

**СОХРАНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ЧЕТНОСТИ КАК ОСНОВНОЙ
ЗАКОН СИММЕТРИИ В ПРИРОДЕ *)****В. Г. Соловьев**

Свойства пространства—времени находят свое отражение в основных законах физики. Так, однородность пространства—времени при отсутствии тяготения служит основанием для законов сохранения энергии, импульса и момента количества движения. Основным принцип частной теории относительности, отражающий свойства пространства—времени, содержится в постулате: законы физики должны быть инвариантны относительно собственных преобразований Лоренца. Требования инвариантности относительно инверсии пространственных и временных координат также отражают свойства пространства—времени. Заметим, что ограничения, накладываемые на теорию поля весьма общими свойствами пространства—времени, должны быть едиными для всех видов взаимодействий.

Остановимся более подробно на требованиях инвариантности относительно преобразований отражения пространственных и временных координат, а также операций зарядового сопряжения. Известно, что эксперименты, проведенные по предложению Ли и Янга¹, показали, что пространственная четность P не сохраняется в слабых взаимодействиях. Поэтому встает вопрос: какими же свойствами симметрии обладает пространство—время. Предпринимались попытки ответственность за несохранение четности в слабых взаимодействиях переложить на одну частицу, а именно на нейтрино. Однако эти попытки потерпели неудачу, так как было открыто несохранение четности во многих реакциях распада элементарных частиц, в которых нейтрино не принимает участия. Ландау² и Ли и Янг⁵ обратили внимание на сохранение комбинированной четности в слабых взаимодействиях. Утверждение Л. Д. Ландау² состоит в том, что пространство является симметричным, а асимметрия заключена в частицах, вернее, в электрических зарядах. Однако отделение свойств частиц от свойств пространства—времени не является убедительным. Например, свойства пространства—времени находят свое проявление в виде ограничения, накладываемого на скорости движения всех частиц. Таким же образом, по нашему мнению, свойства пространства—времени находят свое отражение в трансформационных свойствах операторов, описывающих элементарные частицы. В природе существуют сложные соединения, которые не удовлетворяют требованию инвариантности относительно пространственного отражения. В связи с этим кажется целесообразным связать свойства пространства—времени относительно отражений с поведением элементарных частиц, а именно: на каждом этапе развития науки

*) Доклад, сделанный 3 октября 1958 г. на Всесоюзной межвузовской конференции по квантовой теории полей и теории элементарных частиц в Ужгороде.

свойства пространства—времени в отношении отражения проявляются через поведение тех частиц, которые на этом этапе развития считаются элементарными.

При таком подходе из не сохранения четности в слабых взаимодействиях можно сделать вывод, что пространство—время не обладает симметрией относительно отражения пространственных координат. Ввиду этого основным законом симметрии в природе следует считать закон сохранения комбинированной четности, т. е. любая теория должна обладать свойством инвариантности относительно преобразования комбинированной инверсии. Первоначально^{3,4} этот закон был сформулирован как гипотеза сохранения только комбинированной четности в сильных, электромагнитных и слабых взаимодействиях.

Преобразование комбинированной инверсии PC состоит в операции P отражения пространственных координат и в операции C превращения частицы в античастицу. Из теоремы Паули—Людерса следует, что величины, инвариантные относительно операции комбинированной инверсии, являются также инвариантными относительно операции отражения времени. Поэтому основной закон симметрии в природе можно сформулировать как закон инвариантности теории относительно операции инверсии времени (в смысле Вигнера).

Прежде чем мы перейдем к обсуждению вопроса о сохранении четности в сильных взаимодействиях, остановимся на одной особенности математического аппарата, описывающего элементарные частицы. Придерживаясь систематики элементарных частиц Гелл-Манна и Нишиджима, все лагранжианы сильного взаимодействия мезонов и барионов разделим на два класса⁶. К первому классу отнесем взаимодействия, содержащие хотя бы одну вершину, где фермион не меняет ни одной из своих основных характеристик: масса, электрический заряд, странность. Это взаимодействия π -мезонов с нуклонами и π -мезонов с Ξ -гиперонами (а также электромагнитные). Ко второму классу отнесем взаимодействия, содержащие только такие вершины, где фермион обязательно изменяет хотя бы одну из своих основных характеристик: масса, электрический заряд, странность. Это—взаимодействия π -мезонов с Λ - и Σ -гиперонами, а также все взаимодействия K -мезонов с барионами. Вид лагранжианов взаимодействия, отнесенных к первому классу, определяется поведением операторов поля от отношения к операциям P и PC (или T), а вид лагранжианов, отнесенных ко второму классу, полностью определяется поведением операторов по отношению к операции P .

Основное утверждение рассматриваемой концепции сформулируем следующим образом: закон сохранения комбинированной четности отражает фундаментальные свойства пространства—времени. Сохранение четности в отдельных взаимодействиях является следствием дополнительных требований инвариантности. Действительно, как показано в^{3,4,7}, в случае квантовой электродинамики вследствие условия градиентной инвариантности, требование инвариантности относительно операции комбинированной инверсии PC приводит к инвариантности по отношению к операции пространственной инверсии. Таким образом, сохранение четности в ренормируемых электромагнитных взаимодействиях является следствием закона сохранения электрического заряда*).

*) Заметим, что в письме Зельдовича⁸ рассмотрен пример неренормируемого взаимодействия.

Как показано в ^{3,4,7,11}, в случае ренормируемой псевдоскалярной или (скалярной) мезонной теории вследствие условия изотопической инвариантности, требование инвариантности относительно преобразования комбинированной инверсии PC приводит к инвариантности по отношению к операции пространственной инверсии P . Таким образом, сохранение четности в мезонной теории является следствием гипотезы изотопической инвариантности.

Далее, как показано в ^{9,4}, требование инвариантности относительно операции комбинированной инверсии PC ренормируемого и изотопически инвариантного лагранжиана взаимодействия K -мезонов с барионами, $\Sigma\Lambda$ -взаимодействия не приводит к сохранению четности. Таким образом, требования PC и изотопической инвариантности для лагранжианов взаимодействия, отнесенных к первому классу, приводят к сохранению четности, а для лагранжианов взаимодействия, отнесенных ко второму классу, не приводят к сохранению четности. Вполне возможно, что появится необходимость в каких-нибудь дополнительных требованиях инвариантности, которые приведут к сохранению четности в отдельных видах лагранжианов, отнесенных ко второму классу. Заметим, что ренормированный лагранжиан взаимодействия барионов и мезонов, инвариантный относительно операции комбинированной инверсии, однозначно определен. Действительно, ввиду того, что известно поведение при преобразовании PC -оператора π -мезонного поля, полностью определены члены лагранжиана взаимодействия, отнесенные к первому классу, а для взаимодействий, отнесенных ко второму классу, имеется только один вид лагранжиана взаимодействия, инвариантного относительно PC .

Свое рассмотрение мы ограничим только ренормируемыми лагранжианами взаимодействия. Следует заметить, что разделение лагранжиана взаимодействия на ренормируемые и неренормируемые части проведено на основании разложения S -матрицы в ряд по степеням константы связи. Однако, как известно¹⁰, между ренормируемыми и неренормируемыми теориями имеется существенное физическое различие, так как лагранжианы взаимодействия перенормируемых теорий представляют собой «обломки» нелокализованных взаимодействий, представленных как бы в локализованном виде.

При исследовании несохранения четности в сильных взаимодействиях путем анализа столкновений барионов и мезонов следует иметь в виду, что эффект от несохранения четности в сильных взаимодействиях должен быть больше несохраняющего четность вклада от виртуальных слабых взаимодействий. Поскольку мы придерживаемся классификации взаимодействий, данной Гелл-Манном, то пример Зельдовича⁸ не является случаем нарушения четности в электромагнитном взаимодействии, а, с нашей точки зрения, является иллюстрацией влияния виртуальных диаграмм со слабым взаимодействием на электромагнитные процессы.

Перейдем к обсуждению вопроса об экспериментальной проверке сохранения четности в сильных взаимодействиях. Требование изотопической инвариантности для инвариантных относительно PC лагранжианов взаимодействия, отнесенных к первому классу, приводит к сохранению четности. Поэтому прежде всего исследуем взаимодействия тех частиц, лагранжианы взаимодействия которых относятся ко второму классу. Для проверки сохранения четности при рождении K -мезонов и гиперонов рассмотрим процесс $\pi + N \rightarrow K + Y$ с последующим распадом $Y \rightarrow N + \pi$ (Y может быть Λ -или Σ -гипероном). Как показано в ¹², если четность не сохраняется при рождении K -мезона и гиперона, то может появиться продольная компонента вектора поляризации гиперона, а это приведет к появлению асимметрии в распределении π -мезонов от распада гиперонов (в системе центра

инерции) как относительно плоскости, перпендикулярной плоскости рождения и проходящей по направлению начального π -мезона, так и относительно плоскости, перпендикулярной плоскости рождения и перпендикулярной направлению падающего π -мезона. Причем ^{12, 13}, если имеется продольная поляризация гиперона, то должна появиться асимметрия по крайней мере относительно одной из упомянутых плоскостей *).

Анализ экспериментальных данных¹⁴ и исследование¹⁵ вышеупомянутой асимметрии в реакции $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$ при энергии 1,1 Бэв, проведенное группой пузырьковой камеры в Беркли **), не обнаружили несохранения четности при рождении K -мезонов и гиперонов, точность же результатов измерений весьма невысокая. В связи с этими экспериментами следует заметить, что поскольку неизвестны свойства продольной поляризации (если она появляется), то возможно, что она может быть различной (по величине и знаку) при различных углах рождения гиперонов и при интегрировании по углам эффект может несколько смазываться. В связи с этим было бы интересно рассмотреть этот процесс в узком интервале углов рождения гиперонов. Аналогичный интерес представляют реакции

$$K^- + p \rightarrow Y + \pi, \quad \Sigma^- + p \rightarrow \Lambda + n$$

и другие.

Весьма перспективным является исследование реакции ¹⁶

$$\pi^- + p \rightarrow \Sigma^- + K^+ + \pi^0.$$

Если четность не сохраняется при рождении гиперонов и K -мезонов, то появится асимметрия в распределении K -мезонов относительно плоскости, проведенной (в системе центра масс) через направления падающего π -мезона и гиперона. Преимущество этой и аналогичных реакций

$$K^- + d \rightarrow p + \Lambda^0 + \pi^-, \quad \pi^- + p \rightarrow Y^0 + K^+ + \pi^-$$

состоит в том, что асимметрия не зависит от свойств продольной поляризации. Возможно, что несохранение четности проявится при весьма высоких энергиях, где рождаются три и более мезонов.

Более тщательное изучение несохранения четности проводилось путем рассеяния поляризованных нуклонов на нуклонах и ядрах. На основании анализа проведенного в ¹⁷ поляризационного эксперимента¹⁸ показано, что величина F^2 , характеризующая степень нарушения закона сохранения четности, меньше или равна $3 \cdot 10^{-2}$. В ¹⁹ на основании измерения продольной поляризации нейтронного пучка с энергией 350 Мэв получено $F^2 \leq 3,6 \cdot 10^{-6}$. В ¹⁷ изучался вопрос о несохранении четности при рождении π^+ -мезонов на алюминии поляризованными протонами с энергией 209 Мэв, найдено $F^2 \leq 2 \cdot 10^{-3}$. Более точно подтверждено сохранение четности в ядерных реакциях. Так, Таннер²⁰ нашел $F^2 \leq 4 \cdot 10^{-8}$, а Уилкинсон²¹ в среднем по ряду реакций определил $F^2 \leq 1 \cdot 10^{-7}$.

Если нет нарушения изотопической инвариантности, то несохранение четности в нуклон-нуклонных столкновениях и ядерных реакциях может появиться как вследствие участия виртуальных K -мезонов и гиперонов, так и благодаря нелокальности взаимодействия. Как показывает оценка, проведенная в¹³, вклад K -мезонных сил в нуклон-нуклонный потенциал невелик, поэтому сохранение (с большой точностью) четности в нуклон-нуклонных взаимодействиях не противоречит нарушению сохранения

*) Автор благодарен проф. Дрелл за присылку препринта и сообщение своих соображений по вопросу PC -сохранения.

**) Автор благодарен проф. Штейнбергеру и проф. Гуду за присылку предварительных результатов измерений.

четности при взаимодействиях с участием K -мезонов и гиперонов (т. е. для лагранжианов взаимодействия, отнесенных ко второму классу).

В заключение заметим, что экспериментальное открытие несохранения четности в сильных взаимодействиях, описываемых лагранжианами, отнесенными ко второму классу, не только бы подтверждало всю вышесказанную концепцию, но и дало бы возможность глубже проникнуть в тайны природы. Например, появление несохранения четности при рассеянии π -мезонов на нуклонах будет служить свидетельством или нарушения гипотезы зарядовой инвариантности или появления нелокального взаимодействия. А появление несохранения четности в нуклон-нуклонных взаимодействиях дало бы возможность, кроме того, оценить вклад K -мезон-гиперонных сил.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. T. D. Lee, C. N. Yang, Phys. Rev. **104**, 254 (1956).
2. Л. Д. Ландау, ЖЭТФ **32**, 405 (1957). См. также И. М. Халатников, вступительная статья к сборнику «Новые свойства симметрии элементарных частиц».
3. В. Г. Соловьев, ЖЭТФ **33**, 537 (1957).
4. В. Г. Соловьев, Nuclear Physics **6**, 618 (1958).
5. T. D. Lee, C. N. Yang, Phys. Rev. **105**, 1671 (1957).
6. В. Г. Соловьев, ЖЭТФ **34**, 1335 (1958).
7. S. Gupta, Canadian Journal of Physics **35**, 1309 (1957).
8. Я. Б. Зельдович, ЖЭТФ **33**, 1531 (1957).
9. В. Г. Соловьев, ЖЭТФ **33**, 796 (1957).
10. Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков, УФН **57**, 3 (1955).
11. G. Feinberg, Phys. Rev. **108**, 878 (1957).
12. В. Г. Соловьев, Возможная проверка сохранения четности при рождении K -мезонов и гиперонов, препринт ОИЯИ (P-147), февраль 1958.
13. S. D. Drell, S. C. Frautschi, A. M. Lockett, «PC-сохранение в сильных взаимодействиях» (препринт).
14. F. Eisler et al., Phys. Rev. **108**, 1353 (1957).
15. F. S. Crawford, M. Cresti, M. L. Good, F. T. Solmitz, M. L. Stevenson, Phys. Rev., Lett. **1**, 209 (1958).
16. В. Г. Соловьев, ЖЭТФ **36**, 628 (1959).
17. E. Heer, A. Roberts, J. Tinlot, Phys. Rev. **111**, 645 (1958).
18. O. Chamberlain et al., Phys. Rev. **93**, 1430 (1954).
19. D. R. Jones, P. G. Murphy, P. L. O'Neill, Proc. Phys. Soc. **72**, 429 (1958).
20. N. Tanner, Phys. Rev. **107**, 1203 (1957).
21. D. H. Wilkinson, Phys. Rev. **109**, 1603, 1610, 1614 (1958).