, образованного при распаде протона, может быть использовано для определения спина сверхтяжелой экзотической частицы, путем испускания и последующего поглощения которой происходит распад.) Если распад протона будет обнаружен, это достижение будет рассматриваться как триумф экспериментальной изобретательности и явится новой путеводной нитью в физику очень высоких энергий, и одновременно это поставит перед экспериментаторами и теоретиками много новых задач, выполнение которых потребуется для понимания механизма протонного распада.

ЛИТЕРАТУРА

- Georgi H., Quinn R., Weinberg S.— *Phys. Rev. Lett.*, 1974, v. 33, p. 451.
 Weinberg S.— *Ibid.*, 1979, v. 43, p. 1566; *Phys. Rev. Ser. D*, 1980, v. 22, p. 1694;
Science, 1980, v. 210, No. 4474, p. 1212.
 Trefil J. S. *From Atoms to Quarks: An Introduction to the Strange World*.— N. Y.: Charles Scribner's Sons, 1980.