

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

**КОСМИЧЕСКАЯ АСИММЕТРИЯ МЕЖДУ МАТЕРИЕЙ
И АНТИМАТЕРИЕЙ *)****Ф. Вилчек**

Кажется, что Вселенная сегодня почти полностью состоит из материи. Современные данные из космологии и физики частиц (исследования Вселенной в наибольшем и наименьшем масштабах) предлагают объяснение этого факта.

Все фундаментальные составляющие материи встречаются подходящими парами: для каждой частицы имеется античастица той же массы, но противоположная в других отношениях, таких, как электрический заряд. Симметричное удвоение частиц и античастиц требуется для соединения двух великих теорий в физике двадцатого века — релятивизма и квантовой механики. Эта симметрия хорошо подтверждена экспериментом. С 1932 г., когда был открыт позитрон (или антиэлектрон), каталог античастиц быстро рос вместе с каталогом частиц. В действительности частицу и ее античастицу часто открывали одновременно, когда обе они рождались парой в результате столкновения частиц в ускорителе при высоких энергиях. Такие столкновения всегда, кажется, порождают материю и антиматерию в равных количествах; действительно, долгое время считалось, что законы природы не отдают предпочтения материи или антиматерии.

И все же вне лаборатории, в окружающем нас мире, почти никогда не встречается антиматерия. Атомы, образующие Землю, состоят из нейтронов, протонов и электронов, но никогда из их античастиц. Преобладает ли эта асимметрия во всей Вселенной? То есть состоит ли Вселенная целиком в основном из материи с очень небольшой добавкой антиматерии? Если да, то всегда ли существовала асимметрия или Вселенная начиналась с равного количества частиц и античастиц, а дисбаланс каким-то образом развился позже?

Недавние открытия в космологии и физике частиц предлагают ответы на эти вопросы. Они наводят на мысль, что в первый момент после большого взрыва, когда Вселенная была гораздо горячее и плотнее, чем сейчас, имелись равные количества материи и антиматерии. Однако еще до того, как Вселенная достигла возраста 10^{-35} с, частые столкновения между

*) Wilczek Frank. The Cosmic Assymetry between Matter and AntiMatter.— Scientific American, December 1980, v. 243, pp. 60—68.— Перевод В. Ю. Цейтлина.
Ф. Вилчек — профессор физики Принстонского университета, США.

© Scientific American, Inc., 1980.

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

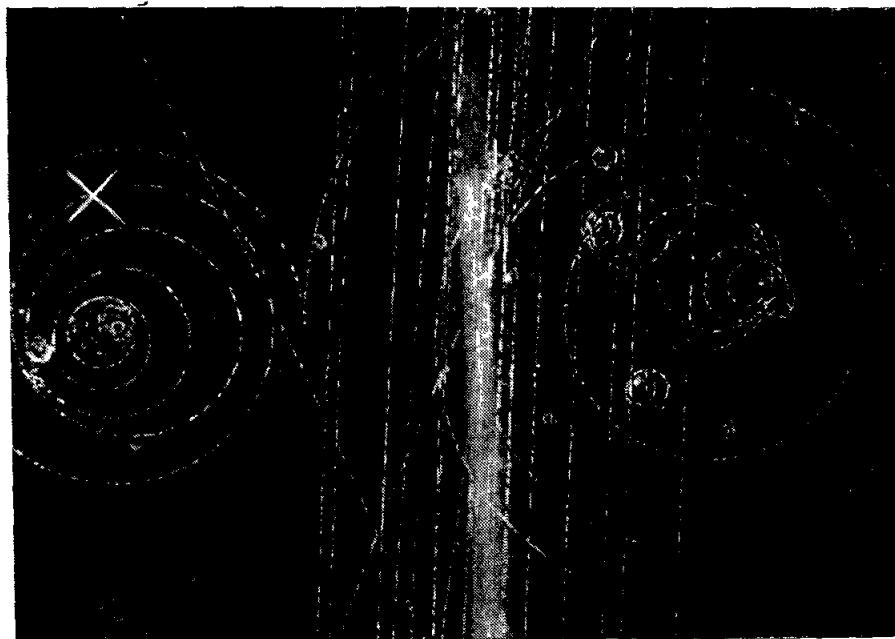


Рис. 1. Рождение антиматерии становится видимым в камере, в которой траектория любой частицы, имеющей электрический заряд, отмечается дорожкой из пузырьков в жидком гелии.

Здесь антиматерией является позитрон, чья закрученная по часовой стрелке траектория заполняет правую часть фотографии. Меньшая спираль, закрученная против часовой стрелки, представляет траекторию электрона. Позитрон — античастица электрона: обе они одинаковы по массе, хотя по некоторым другим свойствам, таким как электрический заряд, они противоположны. Позитрон и электрон в паре родились в распаде фотона, или кванта электромагнитного излучения. Траектория фотона не видна, потому что фотоны не имеют электрического заряда и не вызывают пузырьки в гелии. Для того чтобы изогнуть траектории частиц в камере, было приложено магнитное поле. В экспериментах при высоких энергиях обычным является рождение пар частица — античастица, хотя в больших масштабах Вселенная оказывается состоящей в основном из материи. (Фотография была сделана Н. П. Сэймюсом из Брукхейвенской Национальной лаборатории.)

частицами создали условия, прямо ведущие к асимметрии между материей и антиматерией. С тех пор и навсегда асимметрия была заключена во Вселенную. Дорога, приводящая к этим выводам, местами еще не замощена, но я попытаюсь показать, что маршрут выбран правильно.

□

Как можно убедиться в том, что Вселенная состоит только из материи? Можно легко продемонстрировать, что материя и антиматерия не могут быть однородно перемешаны. Как только частица и соответствующая античастица встречаются, они аннигилируют друг с другом и их масса превращается в энергию. Поэтому звезда, сделанная пополам из материи и антиматерии, моментально бы исчезла в титаническом взрыве. Остается, однако, возможность сосуществования материи и антиматерии, если они заключены в изолированных областях, разделенных пустым пространством.

Одну группу доводов в пользу преобладания материи над антиматерией дают космические лучи — высокоэнергетические частицы, прилетающие из космоса. Они неизменно оказываются частицами материи, такими, как протоны, электроны и атомные ядра, сделанные из протонов и нейтронов; античастицы не наблюдаются. Хотя природа космических лучей еще не полностью понята, они определенно приходят из источников, располо-

женных по всей галактике, а некоторые могут иметь еще более отдаленный источник. Представляется установленным, следовательно, что Млечный Путь состоит только из материи, и есть лишь немногим меньшая убежденность, что группа галактик, членом которой является Млечный Путь, тоже состоит из материи.

Удостовериться, что более отдаленные галактики состоят из материи, более сложно. Просто глядя на галактику, не догадаешься, сделана ли она из материи или антиматерии. «Глядя на» подразумевает «детектируя фотоны, или кванты электромагнитного излучения». Фотоны отвечают не только видимому свету, но и радиоволнам, X-лучам, γ -лучам и т. д. Сложность в том, что фотон является своей собственной античастицей и нет возможности отличить фотон, испущенный материей, от испущенного антиматерией. В результате свет от галактики из материи был бы идентичен свету от галактики из антиматерии, даже по детальной структуре спектра. Например, характерные линии излучения атома водорода точно дублировались бы линиями излучения антиводородного атома.

Имеется одна ситуация, в которой фотонные наблюдения могли бы косвенно вскрыть присутствие антиматерии. Если галактика из антиматерии была бы расположена близко к галактике из материи, пограничный район между ними был бы местом частых аннигиляций частиц и античастиц. Энергия каждой такой аннигиляции в конце концов появилась бы в форме фотонов с длинами волн в гамма-диапазоне. Следовательно, граничный район был бы местом, где обильно испускается гамма-излучение. Астрономические источники гамма-излучения известны и изучаются, но источник с нужными характеристиками не найден. Этот аргумент, однако, несуществен, если материя отделена от антиматерии пустым пространством. В лучшем случае неудача в наблюдении сильного γ -излучения предполагает, что скопления галактик должны состоять полностью из материи или полностью из антиматерии, а не из смеси. Скопления пропитывает межгалактический газ, и любая разница в составе внутри скопления даст вклад в гамма-излучение.

В будущем вопрос, существуют ли значительные образования антиматерии во Вселенной, может быть решен с появлением телескопов, детектирующих не фотоны, а нейтрино. В отличие от фотона, нейтрино имеет античастицу. Нейтрино и антинейтрино испускались бы в ядерных реакциях в материи и антиматерии в разных пропорциях. Звезда, состоящая из материи, излучает в основном нейтрино, тогда как звезда из антиматерии — в большинстве антинейтрино. Ясности здесь еще нет, так как строительство нейтринного телескопа — сложнейшая задача. Нейтрино имеют пренебрежимо малую массу и вообще едва взаимодействуют с материей; их детектирование проблематично.

По крайней мере в настоящее время, преобладающим среди астрономов и астрофизиков является мнение, что в теперешней Вселенной материя доминирует по сравнению с антиматерией. Как я уже говорил, доводы в поддержку этого взгляда не неотразимы, хотя, с другой стороны, заметно отсутствуют доводы в пользу существования антиматерии. Трудно вообразить, как материя и антиматерия в ранней Вселенной могли быть изолированы в разных областях, и это представляется решающим соображением. Более вероятным кажется процесс их взаимной аннигиляции повсюду во Вселенной.

□

Если ныне Вселенная в основном состоит из материи, то естественно спросить, откуда взялась эта асимметрия. Одна возможность — то, что предпочтение материи было отдано с самого начала, что в первичном ве-

шестве с момента большого взрыва преобладала материя. Эта гипотеза не может быть отвергнута, по крайней мере сейчас, но она не очень удовлетворительна. В сущности, любой состав Вселенной мог бы быть объяснен таким же образом. Более того, гипотеза изначального дисбаланса придает фундаментальный статус начальным условиям, что явно не имеет разумного объяснения; любая альтернатива представляется равно правдоподобной. Если бы можно было построить теорию, согласующуюся с установившимися физическими принципами, в которой Вселенная изначально симметрична, то это было бы более привлекательным. Именно такую теорию предлагает соединение космологии и физики частиц.

Решающим событием для современной космологии было открытие Э. П. Хабблом в 20-е годы того, что отдаленные галактики удаляются от Земли со скоростями, пропорциональными расстояниям до них. Разбегание галактик означает, что вся Вселенная расширяется. Экстраполяция назад во времени приводит к выводу, что примерно 10 миллиардов лет назад вещество, которое сейчас образует галактики, возникло взрывным образом из сверхплотного состояния. Действительно, проследивая эволюцию вспять до ее математического предела, можно предположить, что вся Вселенная была изначально точкой без протяженности.

В момент большого взрыва плотность и температура Вселенной были бесконечны. Температура быстро падала, но на протяжении первой минуты она оставалась больше 10^{10} К. В таких условиях любые атомы, которые могли образоваться, моментально разрывались на составные части; даже атомные ядра не могли выжить и распадались на составляющие их частицы. Другими словами, Вселенная в ее первые моменты была горячей плазмой свободных частиц, многие из которых, такие как электрон и протон, были электрически заряжены. Из-за того, что движущиеся заряженные частицы испускают электромагнитное излучение, ранняя Вселенная изобиловала фотонами.

Расширяющаяся Вселенная остывала подобно тому, как охлаждается расширяющийся газ, и по прошествии примерно трех минут после большого взрыва протоны и нейтроны начали, соединяясь, образовывать ядра атомов гелия. Оставшиеся несвязанными протоны в конце концов становились ядрами водорода. (Все тяжелые элементы, которые довольно редки по космическим масштабам, были образованы из водорода и гелия в ядрах звезд и взрывных сверхновых.) Делая простейшие предположения об условиях в ранней Вселенной, которые согласуются с известными физическими законами, можно вычислить отношение гелия к водороду, которое оказывается около одной третьей по весу. Эта величина находится в хорошем согласии с отношением, даваемым оценками для сегодняшней Вселенной. Успех этого предсказания является свидетельством понимания того, что представляла собой Вселенная первые несколько минут после ее рождения.

После примерно 10 000 лет расширения Вселенная оказалась достаточно холодной для того, чтобы последние из свободных заряженных частиц были включены в атомы. Каждый атом электрически нейтрален, так как в нем находится равное число положительных и отрицательных зарядов. Взаимодействие фотонов с нейтральной материей очень слабо, и с этого времени материя и электромагнитное излучение во Вселенной по существу не связаны. После этого излучение пассивно участвовало в расширении, все время охлаждаясь. Как излучение может остывать и как в первую очередь оно может иметь температуру? Если излучение рассматривается как газ фотонов, то последний охлаждается при расширении, отчасти так, как газ частиц материи, так как средняя энергия фотонов уменьшается. Если излучение рассматривается как волна, то расширение

пространства увеличивает расстояние между двумя любыми последовательными гребнями. Более длинные волны отвечают меньшим энергиям фотона.

В 1964 г. было обнаружено, что на Землю равномерно по всем направлениям падает микроволновое излучение. Оно соответствует фотонному газу, который заполняет Вселенную, с плотностью около 300 фотонов на кубический сантиметр. Температура этого излучения 2,7 К — величина, гораздо меньшая примерно 10 000 градусов во времена распада. Наличие такого излучения является дальнейшим свидетельством правильности приведенной теоретической реконструкции ранней Вселенной. Ободренные этим успехом, мы можем попытаться экстраполировать назад к самым ранним моментам существования Вселенной, чтобы посмотреть, не могли ли царившие тогда экстремальные условия отвечать за нынешнюю асимметрию между материей и антиматерией.

□

В первые несколько секунд существования Вселенной частицы горячего первобытного газа обладали энергией, превышающей возможности даже самых больших из современных ускорителей частиц. Взаимодействия частиц при таких энергиях могли качественно отличаться от ныне доступных наблюдению. Даже если характер событий в ранней Вселенной отличался от возможных сегодня, тем не менее можно предположить, что законы природы, управляющие событиями, остались неизменными. Тогда то, что требуется, — это теория, которая бы предсказывала, как частицы взаимодействуют при очень высоких энергиях, на основе законов, выведенных из событий при гораздо более низких энергиях.

Среди обсуждаемых законов природы есть такие, которые применяются к квантовым числам. Квантовое число по существу есть удобный ярлык, принятый, чтобы помочь следить за различными свойствами частиц. Например, электрический заряд может быть выражен как квантовое число: протону приписывается величина $+1$, электрону -1 и фотону и другим нейтральным частицам величина нуль. Закон сохранения применительно к электрическому заряду гласит, что квантовое число суммарного заряда не может изменяться во взаимодействии; сумма всех квантовых чисел заряда после взаимодействия должна быть равна их сумме до взаимодействия.

Важно отметить, что сохранение электрического заряда не запрещает изменение количества заряженных частиц. Электрон и позитрон могут аннигилировать, уменьшая количество заряженных частиц на два, полный же заряд тем не менее есть нуль как до, так и после аннигиляции. Противоположный процесс, в котором электрон и позитрон рождаются из чистой энергии, подчиняется закону сохранения по тем же причинам. В действительности любая частица может быть рождена или уничтожена одновременно со своей античастицей и все квантовые числа будут автоматически сохранены.

Значительный интерес для прослеживания источника космической асимметрии между материей и антиматерией представляет квантовое число, называемое барионным зарядом. Барионы — это большое семейство частиц, наиболее знакомыми членами которого являются протон и нейтрон. В качестве основных составляющих атомного ядра барионы явно играют важную роль в структуре обычной материи. Протону, нейтрону и многим другим, имеющим к ним отношение, барионам приписывается барионное число $+1$. Для антипротона, антинейтрона и других антибарионов барионное число есть -1 . Все другие частицы, включая пионы, мезоны, нейтрино, электрон, фотон и их античастицы имеют барионный заряд нуль.

Сохранение барионного числа — это утверждение, что в любой реакции барионное число всех частиц в начальном состоянии равно барионному числу всех частиц в конечном состоянии. Опять количество частиц может меняться, как в случае рождения или аннигиляции пары протон — антипротон, но полное барионное число неизменно. Предположим, например, что два протона (с полным барионным числом $+2$) сталкиваются при высокой энергии. Продукты реакции могли бы включать четыре протона, нейтрон, три антипротона и некоторое число пионов; сложение барионных чисел показывает, что сумма остается равной $+2$.

□

Электрический заряд — это величина, которая считается сохраняющейся при любых обстоятельствах. Абсолютное сохранение барионного числа менее определено, и действительно имеется сильное подозрение, что закон изредка нарушается.

Наиболее убедительным свидетельством в пользу сохранения барионного числа является стабильность протона. Будучи наименее массивной из частиц с барионным числом $+1$, протон не может распасться на более легкие частицы без нарушения этого закона сохранения. Обнаружение распада протона, таким образом, было бы непосредственным указанием на то, что закон не всегда имеет силу.

Никто еще не наблюдал распад протона, и даже грубые расчеты говорят о том, что его время жизни велико. Если бы протоны распадались, например, в человеческой кости, высвобождающаяся энергия увеличила бы заболеваемость раком. На основании этого время жизни протона должно быть больше, чем 10^{16} лет. Если бы протоны распадались на Юпитере, их энергия давала бы вклад в светимость планеты. На основании этого время жизни больше, чем 10^{18} лет. Систематические эксперименты говорят о том, что на самом деле время жизни протона больше 10^{29} лет. Для сравнения, возраст Вселенной — только 10^{10} лет. Очевидно, если протон действительно распадается, то это чрезвычайно редкое событие. Если реальное время жизни окажется 10^{30} лет, то в 100 тоннах вещества (содержащих 10^{31} протонов) распадается в среднем 10 протонов в год. Малая вероятность распада говорит как о степени строгости закона сохранения барионного числа, так и о трудности проведения экспериментов по поиску его нарушения. Несмотря на это, несколько экспериментов такого рода находится в стадии подготовки.

Говорить о том, что во Вселенной есть избыток материи по сравнению с антиматерией, все равно, что говорить, что Вселенная имеет положительное барионное число. Если бы его закон сохранения был абсолютным, это число для Вселенной было бы постоянным вечно. Могло бы быть больше и барионов, и антибарионов вместе, но число барионов минус число антибарионов должно было бы всегда быть тем же.

Рассмотрим состояние Вселенной, когда ее возраст был одна сотая секунды и она имела температуру 10^{14} К. Для любой заданной температуры имеется равновесная смесь различных типов частиц такая, что для каждого типа число частиц, создаваемых в результате столкновений или распадов, равно числу уничтожаемых частиц. В ранней Вселенной при 10^{14} К равновесная смесь включала около миллиарда протонов и миллиарда антипротонов на каждый протон в теперешней Вселенной. Если барионное число Вселенной было таким же, как сейчас, отношение протонов к антипротонам должно было быть примерно $1\,000\,000\,001$ к $1\,000\,000\,000$ и, следовательно, асимметрия была бы еле заметной.

Позднее почти все протоны аннигилировали в столкновениях с антипротонами. Лишь сохранение барионного числа предупредило полное унич-

толжение всех барионов и антибарионов. С этой точки зрения все современные галактики, звезды, планеты и чувствующие существа есть результат дисбаланса в отношении один к миллиарду. Этот малый дисбаланс — раннее проявление космической асимметрии между материей и антиматерией — и нуждается в объяснении. Как только избыток материи установлен, последующая эволюция Вселенной является сравнительно ясной; источник начальной асимметрии есть более глубокая загадка. В частности, если Вселенная эволюционировала от начального состояния, которое было полностью симметричным по отношению к материи и антиматерии (состояние, имеющее барионное число нуль), до асимметричного состояния, в котором барионное число больше нуля и количество протонов превосходит количество антипротонов, то на некотором этапе должно было произойти нарушение сохранения барионного числа.

Первое указание на то, что сохранение барионного числа не может быть точным, пришло из области исследований, лишь отдаленно касающейся вопроса: теории черных дыр. Математическое исследование показало, что единственными свойствами черной дыры, которые могут быть измерены внешним наблюдателем, являются ее масса, угловой момент и электрический заряд. Из этого списка явно выпадает барионное число. Следовательно, черная дыра, образовавшаяся в результате коллапса звезды, будет неотличима от образовавшейся в результате коллапса антизвезды той же массы, углового момента и заряда, хотя барионное число у звезды положительно, тогда как у антизвезды отрицательно. Явно отсутствует способ приписать барионное число черной дыре и быть уверенным, что барионное число Вселенной сохраняется.

Предполагаемое нарушение закона сохранения черными дырами указывает, что подобный механизм в микроскопическом масштабе мог бы привести к распаду протона. В этом гипотетическом процессе протон поглощается виртуальной черной дырой: мгновенной, короткоживущей флуктуацией геометрии пространства-времени, которая в принципе может возникнуть где угодно в любой момент времени. Виртуальная черная дыра моментально распадается на позитрон и гамма-квант. В этих частицах восстанавливается масса или энергия протона, а также его положительный электрический заряд; его барионное число, однако, необратимо потеряно. Хотя детали такого гипотетического процесса неясны, оценки говорят, что он приводит к времени жизни протона порядка 10^{40} лет. Если барионное число нарушается таким образом, то нарушение действительно ничтожно.

Второе указание на то, что сохранение барионного числа только приближительное, немного менее экзотично, а также более ощутимо влияет на время жизни протона. Этот второй возможный механизм есть результат революционных достижений в теориях, описывающих взаимодействия между элементарными частицами. Чтобы быть более точным, это достигнуто только в прошедшем десятилетии результатом понимания того, что «сильные» силы, ответственные за образование и удержание от распада атомных ядер, и «слабые» силы, ответственные за большинство радиоактивных распадов, довольно похожи на электромагнетизм.

□

Как могло более глубокое понимание этих сил, которые не нарушают сохранение барионного числа, привести к теориям, предсказывающим последнее? Объяснению должно предшествовать более детальное обсуждение этих сил.

Из трех сил только электромагнетизм заурядно проявляется в макроскопическом мире, который люди непосредственно ощущают. Электро-

магнитные силы действуют только между двумя частицами, имеющими электрический заряд; взаимодействие может быть описано как обмен третьей частицей, а именно фотоном. О фотоне говорят, что это векторная частица — обозначение, даваемое каждой частице, чей спиновой момент, измеренный в фундаментальных единицах, равен 1. Возможно, наиболее фундаментальным свойством электромагнетизма является то, что он может быть описан калибровочно-инвариантной теорией. В теории такого рода источник силы связывается с законом сохранения, в данном случае — с сохранением электрического заряда. Взаимодействие векторных

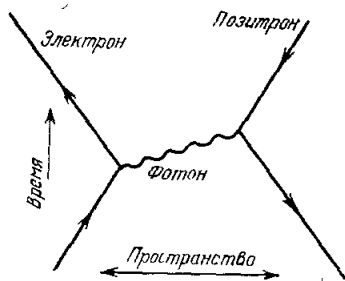


Рис. 2. Электромагнитная сила может быть представлена как обмен фотоном между двумя электрически заряженными частицами.

Взаимодействие нарисовано на диаграмме Фейнмана, где время увеличивается снизу вверх и единственное измерение, представляющее пространство, — слева направо. Линия внизу слева изображает электрон, линия внизу справа изображает позитрон. Стрелки показывают направление, в котором течет электрический заряд. (В математическом описании взаимодействия позитрон, движущийся вперед во времени, эквивалентен его античастице, электрону, движущемуся назад во времени.) При обмене фотоном траектория каждой частицы изменяется.

частиц с сохраняющимся зарядом — характерная черта калибровочных теорий.

Во всех этих отношениях сильные взаимодействия такие же. В калибровочной теории сильные взаимодействия могут быть описаны как обмен векторной частицей между двумя другими частицами, имеющими определенный тип заряда. Однако векторная частица — это не фотон, а гипотетическая сущность, называемая глюоном, и зарядом здесь является не электрический заряд, а некое свойство, называемое цветом. Цветной заряд не имеет, разумеется, ничего общего с цветом в обычном смысле. Слово «заряд» в этом контексте менее надуманное. Оно подходящее, потому что цветной заряд играет в основном ту же роль в сильных взаимодействиях, какую электрический заряд играет в электромагнитных.

Одно из различий между электромагнетизмом и сильными взаимодействиями — то, что электромагнетизм имеет только один тип заряда, тогда как в сильных взаимодействиях их три, обозначаемые R , G и B (англ. — red, green, blue). Цвета присущи фундаментальным составляющим всех сильно взаимодействующих частиц — кваркам. У каждого кварка есть единственный цвет, определяемый путем расстановки трех квантовых чисел цвета. Для красных кварков R равно $+1$, тогда как G и B равны нулю. Аналогично, для зеленых кварков $G = +1$, а для синих кварков $B = +1$, и остальные цветовые квантовые числа равны нулю. В теории требуются восемь типов глюонов. Шесть типов переводят кварк одного цвета в кварк другого цвета всеми возможными способами, именно красный в зеленый, красный в синий, зеленый в красный, зеленый в синий, синий в красный и синий в зеленый. Оставшиеся два глюона напоминают фотон в том смысле, что они переносят силу между «заряженными» частицами, но не меняют заряд.

Свойством цветных зарядов является то, что они могут уничтожить друг друга. Например, сочетание одного красного, одного зеленого и одного синего кварка — бесцветная составная частица, с которой глюоны не взаимодействуют. (Подобным образом частицы с противоположными электрическими зарядами могут образовать нейтральный составной объект.) По-видимому, в природе встречаются только такие бесцветные ком-

бинации кварков. Все барионы состоят из трех кварков, по одному кварку каждого цвета. Мезоны, составляющие другую категорию сильно взаимодействующих частиц, состоят каждый из кварка и антикварка.

Второе различие между сильными взаимодействиями и электромагнетизмом — то, что глюоны сами заряжены, тогда как фотон — нет. Например, у глюона, который поглощается красным кварком и превращает его в зеленый кварк, R равно -1 , G равно $+1$ и B равно нулю; при этой комбинации цветов и антицветов цветной заряд в данном взаимодействии

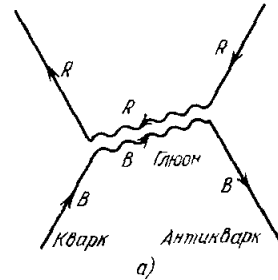
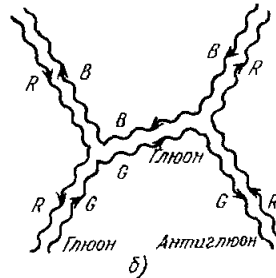


Рис. 3. «Сильная» сила может быть представлена как обмен глюоном между двумя частицами, обладающими качеством, называемым цветом.

На рис. а) эти частицы — кварки; слева — синий (обозначен буквой B), справа — антисиний (см. направление стрелки). Сильное взаимодействие изменяет траекторию, а также цвет каждого кварка. Чтобы взаимодействие сохраняло цвет, глюон должен обладать как цветом, так и (другим) антицветом; в результате глюоны могут сильно взаимодействовать друг с другом. Рассеяние глюона и антиглюона показано на рис. б). Сильные взаимодействия связывают протоны и нейтроны в атомном ядре. Они также связывают вместе кварки, которые, как считается, составляют каждый протон и нейтрон



сохраняется. Так как глюоны действуют на цветные частицы и так как сами глюоны цветные, они взаимодействуют друг с другом. В противоположность этому, фотон электрически нейтрален и не взаимодействует с другими фотонами. Эта разница имеет далеко идущие динамические следствия: на малых расстояниях сильные взаимодействия ослабевают. Когда кварки расположены близко друг к другу, они связаны очень слабо, но их связь становится достаточно сильной, стоит их развести подальше. (В данном контексте достаточно большим расстоянием является 10^{-13} см.)

Такой парадоксальный закон изменения силы много объясняет. С середины 60-х годов было известно, что свойства сильно взаимодействующих частиц можно описать с помощью кварковой модели, но никто никогда не видел изолированного кварка. Более того, использование описания сильно взаимодействующей частицы как составленной из кварков основано на приближении, в котором кварки являются по существу невзаимодействующими частицами, находящимися внутри общего «мешка». Казалось загадочным, что такие сильно взаимодействующие частицы, как кварки, могли успешно трактоваться как невзаимодействующие. Представление о том, что сильное взаимодействие между кварками ослабевает, когда кварки сближаются, как раз и объясняет, почему кварки внутри «мешка» едва взаимодействуют друг с другом и тем не менее не могут быть далеко разнесены. Может оказаться, что изолировать один кварк невозможно. Калибровочная теория сильных взаимодействий, которая лежит в основе кварковой модели, приводит ко многим экспериментальным предсказаниям, которые пока подтверждались с большим успехом. Эта теория становится общепринятой.

□

Слабые взаимодействия могут быть описаны в основном так же, как электромагнитные и сильные, но с некоторыми собственными особенностями. Во-первых, имеются два типа зарядов, аналогичных трем цветным зарядам сильных взаимодействий. Я буду называть их P и O (для цветов —

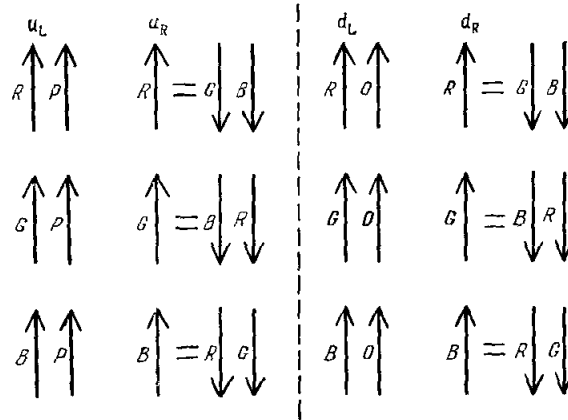


Рис. 4. Изображено семейство из 12 кварков, которые появляются в диаграммах Фейнмана.

У каждого кварка имеется 4 существенных атрибута. Во-первых, каждый кварк называется u (от up — верхний) или d (down — нижний). Электрический заряд u -кварка $+2/3$, электрический заряд d -кварка $-1/3$ (заряд электрона есть -1 , позитрона или протона $+1$). Во-вторых, у каждого кварка имеется цвет по отношению к сильным взаимодействиям: красный, зеленый или синий (R , G , B на рисунке). В-третьих, каждый кварк обладает спином, ось которого направлена по направлению движения частицы (индекс R для правовинтовых частиц) или противоположно ему (индекс L для левовинтовых частиц). Наконец, левовинтовые кварки обладают цветом по отношению к силам природы, называемым слабыми взаимодействиями, которые обуславливают большинство радиоактивных распадов. Этот цвет — пурпурный (P на рисунке) для u -кварков и оранжевый (O на рисунке) для d -кварков. Любопытно, что слабые силы не затрагивают правовинтовые частицы или левовинтовые античастицы. В математическом формализме сильных взаимодействий кварк с данным цветом эквивалентен кварку без этого цвета, но с двумя другими антицветами. Эта эквивалентность показана на примере каждого правовинтового кварка. Обращение стрелок (не показанное на рисунке) превращает кварк в соответствующий антикварк.

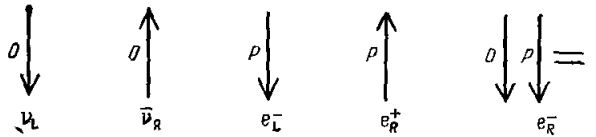


Рис. 5. Слабо взаимодействующие частицы включают левовинтовое нейтрино, его античастицу — правовинтовое антинейтрино, левовинтовой электрон и его античастицу — правовинтовой позитрон.

Эти частицы не взаимодействуют сильно, и поэтому они показаны без «сильных» цветных зарядов. Пятой частицей является правовинтовой электрон. Ему приданы два «слабых» цветных заряда — конфигурация, которая эквивалентна состоянию вовсе без цветного заряда (линия без буквы и без стрелки на рисунке).

пурпурного и оранжевого). Переносят взаимодействие три векторные частицы, называемые W^+ , W^- и Z . У этих частиц есть большие массы, в отличие от фотона и глюонов, которые безмассовы. Частица большой массы может спонтанно возникнуть только в виде короткоживущей флуктуации; если она короткоживущая, она не может далеко распространиться и в результате слабые взаимодействия имеют очень короткий радиус действия. Более удивительной характеристикой слабой силы является то, что она действует только на частицы с определенными геометрическими свойствами. Кварки, электроны, нейтрино и некоторые другие частицы могут классифицироваться как правовинтовые или левовинтовые согласно относительной ориентации их спинового момента и линейного движения.

У правовинтовой частицы ось спина направлена параллельно направлению движения, у левовинтовой — антипараллельно. Слабое взаимодействие затрагивает только левовинтовые частицы и правовинтовые античастицы.

Итак, сильные и слабые взаимодействия требуют наличия пяти типов цветных зарядов (красный, зеленый и синий для сильных и пурпурный с оранжевым для слабых), а также векторных частиц, переводящих некоторые из этих цветов друг в друга.

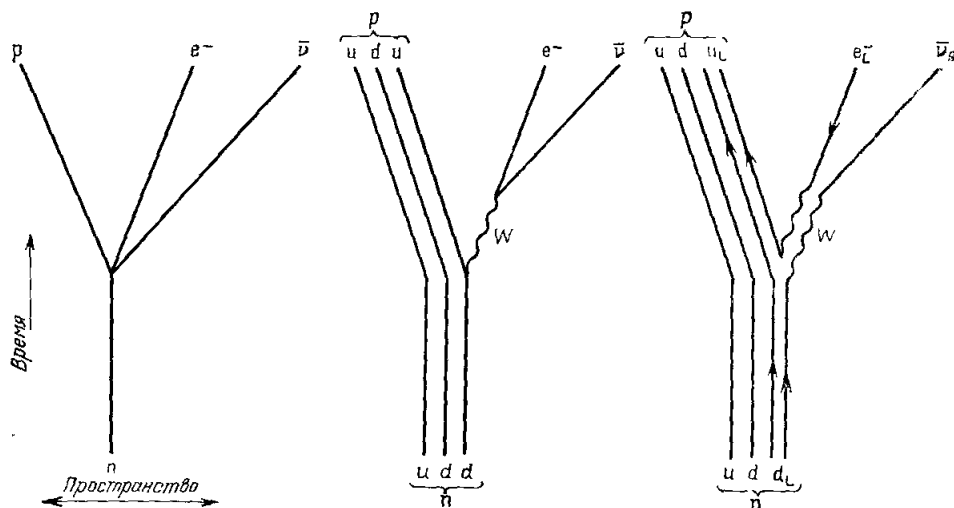


Рис. 6. Распад нейтрона — это слабое взаимодействие, которое ограничивает время жизни этой частицы в среднем всего 15 минутами, если она не связана в атомном ядре. С самой общей точки зрения (левая диаграмма Фейнмана) при распаде нейтрон (n) переходит в протон (p), электрон (e^-) и антинейтрино ($\bar{\nu}$). При более тонком анализе (в центре) выясняется, что нейтрон состоит из трех кварков, и только d -кварк, расположенный произвольно справа, затрагивается в распаде. Левовинтовой d -кварк (d_L) распадется на менее массивный левовинтовой u -кварк (u_L), электрон и антинейтрино. d_L -кварк был красным по отношению к сильным взаимодействиям и оранжевым по отношению к слабым (буквы R и O на диаграмме справа). Оранжевый заряд преобразуется с помощью короткоживущей (или виртуальной) частицы (W), которая одновременно оранжевая и антипурпурная. Изменяются только «слабые» заряды (как и раньше, направление потока цветного заряда указано стрелкой). Слабое взаимодействие типа, изображенного на диаграмме, характерно не только для распада нейтрона, но также для большинства других видов радиоактивного распада. Цвета незатронутых кварков не показаны на диаграмме справа.

В теориях, которые я здесь обрисовал, «сильная» сила есть механизм перестановки красного, зеленого и синего цветов кварков. «Слабая» сила подобным образом меняет пурпурное и оранжевое цветные квантовые числа частиц. Если эти теории должны быть поистине едиными, можно ожидать присутствия некоторых добавочных сил, преобразующих «сильные» цвета в «слабые» и наоборот. Кроме того, что схема, включающая такие новые силы, эстетически привлекательна, все цветные частицы довольно точно в нее укладываются. Более того, она дает определенные предсказания. Например, она предсказывает массу W -частицы, которая пока еще не зарегистрирована.

Именно за счет введения новых сил объединенные теории идут на компромисс с сохранением барионного числа и позволяют протону распадаться. Новые векторные частицы, изменяющие цвет, вводятся как мостик между частицами с «сильным» цветом, такими, как кварки, составляющие протон, и частицами только со «слабым» цветом, чье барионное число равно нулю. Я буду обозначать эти векторные частицы X . Объединяющая теория предсказывает, что X имеет массу, равную 10^{15} масс протона (и примерно сравнима с массой блохи, сжатой в объеме лишь 10^{-27} см

в поперечнике). Из-за того, что X-частица так массивна, она может спонтанно рождаться крайне редко. Соответственно, было оценено, что среднее время жизни протона велико, но не бесконечно; время жизни должно быть порядка 10^{31} лет.

Время жизни в 10^{31} лет говорит о том, что во Вселенной сегодня барионное число нарушено лишь чуть-чуть. Однако, как я уже отмечал, наблюдаемая в настоящее время асимметрия материи и антиматерии соответствует асимметрии только в одну миллиардную в ранней Вселенной.

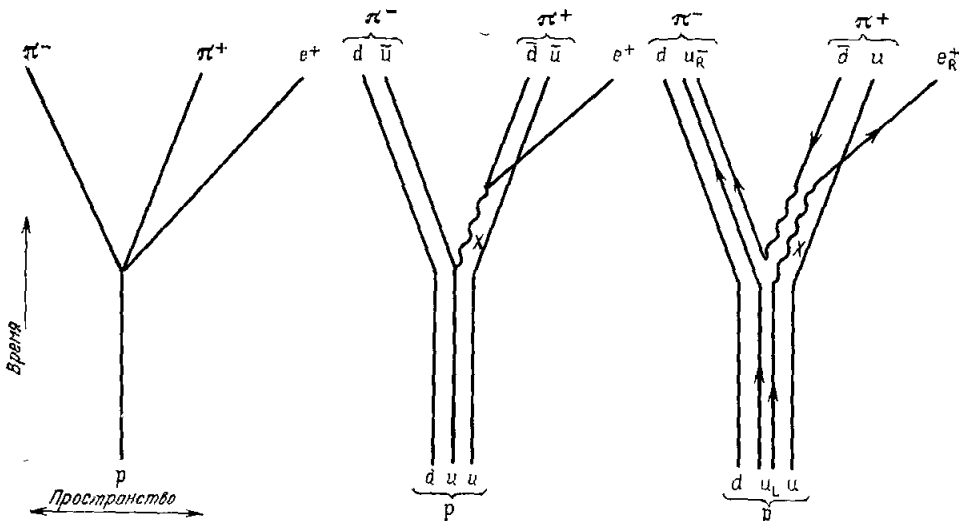


Рис. 7. Распад протона предсказывается теориями, которые объединяют сильные и слабые взаимодействия.

Эти теории предполагают существование виртуальной частицы (X), у которой есть как «сильный», так и «слабый» цвет и которая обуславливает распад. Ее спонтанное рождение редко, и поэтому протон, как считается, живет в среднем 10^{31} лет. В изображенной моде распада протон (p) превращается в два заряженных пиона (π^+ и π^-) и позитрон (e^+). Микроскопическим событием, ответственным за распад, является переход одного кварка в два антикварка и позитрон. Снова на диаграмме слева показан распад в целом, на диаграмме в центре частицы разложены на кварки, и правая диаграмма показывает поток цветового заряда для преобразующегося кварка. Протон — самая легкая из семейства частиц, называемых барионами. Если протон может распадаться, то утверждение, что число барионов во Вселенной постоянно, не есть закон природы. Этот закон должен был быть нарушен в некоторой эре истории Вселенной, если асимметрия между материей и антиматерией развилась в ранней Вселенной.

Более того, способ распада, при котором необходимо рождение нестабильной тяжелой частицы, мог вполне быть более распространенным в ранние моменты Вселенной, когда тяжелые частицы могли свободно рождаться в сверхвысокоэнергетических соударениях.

□

Я перехожу теперь к идее о том, что физические законы не чувствуют различия между материей и антиматерией. История этой идеи представляет собой ряд несбывшихся ожиданий. До середины 50-х годов обычно считалось, что законы физики не изменятся, если все эксперименты повторить в зеркально-отраженном мире. Другими словами, считалось, что не может быть сделано абсолютного различия между правым и левым. Однако позже множество экспериментов вскрыли, что симметрия относительно зеркального отражения заметно нарушается в слабых взаимодействиях. Примером может быть распад мюона на электрон, нейтрино и антинейтрино. В более чем 999 распадах из 1000 электрон оказывается левовинтовым: ось его спина направлена противоположно направлению

движения. Следовательно, распад мюона дает абсолютный стандарт отличия левого от правого.

Тогда теоретики предложили более сложную симметрию, которая, казалось, соблюдается во всех взаимодействиях. Эта вторая гипотеза состояла в том, что законы физики не изменились бы в результате зеркаль-

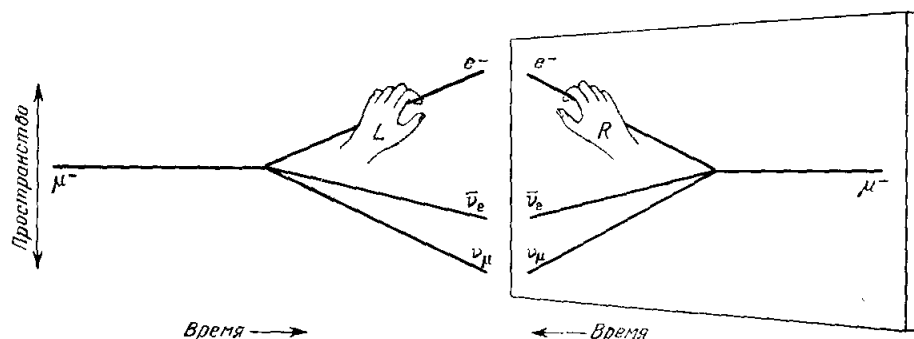


Рис. 8. Нарушение сохранения четности было первым в последовательности открытий, которые показали, что законы физики не безразличны к замене материи на антиматерию.

Сохранение четности, или P , означало бы, что любой физический процесс остается неизменным при замене на зеркально отраженный. Показан процесс распада мюона (μ) на электрон (e^-), электронное антинейтрино ($\bar{\nu}_e$) и мюонное нейтрино (ν_μ); электрон — левовинтовой. В зеркально отраженном распаде электрон — правовинтовой. На самом деле четность в этом процессе не сохраняется: левовинтовые электроны вылетают более чем в 1000 раз чаще правовинтовых.

ного отражения эксперимента, если бы одновременно все частицы в эксперименте были заменены их античастицами. Симметрия эта называется CP из-за названия операций зарядового сопряжения («charge conjugation»)

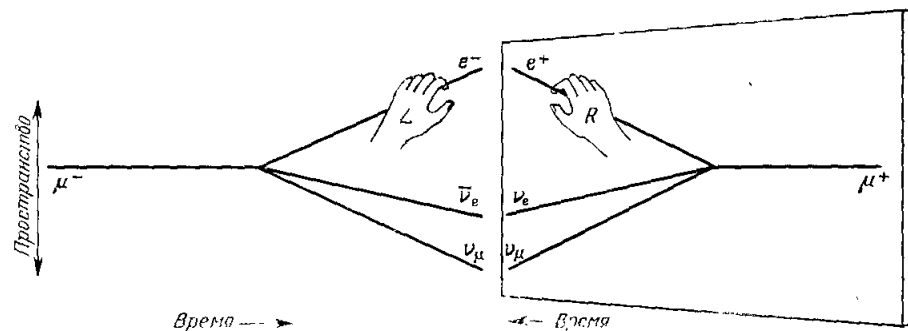


Рис. 9. CP -инвариантность предлагает симметрию, которая могла бы наблюдаться, даже если четность не сохраняется.

Сохранение CP предполагает, что симметрия, нарушенная зеркальным отражением, может быть восстановлена заменой всех частиц на их античастицы (C означает зарядовое сопряжение). В распаде мюона сохранение CP соблюдается: распад слева и распад справа оказываются равновероятными.

и четности («parity»), или зеркального отражения. CP -симметрия предсказывает, что в распаде антимюона вместо электрона будет возникать позитрон и он будет почти всегда правовинтовым. В случае распада мюона действительно наблюдается точная CP -симметрия.

Если бы CP -симметрия была абсолютной, преобладание материи над антиматерией никогда не могло бы возникнуть из изначального равновесия между ними. Для каждого процесса, создающего частицу, равновероятный зеркальный процесс создавал бы античастицу.

Концепция абсолютной CP -симметрии прожила около семи лет. После этого было обнаружено, что долгоживущий нейтральный K -мезон, который совпадает со своей античастицей, распадается более часто на отрицательный пион, позитрон и нейтрино, чем на положительный пион, электрон и антинейтрино. Если бы CP была абсолютной симметрией, эти две распадные моды должны были бы быть равновероятны. Кроме распада K -мезона не было найдено других нарушений CP -симметрии, однако и такие нарушения могли играть более значительную роль в природе при сверхвысоких энергиях.

□

Достижения, которые я описал, говорят о том, что как устойчивость определенных частиц, формализованная в законе сохранения барионного числа, так и нечувствительность законов природы к различию между материей и антиматерией, формализованная в принципе CP -симметрии, не

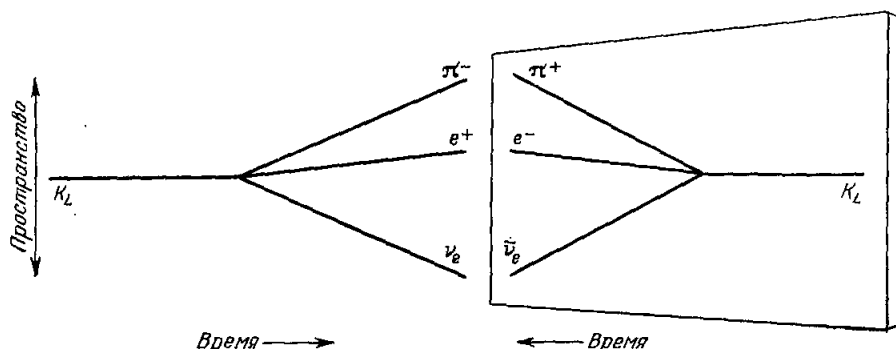


Рис. 10. Нарушение CP демонстрирует распад долгоживущего нейтрального K -мезона (K_L).

Распад этой частицы на π^- , e^+ и ν_e более частый, чем распад на античастицы π^+ , e^- и $\bar{\nu}_e$ (долгоживущий нейтральный K -мезон совпадает со своей античастицей). Если бы CP -симметрия никогда не нарушалась, отношение числа барионов к числу антибарионов было бы фиксированным и не могла бы развиться асимметрия между материей и антиматерией.

являются точными, а только приближенны. Правда, эти принципы довольно точно выдерживаются в настоящее время, но это могло быть не так в очень ранней Вселенной. И действительно, задаваясь даже малым нарушением этих принципов, можно сконструировать специфическую цепь событий, приводящих Вселенную из начального симметричного по отношению к материи и антиматерии состояния к состоянию с преобладанием материи.

Цепочка доказательств начинается с наблюдения того, что температура Вселенной постоянно падала с момента большого взрыва. Чем выше температура, тем больше средняя скорость и энергия составляющих Вселенную частиц и, следовательно, тем больше энергия, доступная для рождения новых частиц в столкновениях. При температуре выше 10^{32} К типичная энергия частицы была сравнима с энергией массы покоя X -частицы. Примерно до 10^{-35} с после большого взрыва во Вселенной сохранялась такая температура, и, значит, можно предположить, что в ней была большая плотность X -частиц.

С расширением и охлаждением Вселенной вероятность рождения X -частиц быстро уменьшалась, в то же время уже существовавшие частицы быстро распадались. Предположим, распады не сохраняли барионное число. Тогда X -частица могла распасться в любое из нескольких ко-

нечных состояний с разными полными барионными числами. Среднее могло быть, скажем, $+2/3$. Если во Вселенной до момента 10^{-35} с были равные количества материи и антиматерии, она содержала одинаковое число X и \bar{X} , где \bar{X} — античастица X . Может показаться, следовательно, что каждая мода распада X была бы сбалансирована распадом \bar{X} , который давал бы частицы со средним барионным числом $-2/3$. В этом случае полное барионное число во Вселенной осталось бы нулем на все времена. На самом же деле, так как CP -симметрия не обязана была проявляться точно в распадах X и \bar{X} , сделать заключение о том, что две распадные по-

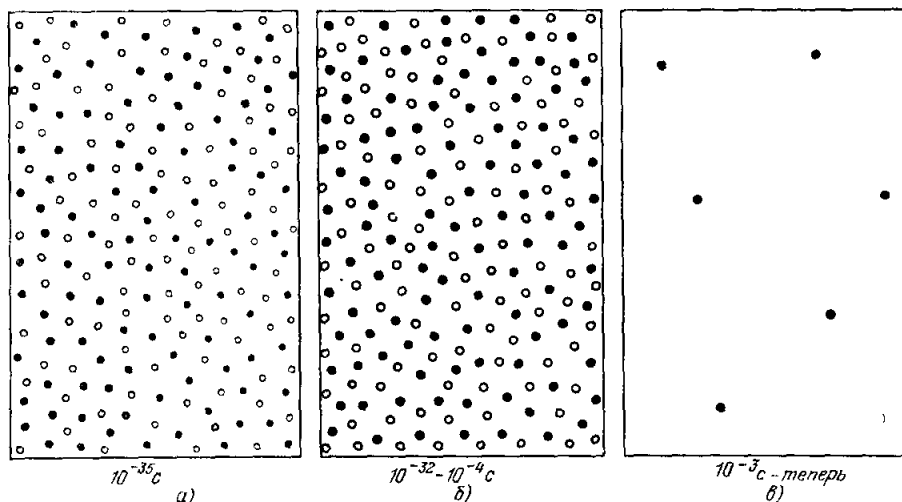


Рис. 11. В соответствии с предсказаниями теорий, объединяющих сильные и слабые взаимодействия, изображена эволюция космической асимметрии между материей и антиматерией.

Рис. а) символизирует Вселенную через 10^{-35} с после большого взрыва. На нем показаны X -частицы (темные кружки) и их античастицы \bar{X} (светлые кружки). В новорожденной Вселенной такие частицы в большом количестве образовывались в высокоэнергетических соударениях. На рис. б) показана Вселенная в промежутке времени от 10^{-34} до 10^{-4} с. X и \bar{X} распались разными способами, которые не всегда сохраняли барионное число и CP -симметрию. В результате возник легкий дисбаланс в пользу протонов (большие темные кружки) над антипротонами (большие светлые кружки). На рисунке показано на шесть протонов больше, чем антипротонов; на самом деле дисбаланс был гораздо слабее, а именно, одна частица на миллиард. Хотя протон и легче X в 10^{15} раз, протон показан на рисунке большим из-за того, что согласно квантовой механике масса обратно пропорциональна неопределенности в положении. На рис. в) показана Вселенная с 10^{-3} с по настоящее время. Каждое столкновение протона и антипротона вызывало аннигиляцию их обоих, так что выжили только избыточные протоны. Они и обеспечивают явное преобладание материи над антиматерией, наблюдаемое в сегодняшней Вселенной.

следовательно всегда давали симметрично противоположные наборы частиц, нельзя. \bar{X} могли давать частицы со средним барионным зарядом, не равным $-2/3$, а, скажем, $-1/3$.

Таким путем Вселенная, имевшая одинаковое число X - и \bar{X} -частиц, эволюционировала бы к состоянию с положительным барионным числом и соответствующим преобладанием материи. Это могло быть, например, состояние с дисбалансом в одну миллиардную в пользу материи. После первых 10^{-35} с или около того температура и средняя энергия частиц во Вселенной падают ниже порога рождения X и \bar{X} . Процессы, нарушающие сохранение барионного числа, становятся после этого несущественными, и преобладание материи над антиматерией замораживается во Вселенной. В ней все еще имеется много больше чем сейчас барионов и антибарионов, но большая их часть в конце концов аннигилирует друг с другом, оставляя наблюдаемое теперь количество материи.

Некоторые аспекты приведенной аргументации в высшей степени умозрительны, и объяснение космической асимметрии между материей и антиматерией может показаться более мифическим, чем научным. Не более чем это неизбежно в силу невоспроизводимости экстремальных условий ранней Вселенной в лаборатории. То, что отличает научную догадку от мифа, — это ее логическая согласованность и возможность подвергнуть по крайней мере некоторые ее элементы экспериментальной проверке. Я описал, как внутренняя логика физики частиц привела к объединенным теориям, в которых не сохраняется барионное число, и отметил, что будущие усилия как в нейтринной астрономии, так и в поисках распада протона смогут проверить теорию. Если эти сложные эксперименты дадут согласующиеся с теоретическими ожиданиями результаты, они сильно приблизят нас к научному пониманию загадочной асимметрии. Даже сейчас вычисления, проведенные согласно объединенным теориям, говорят, что средняя плотность материи во Вселенной сегодня согласуется с изначальным ходом событий, предлагаемым последними. Из-за неопределенностей в механизме CP -нарушения вычисления трудно провести точно, но качественная картина удовлетворительна.

□

Остается еще вопрос. Я описал, как Вселенная, начав с симметрии между материей и антиматерией, могла потом расти асимметрично. Но почему она была симметричной в начальный период?

На некотором уровне на этот вопрос можно ответить статистически. Даже если нарушающие барионное число взаимодействия были частыми в ранней Вселенной, наиболее вероятное состояние, которое устанавливается в равновесии до момента 10^{-35} с, — такое, в котором количества материи и антиматерии равны. Объединенные теории, таким образом, автоматически принуждают к начальной симметрии, ее не нужно отдельно постулировать. После 10^{-35} с скорости распада X и \bar{X} будут малы по сравнению со скоростью расширения и охлаждения Вселенной. При таких условиях равновесие больше не может установиться.

На более глубоком уровне я не нахожу это объяснение полностью удовлетворительным. Оно не может объяснить, почему Вселенная должна была начинаться со взрыва. Оно также не может объяснить, почему Вселенная симметрична в некоторых других отношениях: она в среднем электрически нейтральна и, видимо, не имеет в целом углового момента.

Сейчас я опишу идею, которая может привести к пониманию этих вопросов. Она, без сомнения, хорошо обоснована, но в действительности предполагает целую программу исследований. На самом деле она была первичным мотивом моей собственной работы над проблемой асимметрии материя — антиматерия.

Современные теории взаимодействий между элементарными частицами предполагают, что Вселенная может существовать в различных фазах, которые в некотором смысле аналогичны жидкой и твердой фазам воды. В различающихся фазах свойства материи различны; например, определенная частица может быть безмассовой в одной фазе, но массивной в другой. Физические законы более симметричны в одних фазах, чем в других, точно так же, как жидкая вода более симметрична, чем лед, в котором кристаллическая решетка выделяет определенные точки и направления в пространстве.

В этих теориях наиболее симметричная фаза Вселенной обычно называется нестабильной. Можно попытаться представить себе, что Вселенная начиналась из наиболее симметричного из всех возможных состояний и что в таком состоянии не существовало материи; Вселенная

была вакуумом. Возможно было и другое состояние, в котором существовала материя. Второе состояние имело немного меньшую симметрию, но оно также было ниже по энергии. Случайно образовавшийся кусок менее симметричной фазы начинает быстро разрастаться. Высвобождающаяся в результате фазового перехода энергия находит себе выход в рождении частиц. Это событие можно отождествить с большим взрывом. Электрическая нейтральность Вселенной, в которой уже присутствуют частицы, была бы тогда гарантирована, так как Вселенная без материи была бы электрически нейтральна. Отсутствие вращения во Вселенной с материей можно понять как одно из условий, наиболее благоприятствующих фазовому переходу и последующему росту (со всем тем, что этот рост подразумевает, включая космическую асимметрию между материей и антиматерией). Тогда ответом на древний вопрос, «почему есть нечто, а не ничто», был бы: «потому что «ничто» неустойчиво».

ЛИТЕРАТУРА

- Steigman G.— *Rev. Astron. and Astrophys.*, 1976, v. 14, p. 339.
Weinberg S. *The First Three Minutes: a Modern View of the Origin of the Universe*.—
N. Y.: Basic Books, 1977.
Ioussaint D., Treiman S. B., Wilczek F., Zee A.— *Phys. Rev. Ser. D*, 1979, v. 19, p. 1036.