

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

539.12.01

О ВОЗМОЖНОМ НЕСОХРАНЕНИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ЧЕТНОСТИ В СЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

В августе 1964 г. на Международной конференции по физике высоких энергий в Дубне были доложены сенсационные результаты, полученные группой физиков-экспериментаторов из Принстонского университета в США. Кристенсен, Кроиния, Фитч и Торлей наблюдали распад на два π -мезона долгоживущей компоненты в K_0 -мезонном пучке, полученном на Брукхейвенском протонном ускорителе.

Результаты этого опыта уже опубликованы (см. ¹), и если они подтвердятся, последствия для физики будут очень серьезны. Данные опыта выглядят как свидетельство проявляющегося в слабых взаимодействиях нарушения CP -инвариантности природы ^{*}). Такое заключение, строго говоря, не является однозначным. Имеются и другие возможности. Но все они связаны с радикальными изменениями наших представлений. Мы обсудим далее физические следствия эксперимента.

Рождающийся в ядерных столкновениях за времена порядка 10^{-23} сек K_0 -мезон является состоянием с определенной странностью $S=1$. Его античастица \bar{K}_0 имеет странность $S=-1$, и поскольку слабое взаимодействие может менять странность, возможны переходы $K_0 \rightleftharpoons \bar{K}_0$. Несмотря на то, что в таких переходах странность меняется на две единицы и они происходят во втором приближении по слабым взаимодействиям, возникнет тем не менее мощная перестройка состояний K_0 и \bar{K}_0 , потому что соответствующие уровни являются вырожденными. (Для более подробного ознакомления с понятием «странность» и определением K -мезонных состояний см., например, обзор Зельдовича ³.) Если бы CP -инвариантность была строгой, то состояниями, между которыми отсутствуют переходы и которые имеют определенную массу и время жизни, были бы CP -четная и CP -нечетная комбинации из K_0 и \bar{K}_0 . Их называют соответственно K_1 и K_2 . K_1 -мезон в основном распадается на два π -мезона. Для K_2 такой распад запрещен сохранением CP -четности (система из двух π -мезонов имеет положительную CP -четность). K_2 может распадаться на три π -мезона, а также на π -мезон, электрон (или μ -мезон) и нейтрино, потому что эти состояния не имеют определенной CP -четности. (Подробнее о распадах K -мезонов см. обзор Л. Окуня ⁴.) В связи с различными способами распада времена жизни K_1 и K_2 сильно отличаются. K_2 -мезон «живет» в 600 раз дольше, чем K_1 ($\tau_{K_1} \approx 10^{-10}$ сек, $\tau_{K_2} \approx 6 \cdot 10^{-8}$ сек). В опыте Кристенсона, Кроиния, Фитча и Торлея K -мезоны имели скорость $v \approx 0,91$ с. Поэтому K_1 -мезон должен был распадаться на длине $v\tau_{K_1} (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \approx 6,5$ см, однако распады на два π -мезона были обнаружены на расстоянии ≈ 19 м от места рождения K_0 . Правда, число таких распадов невелико и составляет 0,2% по сравнению с обычными событиями $K_2 \rightarrow 3\pi$, $K_2 \rightarrow \text{лев}$ и $K_2 \rightarrow \text{прав}$. Тем не менее цифру 0,2% очень трудно объяснить.

В самом деле, как мы выяснили, на два π -мезона может распадаться только K_1 -мезон. Но примесь K_1 -мезонов на расстоянии, равном примерно 300 распадным длинам, должна быть, согласно современным представлениям о законе распада нестабильной частицы, на много порядков меньше того, что необходимо для объяснения эффекта. Поскольку эксперимент осуществлялся не в вакууме, K_1 мог бы образоваться из K_2

^{*}) Инвариантность природы относительно преобразований комбинированной инверсии и связанное с этим сохранение CP -четности — это красивая гипотеза, впервые выдвинутая Ландау ². После того, как в 1956 г. экспериментально было обнаружено несохранение пространственной (P) четности в слабых взаимодействиях, гипотеза о сохранении CP -четности понадобилась для того, чтобы сохранить инвариантность пустого пространства (вакуума) относительно зеркального отображения (пространственной инверсии).

после взаимодействия последнего с веществом. Такое явление называется *регессией*. Однако доля K_1 -мезонов, возникающих из K_2 в процессе регенерации в веществе экспериментальной установки, по оценкам авторов в 10^6 раз меньше того, что необходимо.

Таким образом, если данные Принстонской группы подтвердятся, мы будем вынуждены признать, что осуществляется, по-видимому, одна из новых с точки зрения современной физики возможностей.

1) Либо при временах, много больших времени жизни нестабильной частицы, имеются отклонения от экспоненциального закона распада; в связи с этим достаточно большая примесь K_1 -мезонов «выживает» и распадается на большом расстоянии от места рождения. Имеются теоретические соображения (см., например, ^{5, 6}) в пользу приближенности экспоненциального закона распада. Однако до сих пор считалось, что этот эффект слишком мал, чтобы практически его нужно было принимать во внимание.

2) Либо существует какое-то новое поле. K_0 и \bar{K}_0 могут по-разному взаимодействовать с ним. Рассеиваясь в таком поле, K_2 перейдет в K_1 , после чего K_1 распадется на два λ -мезона. В связи с этой возможностью уже предложено несколько конкретных моделей (см., например, работы Бернштейна, Кабиббо и Ли ⁷ и Белла и Перринга ⁸). Новое поле может взаимодействовать со странностью или гиперзарядом (K_0 и \bar{K}_0 имеют различные гиперзаряд и странность). K -мезонам достаточно иметь потенциальную энергию $\sim 10^{-8}$ эв в таком поле, чтобы возник наблюдаемый эффект. Это связано с тем, что разность масс K_1 и K_2 очень мала ($\sim 10^{-5}$ эв) и эта система чувствительна к слабым потенциалам. К сожалению, трудно указать, где еще могло бы проявиться такое взаимодействие, которое оказывается на 10 порядков слабее гравитации.

3) Возможно, существует новая частица, которая взаимодействует со странностью (см. работу Леви и Науэнберга ⁹). Превращение K_2 в K_1 происходит с излучением такой частицы. Если допустить, что ее масса лишь немного меньше разности масс K_2 и K_1 , то ее взаимодействие со «странным зарядом» K -мезонов должно определяться безразмерной постоянной $g^2/4\pi \approx 10^{-5}$. Это всего на три порядка меньше квадрата электромагнитной постоянной.

Может быть, имеется, наконец, еще возможность, которую нельзя сейчас предусмотреть. Многие верят, что в будущем найдется какое-то простое объяснение того, почему в эксперименте Кристенсона, Кронина, Фитча и Торлея наблюдаются распады на 2 λ . Основанием для такой веры служит естественное для физики нежелание радикально изменять сложившееся представление на основании данных одного-единственного опыта, пропавшего к тому же над весьма сложным объектом.

4) После того как все это сказано, мы должны рассмотреть наиболее непосредственный способ интерпретировать данные по распаду K_2 как свидетельство нарушения CP -инвариантности. Вместе с этим и T -инвариантность слабых взаимодействий должна быть подвергнута сомнению ^{*}). Существенно, что до сих пор отсутствуют эксперименты, которые надежно устанавливают сохранение CP - и T -четности в распадах с изменением странности. Кроме того, отсутствуют всякие эксперименты, в которых CP - и T -инвариантности проверялись в лептонных распадах с изменением странности.

После эпохи 1956—1957 гг., связанной с несохранением четности, физика уже трудно чем-либо удивить. Если окажется, что этого требует эксперимент, придется отказаться и от CP , каким бы трудным ни выглядел сейчас этот шаг.

Необычным в возникающей ситуации является также то, что несохранение CP -четности выглядит как очень слабый эффект. Согласно результатам Принстонской группы амплитуда процесса $K_2 \rightarrow 2\lambda$ примерно в $2 \cdot 10^{-3}$ раза меньше, чем амплитуда $K_1 \rightarrow 2\lambda$.

Можно было бы признать, и, возможно, так оно и окажется на самом деле, что слабое взаимодействие (во всяком случае та его часть, которая вызывает нелептонные распады K_0 -мезонов) действительно слабо нарушает CP -инвариантность (соответствующие амплитуды подавлены в 1000 раз). Такое предположение не противоречит другим экспериментам. Эту возможность, по-видимому, нельзя исключить даже в обычном β -распаде. Достигнутая там точность недостаточна для обнаружения столь незначительного эффекта несохранения CP -четности.

Однако все это очень непохоже на то, как не сохраняется P -четность в слабых взаимодействиях. И физики начинают рассуждать следующим образом: если мы обнаружим небольшой эффект несохранения P -четности в процессах, протекающих в основном за счет сильных или электромагнитных взаимодействий, то мы знаем, что это обязано слабым взаимодействиям, где такое несохранение является максимально воз-

^{*}) Инвариантность любой физической теории относительно произведения трех операций: зарядового сопряжения (C), пространственной инверсии (P) и обращения времени (T), следует из очень общих физических принципов. Этот замечательный факт впервые был установлен Людгерсом и Паули и носит название « CPT -теоремы». Из CPT -теоремы вытекает, что вместе с CP нарушается также и T -инвариантность.

возможным; теперь мы обнаружили слабое нарушение CP -инвариантности в нелептонных распадах K_0 -мезона, приписав это влиянию взаимодействий другого класса. Соответствующие таким взаимодействиям распады подавлены по сравнению с лептонными распадами K_0 , но несохранение CP в таких переходах будет большим.

Предложена модель (см. Труонг ¹⁰), в которой нарушение CP -инвариантности обязано взаимодействиям, сильно меняющим изотопический спин ($\Delta T=3/2$). Известно экспериментально, что переходы с $\Delta T=3/2$ примерно на три порядка менее вероятны, чем переходы с $\Delta T=1/2$. Поэтому можно допустить в них относительно большее нарушение CP . Для объяснения эффекта необходимо ввести несохранение CP -четности в $\Delta T=3/2$ -переходах на уровне нескольких процентов. В этой модели K_2 непосредственно распадается на два π -мезона в состоянии $T=2$ (напомним, что изотопический спин K равен $1/2$), в то время как распад в состоянии $T=0$ происходит по схеме

$$K_2 \xrightarrow[CP \neq 1]{\Delta T=3/2} 2\pi \xrightarrow[CP=1]{\Delta T=3/2} K_1 \xrightarrow[CP=1]{\Delta T=1/2} 2\pi.$$

Недавно Сакс исследовал другую возможность ¹¹. Если допустить лептонные распады, в которых изменение странности и заряда сильно взаимодействующих частиц противоположны ($\Delta S=-\Delta Q$), то комбинация таких процессов с обычными распадами $\Delta S=\Delta Q$ приведет к смешиванию состояний K_0 и \bar{K}_0 , например, по цепочке $K_0 \rightarrow \text{леу} \rightarrow \bar{K}_0$. Если теперь предположить, что в таких процессах сильно не сохраняется CP -четность, то в свою очередь K_1 и K_2 будут переходить друг в друга. Однако это будет происходить медленно, потому что у K_1 и K_2 разные массы и разность масс значительно больше, чем взаимодействие, приводящее к лептонным переходам. Численные оценки, сделанные Саксом, позволяют количественно объяснить наблюдаемый эффект. Таким образом, в этой модели не K_2 -мезон распадается на 2π с нарушением CP , а K_2 медленно превращается в K_1 , который в свою очередь быстро распадается на 2π уже с сохранением CP -четности. Серьезным аргументом против такой модели служит то обстоятельство, что распады с $\Delta S=-\Delta Q$ экспериментально не наблюдались. Это с трудом можно объяснить, только приняв ряд дополнительных предположений.

Имеется попытка ввести новое очень слабое взаимодействие, вызывающее переходы с $\Delta S=2$ и максимальным нарушением CP (см. Вольфенштейн ¹²). В этом случае переходы $K_2 \rightarrow K_1$ с последующим быстрым распадом K_1 -мезона возможны уже в первом порядке по этому взаимодействию. Новое взаимодействие должно быть в 10^7-10^8 раз слабее обычного слабого.

В последнее время Кабиббо ¹³ рассмотрел возможность нарушения CP -инвариантности, связав это с так называемыми токами второго рода, которые до сих пор считались отсутствующими. Однако здесь малость отношения амплитуд $K_2 \rightarrow 2\pi / K_1 \rightarrow 2\pi$ выступает больше как случайный факт, чем нужно отнести к недостаткам модели.

Быстрое появление большого числа весьма различных гипотез характеризует неопределенность ситуации и недостаточность наших знаний в этой области. В ближайшее время мы можем ожидать много других предложений, но истинное понимание, возможно, возникнет лишь в связи с будущими экспериментами.

М. В. Герентьев

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, R. Turlay, Phys. Rev. Letts 13, 138 (1964).
2. Л. Д. Ландау, ЖЭТФ 32, 405 (1964).
3. Я. Б. Зелдович, УФН 59, 377 (1956).
4. Л. Б. Окунь, УФН 68, 449 (1959).
5. Л. А. Халфин, ЖЭТФ 33, 1371 (1957).
6. J. Schwinger, Ann. Phys. 9, 169 (1960).
7. J. Bernstein, N. Cabibbo, T. D. Lee, Phys. Letts 12, 146 (1964).
8. J. S. Bell, J. K. Perring, Phys. Rev. Letts 13, 348 (1964).
9. M. Levy, M. Nauenberg, Phys. Letts 12, 155 (1964).
10. T. N. Truong, Preprint.
11. R. G. Sachs, Phys. Rev. Letts 13, 286 (1964).
12. L. Wolfenstein, Preprint.
13. N. Cabibbo, Phys. Letts 12, 137 (1964).