

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА НЕСОХРАНЕНИЯ  
ЧЕТНОСТИ, СЛЕДУЮЩИЕ ИЗ ИЗМЕРЕНИЙ КРУГОВОЙ  
ПОЛЯРИЗАЦИИ  $\gamma$ -ЛУЧЕЙ \*)****Г. Шопнер**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Еще в школе учат, что так называемые законы сохранения энергии, количества движения (импульса) и момента количества движения (вращательного импульса) являются основными законами физики. Менее известно, что эти законы сохранения выражают не что иное, как свойство однородности и изотропности физического пространственно-временного континуума, иными словами, что форма законов природы не зависит от того, какие специальные координатные системы используются для описания происходящих в природе процессов. Очевидно, что процессы, происходящие в природе, ничего не «знают» о том, где лежат начала координатных систем и как они ориентированы. Отметим, в частности, что инвариантность законов природы относительно перемещения непосредственно связана с сохранением импульса, тогда как инвариантность относительно вращения координатной системы эквивалентна сохранению момента количества движения. Сохранение энергии связано с тем, что начало отсчета времени можно выбрать произвольно, и, действительно, форма законов природы не зависит от того, когда был включен секундомер при данном опыте \*\*).

Рассмотренные преобразования имеют то общее свойство, что они могут быть выполнены как последовательность сколь угодно малых перемещений, т. е. они непрерывны. Существуют, однако, преобразования, не являющиеся непрерывными. Таковы например, «отражения», переводящие данный объект в его зеркальное отражение, но не допускающие непрерывного перехода между объектом и его отражением. К этим обобщенным отражениям принадлежат (см. таблицу) пространственные отражения (отражения в начале координат\*\*\*), отражения времени (обращение направления движения) и так называемые зарядовые отражения (зарядовое сопряжение), при которых все заряды заменяются равными зарядами, противоположными по знаку.

\*) Переработанный доклад по случаю присуждения премии Академией наук в Геттингене 29 сентября 1957 г. Naturwiss. 45, 453 (1958 г.). Перевод А. О. Вайсенберга.

\*\*) Таким образом, все покоящиеся пространственные координатные системы эквивалентны. Это утверждение не идет столь же далеко, как соответствующее ему утверждение специальной теории относительности, устанавливающее эквивалентность координатных систем движущихся равномерно относительно друг друга.

\*\*\*) Отражение в начале координат (шверсию) можно разложить на обычное отражение (перемена правого и левого) и поворот на  $180^\circ$ .

Более точно можно сказать, что при зарядовом отражении все частицы заменяются своими античастицами, например, электроны позитронами или нейтроны антинейтронами.

Тот факт, что эти отражения не принадлежат к непрерывным преобразованиям, сказывается в том, что в рамках классической физики они не

	Инвариантность относительно преобразований	Соответствует закону сохранения для величины
Непрерывные преобразования  «Отражения»	Переноса Поворота Смещения нуля отсчета времени	Импульса Момент импульса Энергии
	Отражения пространства ( $r \rightarrow -r$ ) Зарядового отражения (частица—античастица) Отражения времени ( $t \rightarrow -t$ )	Четности  Зарядовой четности
	Калибровочная инвариантность потенциала	Электрический заряд, нуклонное число, лептонное число

приводят к законам сохранения. В квантовой физике инвариантность законов природы относительно пространственного отражения, т. е. относительно перехода от правой координатной системы к левой, соответствует сохранению так называемой четности. Мы не будем входить здесь в детали точного определения этой величины. Аналогично, исходя из инвариантности законов природы относительно зарядового сопряжения\*), во многих случаях можно сформулировать сохранение зарядовой четности. Напротив, на основании соображений, которых мы здесь не будем касаться, из инвариантности относительно отражения времени не вытекает никаких новых законов сохранения.

Следует отметить, что рассмотренная инвариантность означает лишь инвариантность законов природы, но не отдельных объектов. Так, например, законы природы могут быть инвариантны относительно пространственного отражения, но могут существовать предметы, отличающиеся друг от друга при отражении. Например, правый винт при отражении переходит в левый или правая перчатка в левую. Инвариантность законов природы выражается, однако, в том, что при создании таких асимметричных объектов с помощью физических процессов, вероятность образования обоих направлений вращения одинакова.

Известно, что молекулы сахара имеют направление вращения, которое проявляется в том, что раствор сахара может вращать плоскость поляризации линейно поляризованного света. При этом говорят о правом и левом сахаре. Если химик получает сахар синтетическим путем, то образуется равное число лево- и правовращающих молекул. Тогда говорят о смеси.

Исходя из рассмотрения известных противоречий, возникающих при изучении распадов мезонов, Ли и Янг<sup>7</sup> поставили вопрос о том, действи-

\*) Это означает, что в «антимире», построенном из антипротонов и антинейтронов, будут действовать те же законы природы, что и в нашем мире.

тельно ли выполняется инвариантность относительно отражения при слабых взаимодействиях (к которым принадлежат радиоактивный  $\beta$ -распад и распады мезонов). Они показали, что, хотя целый ряд опытов указывает на то, что при сильных взаимодействиях (ядерные и электромагнитные силы) инвариантность выполняется, для  $\beta$ -распада до сих пор не были выполнены никакие опыты, позволяющие получить ответ на этот вопрос.

Возможность нарушения инвариантности относительно зеркального отражения никем до тех пор серьезно не рассматривалась, так как кто поверил бы, например, что освобождающаяся при делении урана энергия может быть различной в зависимости от того, наблюдать ли ее в левой или правой координатной системе. Необходима была смелость мысли для того, чтобы отказаться от представлений, кажущихся столь очевидными, и предложить опыты, которые сделали возможным проверку инвариантности относительно отражения при слабых взаимодействиях.

Первый такой опыт, произведенный Ву и сотрудниками<sup>15</sup> в январе 1957 г., показал, против всех ожиданий, что при  $\beta$ -распаде существует некоторое выделенное направление вращения. Этот опыт был подробно описан в раннем обзоре Людерса<sup>8a</sup>. В принципе он заключается в том, что спины ядер  $\text{Co}^{60}$  с помощью очень низкой температуры ориентируют в магнитном поле и исследуют, одинаковое ли число частиц испускается в параллельном и антипараллельном направлениях. Оказалось, что большее число частиц испускается антипараллельно спине ядра. Направление вращения ядра образует, таким образом, совместно с этим преимущественным направлением испускаемого выделенное направление вращения. Существование такой анизотропии в испускании электронов указывает на то, что зеркальная симметрия нарушается или, иначе говоря, имеет место несохранение четности.

## 2. ИЗМЕРЕНИЕ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ, СЛЕДУЮЩЕГО ЗА $\beta$ -РАСПАДОМ (ОБРАЩЕНИЕ ОПЫТА ВУ)

Измерение анизотропии испускаемых электронов ориентированными ядрами связано со многими затруднениями. Только небольшое число элементов можно ориентировать с помощью низких температур, и эта операция настолько трудна экспериментально, что достичь большой точности измерений невозможно. Поэтому существенно, что опыт Ву может быть обращен. В опыте Ву спин ядра ориентируется до  $\beta$ -распада, после чего наблюдается преимущественное испускание электронов в одном направлении. В противоположность этому можно исходить из неориентированных ядер и наблюдать  $\beta$ -частицы, испускаемые в определенном направлении. При нарушении инвариантности относительно отражения можно ожидать, что образовавшееся после испускаемого  $\beta$ -частицы ядро приобретет некоторую ориентацию, параллельную или антипараллельную направлению испускаемого  $\beta$ -частицы. Трудность заключается в том, чтобы обнаружить эту ориентацию дочерних ядер.

Эту задачу может облегчить следующее обстоятельство. Если ориентированные ядра испускают  $\gamma$ -лучи, то ориентировка ядерных спинов частично переносится на кванты, спин которых при этом приобретает преимущественное направление, параллельное или антипараллельное направлению распространения. При этом говорят о круговой поляризации  $\gamma$ -квантов. Она проявляется при рассеянии  $\gamma$ -квантов на ориентированных электронах. Сечение комптоновского рассеяния зависит от относительной ориентировки спинов электрона и  $\gamma$ -кванта. Ориентированные электроны существуют в намагниченном железе, где, однако, даже при магнитном насыщении поляризуется около 8% электронов. Поэтому, если рассеивать

кванты с круговой поляризацией на намагниченном железе, то интенсивность рассеяния будет изменяться при перемене направления намагничивания.

На основе этих идей можно придти к показанной на рис. 1 схеме опыта<sup>11</sup>.  $\beta$ -частицы, испускаемые источником  $S$  влево, регистрируются

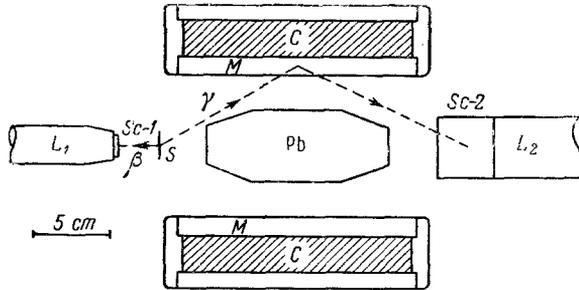


Рис. 1. Схема опыта Шошера.

сцинтилляционным счетчиком Sc-1. Гамма-кванты, испущенные в приблизительно противоположном направлении, рассеиваются на внутренней части магнита  $M$  (намагничиваемого с помощью катушки  $C$ ) и регистрируются сцинтилляционным счетчиком Sc-2. Свинцовый экран  $Pb$  защищает этот счетчик от прямого пучка  $\gamma$ -квантов. Регистрируются одновременные попадания электрона в счетчик Sc-1 и  $\gamma$ -кванта в счетчик Sc-2 («совпадения»); одновременность означает в данном случае, что совпадение происходит в пределах около  $10^{-8}$  сек). Затем меняют

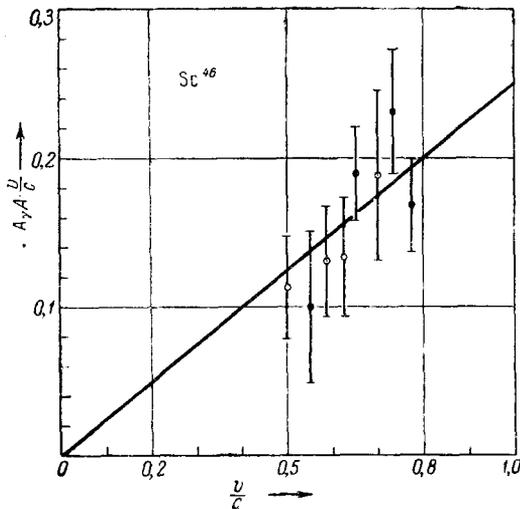


Рис. 2. Величина  $A_\gamma \cdot A_\beta \frac{v}{c}$  как функция  $\frac{v}{c}$  для  $Sc^{46}$ : ● — по Штеффену и др.<sup>14</sup>, ○ — по Шошеру и Юнгсту<sup>13</sup>.

направление тока в катушке и тем самым направление намагничивания и узнают насколько изменилось число  $\beta$ - $\gamma$ -совпадений в некоторый заданный интервал времени. Трудность этих опытов состоит в том, что даже при полной поляризации  $\gamma$ -квантов изменение числа отсчетов при перемагничивании составляет лишь несколько процентов. Причина этого в том, что только небольшая часть электронов в железе может быть ориентирована.

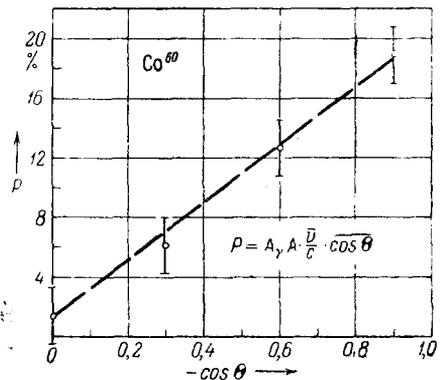


Рис. 3. Степень круговой поляризации  $P$  для  $\gamma$ -излучения (в %) в зависимости от  $\theta$  для  $Co^{60}$  по Аппелю<sup>1</sup>.

Первые измерения  $^{11}$  в  $\text{Co}^{60}$  и  $\text{Na}^{22}$  обнаружили явления, находящиеся в согласии с измерениями анизотропии испускания электронов. Они указывали, также, на большое нарушение четности.

Теория дает следующее выражение для степени круговой поляризации  $\gamma$ -квантов

$$P = A_{\gamma} \cdot A \left( \frac{v}{c} \right) \cos \vartheta,$$

где  $A_{\gamma}$  — коэффициент, зависящий от типа  $\gamma$ -перехода, который для многих распадов известен ( $A_{\gamma} = 1/3$  для  $\text{Co}^{60}$ ).

$A$  представляет собой наиболее интересную величину, которая отлична от нуля только при нарушении инвариантности относительно пространственного отражения. Кроме того,  $A$  зависит еще от типа  $\beta$ -перехода. В случае  $\text{Co}^{60}$  при максимальном несохранении четности  $|A| = 1$ ;  $v$  и  $c$  означают скорость частицы и скорость света,  $\vartheta$  — угол между направлениями испускания  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -кванта.

Справедливость этого соотношения была проверена экспериментально, причем прежде всего была измерена степень поляризации для различных скоростей электронов (рис. 2) и различных углов  $\vartheta$  (рис. 3). В пределах пока еще больших ошибок ожидаемые зависимости подтверждены. Особый интерес представляет возможно более точное определение  $A$ . Наилучшие из выполненных до сих пор измерений  $^{1,3}$  дают  $A = -1,014 \pm 0,054$ . Это наиболее точное из имеющихся доказательств того, что инвариантность относительно пространственного и зарядового отражения нарушается максимально возможным образом.

### 3. ДАЛЬНЕЙШИЕ ИЗМЕРЕНИЯ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ $\gamma$ -ЛУЧЕЙ

Из описанных в предыдущем разделе опытов нельзя сделать никаких заключений по поводу инвариантности относительно обращения времени. Это становится, однако, возможным, если произвести аналогичные исследования для так называемых смешанных  $\beta$ -переходов. Измерения со  $\text{Sc}^{46}$   $^{4,13}$  и  $\text{Zr}^{95}$   $^2$  указывают на то, что, если эта инвариантность и нарушается, то не сильно.

Дальнейшее следствие несохранения четности заключается в том, что испускаемые при  $\beta$ -распаде электроны продольно-поляризованы, т. е. их спин параллелен или антипараллелен направлению движения. Эта продольная поляризация может быть измерена по круговой поляризации  $\gamma$ -квантов следующим образом. Известно, что при внезапном торможении электронов возникает рентгеновское излучение. Теория говорит, что это тормозное излучение обладает круговой поляризацией, если оно возникло от торможения продольно-поляризованных электронов. Круговая поляризация такого (внешнего) тормозного излучения может быть измерена, как было описано выше, по рассеянию в намагниченном железе.

Экспериментальные данные снова указывают на максимальное несохранение четности  $^{5a}$ . Испускаемое при  $\beta$ -распаде одновременно с электроном, внутреннее тормозное излучение также обладает круговой поляризацией  $^{12}$ .

Новые данные могут быть получены из следующих опытов.

Особой формой  $\beta$ -распада является так называемый электронный захват. При этом ядро захватывает один электрон из атомной оболочки и освобождающаяся при этом энергия уносится нейтрино или иногда

частично передается последующему  $\gamma$ -излучению\*). Если при таком переходе четность не сохраняется, то  $\gamma$ -излучение, испущенное в сторону, противоположную испусканию нейтрино, должно иметь круговую поляризацию. Так как нейтрино нельзя наблюдать непосредственно, то этот опыт требует некоторых ухищрений, которые мы здесь не будем рассматривать<sup>5,6</sup>.

Рассмотрение этих опытов дает непосредственную возможность установить направление закрученности (спиральности) нейтрино. Оказывается, что спин нейтрино направлен антипараллельно направлению его движения, образуя таким образом, левый винт. Рассматривая этот результат совместно с результатом описанного в предыдущем разделе опыта ( $A = -1$ ), можно сделать заключение о типе  $\beta$ -взаимодействия. Оказывается, что из пяти принципиально возможных взаимодействий\*\*) в  $\beta$ -распаде преобладают только два, а именно векторное и аксиальновекторное взаимодействия.

Подводя итог следует сказать, что рассмотренные опыты показали, что при  $\beta$ -распаде происходит практически максимальное нарушение инвариантности относительно пространственного и зарядового сопряжения. В противоположность этому, инвариантность относительно обращения времени не нарушается или нарушается незначительно. В отношении сохранения числа лептонов\*\*\*) нельзя делать окончательных заключений. Справедливость остальных, приведенных в таблице, законов сохранения не подверглась изменению.

#### 4. ПОИСКИ ОБЪЯСНЕНИЯ

Неожиданный результат этих опытов заставляет задуматься о том как можно понять преобладание в природе определенного направления вращения. Одна возможность объяснения заключается в том, что радиоактивные ядра имеют определенную спиральность еще до распада, подобно некоторым молекулам или кристаллам. Следует, однако, иметь в виду, что все произведенные до сих пор опыты с частицами, из которых состоят атомные ядра, свидетельствуют о том, что эти частицы ведут себя скорее всего подобно молекулам жидкости, т. е. легко перемещаются друг относительно друга. В таких условиях создание определенной спиральности невозможно, так как для этого необходимо жесткое соединение отдельных частиц.

Другая возможность объяснения заключается в том, что спиральность присуща одной из участвующих в  $\beta$ -распаде частиц. Такое объяснение некоторое время казалось весьма привлекательным<sup>16</sup>. Действительно, обнаружилось, что отсутствие у нейтрино массы покоя тесно связано с наличием выделенного направления вращения («двухкомпонентная теория»). Более точный теоретический анализ показал, однако, что хотя таким способом можно математически весьма элегантно сформулировать максимальное несохранение четности, причина, по которой нейтрино обладает указанным свойством, не становится от этого более понятной.

Возможно, что идея, высказанная Ландау<sup>6</sup>, сможет, по крайней мере частично, уменьшить трудности, возникшие в нашем представлении о физическом пространстве, благодаря нарушению инвариантности относи-

\*) При  $\beta$ -распаде одновременно с  $\beta$ -частицей испускается незаряженная частица со спином  $1/2$ , не имеющая массы покоя. Частица, испускаемая совместно с электроном, называется антинейтрино, совместно с позитроном или при  $K$ -захвате—нейтрино.

\*\*) Исходя из их свойств относительно преобразований, различают скалярное, векторное, тензорное, аксиальновекторное и псевдоскалярное взаимодействия.

\*\*\*) «Лептон»—собирательное наименование для электрона и нейтрино и их античастиц: позитрона и антинейтрино ( $\lambda\epsilon\pi\tau\sigma_c$ —легкий).

тельно зеркального отражения. Существует общая теорема<sup>8а</sup>, из которой следует, что, если нарушается инвариантность относительно одного из трех отражений, то относительно по крайней мере одного из двух оставшихся отражений инвариантность не может сохраниться.

Из рассмотренных опытов вытекает, что инвариантность нарушается не только относительно пространственного, но и относительно зарядового отражения. Последнее означает, что физик, который выполнит те же опыты в некотором «антимире»\*), постоянно будет получать знаки, противоположные по отношению к нашим опытам.

С другой стороны, несохранение четности означает, что рассмотрение явления в зеркале вызывает перемену знака в описываемых опытах. Если, однако, одновременно выполнить оба отражения, то знак изменится дважды и снова приобретет прежнее значение. Поэтому в пространственно отраженном антимире все опыты дадут тот же результат, что и в нашем мире. Это привело Ландау к следующей идее. Выделение определенного направления вращения в нашей галактике может соответствовать предпочтению противоположного направления в галактике, построенной из античастиц. Тогда симметрия пространства в известном смысле сохранилась бы: выделенное направление вращения имело бы при этом только локальный характер.

Шапиро<sup>10</sup> предпринял другую попытку объяснения. Характеристическая длина для  $\beta$ -распада имеет порядок  $10^{-17}$  см, что существенно меньше радиуса ядерных сил ( $\sim 10^{-13}$  см). Этот исследователь считает поэтому, что в столь малых размерах пространства вообще невозможно обнаружить направление вращения. При переходе к большим размерам это свойство было бы потеряно. Эти еще весьма несовершенные попытки показывают, как мало мы знаем об истинных причинах несохранения четности. Несмотря на это, уже сейчас можно сделать ряд интересных выводов. Вероятно, окажется необходимым пересмотреть наши представления о физическом пространстве и особенно о его зеркальной симметрии. В физике элементарных частиц несохранение четности при слабом взаимодействии приводит к некоторым конкретным результатам. Дальнейшее развитие идей в этой области трудно предвидеть.

Далее можно рассмотреть следующие интересные соображения. В общей теории относительности взаимное притяжение масс оказывает действие на структуру пространства. С другой стороны, мы видели выше, что несохранение такой чисто квантовомеханической величины, как четность, также тесно связано со структурой пространства. Может быть это даст когда-нибудь возможность осуществить связь между гравитацией и квантовой механикой, которые до сих пор существовали друг около друга, будучи почти несвязанными.

Наконец, следует кратко упомянуть о том, что дает новая точка зрения биологии и химии. Как было уже сказано во введении, при синтетическом получении сахара образуется оптически не активная смесь, что находится в наилучшем соответствии с инвариантностью относительно пространственного отражения. Однако хорошо известно, что растворы растительного сахара оптически активны. Это объясняется тем, что все молекулы растительного сахара обладают одинаковой спиральностью. Как показывают, однако, новые исследования, такие оптически активные растворы можно получить искусственно. Некоторые кристаллы, если их во время роста подвергнуть облучению  $\beta$ -частицами, образуются в состоянии

---

\*) Это мир, в котором все частицы замещены своими античастицами, т. е. протоны—антипротонами, электроны—позитронами и т. д. Некоторые астрономические наблюдения говорят о возможности существования таких галактик.

определенной спиральности. И наоборот, однородная смесь становится оптически активной после облучения  $\beta$ -частицами, так как молекулы некоторой определенной спиральности разрушаются легче, чем те же молекулы с противоположной спиральностью. В обоих опытах, по-видимому, спиральность, которую получают  $\beta$ -частицы из-за несохранения четности, частично переносится на облучаемое вещество.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Арпел, Диссертация, 1958.
2. Н. Арпел, Н. Шорпер, Zeits. Phys. **149**, 403 (1957).
3. Н. Арпел, Н. Шорпер и С. Д. Блум, Phys. Rev. **109**, 2211 (1958).
4. Ф. Воехм и Н. Варстра, Phys. Rev. **107**, 1207 (1957).
5. М. Голдхабер, Л. Гродзинс и А. В. Сунуар, Phys. Rev.: a) **106**, 826 (1957), b) **108**, 1015 (1958).
6. Л. Ландау, Nuclear Phys. **3**, 127 (1957).
7. Т. Д. Ли и С. Н. Янг, Phys. Rev. **104**, 254 (1956).
8. Г. Лүдерс: a) Naturwiss. **44**, 273 (1957), b) Dan. Mat. Fys. Medd. **28**, No. 5 (1954).
9. В. Паули, Niels Bohr and the development of Physics. London: Pergamon Press, 1955. (Русский перевод «Нильс Бор и развитие физики», ИЛ, 1958).
10. I. S. Schapiro, Fortschr. Phys. **5**, 515 (1958); русский текст УФН, **61**, 313 (1957).
11. Н. Шорпер, Phil. Mag. **2**, 710 (1957).
12. Н. Шорпер и С. Галстер, Nuclear Phys. **6**, 125 (1958).
13. Н. Шорпер и В. Юнгст—неопубликованные данные.
14. Стеффен и Митраб—частное сообщение.
15. С. С. У и, Е. Амблер, Р. У. Наууард, Д. Д. Норрес и Р. Р. Худсон, Phys. Rev. **105**, 1413 (1957). Русский перевод: «Новые свойства симметрии элементарных частиц», ИЛ, 1957 г.
16. См. также следующие обзоры: О. Р. Фриш и Т. Н. Р. Скурме, Progr. Nuclear Phys. **6**, 267 (1957); Н. Шорпер, Fortschr. Phys. **5**, 581 (1957). Proceedings of the Rehovoth Conference on Nuclear Structure, Amsterdam: North-Holland Publishing Comp., 1958.