

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ПРОБЛЕМЫ НАРУШЕНИЯ СР-ИНВАРИАНТНОСТИ

С 22 по 26 января 1968 г. в Москве проходил Международный семинар по проблемам нарушения СР-инвариантности. Все доклады, заслушанные на семинаре, носили обзорный характер, что позволило охватить широкий круг вопросов, связанных с проблемой нарушения СР-инвариантности. Труды семинара публикуются в журнале «Успехи физических наук» и в июльском номере журнала «Ядерная физика».

Ниже приводится программа семинара:

К. Руббиа, «Нарушение СР-инвариантности в распадах K^0 -мезонов».

Л. Вольфенштейн, «Феноменология нарушения СР-инвариантности».

Г. А. Лексин, «Фазы пл-рассеяния в состоянии с $T=0$ и $T=2$ » *).

В. В. Анисович, «Несохранение СР-четности в $K \rightarrow 3\pi$ -распаде».

Б. Обэр, «Трехчастичные распады K -мезонов».

М. Вельтман, «Модели нарушения СР-симметрии» *).

Б. А. Арбузов, «Модели нарушения СР-инвариантности».

А. Т. Филиппов, «Нарушение СР-инвариантности в слабых радиационных распадах» *).

Г. Финокьяро, «Проверка С-инвариантности в сильных и электромагнитных взаимодействиях элементарных частиц» *).

К. Баглэн, «Поиски С-неинвариантности в распадах η -мезонов» **).

Б. Г. Ерозолимский, Л. Н. Бондаренко, Ю. А. Мостовой, Б. А. Обиных, В. П. Захарова, В. А. Титов, «Поиски нарушения Т-четности в β -распаде поляризованных нейтронов» *).

Ф. Л. Шапиро, «Электрические дипольные моменты элементарных частиц» ***).

И. С. Шапиро, «Ядерные силы, не сохраняющие четность» **).

П. Миллер, «Поиски электрического дипольного момента нейтрона».

Н. А. Бургов, «Об обнаружении несохранения временной четности посредством использования эффекта Мессбауэра» *).

Л. И. Лапидус, «Следствия СРТ-инвариантности и эксперимент» **).

В. Я. Файнберг, «Теоретические основы СРТ-теоремы».

*) Доклад опубликован в июльском номере журнала «Ядерная физика» за 1968 г.

**) Доклад будет опубликован в следующем выпуске журнала «Успехи физических наук» (том 95, вып. 4, август 1968 г.)

***) Обзор опубликован в майском выпуске журнала «Успехи физических наук» (том 95, вып. 1, стр. 145).

С. М. Биленький, Л. И. Липидус, Р. М. Рындин, «Поляризационные опыты по проверке T - и CP -инвариантности в нуклон-нуклонном и нуклон-антинуклонном рассеянии».

Л. Б. Окунь, «Нарушение CP -инвариантности».

К семинару были подготовлены также таблицы экспериментальных данных, относящихся к проблеме CP -инвариантности и обзор данных по $\mu \rightarrow e$ -распаду И. И. Гуревича и Б. А. Никольского. Эти материалы публикуются в настоящем номере журнала.

РЕДАКЦИЯ

539.12 01

НАРУШЕНИЕ CP -ИНВАРИАНТНОСТИ

Л. Б. Окунь

ВВЕДЕНИЕ

Операции зарядового сопряжения C , зеркального отражения P и обращения времени T исследуются физиками уже около сорока лет. Интерес к этим операциям особенно усилился после того, как четыре года назад было обнаружено нарушение CP -инвариантности.

Почему нарушение CP -инвариантности вызывает такой большой интерес?

Возможно, потому, что это одна из наиболее фундаментальных проблем современной физики, в связи с которой по новому поставлены вопросы о соотношении между частицами и античастицами, о зеркальной асимметрии мира и стреле времени.

Возможно, потому, что обнаружив нарушения CP -инвариантности физики, столкнулись с каким-то новым типом взаимодействия. К известным четырем взаимодействиям — сильному, электромагнитному, слабому и гравитационному — добавилось пятое, нарушающее CP -инвариантность.

Трудно указать другую фундаментальную проблему, которая так активно подвергалась бы сейчас экспериментальному исследованию. Это исследование в настоящее время интенсивно проводится в десятках лабораторий во всем мире и далеко вышло за пределы физики K -мезонов. В поисках нарушения CP -инвариантности скрупулезной проверке подвергаются распады η^0 -мезонов и ядерные реакции, электромагнитные свойства нейтрона и электрона, распады гиперонов и ядер. В этих исследованиях достигнуты рекордные точности и выполнены опыты, которые еще несколько лет назад считались невыполнимыми. К сожалению, ни в одном явлении, кроме распадов нейтральных K -мезонов, нарушение CP -инвариантности не обнаружено. В этом отношении то, что происходит сейчас, отличается от событий, происходивших 11 лет назад. Тогда несохранение пространственной четности, толчком к открытию которого послужили распады K^+ -мезонов на 2π и 3π , было обнаружено сразу же практически во всех слабых распадах. Теперь прошло уже около четырех лет со времени открытий CP -неинвариантного распада долгоживущего нейтрального K -мезона $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, но по-прежнему не удается найти никаких CP -неинвариантных эффектов у других частиц, кроме K^0 -мезонов *).

*) Напомним, что несохранение пространственной четности следовало из того, что K^+ -мезон может распадаться на $\pi^+\pi^0$ и $2\pi^+\pi^-$, а π -мезоны обладают отрицательной P -четностью, так что система 2π — четна, а 3π — нечетна. Аналогичным образом из того факта, что K_L^0 -мезон распадается на систему $3\pi^0$, имеющую отрицательную CP -четность, и систему 2π , имеющую положительную CP -четность, следует, что не сохраняется CP -четность.

Зато в исследовании самих K^0 -мезонов достигнут значительный прогресс. Прежде всего, тщательнейшим образом был изучен распад $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$. Если в первой работе число наблюдаемых случаев этого распада составляло десятки, то сегодня это уже тысячи.

Установлено, что этот распад действительно обусловлен нарушением CP -инвариантности, а не происходит под действием каких-то внешних дальнедействующих сил, источником которых могли бы быть Земля, Солнце или Галактика. Установить это удалось благодаря тому, что под действием таких сил отношение ширины распада $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ к полной ширине K_L^0 -мезона должно было бы расти как квадрат энергии K_L^0 -мезона. На опыте же оно оказалось не зависящим от энергии.

Были осуществлены ряд опытов, цель которых заключалась в том, чтобы найти не только модуль амплитуды распада $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, но и ее фазу, более точно — ее фазу относительно амплитуды CP -разрешенного распада $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$. Очевидно, что измерить эту фазу можно только, если наблюдать явления, обусловленные интерференцией этих двух амплитуд. Такие явления наблюдались, однако их количественная интерпретация все еще содержит большие погрешности.

Были осуществлены чрезвычайно трудные опыты по обнаружению распада $K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$ и измерению его вероятности. Степень трудности этих опытов легко представить, если учесть, что продукты этого распада (четыре фотона) нейтральны, а обнаружить этот распад надо на фоне примерно на два порядка более вероятного CP -разрешенного распада $K_L^0 \rightarrow 3\pi^0$. Не удивительно поэтому, что экспериментальные значения вероятности этого распада в течение истекшего года все время менялись.

Наконец, было обнаружено явление зарядовой асимметрии в распадах K_L^0 -мезонов на лептоны. Существование этой асимметрии особенно наглядно демонстрирует неравноправие положительных и отрицательных зарядов в природе, которое является неизбежным следствием нарушения CP -инвариантности. Оказалось, что нейтральный K_L^0 -мезон в вакууме дает распадов на $\pi^-e^+\nu$ больше, чем на $\pi^+e^-\bar{\nu}$. То же самое было обнаружено и для распадов на $\pi^-\mu^+\nu$ и $\pi^+\mu^-\bar{\nu}$. Так же как и другие CP -нечетные эффекты, эта зарядовая асимметрия очень мала ($\sim 10^{-3}$), и в последнем опыте понадобилось зарегистрировать 17 миллионов распадов, чтобы измерить эффект.

Основная цель многочисленных экспериментов — найти механизм нарушения CP -инвариантности, установить свойства взаимодействия, ответственного за это нарушение.

Если пользоваться ядерными единицами, в которых $\hbar = c = m = 1$, где m — масса π -мезона, то константа сильного взаимодействия будет порядка единицы, электромагнитного $\sim 10^{-1}$, слабого $\sim 10^{-5}$, гравитационного $\sim 10^{-40}$. Какой величины константа нового CP -неинвариантного взаимодействия? Ответа на этот вопрос мы все еще не имеем. Возможные значения этой константы простираются от величины порядка 10^{-2} до величины порядка 10^{-16} .

Вопрос в том, является ли нарушение CP -инвариантности проявлением «нового» взаимодействия или проявлением неизвестных до сих пор свойств одного из «старых» взаимодействий, может оказаться в некотором смысле вопросом терминологическим. Так может получиться, если константа взаимодействия и частицы, в нем участвующие, окажутся у «нового» CP -неинвариантного взаимодействия такими же, как у одного из «старых». В частности, в литературе подробно обсуждалась гипотеза о том, что CP -инвариантность нарушается в электромагнитном взаимодействии. Специально осуществленные опыты не подтвердили эту гипотезу.

Очевидно, что чем меньше константа, тем менее доступно экспериментальному исследованию соответствующее взаимодействие. Наиболее неблагоприятным с точки зрения возможных экспериментальных следствий является так называемое сверхслабое взаимодействие с константой порядка 10^{-15} — 10^{-16} . Это взаимодействие способно давать наблюдаемые эффекты только в распадах K^0 -мезонов и нигде больше.

Естественно задать вопрос: каким образом, обладая такой малой константой, оно тем не менее наблюдаемо и может проявиться в распадах K^0 -мезонов? Ведь, казалось бы, оно должно всегда давать вероятности примерно на двадцать порядков меньшие, чем те, которые обусловлены слабым взаимодействием. Ответ на этот вопрос заключается в том, что в случае нейтральных K -мезонов мы имеем дело с очень близко лежащими состояниями с противоположными CP -четностями: $K_1^0 = \frac{K^0 + \bar{K}^0}{\sqrt{2}}$, $K_2^0 = \frac{K^0 - \bar{K}^0}{\sqrt{2}}$. Разность масс этих состояний порядка 10^{-5} эв. В результате даже сверхслабое взаимодействие может несколько перемешать эти состояния и привести к наблюдаемым эффектам нарушения CP -четности. Это явление совершенно уникально: другого примера такого вырождения мы не знаем.

Можно показать, что одним из следствий сверхслабого взаимодействия является соотношение

$$\frac{W(K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)}{W(K_L^0 \rightarrow 2\pi^0)} = \frac{W(K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)}{W(K_S^0 \rightarrow 2\pi^0)}.$$

Правая часть этого равенства известна на опыте более или менее неплохо и близка к 2. Левая часть известна с очень плохой точностью. И новые более точные данные по распаду K^0 крайне необходимы.

Если CP -инвариантность нарушается, то, по-видимому, должна нарушаться также инвариантность относительно обращения времени. Однако прямого экспериментального доказательства нарушения T -инвариантности мы пока не имеем.

Как известно, в силу T -инвариантности должны равняться нулю электрические дипольные моменты частиц. Это утверждение легко понять, если учесть, что единственным выделенным направлением в пространстве для покоящейся частицы является направление ее внутреннего углового момента — спина. Поэтому дипольный момент частицы, если она им обладает, должен быть направлен по спину. Но дипольный момент \mathbf{d} — это такой полярный вектор ($\mathbf{d} \sim e\mathbf{r}$), который не меняет знака при обращении времени, а угловой момент \mathbf{J} — это такой аксиальный вектор ($\mathbf{J} \sim [\mathbf{r}\mathbf{p}]$), который меняет знак при замене $t \rightarrow -t$. Поэтому вектор \mathbf{d} может быть направлен по \mathbf{J} только в том случае, если отсутствует как зеркальная симметрия (P), так и обратимость времени (T).

Большие усилия были направлены в последнее время на поиски электрического дипольного момента нейтрона. Обнаружить его не удалось. Но достигнутая точность такова, что можно сказать, что электрический момент нейтрона по крайней мере на восемь порядков меньше его магнитного момента.

Заметим, что нарушение T -инвариантности должно привести к нарушению принципа детального баланса: матричные элементы прямой и обратной реакций будут, вообще говоря, не равны друг другу. Это обстоятельство должно в принципе сказаться на кинетике макропроцессов, но не может, разумеется, изменить вид статических распределений.

Лет сорок назад идея зарядовой симметрии уравнений физики казалась странной даже самим создателям релятивистской квантовой механики (см., например, книгу В. Паули «Общие принципы волновой механики»). Однако вся структура основных уравнений физики требовала такой симметрии и последующее открытие на опыте античастиц блестяще ее подтвердило. Означает ли крушение P , C и CP , что представление о такой симметрии было совершенно ложным? Нет, не означает, если только непоколебленной останется CPT -инвариантность.

Возьмем некоторый процесс, например распад $K_L^0 \rightarrow \pi^- \mu^+ \nu$, и отразим его в зеркале. В силу нарушения P -инвариантности мы увидим в зеркале процесс, которого нет в природе. Заменим в исходном процессе все частицы античастицами; в силу нарушения C -инвариантности мы снова получим нечто несуществующее. Наконец, обратим в исходном процессе начальное и конечное состояния и поменяем знаки у всех импульсов и спинов; если нарушается T -инвариантность, мы еще раз получим физически нереализуемый процесс. Не дадут физических процессов и парные произведения CP , PT и TC . Если, однако, произвести все три преобразования C , P и T вместе, то любой физический процесс снова переходит в процесс, реализуемый в природе. Это и называется CPT -инвариантностью.

Строго говоря, сохранение CPT -инвариантности пока прямо не доказано. Однако мало кто из физиков-теоретиков сомневается в том, что CPT -инвариантность устоит. Дело в том, что теоретическую модель нарушения CP - и T -инвариантности написать легко. Для этого достаточно некоторую действительную константу в лагранжиане взаимодействия заменить на комплексную. Весь аппарат теории остается при этом неизменным. Но никому еще не удалось написать разумный CPT -инвариантный лагранжиан. Если бы оказалась нарушенной CPT -инвариантность, то это потрясло бы самые основы здания современной физики.

Из сказанного выше видно, что физики-теоретики примирились с нарушением CP -инвариантности и не считают, что CP -инвариантные лагранжианы обладают какими-либо пороками. Почему же принцип CP -инвариантности подавляющим большинством физиков считался неизбежным вплоть до 1964 г.? Какова та трудность, которая мешала отказаться от этого принципа раньше? Иногда эту трудность формулируют как проблему выбора. Грубо говоря, существует вопрос: как природа может выбрать между фазами $+i\varphi$ и $-i\varphi$ в комплексной константе лагранжиана взаимодействия? И так как ответа на этот вопрос не было, то делалось заключение, что константа взаимодействия должна быть реальной, $\varphi = 0$ и, следовательно, CP -инвариантность не может нарушаться.

По существу, аналогичное возражение было в свое время и против нарушения P -инвариантности: как может природа выбрать знак при псевдоскалярном члене в лагранжиане, как она может предпочесть левые винты правым? Ответ на этот последний вопрос, который был предложен в конце 1956 г., заключался в том, что природа не делает этого выбора. Согласно гипотезе Л. Д. Ландау о сохранении комбинированной четности (CP -четности), если частица обладает левым винтом, то ее античастица обладает правым винтом. Таким образом, симметрия между левым и правым и между частицами и античастицами оказывалась сохраненной, хотя для одних только частиц (без античастиц) зеркальной симметрии не осталось.

Представим себе на минуту, что в 1956 г. были открыты не эффекты нарушения P - и C -инвариантности, как это было в действительности, а какие-нибудь эффекты нарушения T - и S -инвариантности, например зарядовая асимметрия в $K_{\mu 2}$ -распадах долгоживущего нейтрального

K -мезона, о которой говорилось выше. Существование этого эффекта означает, что где-то в полном лагранжиане имеется член с комплексной константой взаимодействия. Однако вопрос о выборе фазы этой константы не существовал бы и в этом случае, так как выбор этот чисто условен и зависит от того, что называть частицами. Изменив направление стрелы времени (или поменяв начальное и конечное состояния какой-либо реакции) и заменив все частицы их античастицами, мы получим процесс, амплитуда которого в точности равна амплитуде исходного процесса.

Таким образом, мы могли бы сказать, что в CT -инвариантном, но C - и T -неинвариантном микромире оба направления времени были бы равноправны, так же как равноправны были бы в случае PC -инвариантного, но C - и P -неинвариантного микромира левая и правая тройки декартовых ортов. В обоих примерах мы могли бы сохранить геометрические симметрии, расширив их интерпретацию и используя для этого дополнительную симметрию, существующую в природе.

Но использовать C два раза, чтобы «починить» и P , и T , нельзя. В результате, в случае нарушения CP -инвариантности вырождение частицы — античастицы оказывается недостаточным, чтобы сохранить как T -, так и P -симметрию. Мы можем, если используем переход от частиц к античастицам, сохранить лишь PT -симметрию. Таким образом, вместо двух геометрических симметрий у нас осталась одна: CPT . Нам пришлось связать между собой две геометрические операции, отказавшись от каждой из них по отдельности. Именно это обстоятельство и мешало физикам-теоретикам легко примириться с потерей CP -инвариантности.

Неэквивалентность прямого и обратного направлений времени (стрела времени), неэквивалентность левого и правого, частиц и античастиц, обнаруженная в последние годы в микромире, давно и хорошо известны в макромире: мы состоим из нуклонов и электронов, сердце у нас слева, и все мы стареем. Какова связь между нарушением C , P и T в макромире и в микромире? Отвечает ли CPT -инвариантности микромира CPT -инвариантность макромира? Вопросы эти приходят на ум каждому, кто сталкивается с проблемой дискретных симметрий. Оба эти вопроса уводят задающего их в глубины космологии. Ведь, как известно, и зарядовая, и временная асимметрии окружающего нас мира являются следствиями особых «начальных условий», существовавших во Вселенной примерно 10^{10} лет назад.

Последующие главы обзора рассчитаны на читателя-физика, который знаком с вопросом о нарушении CP -инвариантности и хотел бы иметь отчет о последних событиях в этой области. Мы рассмотрим основные факты и основные теоретические модели.

Экспериментальные данные, которыми мы располагаем, можно разделить на две группы: к первой относятся числа, характеризующие наблюдаемые CP -неинвариантные эффекты, ко второй — верхние границы для ненаблюдаемых эффектов. Перечислим основные факты в том виде, в каком они были известны ко времени Гейдельбергской конференции (сентябрь 1967 г.), и отметим новые, появившиеся в самое последнее время.

1. НАБЛЮДЕННЫЕ CP -НЕИНВАРИАНТНЫЕ ЭФФЕКТЫ

К настоящему времени нарушение CP -инвариантности обнаружено в четырех процессах; все они представляют собой распады долгоживущего нейтрального мезона K_L^0 :

1.1. Распад $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ характеризуется комплексным числом η_{+-} — отношением амплитуд этого распада и распада короткоживущего мезона

$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$:

$$\eta_{+-} = \frac{\langle \pi^+ \pi^- | T | K_L^0 \rangle}{\langle \pi^+ \pi^- | T | K_S^0 \rangle}.$$

Модуль этого числа $|\eta_{+-}| = (1,95 \pm 0,07) \cdot 10^{-3}$, фаза $\Phi_{+-} = 65 \pm 20^\circ$. Дальнейшего уточнения можно ожидать после того, как будут закончены ведущиеся сейчас опыты по более точному измерению δm — разности масс K_S^0 и K_L^0 .

1.2. Распад $K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$ характеризуется числом η_{00} :

$$\eta_{00} = \frac{\langle \pi^0 \pi^0 | T | K_L^0 \rangle}{\langle \pi^0 \pi^0 | T | K_S^0 \rangle}.$$

Результаты опубликованных в 1967 г. опытов давали $|\eta_{00}|$ порядка $4 \cdot 10^{-3}$ и отвергали возможность равенства $|\eta_{00}| = |\eta_{+-}|$. Однако в последние месяцы появились неопубликованные сообщения о новых опытах, указывающих на то, что $|\eta_{00}|$ существенно меньше, чем $4 \cdot 10^{-3}$, и, возможно, близко к $2 \cdot 10^{-3}$. Измерение $|\eta_{00}|$ является целью целого ряда экспериментов, идущих в настоящее время. Фаза Φ_{00} пока не изменена.

1.3. Вероятность распада $K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ оказалась больше вероятности распада $K_L^0 \rightarrow \pi^+ e^- \nu$. Величина этой зарядовой асимметрии равна

$$\delta_e = \frac{N(e^+) - N(e^-)}{N(e^+) + N(e^-)} = (2,24 \pm 0,36) \cdot 10^{-3}.$$

1.4. Вероятность распада $K_L^0 \rightarrow \pi^- \mu^+ \nu$ оказалась больше вероятности распада $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \mu^- \nu$:

$$\delta_\mu = \frac{N(\mu^+) - N(\mu^-)}{N(\mu^+) + N(\mu^-)} = (4,0 \pm 1,4) \cdot 10^{-3}.$$

Подробное обсуждение экспериментов с K_L^0 -мезонами см. в докладе К. Руббиа.

II. НЕНАБЛЮДЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ

Обнаружение распада $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ активизировало поиски CP -, T - и CPT -неинвариантных эффектов в распадах других частиц и реакциях. Ни одного из этих эффектов найдено не было, причем были установлены следующие границы (в скобках указано, какая инвариантность проверялась: C , T , CP , CPT ; жирным шрифтом выделены наиболее чувствительные опыты).

а) В распадах K -мезонов:

2.1 (**CP**). Вероятности распадов $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ и $K^- \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+$ равны с точностью 0,2%.

2.2 (CP). Спектры π^- в распаде $K^+ \rightarrow 2\pi^+ \pi^-$ и π^+ в распаде $K^- \rightarrow 2\pi^- \pi^+$ одинаковы с точностью порядка 20%.

2.3 (CP). Спектры π^+ и π^- -мезонов в распаде $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ совпадают с точностью порядка 50% (точнее говоря, в спектрах имеется различие, но, по-видимому, оно обусловлено какими-то систематическими ошибками).

2.4 (CP). Распад $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ не обнаружен. Точность опытов, впрочем, очень низка: можно лишь утверждать, что вероятность этого распада не больше, чем вероятность распада $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$. Как известно, распад $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ может идти как с сохранением, так и с нарушением CP .

2.5 (CP). Не обнаружено нарушения CP , связанного с возможным нарушением правила $\Delta Q = \Delta S$ в распадах K_{\pm}^0 и \bar{K}_{\pm}^0 . Для параметра $\text{Im}x$, характеризующего нарушение CP и $\Delta Q = \Delta S$, получено $\text{Im}x \lesssim 0,25$.

2.6 (CP). Не обнаружены распады $K_L^0 \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ и $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ($B < 7 \cdot 10^{-5}$). *)

2.7 (T). Поляризация мюона в распаде $K_{\mu 3}^0$, перпендикулярная к плоскости распада, отсутствует с точностью 1,5%.

2.8 (CPT). Времена жизни K^+ и K^- -мезонов совпадают с точностью 0,1%.

б) В медленных распадах других частиц:

3.1 (T). В β -распаде свободного нейтрона не обнаружена T -нечетная корреляция $\sin \phi \zeta_n [p_{\text{e} \nu}]$. Из опыта Ерозолимского, который рассказал о нем на настоящем семинаре, следует, что относительная фаза ϕ аксиальной и векторной констант в β -распаде нейтрона меньше $1,5^\circ$ (прежний предел для ϕ составлял 6°).

3.2 (T). В β^+ -распаде Ne^{19} для той же фазы ϕ получен предел 2° .

3.3 (T). Из вида спектра и поляризации электронов в β -распаде RaE следует, что основные матричные элементы взаимно компенсируются с высокой точностью. Это возможно только, если $\phi < 5^\circ$.

3.4 (T). В распаде $\Lambda \rightarrow p \pi^-$ относительная фаза s - и p -волн равна $7 \pm 7^\circ$, а $p\pi$ -рассеяние дает $5-8^\circ$.

3.5 (CPT). Времена жизни π^+ и π^- совпадают с точностью порядка 0,7%, а μ^+ и μ^- — порядка 0,1%.

в) В сильных и электромагнитных процессах:

4.1 (CP). Не обнаружен CP-нечетный распад $\eta_0 \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ ($B < 0,1\%$)

4.2 (CP). Не обнаружена зарядовая асимметрия A^{**} в распаде $\eta^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ ($A < 1\%$).

4.3 (CP). Не обнаружена зарядовая асимметрия A в распаде $\eta^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ ($A < 4\%$). В докладах Баглэна и Финокьяро подробно анализируются эти опыты и сообщается о новых, более точных экспериментах, которые находятся сейчас в стадии завершения.

4.4 (CP). Спектры π^+ и π^- в аннигиляции $p + \bar{p}$ совпадают с точностью порядка нескольких процентов. То же относится к спектрам K^+ и K^- .

4.5 (CP). Отсутствует зарядовая асимметрия A в распаде $X^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ ($A < 15\%$).

4.6 (T). Не обнаружен электрический дипольный момент нейтрона. Последние результаты Миллера, о которых он сообщил в своем докладе, дают $d_n < e \cdot 3 \cdot 10^{-22}$ см.

4.7 (T). Верхний предел для дипольного момента атома цезия оказался равным $e \cdot (2,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-21}$ см. Авторы работы делают отсюда вывод, что верхний предел дипольного момента электрона $d_e = e \cdot (1,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-23}$ см. (Подробно этот вопрос рассмотрен в докладе Ф. Л. Шапиро.

4.8 (T). Амплитуды прямых и обратных ядерных реакций совпадают с точностью порядка нескольких десятых процента ($\text{Mg}^{24} + d \rightleftharpoons \text{Mg}^{25} + p$, $\text{Mg}^{24} + \alpha \rightleftharpoons \text{Al}^{27} + p$).

4.9 (CP). Распад $\pi^0 \rightarrow 3\gamma$ не обнаружен ($B < 5 \cdot 10^{-6}$).

4.10 (CP). Распад парапозитрония на три фотона не обнаружен ($B \leq 2,8 \cdot 10^{-6}$).

4.11 (T). Не обнаружена T -нечетная корреляция в распаде $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 e^+ e^-$ (точность порядка 10 %).

*) Здесь и ниже B обозначает отношение ширины данного распада к полной ширине частицы.

**) Здесь и ниже A обозначает зарядовую асимметрию:

$$A = \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-}.$$

4.12 (T). Не обнаружено нарушение T -инвариантности в pp -рассеянии при высоких энергиях. Точность этих опытов (подробно рассмотренных в докладе С. М. Биленького, Л. И. Липидуса и Р. М. Рындина).

4.13 (T). Не обнаружены T -нечетные $\beta\gamma\gamma$ -корреляции в распадах ядер ($\eta < 4 \cdot 10^{-2}$, где η — относительная фаза матричных элементов смешанного перехода).

4.14 (T). Не обнаружены T -нечетные $\gamma\gamma$ -корреляции после захвата ядром поляризованного нейтрона ($\eta < 2 \cdot 10^{-2}$).

4.15 (T). Не обнаружены T -нечетные $\gamma\gamma$ -корреляции, поиски которых велись с помощью эффекта Мёсбауэра ($\eta < 3 \cdot 10^{-3}$, см. доклад Н. А. Бургова).

4.16 (CPT). Массы частиц и античастиц равны друг другу с точностью порядка 10^{-2} для π^\pm , K^\pm и 10^{-4} — для μ^\pm .

4.17 (CPT). Магнитные моменты частиц и античастиц равны друг другу с точностью $2 \cdot 10^{-5}$ (μ^\pm и e^\pm). Согласно неопубликованному результату Пикассо (см. доклад Финокьяро) для μ^+ и μ^- равенство магнитных моментов проверено сейчас с точностью 10^{-6} .

Таковы те факты, которыми мы располагаем. Как правило, точность соответствующих опытов все еще слишком низка. Однако некоторые из них (они выделены) позволяют сделать важные физические выводы.

III. МОДЕЛИ НАРУШЕНИЯ CP -ИНВАРИАНТНОСТИ

Гипотетических механизмов нарушения CP -инвариантности было предложено очень много. Рассмотреть их все мы не в состоянии (см. доклады Б. А. Арбузова, М. Вельмана и А. Т. Филиппова). В первом приближении известные модели можно разбить на четыре группы в соответствии с величиной f константы взаимодействия, нарушающего CP -инвариантность, и правилами отбора по гиперзаряду Y и четности P (см. таблицу).

Таблица взаимодействий

Взаимодействие	f	$ \Delta Y P$
Электромагнитное	$\sim e$	0^+
Миллисильное	$\sim 10^{-3}$	0^+
Миллисильное	$\sim 10^{-9} \approx 10^{-3} G$	$1^-, 1^+, 2^-, 3^+$
Наносильное (сверхслабое)	$\sim 10^{-15} \approx 10^{-9} G$	2^+

Сравнительная оценка различных моделей при отсутствии целого ряда экспериментальных данных, разумеется, не может не быть субъективной. Тем не менее я попробую оценить состояние каждой из моделей по пятибальной системе.

а) Модель электромагнитного взаимодействия — наиболее оптимистичная — предсказала целый ряд эффектов, ни один из которых не обнаружен, хотя точность в исследовании этих эффектов (распада η^0 -мезона, дипольный момент нейтрона *)) превосходит

*) Модель электромагнитного нарушения CP -инвариантности предсказывает существование дипольного момента нейтрона только в том случае, если существует слабое взаимодействие без изменения странности, нарушающее сохранение пространственной четности. Существование этого взаимодействия, предсказанного $V-A$ -теорией, было подтверждено недавно рядом опытов (см. таблицы В. М. Лобашова и доклад И. С. Шапиро).

ту точность, о которой в свое время просили экспериментаторов на основе оптимистических оценок. Разумеется, используя различные дополнительные гипотезы (запреты по изоспину, по SU_3 и т. д.), можно каждую из этих оценок существенно понизить. В частности, многие эффекты оказываются подавленными, если CP -неинвариантные фотонные вершины изоскалярны. Для проверки этой возможности было бы целесообразно продолжить с хорошей точностью поиски зарядовой асимметрии в распаде $X^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ и осуществить измерение поперечной поляризации дейтонов отдачи в ed -рассеянии.

Из-за ненадежности оценок с виртуальными адронами и из-за того, что исходный вид CP -неинвариантного электромагнитного взаимодействия в модели не фиксирован, окончательное «закрытие» электромагнитной модели может оказаться делом довольно далекого будущего. Но сегодня очень хочется поставить ей «двойку».

б) Модель миллисильного взаимодействия. Строго говоря, ни одно из предсказаний миллисильной модели (впрочем, довольно осторожных) пока не опровергнуто. Однако ряд косвенных уликов против модели имеется. Отсутствие асимметрии в распаде $\eta^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ указывает на то, что у миллисильного взаимодействия компоненты с $T = 2$, по-видимому, нет. С другой стороны, если $\eta_{00} \neq \eta_{+-}$, то у этого взаимодействия должны быть компоненты с $T \geq 1$ (одной компоненты с $T = 0$ недостаточно). По-видимому, компонента с $T = 0$ должна была бы проявиться в опытах по сравнению сечений прямых и обратных реакций, а компонента с $T = 3$ — в опытах по сравнению ширин распадов $K_{3\pi}^+$ и $K_{3\pi}^-$, если точность этих опытов будет повышена на порядок. Мне кажется, что больше «тройки» миллисильная модель сегодня не заслуживает.

в) Модель миллислабого взаимодействия. Предсказания этой модели еще более осторожны и трудно проверяемы. Сделанным опытом не хватает, как минимум, порядка по точности, чтобы ее проверять (сравнение $K^+ \rightarrow 2\pi^+\pi^-$ и $K^- \rightarrow 2\pi^-\pi^+$, см. доклад В. В. Анисовича — β -распад нейтрона). Заметим, что отрицательный результат, например в β -распаде, не закрыл бы модель, так как априори не ясно, должны ли участвовать в миллислабом взаимодействии также и лептоны или только одни адроны.

Давайте посмотрим, что еще, кроме «отеческих» указаний повысить точность уже сделанных опытов на один-два порядка, могли бы посоветовать теоретики экспериментаторам для проверки миллисильной модели?

Очевидно, что искать проявления CP -неинвариантного взаимодействия лучше всего в таких процессах, где CP -инвариантные амплитуды по каким-то причинам малы. С этой точки зрения представляет интерес распад $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$, амплитуда которого примерно в 20 раз меньше амплитуды распада $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$. Если бы CP -нечетные переходы K -мезона в состоянии 2π с $T = 0$ и с $T = 2$ были сравнимы по величине, то в распаде $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ последний мог бы давать примерно 4%-ное несохранение CP . К сожалению, в самом распаде $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ наличие CP -неинвариантной фазы обнаружить нельзя (вероятность пропорциональна квадрату модуля амплитуды). Его можно было бы обнаружить, однако, в распаде $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma$. Вследствие интерференции тормозной амплитуды и амплитуды контактного испускания дипольного фотона можно было бы ожидать значительных CP -неинвариантных эффектов. В частности, различие ширин распадов $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma$ и $K^- \rightarrow \pi^-\pi^0\gamma$ могло бы достигать процента. Если этот эффект будет обнаружен, то для выяснения его природы было бы интересно исследовать на опыте нарушение CP в распадах $K_{L,S} \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$. Наличие интерференционных явлений в этих распадах прямо указывало

бы на нарушение CP . Если бы оказалось, что в распаде $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ нарушение CP существенно меньше, чем в распаде $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$, то это означало бы, что в последнем распаде CP нарушается именно в тормозной, а не в контактной амплитуде. Если бы оказалось, что в обоих распадах эффекты сравнимы, то это означало бы, что нарушение CP происходит в контактной амплитуде и тесно связано с испусканием фотона.

Ревизия экспериментальных данных, относящихся к слабому взаимодействию, показала, что теория универсального слабого $V - A$ -взаимодействия проверена до сих пор с очень плохой точностью. Так, например, не исключена относительная фаза аксиальной и векторной констант в распаде мюона порядка 15° . В β -распаде имеются результаты опытов, противоречащих теории, например данные о продольной поляризации электронов (см. доклад и таблицу Б. Г. Ерозолимского и обзор И. И. Гуревича и Б. А. Никольского)

Серьезные несогласованности имеют место также в распадах K -мезонов. Так, данные по спектрам и относительным вероятностям распадов K_{e3} и $K_{\mu 3}$ не согласуются с данными о поляризации мюонов в распадах $K_{\mu 3}$ в рамках универсального $V - A$ -взаимодействия (см. доклад Обэра).

Учитывая все изложенное выше, можно сказать, что гипотеза милли-слабого взаимодействия, пожалуй, заслуживает «четверки».

Электромагнитная и миллислабая гипотезы, рассмотренные выше, страдают общим недостатком — их предсказания не безусловны, они носят сугубо оценочный характер. Поэтому эти гипотезы не могут предложить соответствующий отрицательный *experimentum crucis*. Этот же упрек относится и к ряду вариантов миллислабой модели.

г) Модель сверхслабого взаимодействия. Замечательным свойством модели сверхслабого взаимодействия является то, что она дает жесткие предсказания

1. $|\eta_{+-}| = |\eta_{00}|$.

2. $\Phi_{+-} = \Phi_{00}$.

3. $\Phi_{+-} = \arctg \frac{2(m_L - m_S)}{\Gamma_S - \Gamma_L} \cong 43^\circ$.

4. $\delta_e = \delta_\mu = 2|\eta_{+-}| \cos \Phi_+$.

5. Еще ряд предсказаний, относящихся к другим распадам $K_{3\pi}^0$, $K_{2\pi\gamma}^0$ и т. д., которые, однако, довольно трудно проверяемы, так как предсказываемая величина эффектов очень мала.

6. Никаких наблюдаемых CP -неинвариантных эффектов, кроме как в распадах K^0 -мезонов.

Предсказание 1 противоречит опыту, однако не ясно, являются ли соответствующие экспериментальные данные окончательными.

Предсказание 2 на опыте до сих пор не проверено.

Предсказания 3 и 4 в пределах ошибок не противоречат опыту.

Предсказание 6 блестяще согласуется с обилием отрицательных результатов, к которым привели опыты по поискам нарушения CP -и T -инвариантностей везде, кроме K^0 -мезонов.

Итак, сейчас все свелось к опыту по измерению распада $K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$. Если окажется, что $|\eta_{00}| \neq |\eta_{+-}|$, то мы поставим модели сверхслабого взаимодействия «единицу» и забудем о ней. Если же окажется, что $|\eta_{00}| = |\eta_{+-}|$, то придется оценить модель высшей оценкой, и шансы на то, что в дальнейшем она окажется неправильной, будут невелики, хотя и отличны от нуля.

Почему экспериментальное подтверждение целого ряда предсказаний сверхслабой модели не будет означать, что она полностью доказана? Для этого есть, по меньшей мере, два основания.

Во-первых, при дальнейшем уточнении экспериментальных данных могут обнаружиться расхождения с моделью. Во-вторых, что более существенно, имеется ряд моделей, предсказания которых в целом ряде пунктов совпадают с предсказаниями модели сверхслабого взаимодействия.

Например, миллислабые модели с правилами отбора $|\Delta Y|^P = 1^+, 2^-, 3^+$ могли бы приводить к наблюдаемым распадам $K_L \rightarrow 2\pi$ только в сочетании с обычным слабым взаимодействием путем переходов $K \leftrightarrow \bar{K}$ с $\Delta Y = 2$. То же относится к модели, в которой источником нарушения CP -инвариантности являются лептонные распады с миллислабым нарушением правила $\Delta Q = \Delta S$. Отличить каждую из этих моделей от модели сверхслабого взаимодействия можно только путем исследования нарушения CP в распадах $K_{3\pi}, K_{l3}$, а также поисков распадов $\Delta Y \geq 2$ ($\Xi \rightarrow N\pi, \Omega^- \rightarrow N\pi$ и т. д.).

Если CP -неинвариантное сверхслабое взаимодействие действительно осуществляется в природе, то шансы обнаружить его в распадах других элементарных частиц ничтожны. Ведь вероятности обусловленных им процессов должны быть примерно на 18 (!) порядков меньше, чем вероятности обычных слабых процессов. Не следует, однако, впадать в отчаяние. Ведь не исключено, что сверхслабое взаимодействие может делать то, что недоступно обычному слабому взаимодействию. Как заметил на нашем семинаре Б. М. Понтекорво, опыты по поискам двойного β -распада имеют сейчас такую точность, что если бы сверхслабое взаимодействие нарушало сохранение лептонного заряда ($\Delta L = 2$), эти опыты могли бы его обнаружить. Возможно также, что с ростом энергии сталкивающихся частиц сверхслабое взаимодействие усиливается. Если оно связано с какими-то специфическими частицами (например, с так называемыми a -частицами), то выше порога рождения этих частиц сечение образования их может оказаться отнюдь не «сверхслабым» (такая модель рассматривалась несколько лет назад).

Наконец, может оказаться наблюдаемым сверхслабое взаимодействие обычных частиц с так называемыми зеркальными частицами. Однако зеркальные частицы — это уже область фантазии, и я коснусь этого вопроса в самом конце данного обзора. А пока рассмотрим более прозаический и гораздо более насущный вопрос.

IV. ЧЕМУ НАС МОГУТ НАУЧИТЬ ДАЛЬНЕЙШИЕ ОПЫТЫ С K^0 -МЕЗОНАМИ?

Ответ на этот вопрос дает феноменологический анализ распадов K^0 -мезонов. Итак, что мы выясним, когда будут надежно измерены параметры $\eta_{+-}, \eta_{00}, \delta_e, \delta_\mu$, характеризующие нарушение CP в распадах нейтральных K -мезонов? Знание этих параметров дает возможность определить волновые функции K_L^0 и K_S^0 и с уникальной точностью проверить CPT -инвариантность; проверить $\mu - e$ -универсальность; выяснить, нарушается ли CP в других каналах, кроме 2π ; найти изотопические амплитуды распадов; определить амплитуду перезарядки $\pi^+\pi^- \rightarrow 2\pi^0$ и, наконец, вынести суждение о справедливости тех или иных моделей. Остановимся более подробно на некоторых из этих утверждений.

а) Проверка CPT -инвариантности. Как известно, состояния с определенными временами жизни и массами K_L и K_S не ортогональны. Мера этой неортогональности $\langle K_L | K_S \rangle$ в силу сохранения полной вероятности (унитарности S -матрицы) оказывается связанной с амплитудой распадов K_L^0 и K_S^0 -мезонов простым соотношением

$$\langle K_S | K_L \rangle \left[i(m_L - m_S) + \frac{1}{2}(\Gamma_L + \Gamma_S) \right] = \sum_F \langle F | T | K_S \rangle^* \langle F | T | K_L \rangle.$$

Здесь все обозначения почти очевидны: $\langle K_S | K_L \rangle$ — скалярное произведение состояний K_L и K_S , F — состояния, в которые могут распадаться K_L - и K_S -мезоны.

Выделим явно каналы $F = \pi^+ \pi^-$, $2\pi^0$ и запишем условие унитарности, пренебрегая членами Γ_L/Γ_S :

$$\langle K_S | K_L \rangle \left[i \frac{m_L - m_S}{\Gamma_S} + \frac{1}{2} \right] = B_S^{+-} \eta_{+-} + B_S^{00} \eta_{00} + \gamma. \quad (*)$$

Здесь

$$B_S^{+-} = \Gamma_S(\pi^+ \pi^-) / \Gamma_S, \quad B_S^{00} = \Gamma_S(\pi^0 \pi^0) / \Gamma_S, \\ \gamma \Gamma_S = \sum_{F'} \langle F' | T | K_S \rangle^* \langle F' | T | K_L \rangle,$$

где F' — все каналы, кроме $\pi^+ \pi^-$ и $2\pi^0$. Соотношение (*) может быть изображено на комплексной плоскости в виде четырехугольника (рис. 1).

Если имеет место CPT -инвариантность, то величина $\langle K_S | K_L \rangle$ должна быть чисто вещественна и может быть определена из данных по величине зарядовой асимметрии в распадах K_L^0 -мезонов:

$$\delta_e = \langle K_S | K_L \rangle \frac{1 - |x|^2}{|1 - x|^2}.$$

Здесь, как и ранее,

$$\delta_e = \frac{N(e^+) - N(e^-)}{N(e^+) + N(e^-)},$$

а x — отношение амплитуд с $\Delta Q = -\Delta S$ и $\Delta Q = \Delta S$; если $x = 0$, то $\delta_e = \langle K_S | K_L \rangle$. Если степень нарушения CP в каналах F' не больше, чем в каналах 2π ($\sim 10^{-3}$), то членом γ можно пренебречь, так как ширины каналов F' примерно на два-три порядка меньше, чем 2π . Однако прямые экспериментальные данные о каналах F' оставляют для γ довольно широкие пределы: $|\gamma| \lesssim 10^{-3}$. Если бы оказалось, что $|\gamma|$ того же порядка, что $|\eta_{+-}|$ и $|\eta_{00}|$, то примерно с процентной точностью параметр γ должен быть чисто мнимым (именно так он изображен на рис. 1). В настоящее время две стороны четырехугольника ($|\eta_{00}|$ и γ) известны довольно плохо, а один угол Φ_{00} совсем не известен. Когда все его элементы будут измерены, четырехугольник будет дважды переопределен. Если его не удастся замкнуть, то это будет означать нарушение CPT -инвариантности.

Следует отметить, что точность, с которой проверяется CPT -инвариантность взаимодействий, ответственных за распады, в случае K_L^0 -мезонов, примерно такая же, что и точность, достигнутая в настоящее время для других частиц (K^\pm , π^\pm , μ^\pm). Однако точность, с которой проверяется CPT -инвариантность взаимодействий с $\Delta Y = 0$ и, в частности, сильного и электромагнитного взаимодействий, дающих основной вклад в массы частиц в опытах с K_L^0 -мезонами, примерно на 10 порядков лучше, чем в опытах с другими частицами.

Если бы оказалось, что феноменологический анализ K_L^0 -распадов указывает на нарушение CPT -инвариантности, то было бы интересно проверить, не согласуется ли он с гипотезой о T -инвариантности. Ведь до сих пор мы не имеем ни одного экспериментального факта, указывающего на нарушение T -инвариантности. И, в сущности, только глубокая

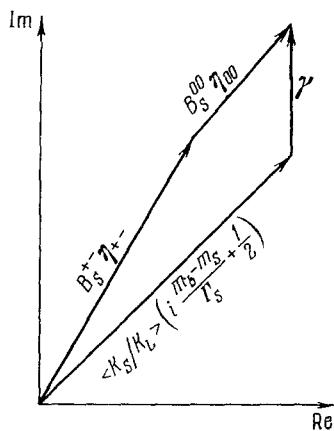


Рис. 1.

вера в CPT -теорему заставляет многих из нас считать, что сам факт наблюдения распада $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ означает крушение не только CP , но и T .

В случае T -инвариантности величина $\langle K_S | K_L \rangle$ была бы чисто мнимой, а величина γ , если она велика, практически вещественной. Диаграмма, отвечающая случаю, когда $\text{Re} \langle K_S | K_L \rangle = 0$, изображена на рис. 2.

Заметим, что если бы оказалось, что $\Phi_{+-} \simeq 40-60^\circ$, а $|\eta_{00}| \simeq |\eta_{+-}|$, то из-за малости γ замкнуть четырехугольник на рис. 2 не удалось бы и нарушение T -инвариантности можно было бы считать доказанным. Более подробно вопрос о проверке CPT - и T -инвариантностей в распадах K_L^0 -мезонов рассмотрен в докладе Л. И. Лапидуса.

Ремесленное хладнокровие, с которым выше обсуждались возможные способы проверки CPT -инвариантности, отнюдь не означает, что обсуждающие этот вопрос не понимают фундаментального характера этой инвариантности для современной теории элементарных частиц. Наоборот, именно потому что эта инвариантность связана с самыми глубокими понятиями теории (существование частиц и античастиц, причинность, связность пространства-времени со статистикой; см. доклад В. Я. Файнберга), ее экспериментальная проверка представляет фундаментальный интерес.

б) Нахождение изотопических амплитуд также является одной из важных целей феноменологического анализа K_L^0 -распадов. Преимуществом изотопических амплитуд является то, что их фазы можно предсказать теоретически.

Если принять в качестве нулевого приближения, что в распадах $K_S^0 \rightarrow 2\pi$ правило $\Delta T = 1/2$ выполняется с хорошей точностью (соответствующие опыты пока еще очень неточны), то с помощью хорошо известных коэффициентов Клебша — Гордана нетрудно получить, что

$$\eta_{+-} = \epsilon_0 + \epsilon_2, \quad \eta_{00} = \epsilon_0 - 2\epsilon_2,$$

где

$$\epsilon_0 = \frac{\langle \psi_0 | T | K_L \rangle}{\langle \psi_0 | T | K_S \rangle}, \quad \epsilon_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\langle \psi_2 | T | K_L \rangle}{\langle \psi_0 | T | K_S \rangle},$$

а $\langle \psi_0 |$ и $\langle \psi_2 |$ — состояния 2π с $T = 0$ и $T = 2$ соответственно.

На рис. 3 показаны векторы ϵ_0 и $\frac{2}{3}\epsilon_2$.

Знание ϵ_2 позволяет также получить интересные данные о фазе $\pi\pi$ -рассеяния. Дело в том, что фаза ϵ_2 должна равняться $\delta_2 - \delta_0 + \frac{\pi}{2}$, где δ_2 и δ_0 — $\pi\pi$ фазы в состояниях с $T = 2$ и $T = 0$ соответственно при полной энергии в системе $\pi\pi$ и равной массе K -мезона. Данные о величине $\delta_2 - \delta_0$, которые можно получить из других процессов ($\pi N \rightarrow 2\pi N$, $K_{\pi 3}$ -распад), были подробно обсуждены в докладе Г. А. Лексина. Эти данные, по-видимому, дают достаточно надежные сведения об абсолютной величине $\delta_2 - \delta_0$ ($|\delta_2 - \delta_0| \approx 50^\circ$), но выводы о знаке $\delta_2 - \delta_0$, полученные различными способами, противоречат друг другу.

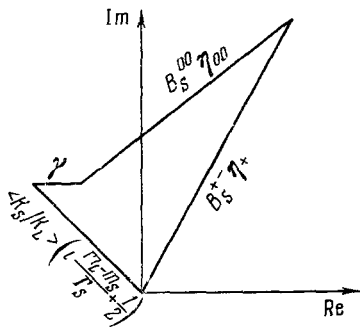


Рис. 2

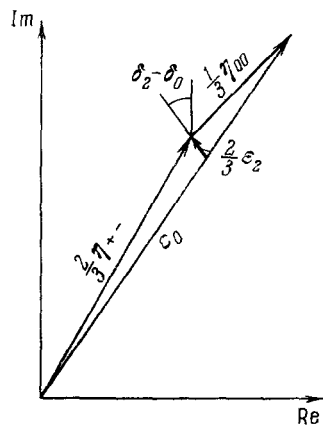


Рис. 3.

Заметим, что в случае модели сверхслабого взаимодействия $\epsilon_2 = 0$ и фазу $\pi\pi$ -рассеяния из данных по распадам K_L^0 -мезонов определить нельзя.

В заключение этого раздела следует отметить, что достаточно точное измерение параметров K_L^0 -распадов может «закрыть» модель сверхслабого взаимодействия и некоторые сходные с ней миллислабые модели. Однако, и это было особенно подчеркнуто в докладе Вольфенштейна, это не относится к большинству других моделей, которые не дают четких предсказаний для параметров η_{+-} , η_{00} , δ и для проверки которых необходимо обнаружение эффектов за пределами K_L^0 -мезонов.

V. ЗЕРКАЛЬНАЯ СИММЕТРИЯ И ЗЕРКАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Уже изученные CP -неинвариантные эффекты дают возможность изолированному наблюдателю однозначным образом определить, что называть частицей, а что — античастицей, что называть левым, а что — правым. Действительно, пучок K_L^0 -мезонов, например, дает теперь безусловное определение того, что есть позитрон. Позитрон — это та частица, на которую K_L^0 чаще распадается в K_{e3} -распадах. В результате нетрудно выяснить, что содержит окружающие наблюдателя атомы: электроны или позитроны. А так как позитроны в K_{e3} правополяризованы, то возникает абсолютное определение левого и правого.

Понятие левого и правого вновь приобрело бы относительный характер, если бы оказалось, что наряду с обычными частицами существуют зеркальные, так что в природе для любого процесса возможен зеркальный процесс. Из имеющихся экспериментальных данных следует, что взаимодействие зеркальных частиц с «нашими» не может быть ни сильным, ни электромагнитным, ни даже слабым. Однако имеющиеся экспериментальные данные не исключают существования миллислабого и сверхслабого взаимодействий, которые могли бы давать интересные наблюдаемые эффекты. Наиболее богато эти эффекты могут проявляться у нейтральных K -мезонов. Согласно обсуждаемой гипотезе, нейтральных K -мезонов четыре: два долгоживущих и два короткоживущих, причем массы и времена жизни всех четырех различны. Полный лагранжиан должен быть инвариантен относительно CRA -преобразования, где A — преобразование, заменяющее наши частицы зеркальными, и наоборот. При этом один из долгоживущих K -мезонов должен иметь положительную CRA -четность (K_L^c), а другой — отрицательную (K_L^o). То же относится и к короткоживущим K -мезонам (K_S^c и K_S^o). В сильных взаимодействиях на наших ускорителях должны рождаться только «наши» K^0 -мезоны. Однако в вакууме, благодаря осцилляциям, подобным тем, которые хорошо известны для обычных K^0 -мезонов, будет происходить медленный переход «наших» K^0 -мезонов в зеркальные. Если поставить на пути такого пучка толстую стену, в которой поглотились бы все наши частицы, то за стеной останется пучок зеркальных частиц. Эти последние вследствие все тех же осцилляций должны будут медленно переходить в «наши» K^0 -мезоны, распадаться на «наши» π -мезоны, μ -мезоны, электроны и т. д. и, таким образом, могут быть зарегистрированы. Именно такие условия были в нейтринном опыте, где детекторы были защищены от первичных пучков частиц железной стеной толщиной 25 м. Анализируя этот опыт, можно заключить, что время перехода «наших» K^0 -мезонов в зеркальные по крайней мере на два порядка больше времени жизни K_L^0 -мезона. Было бы интересно поставить специальные опыты, в которых детектор распадов находился бы за стеной на расстоянии порядка распадной длины

K_L -мезона, так как число трехчастичных распадов K_L -мезонов должно квадратично расти с расстоянием вплоть до $l \simeq 2\gamma\tau_L c$.

Что касается непосредственного выяснения того, описывается ли распад K_L -мезона одной или двумя экспонентами, то в рамках модели зеркальных частиц эти опыты менее чувствительны, чем описанные выше «опыты за стеной». Однако опыты по проверке экспоненциальности распада могут представлять интерес и вне рамок модели зеркальных частиц. Ведь утверждение, что наблюдение эффектов 1.1—1.4 в распадах K_L^0 -мезонов доказывает нарушение CP -инвариантности, основано на гипотезе о том, что в пучке нейтральных K_L^0 -мезонов нет двух когерентных компонент, а есть только одна, распадающаяся как на 2π , так и на 3π . Несомненно, что эта гипотеза более чем правдоподобна, ведь до сих пор не было предложено ни одной удовлетворительной CP -инвариантной модели с двумя когерентными долгоживущими K_L^0 -мезонами. (Напомним, что так называемая модель «теневого Вселенной» оказалась противоречащей данным нейтринного опыта.)

Однако экспериментальные данные, подкрепляющие утверждение о том, что K_L^0 -мезон действительно один, все еще довольно скудны. Так, точность, с которой проверена экспоненциальность K_L^0 -распадов, все еще низка, а постоянство относительной ширины распада $K_L \rightarrow 2\pi$ проверено лишь в интервале $0,15 < t/\tau_L < 0,80$ и с точностью порядка 10%. (см. таблицу Н. Н. Николаева). Было бы желательно увеличить точность этих измерений и осуществить их при больших значениях t .

Институт теоретической
и экспериментальной физики,
Москва