

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ**ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЧЕТНОСТИ И ДРУГИЕ ЗАКОНЫ СИММЕТРИИ *)***Чжень-нин Янг*

Является большой честью и истинным удовольствием такая возможность обсуждения вопроса о сохранении четности и других законах симметрии. Сначала мы коснемся общей роли законов симметрии в физике. Затем познакомимся с теми обстоятельствами, которые привели к опровержению закона сохранения четности. И, наконец, мы обсудим некоторые другие законы симметрии, которые установлены физиками экспериментальным путем, но которые все еще не образуют идейно простого и цельного. Об очень интересном и волнующем развитии физики, после того как сохранение четности было опровергнуто, расскажет в своей лекции Ли ¹.

ПРИНЦИПЫ СИММЕТРИИ

Существование законов симметрии находится в полном соответствии с нашим жизненным опытом. Понятия о простейших симметриях—изотропности и однородности пространства—появились на заре человеческого сознания.

Инвариантность законов механики при переходе к равномерно движущейся системе координат (известная также как инвариантность относительно преобразования Галилея) явилась примером первой лишней простоты симметрии. Эта симметрия является одним из исходных принципов ньютоновской механики. Следствия, вытекающие из этого принципа симметрии, интенсивно разрабатывались физиками в прошлом веке и привели к ряду важных результатов. Хорошим примером из этой области служит теорема, гласящая, что в изотропном твердом теле могут быть только два модуля упругости.

Другого типа следствиями из законов симметрии являются законы сохранения. В настоящее время общеизвестно, что, вообще говоря, принцип симметрии (или, что то же самое, принцип инвариантности) приводит к закону сохранения. Например, инвариантность физических законов относительно пространственных трансляций приводит к закону сохранения импульса, а инвариантность относительно пространственных вращений приводит к сохранению момента. В то время как важность этих законов сохранения была полностью понята, их тесная связь с законами симметрии

*) Чжень-нин Янг—профессор физики в Институте усовершенствования, Принстон, Нью-Йорк. В этой статье воспроизводится доклад, сделанный Янгом в Стокгольме 11 декабря 1957 г. после вручения ему Нобелевской премии по физике; эту премию Янг разделил вместе с Цзян-дао Ли.

не была полностью установлена вплоть до начала XX века² (см. рис. 1).

В связи с созданием специальной и общей теории относительности законы симметрии приобрели новое значение: между законами симметрии и динамическими законами физики связь оказалась значительно более тесной и взаимоопределяющей, чем в классической механике, где, по существу, законы симметрии явились только следствиями динамических законов, случайно обладавших симметрией. В релятивистской теории также было существенно расширено число законов симметрии путем включения таких законов, которые на основе обыденных представлений явились отнюдь не очевидными: скорее их справедливость выводилась на основании слож-

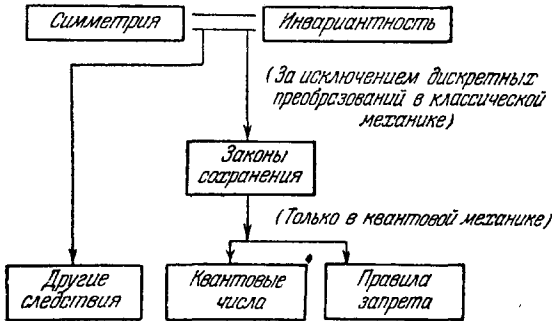


Рис. 1. Соотношение между законами сохранения и симметрией.

ных экспериментов (или в дальнейшем подтверждалась сложными экспериментами). Позвольте мне подчеркнуть, что для физиков являлась могучим источником вдохновения идейная простота и внутренняя красота симметрии, обнаруживаемой в сложных экспериментах. Появлялась надежда, что природа таит в себе определенную упорядоченность, которую можно постигнуть. Однако вплоть до появления квантовой механики принципы симметрии были распространены в физике не очень широко. Квантовые числа, которые определяют состояния системы, часто совпадают с квантовыми числами, определяющими симметрию системы. Действительно, трудно переоценить ту роль, которую играют принципы симметрии в квантовой механике. Сошлемся на два примера: общее строение периодической системы элементов по существу является прямым следствием изотропности закона Кулона; существование античастиц—а именно позитрона, антипротона и антинейтрона—теоретически предсказывалось как следствие инвариантности физических законов по отношению к преобразованию Лоренца. В обоих случаях кажется, что природа использует преимущество простоты математического представления законов симметрии. Чувство глубочайшего уважения к мощи законов симметрии никогда не ослабевает у того, кто обдумывал изящество и красоту безупречных математических доказательств и сопоставлял это со сложными и далеко идущими физическими следствиями.

Один из принципов симметрии—симметрия между левым и правым—так же стар, как и человеческая цивилизация. Вопрос о том, проявляется ли в природе подобная симметрия, подробно обсуждался философами в прошлом³. Конечно, в повседневной жизни левое и правое совершенно различны. Наше сердце, например, всегда с левой стороны. В языке, употребляемом народами Востока и Запада, «правое» одновременно означает «хорошо», а «левое»—«плохо». Однако в физических законах всегда проявляется полная симметрия между левым и правым. Асимметрия в повседневной жизни приписывается случайной асимметрии окружающей среды или асимметрии условий, при которых зародилась органическая жизнь. Чтобы пояснить это, я упомяну о том, что если существует «зеркально отраженный человек» с сердцем с правой стороны и с внутренними органами, являющимися зеркальным отражением наших внутренних

ных экспериментов (или в дальнейшем подтверждалась сложными экспериментами).

Позвольте мне подчеркнуть, что для физиков являлась могучим источником вдохновения идейная простота и внутренняя красота симметрии, обнаруживаемой в сложных экспериментах. Появлялась надежда, что природа таит в себе определенную упорядоченность, которую можно постигнуть.

Однако вплоть до появления квантовой механики прин-

органов, и если в действительности молекулы, составляющие тело такого человека (например, молекулы сахарозы), зеркальны относительно наших и пища, которой питается этот человек, является зеркальным отражением нашей пищи, то на основании физических законов этот человек будет функционировать так же, как функционируем мы с вами.

Хотя в классической физике и использовался закон симметрии между правым и левым, однако большого практического значения эта симметрия не играла. Единственная причина этого заключается в том, что в отличие от симметрии относительно вращения, которая порождает непрерывное преобразование, симметрия между правым и левым порождает дискретное преобразование. В то время как непрерывное преобразование в классической механике всегда приводит к закону сохранения, дискретное преобразование к закону сохранения не приводит. Однако в рамках квантовой механики это различие между непрерывным и дискретным преобразованиями исчезает. Закон симметрии правого и левого также приводит к закону сохранения—закону сохранения четности.

Открытие этого закона сохранения восходит к 1924 г., когда Лапорт⁴ нашел, что в сложных атомах энергетические уровни могут быть разбиты на два класса: «штрихованные» уровни и «нештрихованные» уровни, или, говоря современным языком, четные и нечетные уровни. Лапорт обнаружил, что испускание или поглощение фотона всегда приводит к такого типа переходам между уровнями, при которых нечетный уровень переходит в четный и наоборот. Предвосхитив дальнейшее развитие, мы отметим, что обнаруженная Лапортом «штрихованность» или «нештрихованность» уровней позже стала рассматриваться нами как четность уровней. Четные уровни определяются как уровни, имеющие четность $+1$, а нечетные уровни—как уровни, имеющие четность -1 . При этом испущенному или поглощенному в атомных переходах фотону приписывается четность, равная -1 . Тогда правило Лапорта может быть сформулировано в виде следующего утверждения: в атомных переходах, сопровождающихся испусканием фотонов, четность начального состояния совпадает с полной четностью конечного состояния (при этом полная четность конечного состояния определяется как произведение четности уровня атома, находящегося в конечном состоянии, на четность испущенного фотона). Другими словами, четность сохраняется—или же не изменяется—при переходах.

В 1927 г. Вигнер¹⁵ сделал решающий шаг в доказательстве, что эмпирическое правило Лапорта является следствием инвариантности электромагнитных сил в атомах относительно зеркального отражения (или, что то же самое, относительно симметрии правого и левого). Эта фундаментальная идея быстро вошла в плоть и кровь физики. Так как наличие и в других взаимодействиях симметрии между правым и левым не вызывало сомнения, то эта идея была распространена на другие области физики: на ядерные реакции, β -распад, взаимодействие мезонов и взаимодействие странных частиц. К идее ядерной четности привыкли в такой же степени, как к идее четности атомных уровней; обсуждалась и измерялась внутренняя четность мезонов. При этом всюду понятие четности и закон сохранения четности оказались крайне плодотворными. Этот успех в свою очередь служил указанием на справедливость симметрии между правым и левым.

ЗАГАДКА «ТЕТА—ТАУ»

В такой обстановке несколько лет тому назад появилась так называемая «загадка θ — τ ». Прежде чем я объясню смысл этой загадки, будет полезно коснуться классификации сил, действующих между элементарными частицами. Эту классификацию физики установили на основании

многочисленных экспериментов, проведенных за последние 50 лет. Четыре класса взаимодействий (с указанием силы взаимодействия) перечислены в таблице.

Сильными взаимодействиями являются ядерные взаимодействия, которые включают в себя силы, связывающие нуклоны в ядро, и взаимодействия между ядрами и π -мезонами. Сильные взаимодействия также включают в себя взаимодействия, приводящие к наблюдаемому образованию странных частиц. Во второй класс входят электромагнитные взаимодей-

Таблица

Классификация взаимодействий
и сила взаимодействий
различных классов

Класс	Сила
1. Ядерные силы	1
2. Электромагнитные силы	10^{-2}
3. Слабые силы (распадные взаимодействия) . . .	10^{-13}
4. Гравитационные силы	10^{-38}

ствия, о которых физики знают много. В самом деле, венцом достижений физиков XIX века было детальное изучение электромагнитных сил. С развитием квантовой механики наше знание природы электромагнитных сил в принципе привело к точному, полному и подробному описанию окружающих нас физических и химических явлений. Третий класс сил—слабые взаимодействия—был впервые открыт в начале этого века в виде β -радиоактивности ядер—явления, которое особенно упорно изучалось экспериментально в последние 25 лет. После открытия π - μ -распада, μ - e -распада и μ -захвата независимо Кляйном; Тимом и Уиллером; Ли, Розенблатом и мною⁶ было установлено, что эти взаимодействия имеют примерно такую же

силу, что и β -взаимодействие. Эти взаимодействия были названы «слабыми взаимодействиями», и за несколько последних лет они то и дело пополнялись за счет открытия многих новых взаимодействий, ответственных за распады странных частиц. Поразительно устойчивая картина всегда одинаковой силы слабых взаимодействий и сегодня дразнит ложными надеждами—тема, к которой мы в дальнейшем вернемся. Относительно последнего класса сил—сил гравитации—мы только отметим, что в атомных и ядерных явлениях они так малы, что могут не приниматься в расчет при всех измерениях, осуществляемых существующей аппаратурой.

Теперь вернемся к «загадке θ - τ ». В 1953 г. Далиц и Фабри⁷ обратили внимание на то, что из распадов θ - и τ -мезонов:

$$\theta \rightarrow \pi + \pi,$$

$$\tau \rightarrow \pi + \pi + \pi,$$

можно получить некоторые данные о спинах и четностях θ - и τ -мезонов. Грубо говоря, аргументация заключалась в следующем. Еще раньше было установлено, что π -мезон является нечетным (т. е. четность π -мезона равна -1). Для начала пренебрежем эффектами, связанными с движением π -мезонов друг относительно друга. Для того чтобы при распаде четность сохранялась, θ -мезон должен иметь четность, совпадающую с полной четностью двух π -мезонов (другими словами, четность θ -мезона должна равняться произведению четностей двух π -мезонов). Два π -мезона являются четной системой (т. е. четность системы из двух π -мезонов равна $+1$). Аналогично τ -мезон должен иметь четность, равную четности системы из трех π -мезонов (а система из трех π -мезонов является нечетной). В действительности из-за относительного движения π -мезонов рассуждения

не столь просты и однозначны, как это было выше представлено. Чтобы сделать аргументацию более определенной и позволяющей делать выводы, необходимо было экспериментально изучить импульсы и угловое распределение образующихся π -мезонов. Эти исследования проводились во многих лабораториях, и к весне 1956 г. накопившиеся экспериментальные данные, казалось, однозначно указывали (при рассуждениях, аналогичных приведенным выше) на то, что θ - и τ -мезоны имеют разные четности и, следовательно, являются разными частицами. Этот вывод, однако, резко противоречил другим экспериментальным результатам, которые также были установлены к этому времени. Это противоречие было известно как «загадка θ — τ » и широко обсуждалось. Чтобы воспроизвести атмосферу того времени, я процитирую параграф, касающийся вывода о том, что θ - и τ -мезоны являются разными частицами, из доклада⁸ под названием «Современные представления о новых частицах». Этот доклад я делал на Международной конференции по теоретической физике в Сиетле в сентябре 1956 г.

«Однако не следует делать поспешных выводов. Ибо экспериментально известно, что все К-мезоны (т. е. θ - и τ -мезоны) имеют одинаковые массы и времена жизни. Массы известны с точностью примерно от 2 до 10 электронных масс, т. е. до долей процента, а времена жизни известны примерно с точностью до 20 процентов.

Так как нельзя ожидать, чтобы массы и времена жизни у частиц, имеющих различное значение спина и четности и сильно взаимодействующих с нуклонами и π -мезонами, оказались одинаковыми, мы вынуждены оставить нерешенным вопрос, является ли окончательным упоминавшийся вывод о том, что θ - и τ -мезоны—различные частицы. В скобках я могу добавить, что несомненно этот вывод следовало бы считать окончательным (и в действительности намного лучше обоснованным, чем многие выводы в физике), если бы не было аномального вырождения масс и времен жизни». Положение, в котором очутились физики в то время, подобно положению человека, нащупывающего выход из темной комнаты: он знает, что где-то должна быть дверь, ведущая наружу; но в каком направлении эта дверь?

Оказалось, что это направление заключалось в том, что закон сохранения четности был несправедлив для слабых взаимодействий. Но для того, чтобы опровергнуть принятые ранее идеи, сначала надо было показать, почему опрометчивая очевидность этих идей несостоятельна. Ли и я⁹ подробно исследовали этот вопрос и в мае 1956 г. пришли к следующим выводам: а) известные эксперименты по слабым взаимодействиям на самом деле не имеют никакого отношения к вопросу о сохранении четности; б) при сильных взаимодействиях—т. е. взаимодействиях класса 1 и класса 2 (таблица)—действительно имеется много экспериментов, которые доказывают с большой степенью точности, что четность сохраняется. Однако эта степень точности недостаточна, чтобы обнаружить нарушение закона сохранения четности в слабых взаимодействиях.

Очень удивительным оказался тот факт, что без экспериментального подтверждения в течение очень долгого времени считалось, что в слабых взаимодействиях справедлив закон сохранения четности. Но еще более удивительной казалась надежда на то, что так хорошо изученный физиками закон пространственно-временной симметрии может оказаться нарушенным. Как раз эта надежда не привлекала нас. Скорее, так сказать, мы пришли к ней в результате крушения надежд на раскрытие «загадки θ — τ » в многочисленных попытках другого рода¹⁰.

Как я в дальнейшем укажу, в физике известен закон сохранения — сохранение изотопического спина, — который выполняется для взаимодействий класса 1, но оказывается несправедливым, если включаются более слабые взаимодействия. Однако на такую возможность приближенно выполняющегося закона симметрии нельзя было надеяться для симметрии, связанной с пространством и временем. В самом деле, и сейчас заманчивыми кажутся предположения, что в слабых взаимодействиях обнаружено нарушение закона сохранения четности и не обнаружено, что описание слабых взаимодействий в рамках обычных представлений о пространстве и времени является несправедливым. В конце лекции у меня будет возможность вернуться к вопросам, близко связанным с этим.

Почему так случилось, что среди множества экспериментов по β -распаду — наиболее исчерпывающе исследованному процессу из числа слабых взаимодействий — не было указаний на сохранение четности в слабых взаимодействиях? Это случилось благодаря комбинации двух причин. Во-первых, потому, что у нейтрино отсутствует масса, что приводит к неопределенности, не позволяющей¹¹ получить косвенных указаний о выполнении закона сохранения четности из таких простых экспериментов, как изучение β -спектра. Во-вторых, чтобы непосредственно проверить выполнение закона сохранения четности в β -распаде, недостаточно изучать только четности ядерных уровней, как это всегда делалось. Надо изучать сохранение четности в целом во всем процессе распада. Другими словами, надо было предложить эксперимент, который бы проверил симметрию правого и левого в β -распаде. Такие эксперименты не были сделаны.

ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЧЕТНОСТИ В СЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

После того как стали ясны эти положения, легко было указать эксперименты, в которых однозначно можно было проверить ранее не проверенные предположения о том, что четность сохраняется в слабых взаимодействиях. Ряд таких экспериментов, включающих β -распад, π - μ -распад, μ - e -распад и распады странных частиц, были предложены летом 1956 г. Ли и мною⁹. Основные принципы, лежащие в основе этих экспериментов, были следующие: конструировалось два экспериментальных устройства, одно из которых являлось зеркальным отражением другого; экспериментальные устройства включали в себя слабые взаимодействия; далее определялось, всегда ли дают эти два устройства одни и те же результаты (результаты снимались со шкалы или счетчика). Если результаты не одни и те же, то симметрии между правым и левым (в том смысле, в каком мы ее всегда понимали) не существует. Идея опыта иллюстрируется рис. 2, на котором показан эксперимент, предложенный для определения сохранения четности в β -распаде.

Этот эксперимент был впервые выполнен во второй половине 1956 г. и закончен в начале 1957 г. Ву, Амблером, Хайвартом, Хониссом и Гудзоном¹². Из-за необходимости исключить влияние случайных внешних причин фактическая структура экспериментального устройства была очень сложна (эксперимент проводился при очень низких температурах). Техника совмещения измерений по β -распаду с использованием низких температур прежде не была известна и таила в себе большие трудности, кото-

рые успешно были разрешены авторами экспериментальной работы. Научная отвага и искусство, проявленные при осуществлении этого эксперимента, открыли ясный путь для проведенных за истекший год замечательных исследований вопроса о сохранении четности.

Результатом эксперимента Ву, Амблера и их сотрудников явилось обнаружение, что имеется большая разница в показаниях двух счетных устройств, схематически изображенных на рис. 2. Обнаруженная асимметрия обуславливалась β -распадом кобальта, так как все прочее экспериментальное оборудование обладало симметрией между правым и левым. Вслед за тем, как эти результаты стали известны, вскоре было проведено большое количество экспериментов, которые указали на нарушение закона сохранения четности в различных слабых взаимодействиях¹.

ОБСУЖДЕНИЕ

Крушение закона сохранения четности поставило в центр внимания физиков целый ряд вопросов, связанных с законами симметрии. Я затрону эти вопросы лишь в общих чертах.

1. Эксперименты Ву, Амблера и сотрудников также показали^{13, 14}, что в β -распаде нарушается инвариантность относительно зарядового сопряжения¹⁵. Другая симметрия, называемая инвариантностью относительно отражения времени¹⁶, до сих пор экспериментально изучается для случая слабых взаимодействий.

Три дискретных преобразования—преобразование зеркального отражения, преобразование зарядового сопряжения и преобразование отражения времени—связаны между собой важной теоремой^{17, 18}, называемой СРТ-теоремой. Используя эту теорему, можно получить¹³ ряд общих результатов, касающихся возможности экспериментально обнаружить в слабых взаимодействиях нарушение трех упомянутых симметрий.

Особый интерес представляет возможность, что слабые взаимодействия сохраняют инвариантность относительно обращения времени. В этом случае из СРТ-теоремы следует, что хотя закон сохранения четности и нарушается, но симметрия между правым и левым остается, если только¹⁹ переводить при зеркальном отражении частицы в античастицы. В терминах, употребляемых на рис. 2, это означает, что если на правом рисунке мы заменим в с вещество, из которого сделана аппаратура, на антивещество, то показания счетных устройств будут одинаковы для обоих рисунков в том случае, если имеет место инвариантность относительно обращения времени. Важно отметить, что при обычно принятом определении отражения электрическое поле есть вектор, а магнитное поле—псевдовектор. В рассмотренном же случае инвариантности относительно отражения времени электрическое поле есть псевдовектор, а магнитное—вектор. В случае отражения времени свойства преобразования электрического и магнитного зарядов также противоположны тем, которые

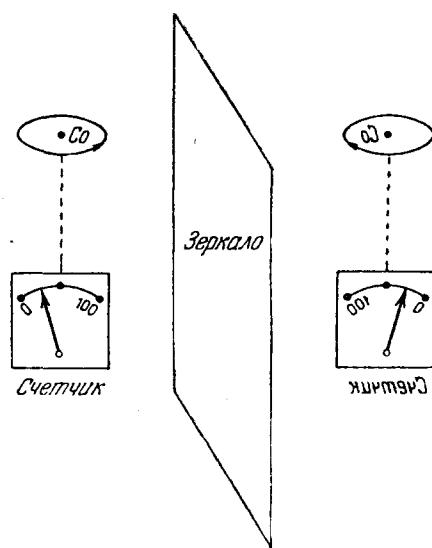


Рис. 2. Схематическая диаграмма эксперимента по проверке закона сохранения четности при β -распаде.

существуют при пространственном отражении. Интересно продумать возможную связь между несохранением четности и ролью, которую играют электрические и магнитные поля в симметрии.

В некоторой степени за последний год обсуждался вопрос о справедливости законов непрерывного преобразования пространства—времени. Имеются большие основания к тому, что законы симметрии подобного рода не нарушаются в слабых взаимодействиях.

2. Другим широко обсуждающимся законом симметрии является закон, приводящий к сохранению изотопического спина²⁰. В последние годы применение этого закона симметрии привело к замечательному эмпирическому упорядочению явлений, связанных со странными частицами²¹. Однако этот закон—наименее понятный из всех законов симметрии. В отличие от преобразования Лоренца и преобразования отражения этот закон не является законом «геометрической» симметрии, связанной с инвариантными свойствами пространства—времени. В отличие от преобразования зарядового сопряжения¹⁸ он не возникает из алгебраических свойств комплексных чисел, появляющихся в квантовой механике. В этом смысле он похож на законы сохранения заряда и тяжелых частиц. Однако последние законы являются точными, в то время как закон сохранения изотопического спина нарушается под действием электромагнитных взаимодействий и слабых взаимодействий. Несомненно, что на сегодня одной из важнейших задач в области физики высоких энергий является выяснение вопроса об обосновании закона сохранения изотопического спина и выяснение связи этого закона с прочими законами симметрии.

3. Я уже отмечал, что для всех типов слабых процессов величины силы взаимодействия примерно одинаковы. Проведенные за последний год экспериментальные исследования по несохранению четности указывают с большой вероятностью также на то, что для различных слабых процессов свойства, относящиеся к несохранению четности и к нарушению инвариантности относительно зарядового сопряжения, близки. Таким образом, слабые процессы годятся для того, чтобы отличать правое от левого (если только как-то определена разница между веществом и антивеществом). Слабые процессы также могут быть использованы для того, чтобы отличить вещество от антивещества (если только определена разница между правым и левым). Если нарушается инвариантность относительно обращения времени, то слабые процессы могут служить даже для независимого разделения правого от левого и вещества от антивещества. Здесь чувствуется, что происхождение слабых взаимодействий тесно связано с вопросом о возможности отличить правое от левого и вещество от антивещества.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ц. Д. Ян, следующая статья этого же выпуска УФН.
2. Ссылки по этому поводу смотри: E. P. Wigner, Proc. Ark. Phil. Soc. 93, 521 (1949).
3. Сравни с интересным обсуждением двухсторонней симметрии у H. Weyl, Symmetry (Princeton Univ. Press., 1952).
4. O. Laporte, Z. Phys. 23, 135 (1924).
5. E. P. Wigner, Z. Phys. 43, 624 (1927).
6. O. Klein, Nature 161, 897 (1948); J. Tiomno a. J. A. Wheeler, Revs. Modern Phys. 21, 144 (1949); T. D. Lee, M. Rosenbluth, C. N. Yang, Phys. Rev. 75, 905 (1949).
7. R. Dalitz, Phil. Mag. 44, 1068 (1953); E. Fabri, Nuovo Cimento 11, 479 (1954).
8. C. N. Yang, Revs. Modern Phys. 29, 231 (1957).
9. N. D. Lee a. C. N. Yang, Phys. Rev. 104, 254 (1956).
10. T. D. Lee a. J. O'Gear, Phys. Rev. 100, 932 (1955); T. D. Lee a. C. N. Yang, Phys. Rev. 102, 290 (1956); M. Gell-Mann (не опубликовано), R. Weinstein,

