

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

330.1

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

НАРУШЕНИЕ СИММЕТРИИ В ФИЗИКЕ*)

Е. Вигнер

Ровно девять лет назад, в декабре 1956 г., физики, к своему удивлению, установили, что на самом фундаментальном уровне строения вселенной существуют понятия правого и левого. До декабря 1956 г. они предполагали, что, если некоторое событие возможно, его зеркальный образ тоже возможен, т. е. если рассматривать некоторое реальное событие в зеркале, то событие, которое мы в нем видим, также может произойти в действительности. Это свойство пространства называли симметрией относительно отражения, и на нем основывается принцип сохранения четности. Ряд загадочных явлений в ядерной физике побудил Ли и Янга летом 1956 г. подвергнуть сомнению общую обоснованность этого принципа. Несколько месяцев спустя Ву, Амблер, Хопс и Хадсон показали, что в некоторых явлениях принцип сохранения четности нарушается. Этот принцип был одним из тех принципов симметрии, которые физики при построении математических теорий принимали аксиоматически. Несохраниение четности заставило их усомниться и в других принципах сохранения и искать путей проверки каждого из них в отдельности. В результате этих усилий отпало по крайней мере еще два принципа, а третий был поставлен под сомнение. Это — принцип симметрии относительно обращения времени, который означает, что природа безразлична к направлению протекания времени. Физики были глубоко убеждены, что природа сходна с электрическими часами, которые идут вперед или назад в зависимости от того, в каком направлении повернуть пусковой рычажок.

Различные виды симметрии можно сравнить с зеркалами, в которых явления природы отражаются вполне определенным, специальным образом. Зеркало четности, которое мы обозначим как *P*-зеркало, — это просто обычное зеркало, используемое в повседневной жизни. У этого зеркала имеется, однако, одно свойство, которое может удивить непрофессионала; поэтому мы будем называть *P*-зеркалом «зеркало физиков» в отличие от «зеркала пессимистов», которое мы будем называть *L*-зеркалом.

Каждому известно, что электрический ток, текущий по проводочному кольцу, индуцирует магнитное поле. Мы узнали в школе, что направление поля, т. е. направление его северного магнитного полюса, определяется «правилом правой руки». Это правило утверждает, что, если

*) Eugene P. Wigner, Violations of Symmetry in Physics, Sci. American 213 (6), 28 (1965). Перевод А. Т. Филиппова.

В оригинале имеется резюме: «„Из семи зеркал“, изобретенных физиками для описания симметрии законов природы, три уже разбились вдребезги. Из оставшихся же только одно можно считать полностью сохранившимся. Это так называемое *CPT*-зеркало».

указательный палец правой руки изогнут по направлению тока, большой палец правой руки определяет направление северного полюса индуцированного магнитного поля.

Раньше студенты, изучающие электричество, определяли направление тока по направлению от положительной клеммы батареи к отрицательной. Теперь, когда мы понимаем, что электрический ток определяется потоком электронов, кажется более разумным говорить о направлении электронного потока, который движется от отрицательной клеммы к положительной. Следовательно, если говорить о направлении движения электронов в кольце проволоки, то для определения направления севера

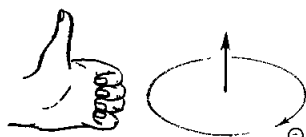
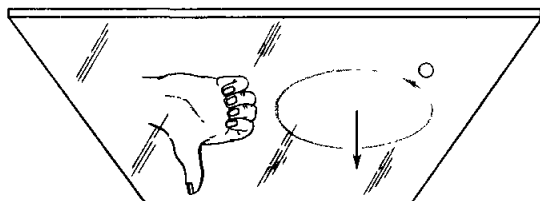


Рис. 1. «Зеркало неспециалиста» дает неправильную картину соотношения между магнитным полем и потоком электронов в проволочном кольце.

«Правило левой руки», примененное к настоящему проволочному кольцу с током (внизу), позволяет по направлению большого пальца определить, что северный магнитный полюс (черная стрелка) направлен вверх, если указательный палец левой руки изогнут в направлении потока электронов (цветная стрелка). Когда левая рука отражается в зеркале, она, однако, становится правой и поэтому показывает (неправильно), что магнитное поле направлено вниз. В зеркале физика, изображенном на следующем рисунке, показано, что поле направлено (правильно) вверх.

Теперь вообразим, что на потолке, прямо над столом, имеется зеркало. Что мы в нем увидим? Если мы поместим левую руку рядом с кольцом и применим правило левой руки, то в зеркале мы увидим правую руку, большой палец которой направлен вниз. Рука в зеркале указывает нам (правильно), что поток электронов, как видно в зеркале, движется против часовой стрелки, но она также говорит нам (неверно), что магнитное поле направлено вниз. Рука в зеркале дезинформирует нас о направлении магнитного поля, потому что она является (или кажется) правой рукой, а реальное поле связано с реальным потоком электронов правилом левой руки. Если мы допустим (неправильно), что направление магнитного поля указывается правой рукой, то мы тем самым в интерпретации зеркального образа станем на точку зрения неспециалистов; в этом смысле данное зеркало является *L*-зеркалом. Если, однако, мы, как физики, будем утверждать, что определяющей реальностью является поток электронов, а магнитное поле вторично, то для определения магнитного поля в зеркале мы должны будем воспользоваться правилом левой руки и тогда

магнитного поля следует пользоваться правилом левой руки. (Мы, конечно, понимаем, что «север» и «юг» сами по себе — условности, основанные на том, что, как принято считать, стрелка компаса указывает на Северный полюс Земли.) Во всяком случае, в этой статье направление магнитного поля связывается с потоком электронов и определяется правилом левой руки. Без сомнения, читатель хорошо знаком с этими элементарными правилами, но обзор их, возможно, поможет избежать путаницы при переходе к зеркалам.

Сначала рассмотрим зеркало четности. Представим себе находящееся на столе кольцо из проволоки, по которому электроны текут в направлении часовой стрелки, если смотреть сверху. Тогда, согласно правилу левой руки, индуцированное магнитное поле направлено вверх (рис. 1).

заклучим, что оно в действительности направлено внутрь зеркала, а не из зеркала. Следовательно, магнитное поле на столе и в зеркале (в P -зеркале физиков) имеет одно и то же направление (рис. 2).

Теперь можно описать эксперимент по проверке несохранения четности, проведенный мисс Ву и ее сотрудниками. В центре кольца, по которому шел электрический ток, был помещен радиоактивный кобальт, который при распаде испускал электроны и нейтрино. Экспериментальная установка в целом обладала плоскостью симметрии — плоскостью, содержащей кольцо с током. Направление вверх (над плоскостью) ничем не отличалось от направления вниз. Тем не менее оказалось, что электроны вылетают из распадающихся атомов кобальта асимметрично — почти исключительно вверх. Если над установкой параллельно плоскости кольца с током поместить зеркало, то в нем мы увидим, что электроны вылетают из зеркала, т. е. вниз, хотя электроны не должны двигаться в этом направлении, если ток и радиоактивный материал являются реальными, а не зеркальными образами (рис. 3).

Этот неожиданный результат привлек огромное внимание и принес Ли и Янгу Нобелевскую премию. Тот факт, что для электронов существует предпочтительное направление, а именно направление, определяемое большим пальцем левой руки, когда указательный палец изогнут по направлению потока электронов, означает, что радиоактивность кобальта оказывает предпочтение левой руке.

Насколько я могу вспомнить эти давно прошедшие дни, никто не был в восторге от такого результата. Разумеется, верно, что большинство из нас отдает предпочтение своей правой руке, точно так же, как кобальт предпочитает левую руку. Чувствуется, однако, что радиоактивный кобальт не имеет права на такое предпочтение, так как он, во-первых, должен был бы «забывать» о своем прошлом и так как, во-вторых, в тот момент, когда он испускает частицы (продукты распада), он не испытывает никакого воздействия, которое могло бы как-то выделить одну из сторон плоскости кольца. Эта плоскость является плоскостью симметрии в начале эксперимента и остается ею, пока нет внешнего возмущения, способного нарушить эту симметрию. Это утверждение эквивалентно постулату, что всякая возможная последовательность реальных событий должна остаться возможной последовательностью событий, если каждое

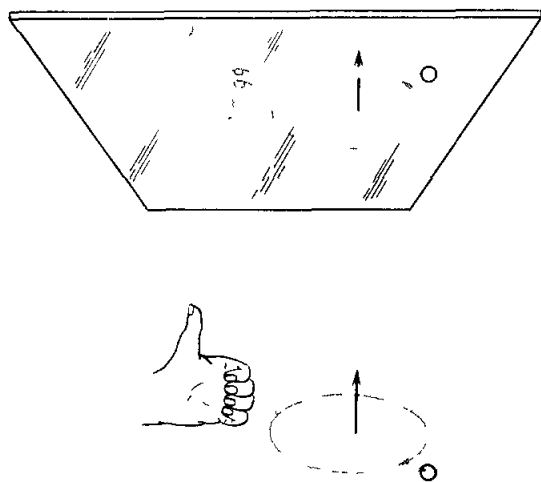


Рис. 2. «Зеркало физика» является также P -зеркалом, или зеркалом четности.

Оно идентично зеркалу неспециалиста, но физик сохраняет бдительность, чтобы не впасть в заблуждение. Он знает, что при замене настоящего кольца с током на кольцо, которое он видит в зеркале (и в котором электроны текут против часовой стрелки, если смотреть снизу), направление магнитного поля будет по-прежнему определяться правилом левой руки. Иными словами, он сознает, что зеркальное изображение левой руки (т. е. правая рука) дает ему неправильную информацию о направлении магнитного поля. Он придерживается той точки зрения, что первичной реальностью является поток электронов, а магнитное поле возникает как его следствие.

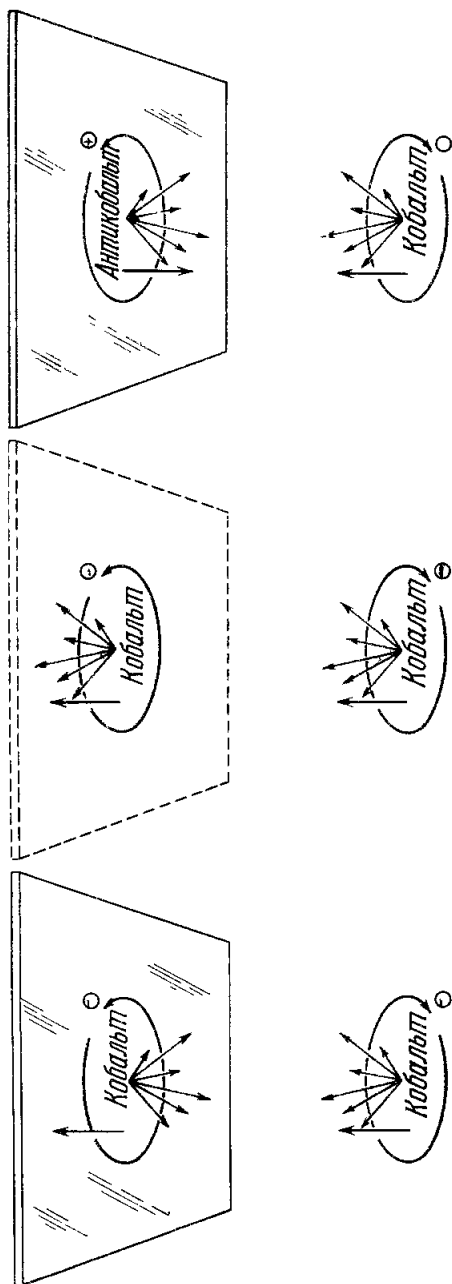


Рис. 3. Ниспровержение четности, или симметрии относительно отражения, следует из выполненного в декабре 1936 г. эксперимента Бу, Амблера и их сотрудников.

Они поместили образец радиоактивного кобальта в магнитное поле, созданное кольцом с током, и фиксировали направление вылета одного из продуктов распада, а именно электронов. Согласно принципу четности, электроны должны вылетать вверх и вниз с одинаковой вероятностью. Вместо этого они летят исключительно вверх, в направлении магнитного поля, как это показано в нижней части левого рисунка. При отражении этого опыта в P -зеркале будет казаться, что электроны летят вниз. Если бы радиоактивный кобальт и электрический ток в зеркале были настоящими, то электроны в действительности летели бы вверх (средний рисунок). Симметрия относительно отражения тем самым была опровергнута. Принципы симметрии был спасен заявлением, что природа симметрична в «волшебное зеркало», или в CP -зеркало, в котором вещество заменяется на антивещество. Это соотношение симметрии изображено на правом рисунке, где радиоактивный кобальт заменен на антикобальт, а электроны, текущие в кольце с током, заменены на антиэлектроны, т. е. позитроны. Частицы, возникающие при распаде (тоже позитроны), летят тогда вниз. Направление магнитного поля также изменится на противоположное, так как поток положительных зарядов порождает магнитное поле, направление которого противоположно направлению поля, созданного потоком отрицательных зарядов.

событие заменить его зеркальным изображением. Очевидно, что это не так в случае распада радиоактивного кобальта.

Вскоре несколько физиков независимо предложили новую интерпретацию опыта Ву, которая спасала принцип симметрии отражения. По существу, они предполагали, что природа смотрится не в P -зеркало, а в «волшебное зеркало», которое меняет знак всех электрических зарядов. В этом зеркале изображением электрона является позитрон (положительный электрон), а зеркальным изображением ядер радиоактивного кобальта будут ядра, сделанные из антивещества (из антинейтронов и антипротонов). Если бы можно было взглянуть, как выглядит опыт Ву в таком правильном зеркале, то оказалось бы, что в том направлении, в котором, по предположению, двигались электроны, будут двигаться позитроны. Поскольку поток позитронов эквивалентен потоку положительных носителей тока, для определения направления магнитного поля следует пользоваться правилом правой руки. Тогда окажется, что магнитное поле направлено «из зеркала», или вниз, и, следовательно, прямо противоположно магнитному полю в реальном эксперименте. Частицы, излученные ядрами антивещества радиоактивного кобальта, также стремятся двигаться «из зеркала», т. е. вниз, завершая тем самым зеркальный образ в опыте Ву (см. рис. 3).

Эта новая интерпретация симметрии отражения была сначала чисто умозрительной, основанной исключительно на желании сохранить среди законов природы принцип симметрии отражения. Об экспериментальной проверке не могло быть и речи; даже сегодня мы далеки от возможности создания антикобальта, т. е. кобальта, ядра которого состоят из антипротонов и антинейтронов. Возможно, однако, проверить эту новую гипотезу другими способами. Указанная новая интерпретация до совсем недавнего времени находилась в полном соответствии со всеми экспериментальными данными. Были исследованы направления вылета частиц не только в распаде радиоактивного кобальта, но и в других реакциях. В частности, исследовалась реакция, в которой наблюдалось рождение как частицы, так и ее античастицы. Это — мюон и антимюон; распад антимюона во всех деталях выглядит так же, как изображение распада мюона в только что описанном волшебном зеркале.

Мы до сих пор не упоминали о роли кольца с током в опыте мисс Ву. Оно создает магнитное поле, перпендикулярное плоскости кольца. Это поле ориентирует спины ядер радиоактивного кобальта. Направление вылетающих при распаде частиц непосредственно связано со спинами радиоактивных ядер, испускающих эти частицы, и только косвенно, посредством магнитного поля, с направлением потока электронов в кольце.

Спины ядер кобальта являются носителями момента импульса; это фундаментальное свойство связано с вращательным движением. Во всех исследованиях вращательного движения до опыта мисс Ву оказывалось, что момент импульса обладает плоскостью симметрии, которой является плоскость вращения. Если эта плоскость расположена горизонтально, то следовало бы ожидать, что продукты распада вращающегося объекта разлетаются вверх и вниз с равной вероятностью. Тот факт, что в случае радиоактивного кобальта этого не происходит, означает, что общая симметрия законов природы ниже, чем первоначально предполагали физики. Законы природы неинвариантны относительно отражения в P -зеркале. Волшебное зеркало, которое дает правильное отражение, называется CP -зеркалом; оно является комбинацией зеркала четности (P), которое отражает положения частиц, и зеркала зарядового сопряжения (C), которое изменяет знак электрических зарядов.

Сколько всего зеркал придумали теоретики? Я надеюсь, что нас не заподозрят в попытке заранее захватить патенты, если мы будем претендовать на «изобретение» семи зеркал. По существу, они являются различными комбинациями P -зеркала и еще одного зеркала — T -зеркала, которое отражает направление времени. Перечислим эти семь зеркал: P , C , T , CP , CT , PT и CPT .

Мы уже видели, как отражаются в P -зеркале электрические токи и магнитные поля. Теперь посмотрим, как P -зеркало отражает траекторию частицы, которая рассеивается или отклоняется другой частицей (рис. 4). Допустим, что рассеивателем является тяжелая частица, напри-

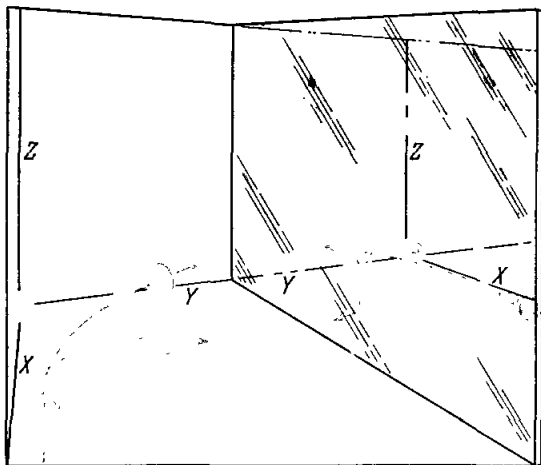


Рис. 4. Изображение рассеяния в P -зеркале в точности совпадает с тем, что можно было бы ожидать увидеть в обычном зеркале.

В действительном опыте (слева), когда позитрон налетает на положительно заряженное достаточно тяжелое ядро (например, ядро кислорода), он рассеивается, или отклоняется, вправо. Позитрон, кроме того, обладает спином, или моментом импульса, изображенным цветной стрелкой. Если направление спина после рассеяния не изменяется, то позитрон окажется над плоскостью, в которой лежал его первоначальный путь. Если направление спина меняется на противоположное, то позитрон окажется под этой плоскостью. Как и следовало ожидать, направления всех спинов в зеркале противоположны их направлениям в реальном эксперименте.

гаться несколько выше плоскости первоначального направления. Если спин переворачивается, меняя свое направление на противоположное (становится антипараллельным), то частица будет двигаться ниже первоначальной плоскости. Частица может двигаться по любой из этих траекторий, и движение по каждой из них составляет вполне определенную часть всех наблюдаемых движений.

Мы будем рассматривать один и тот же процесс рассеяния в разных зеркалах, так что изображения будут разными. Предположим, что во всех случаях зеркало расположено вертикально и справа, т. е. между предметом и изображением. Если зеркало является P -зеркалом физиков, то отраженные траектории совпадут с ожидаемыми. Траектория, загибающаяся в реальном случае вправо, кажется в зеркале загибающейся влево. Кроме того, меняется на обратное направление спинов частиц, так что, когда в реальном опыте частица вращается по часовой стрелке, если смотреть сзади, в зеркале будет казаться, что она вращается против часовой стрелки, если смотреть сзади (относительно зеркального изображения).

мер ядро кислорода, а падающая частица — легкая, например позитрон. Таким образом, каждая частица имеет положительный электрический заряд (обозначенный на рисунке знаком «плюс»). Позитрон — настолько легкая частица, что он почти не меняет положения ядра кислорода; поэтому мы должны следить только за траекторией позитрона, который приближается к ядру кислорода и рассеивается.

Следует также учесть, что падающая частица имеет спин и что ось спина параллельна направлению движения частицы. После рассеяния направление движения частицы изменяется, и оказывается, что новое направление движения зависит от того, что произойдет со спиновым моментом частицы. Если направление спина не изменилось (осталось параллельным), то частица будет дви-

Продлав этот эксперимент, можно было бы безусловно установить, что P -зеркало является правильным; при существующей точности измерений не удалось бы обнаружить различие между реальной траекторией и ее изображением в зеркале. Тем не менее из эксперимента мисс Ву с радиоактивным кобальтом мы знаем, что это зеркало оказалось неверным: в ее опыте P -зеркало дало совершенно неправильную картину. Следовательно, вообще говоря, P -зеркало является не совсем правильным, и действительность будет отличаться от того, что оно показывает, хотя в нашем эксперименте по рассеянию оно дает пренебрежимо малую ошибку.

Теперь посмотрим, как выглядят эксперименты по рассеянию в C -зеркале (рис. 5). Конечно, C -зеркало не является материальным зеркалом. Оно не изменяет ни положения, ни направления движения, ни ориентации спина. Единственное, что оно делает, — это заменяет положительные электрические заряды на отрицательные и наоборот или, в более общем случае, заменяет вещество на антивещество и наоборот. Таким образом, когда мы «смотрим» в P -зеркало, то видим, что ядро кислорода в нашем эксперименте по рассеянию заменяется на антиядро, состоящее из антипротонов и антинейтронов и обладающее отрицательным зарядом, а позитрон заменяется на электрон, также заряженный отрицательно.

Ситуация с C -зеркалом аналогична ситуации с P -зеркалом. Поскольку неизвестно, как создать антиядро для такого тяжелого ядра, как ядро кислорода, наш конкретный эксперимент по рассеянию выполнить не удастся. Однако из других, сходных экспериментов с античастицами известно, что никаких заметных различий между реальным рассеянием и его отражением в P -зеркале не наблюдается. Тем не менее на основании некоторых экспериментов можно утверждать, что C -отражение не более точная симметрия, чем P -отражение. К сожалению, экспериментальное подтверждение несохранения C не является таким непосредственным, как подтверждение несохранения P в опыте мисс Ву. Доказательство нарушения C -симметрии является математическим и основано на наблюдении направления спина электронов и позитронов, излучаемых соответственно отрицательными и положительными мюонами. Этот эксперимент был выполнен в 1957 г. в Ливерпульском университете Каллиганом, Фраппом, Холтом и Кливером.

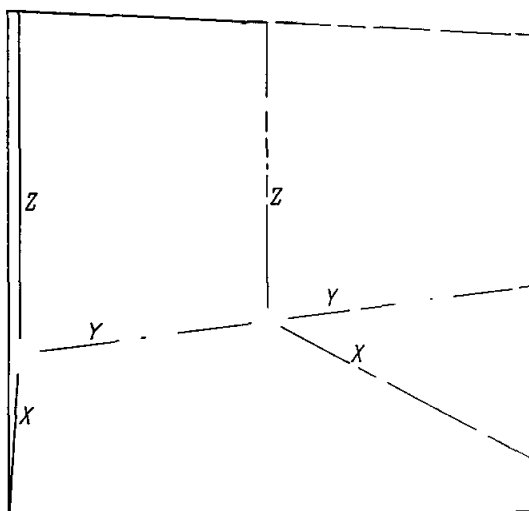


Рис. 5. Изображение рассеяния в C -зеркале непохоже на то, что можно увидеть в любом материальном зеркале.

Направления путей частицы и ее спина не изменяются, а знаки всех зарядов меняются на противоположные.

Если известно, что P - и C -зеркала по отдельности недостаточно точны, быть может, упомянутое ранее волшебное CP -зеркало правильно отражает реальность? Изображение в CP -зеркале (CP -образ) можно получить одним из двух способов: отражением P -образа в C -зеркале или отражением

C -образа в P -зеркале. Тот факт, что изображение, полученное двумя такими отражениями, дает правильную картину реальности, следует из того, что изображение в каждом из зеркал чрезвычайно близко к реальности. Действительно, до недавнего времени физики полагали, что небольшие отклонения, возникающие в отдельных зеркалах, погашают друг друга, и поэтому CP -зеркало точно соответствует реальности. Казалось достаточно убедительным, что дело обстоит именно так, по крайней мере для ряда явлений, в которых наблюдался радиоактивный распад и несохранение

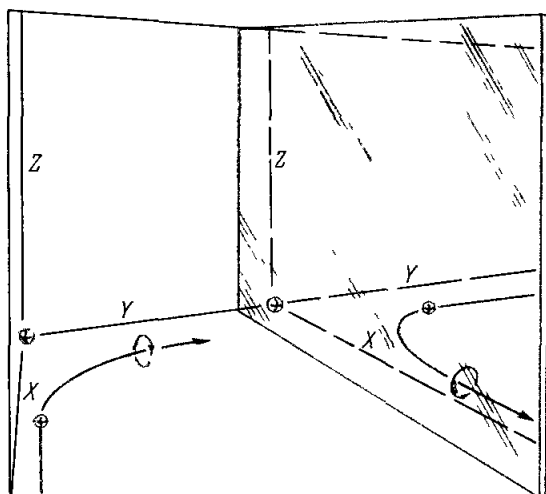


Рис. 6. Изображение рассеяния в T -зеркале также не имеет ничего общего с тем, что можно увидеть в каком-либо обычном зеркале.

В T -зеркале частица идет по тому же пути, что и в действительности, но движется в противоположном направлении. Воображаемое T -зеркало реализует обращение времени.

Еще интересует обратимость в явлениях атомных и субатомных масштабов. Моделью такого типа обратимости было бы поведение абсолютно упругого мяча. Если этот мяч бросить на совершенно жесткую поверхность, он бы подпрыгивал неограниченно долго. Если заснять движение этого мяча на киноленту, то нельзя установить, в каком направлении движется пленка — вперед или назад, т. е. ось времени была бы полностью обратимой.

До недавнего времени считалось, что T -зеркало, так же как и CP -зеркало, является точным. По причинам, о которых мы скажем позже, физики вынуждены предположить, что комбинация T -зеркала и CP -зеркала, т. е. CPT -зеркало, остается точной, даже если C -, P - и T -зеркала по отдельности окажутся несостоятельными!

Вернемся к эксперименту, который вызвал сомнение в правильности CP -зеркала и, косвенно, в правильности T -зеркала. Этот эксперимент был выполнен немногим более года назад в Брукхейвенской национальной лаборатории Кристенсоном, Кронином, Фитчем и Тюрлэ из Принстонского университета. Одна из первоначальных целей эксперимента состояла в подтверждении CP -инвариантности, а не в демонстрации ее несостоятельности. Однако иногда эксперименты дают неожиданные результаты; так, безусловно, произошло и в этом случае. Тем не менее нарушение CP -

C и P по отдельности. Прежде чем перейти к обсуждению эксперимента, который бросает подозрение на CP -зеркало, сделаем несколько замечаний о T -зеркале.

Подобно C -зеркалу, T -зеркало не меняет траекторий частиц. Оно только меняет их направление на противоположное, т. е. обращает ось времени (рис. 6). Фактически обозначение T употребляется для симметрии относительно обращения времени. Это утверждение трудно принять интуитивно благодаря нашему повседневному опыту с явлениями, которые заведомо необратимы; никто никогда не слышал, чтобы куски разбитой чашки сами по себе соединились. Необратимость такого сорта является бесспорной. Физика больш-

инвариантности не так очевидно, как нарушение P -инвариантности, продемонстрированное опытом мисс Ву, или даже нарушение C -инвариантности в эксперименте Каллигана и его сотрудников.

Указанием на неправильность CP -зеркала является существование одного типа распада K -мезонов, или K -частиц. K -частицы легко создать в ускорителе частиц высоких энергий, если направить поток протонов на соответствующую мишень, например, из бериллия. В результате взаимодействия протона высокой энергии с нейтроном атомного ядра мишени неизменно возникают две тяжелые частицы, одна из которых является обычно протоном или нейтроном. При энергии налетающей частицы около 30 Гэв, как это было в Брукхейвском эксперименте, другой тяжелой частицей может оказаться одна из странных частиц, например Λ -частица или Σ -частица. Одновременно в результате взаимодействия появится K -частица, которая может быть положительной (K^+), отрицательной (K^-) или нейтральной (K^0).

K -мезон — очень странная частица. Это та самая частица, загадочное поведение которой при распаде в свое время побудило Ли и Янга усомниться в P -инвариантности. Еще до этого было установлено, что K^0 — не одна частица, а комбинация двух частиц, каждая из которых является античастицей по отношению к другой. Когда частица обладает электрическим зарядом, ее легко отделить от античастицы, которая должна иметь заряд противоположного знака. Следовательно, невозможно породить заряженную частицу, которая с некоторой вероятностью была бы своей собственной античастицей.

Иная ситуация возникает, если частица не имеет электрического заряда. В этом случае вполне возможно состояние, в котором нейтральная частица, такая, как K^0 -мезон, с равной вероятностью (50/50) может быть частицей или античастицей. Еще более удивительным результатом существующей квантовомеханической теории является то, что такое состояние не единственно, имеется непрерывное множество «суперпозиций» таких состояний. Однако для наших целей нужно только два состояния, которые обозначаются как $(K^0 + \bar{K}^0)$ и $(K^0 - \bar{K}^0)$. Черта над вторым K^0 в каждой скобке обозначает античастицу. Следует подчеркнуть, что каждое состояние описывает одну частицу, но свойства этих двух состояний различны, что можно показать экспериментально.

Существование такой суперпозиции состояний является следствием волновой природы материи. Аналогичные суперпозиции играют важную роль также в области низких энергий, в частности, в теории оптически активных органических соединений, таких, как оптически активные аминокислоты и сахара. Например, один вид сахара обладает свойством вращать плоскость поляризации света вправо, а другой сахар при том же химическом составе вращает плоскость поляризации света влево. Различие в оптической активности основано единственно на том факте, что оба соединения обладают трехмерной структурой, одна из которых является зеркальным образом другой, и, таким образом, относятся друг к другу, как левая и правая рука (рис. 7).

Рис. 8 иллюстрирует квантовомеханическое описание положения атома, определяющего, является ли органическое соединение «правым» или «левым». Горизонтальная ось указывает положение атома (левое или правое) в оптически активном соединении. По вертикальной оси отложена амплитуда вероятности для каждого положения атома; вероятность нахождения атома в любом данном положении равна квадрату амплитуды вероятности. Когда кривая амплитуды вероятности расположена целиком справа от начала координат, атом наверняка находится справа, и, таким образом, создается асимметричная картина. Это соответствует

«правому», или «правовращающему», соединению. Если кривая амплитуды вероятности расположена целиком слева от начала координат, атом наверняка находится слева, что соответствует «левому», или «левовращающему», соединению.

Нижняя пара кривых на рис. 8 описывает амплитуды вероятности состояний, для которых левое и правое положение атомов равновероятны; это приводит к взаимному погашению эффекта, и оптическая активность не наблюдается. Нижняя левая кривая изображает амплитуду вероятности, состоящую из двух симметричных положительных горбов. Это состояние оптически неактивно, так как оно совпадает со своим зеркальным отражением. Такие состояния устойчивы при низких температурах, их называют рацемическими смесями. На нижней правой кривой

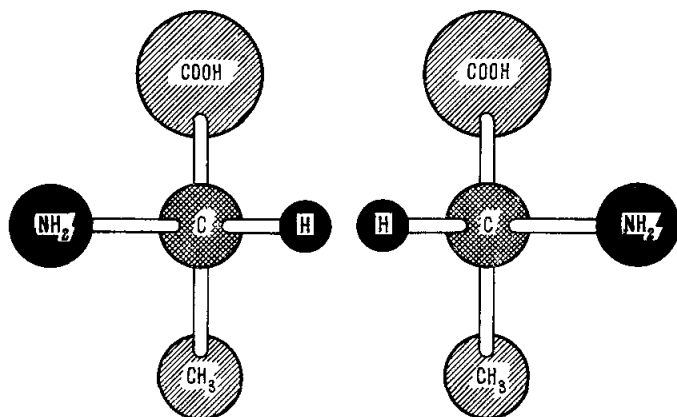


Рис. 7. Зеркально отраженные молекулы, называемые оптическими изомерами, хорошо известны в органической химии.

На рисунке изображены два изомера аланина, одной из 20 аминокислот, используемых живыми организмами для построения протеиновых молекул. Раствор, содержащий изомер, изображенный слева, вращает плоскость поляризации влево, и поэтому этот изомер называют левовращающим (или левым). Его зеркальное изображение называют правовращающим или (правым); изомер вращает плоскость поляризации вправо. Природные белки построены исключительно из левых аминокислот. Многие из органических соединений встречаются как в левовращающей, так и в правовращающей форме.

амплитуда вероятности асимметрична: левый горб — положительный, а правый — отрицательный. Однако вероятность, равная квадрату амплитуды вероятности, будет всюду положительной, причем ее значение слева равно соответствующему значению справа. Хотя это состояние также оптически неактивно, оно отличается по своим свойствам от предыдущего неактивного состояния, в частности, его энергия чуть-чуть выше.

Этим четырем соединениям — двум оптически активным и двум неактивным — соответствуют определенные состояния нейтральных K -мезонов. Когда K -мезон только что образовался, он представляет собой античастицу \bar{K}^0 и соответствует оптически активному левому соединению. Это состояние можно представить как сумму симметричного и антисимметричного состояний, являющихся двумя оптически неактивными формами соединения. Обозначим эти два состояния нейтрального K -мезона как K_+^0 и K_-^0 (их также обозначают как K_1^0 и K_2^0). Единственное существенное отличие двух оптически неактивных состояний рассмотренного соединения от состояний нейтрального мезона K_+^0 и K_-^0 состоит в том, что отражения, относительно которых состояния симметричны или анти-

симметричны, являются не обычными отражениями, а отражениями в CP -зеркале.

Далее, симметричное состояние K_+^0 может распасться на два π -мезона за время около 10^{-10} сек. Антисимметричное состояние K_-^0 распадается на три π -мезона, и этот процесс идет примерно в 600 раз медленнее, чем распад на два π -мезона, т. е. за время порядка около $6 \cdot 10^{-8}$ сек. Следовательно, после того, как все K_+^0 -мезоны исчезнут, останется еще достаточно много K_-^0 -мезонов. Распад K_+^0 -мезона на два π -мезона возможен

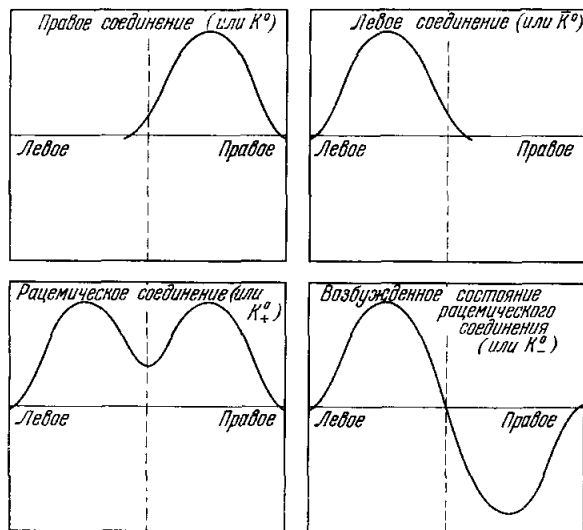


Рис. 8. Квантовомеханическое столкновение левых и правых органических соединений применимо также и к состояниям нейтрального K -мезона.

Для этого нужно привлечь понятие «амплитуды вероятности», значение которой откладывается по вертикальным осям изображаемых графиков. Горизонтальная ось дает положение (на языке левого и правого) атома, которое определяет, является ли органическое соединение левым или правым. Вероятность нахождения атома в любом данном положении равна квадрату амплитуды вероятности. Верхние два графика соответствуют тому, что атом определенно находится справа или слева. Нижние два графика соответствуют тому, что атом с одинаковой вероятностью может находиться как слева, так и справа. Применение этих кривых к K -мезону объяснено в тексте.

потому, что все состояния системы, состоящей из двух π -мезонов, симметричны относительно CP -отражения (так как при этом K_+^0 -мезон переходит сам в себя). Состояние K_-^0 , антисимметричное относительно CP -отражения, не может распасться на симметричные состояния, но оно может распасться на три π -мезона. Система трех π -мезонов может находиться в состояниях, которые антисимметричны относительно CP -отражения. Распад на три π -мезона — более медленный процесс, поэтому время жизни K_-^0 -мезонов больше.

Однако Кронин, Фитч и их коллеги обнаружили, что некоторая малая часть K_-^0 -мезонов, вопреки CP -инвариантности, распадается на два π -мезона. Поскольку лишь примерно один из 500 K_-^0 -мезонов распадается на два π -мезона, то этот тип распада для K_-^0 -мезона более чем в 100 000 раз медленней, чем для быстро распадающегося K_+^0 -мезона. Тем не менее этот «запрещенный» распад имеет место, и это интерпретируется как нарушение CP -симметрии.

Легко понять, что предыдущие доводы достаточно запутаны и отнюдь не так просты, как доказательство нарушения P -симметрии в опыте

мисс Ву. По этой причине некоторые физики не хотят признавать эксперимент Кронина — Фитча окончательным доказательством нарушения CP -симметрии. Имеется возможность сохранить CP -симметрию; в самом деле, можно предложить различные способы сделать это, однако доводы в пользу нарушения CP являются достаточно вескими.

Что же следует из нарушения CP -симметрии? У физиков осталось еще предположение, что самое последнее зеркало — CPT -зеркало — является истинным зеркалом. Это предположение основано не на свойственном природе предпочтении к этой симметрии, оно основано просто

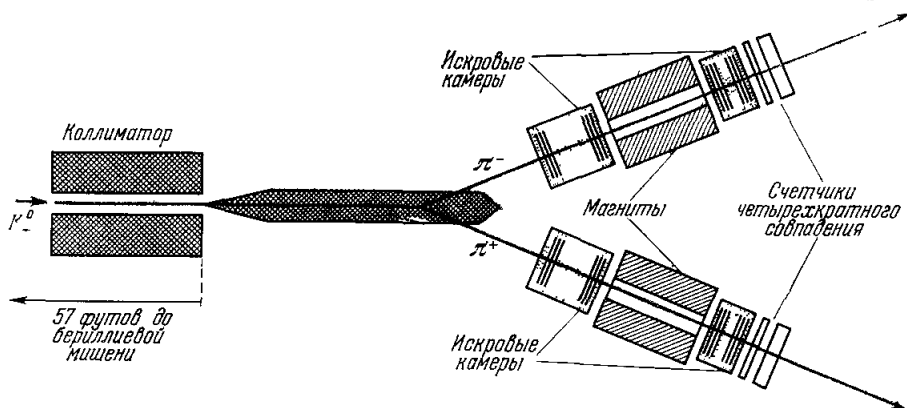


Рис. 9. Ниспровержение обратимости времени — такой вывод, по видимому, вытекает из эксперимента, показавшего, что K^0 -частица (называемая также K_S^0 -частицей) распадается иногда на два π -мезона (π^+ и π^-), а не на три π -мезона, как этого требует CP -симметрия.

Если K^0 распадается где-либо в незаштрихованной области, то имеется вероятность того, что продукты распада пройдут через два магнита и четыре искровые камеры. Эти искровые камеры включаются и тем самым выявляют следы частиц лишь в том случае, когда прохождение частицы регистрируется одновременно всеми четырьмя счетчиками совпадения. Магниты вызывают отклонение частицы (перпендикулярное плоскости страницы), которое позволяет определить ее импульс. Этот эксперимент был выполнен в Брукхейвенской лаборатории Кристенсоном, Кронином, Фигчем и Тюрлэ из Принстонского университета.

на том упрямом факте, что мы не можем сформулировать уравнения движения в квантовой теории поля, которые нарушали бы эту симметрию и одновременно удовлетворяли бы постулатам специальной теории относительности. Если принцип CPT -симметрии справедлив, то это служит доказательством правильности общих основ квантовой электродинамики и специальной теории относительности, но не дает никаких указаний на какую-то дополнительную симметрию природы.

Следует отметить одно несколько неприятное обстоятельство: для того чтобы CPT -зеркало осталось правильным, T -зеркало должно быть неправильным. Это заключение можно вывести из эксперимента Кронина — Фитча (рис. 9). Действительно, K^0 -мезон находится вначале в антисимметричном состоянии и распадается в симметричное относительно отражения в CP -зеркале состояние, тем самым демонстрируя несовершенство этого зеркала. Если изображение в CP -зеркале затем отразить в T -зеркале, то первоначальная асимметрия будет восстановлена — при условии, что CPT -зеркало (C плюс P плюс T) является правильным. Однако, чтобы перевести симметричное состояние в антисимметричное, T -зеркало само должно создавать антисимметричное изображение. Это эквивалентно утверждению, что при отражении время инвариантно и симметрия относительно обращения времени не имеет места.

Физики только приступили к объяснению смысла этого последнего нарушения. Если оставить в стороне явное нарушение T -симметрии, то из несохранения C , P и CP можно заключить, что законы природы отдают предпочтение либо правой, либо левой руке. Нас окружают многие явления, в которых, по-видимому, проявляется точно такое же предпочтение или, более точно, такое же различие между «правым» и «левым». Большинство из нас — «правши», а наше сердце расположено с левой стороны. В больших масштабах мы наблюдаем, что Земля вращается влево (против часовой стрелки), если смотреть сверху, с Северного полюса. В свою очередь Солнце вращается в Галактике вправо, если смотреть сверху, с Северного полюса Галактики. Эта асимметрия приписывалась асимметрии начальных условий. Теперь можно приписать ту же самую асимметрию законам движения, т. е. предположить, что вселенная была первоначально более симметричной, чем теперь, и что теперешнее ее состояние образовалось в результате асимметрии законов движения. Многие склонны соглашаться с этими рассуждениями, но я лично не убежден в их правильности. Тем не менее такие рассуждения можно проверить, если обладать достаточной информацией относительно вращения планет в других солнечных системах.

Из того факта, что законы природы не обладают симметрией относительно отражения пространства, вытекает одно мало приятное следствие. Оно лишает нас иллюзии, что эти законы являются простейшими (быть может, в весьма тонком, но тем не менее во вполне определенном смысле) мыслимыми законами, совместимыми с некоторыми очевидными опытами. Всякому закону природы соответствует некоторый новый закон природы, получающийся при отражении первого относительно какой-либо плоскости, и этот новый закон должен быть столь же простым, как и первый. Раньше мы думали, что закон, полученный отражением, должен быть идентичен исходному закону, подобно тому, как сфера при отражении остается сферой. Теперь мы убедились, что это не так. Трудности начались после того, как опыт мисс Ву показал, что продукты распада радиоактивного кобальта летят преимущественно вверх. Мы обошли эту трудность, вводя в рассмотрение другое вещество — радиоактивный антикобальт, который испускает частицы вниз. Это восстанавливает симметрию, так как теперь можно сказать, что законы природы симметричны, однако при этом нужно рассматривать два вида материи: вещество и анти-вещество. Явная асимметрия законов природы определяется асимметрией начальных условий, которые позволяют веществу преобладать над анти-веществом, по крайней мере той части вселенной, которую мы знаем из собственного опыта.

Однако недавний эксперимент Кронина и Фитча дает указание на то, что такое объяснение невозможно. Строго говоря, это указание — лишь косвенное, и мы должны исследовать все пути, которые могут привести к другой интерпретации и сохранить симметрию пространственных отражений законов природы. Если эти пути не приведут к выходу из трудностей, мы должны будем признать, что можно себе представить два одинаково простых закона природы, из которых природа по своему высочайшему капризу выбрала только один. Итак, если законы природы формулируются в понятиях, относящихся к принципам симметрии, связываемых нами обычно со свойствами пространства-времени (независимо от того, сколь утонченно они формулируются), то мы подошли к границе, до которой можно было считать законы природы простейшими из возможных.

Естественно возникает вопрос: испытывала ли физика и прежде подобный кризис? Да, испытывала. В классической физике предполагалось, что вещество можно разделять на сколь угодно малые части и при этом его основные свойства, такие, как удельный вес, вязкость, упругость, остаются неизменными. Конец этой бесконечной делимости положило открытие атома. Таким образом, атом усложнил строение материи, и этот упрямый новый факт был для многих столь же трудно приемлемым, как для нас отсутствие симметрии строения законов природы.

Большинство следствий атомной структуры, казавшихся сначала трудно приемлемыми, были правильно поняты, когда физики и химики научились использовать для своих измерений атомную шкалу и поняли, в частности, что атомы дают естественную единицу длины. Без такой единицы было бы трудно понять, почему средний рост человека равен примерно пяти-шести футам; если бы масштабы всех явлений можно было произвольно изменять, то человек, мышь и бактерия могли бы оказаться одного размера. Атомная теория позволяет также объяснить ряд свойств вещества, таких, как плотность, вязкость, упругость и т. д. Поэтому, в конечном счете, атомная теория скорее обогащает, а не усложняет нашу картину природы. Есть надежда, но пока только надежда, что ведущееся ныне зондирование симметрии пространства-времени приведет к аналогичному результату.

ЛИТЕРАТУРА

1. T. D. Lee and C. N. Yang, Phys. Rev. 104 (1), 254 (1956).
2. C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoopes, R. P. Hudson, Phys. Rev. 105 (4), 1413 (1957).
3. J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, R. Turlay, Phys. Rev. Letts. 13, (4), 138 (1964).
4. J. J. Sakurai, Invariance Principles and Elementary Particles, Princeton University Press, 1964.
5. E. P. Wigner, в сб. «Group Theoretical Concepts and Methods in Elementary Particle Physics» (ed. Feza Gürsey), Gordon and Breach Sci. Publ., 1964.