

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

539.12

## ПРОГРЕСС В НАШЕМ ПОНИМАНИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ \*)

Л. Ван-Хов

## 1. ЧАСТИЦЫ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

За последние годы наметился резкий контраст между быстрым, носящим почти взрывной характер прогрессом физики элементарных частиц в области эксперимента и ситуацией, сложившейся в теории. Если касаться только основных проблем, то можно сказать, что за последнее десятилетие в нашем теоретическом понимании элементарных частиц был сделан лишь очень ограниченный прогресс, поэтому я бы хотел рассмотреть ситуацию в более широкой исторической перспективе. Она должна быть достаточно широкой, чтобы включать в себя и некоторые из основных достижений теории, которые сформировали наше сегодняшнее мировоззрение в области физики элементарных частиц, хотя и очень ограниченное в данный момент.

Однако прежде всего я напому вам о тех объектах, о которых пойдет речь. Мы будем говорить о вещах, которые могут быть сгруппированы в четыре категории: фотоны, лептоны, мезоны и барионы. Для простоты изложения я буду использовать традиционную терминологию, называя все их частицами и опуская таким образом то разделение, которое можно было бы ввести, если рассмотреть эту проблему несколько глубже, как это было сделано в статье Вайскопфа (см. стр. 343).

Итак, наш перечень частиц таков:

- 1) фотоны,
- 2) лептоны: электроны ( $e$ ), мюоны ( $\mu$ ), нейтрино ( $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ ) и их античастицы,
- 3) мезоны, классифицируемые по странности  $S$ ,
  - $S = 0$ :  $\pi$ ,  $\eta$ ,  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $f^0$  и т. д.,
  - $S = \pm 1$ :  $K$ ,  $K^*$ ,
- 4) барионы, опять-таки классифицируемые соответственно их странности:
  - $S = 0$ : нуклоны (протоны и нейтроны) и их возбужденные состояния,
  - $S = -1$ :  $\Lambda$ - и  $\Sigma$ -гипероны и их возбужденные состояния,
  - $S = -2$ :  $\Xi$ -гипероны и их возбужденные состояния,
- 5) все античастицы рассмотренных выше барионов.

Таков перечень того большого количества частиц, которые известны на сегодняшний день. Физик изучает их свойства и взаимодействия между ними. Эти взаимодействия подразделяются на три фундаментальных типа,

\*) L. Van Hove, Progress in Our Understanding of Elementary Particles, Proc. Roy. Soc. A278, 416 (1964). Перевод И. М. Дрёмина.

и несмотря на открытие многих новых частиц в последние годы наши основные концепции относительно такого подразделения были весьма стабильны, что само по себе является достаточно замечательным фактом.

Электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия и есть эти три типа взаимодействий. Электромагнитными взаимодействиями являются все те, в которых принимают участие фотоны, когда фотоны присутствуют до того или после того, как частицы провзаимодействовали, или когда фотоны играют роль некоего виртуального переносчика во время взаимодействия.

Слабые взаимодействия удовлетворяют одной или сразу обоим из следующих двух характеристик. К ним принадлежат все взаимодействия, в которых принимает участие нейтрино, и все взаимодействия, изменяющие странность. Некоторые процессы, обусловленные слабыми взаимодействиями, обладают обоими чертами: в них принимает участие нейтрино и изменяется странность, другие же или происходят только с участием нейтрино, или приводят лишь к изменению странности. Что касается сильных взаимодействий, то это все те взаимодействия мезонов и барионов, которые не являются ни электромагнитными, ни слабыми. Имеет место замечательное разделение по силе взаимодействия для этих трех типов. Сильные взаимодействия можно рассматривать как взаимодействия с силой порядка единицы, электромагнитные — порядка  $10^{-2}$  и слабые — порядка  $10^{-5}$ .

## 2. ТЕОРИЯ ПОЛЯ КАК ОСНОВНОЙ МЕТОД ДЛЯ ПОНИМАНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Если мы спросим, какой основной метод использовался в теоретических дискуссиях, начиная с младенческих лет физики элементарных частиц в 30-х годах, для понимания этих частиц, то, очевидно, ответом будет: «Квантовая теория поля». Дадим краткий обзор тех огромных достижений, которые были здесь сделаны. Как мы увидим ниже, картина окажется очень контрастной.

Начнем с электромагнитных взаимодействий, которые изучены лучше всего. Теоретико-полевая трактовка этих взаимодействий достигла изумительной степени точности и огромных успехов для тех частиц, которые обладают лишь электромагнитными, но не сильными взаимодействиями, т. е. для электронов, мюонов и фотонов. Как вы помните, основание квантовой теории электромагнитного поля, взаимодействующего с заряженными частицами, было заложено работами Дирака, Паули, Гайзенберга и некоторых других авторов в период 1928—1929 гг. Они предложили квантовую теорию, которая имеет дело с электроном, фотоном и взаимодействием между ними, а также разработали метод вычисления эффектов электромагнитного взаимодействия в низшем порядке теории возмущений, рассматривая это взаимодействие как малое и пренебрегая эффектами высшего порядка.

Эта теория оказалась очень плодотворной и была поддержана крупными успехами в экспериментальных исследованиях. Дальнейшее ее развитие было затруднено лишь тем обстоятельством, что любая попытка перейти к большей точности, рассматривая электромагнитное взаимодействие в высших порядках, приводила к непреодолимым математическим трудностям, так как теория в каждом случае приводила к бесконечным ответам, расходящимся интегралам, которые, очевидно, не имели никакого смысла. Почти 20 лет было потрачено на то, чтобы преодолеть эту очень серьезную трудность, возникшую в рамках квантовой электродинамики. Значение математических расходимостей было понято намного

лучше лишь к 1948 г., что позволило устранить их из конкретных расчетов. Эта так называемая теория перенормировок была блестяще подтверждена, когда было найдено, что ее предсказания находятся в согласии с весьма точными измерениями атомных спектров.

Благодаря методу перенормировок мы теперь можем изучать электромагнитные взаимодействия в более высоких порядках, это означает, что мы можем вычислять поправки к основным эффектам. Поскольку последние имеют порядок 1%, то мы теперь можем сравнивать электромагнитную теорию и эксперимент с точностью, намного превышающей 1%. Я бы хотел напомнить поразительный пример, именно, магнитный момент мюона, а затем сказать несколько слов о магнитном моменте электрона.

Заряженные лептоны, электрон и мюон обладают магнитным моментом, равным величине

$$\mu = \frac{e\hbar}{2mc} (1 + \varepsilon),$$

где  $e$  — электрический заряд,  $\hbar$  — постоянная Планка, разделенная на  $2\pi$ ,  $m$  — масса лептона,  $c$  — скорость света,  $\varepsilon$  — поправка более высокого порядка, которой мы интересуемся. Для мюона ее величина, предсказываемая теорией, дается выражением

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{2\pi} + 3 \left( \frac{\alpha}{2\pi} \right)^2 + O(\alpha^3),$$

где  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры, равная  $e^2/\hbar c$ . Численно:  $\alpha/2\pi = 1,16 \cdot 10^{-3}$ ,  $3(\alpha/2\pi)^2 = 0,004 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-6}$ . Проведенный в ЦЕРНе эксперимент подтвердил это теоретическое значение величины  $\varepsilon$  с неопределенностью порядка  $5 \cdot 10^{-6}$ , т. е. примерно равной члену  $3(\alpha/2\pi)^2$ , пропорциональному  $\alpha^2$ .

Для электрона

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{2\pi} - 1,312 \left( \frac{\alpha}{2\pi} \right)^2 + O(\alpha^3).$$

Последние экспериментальные результаты, касающиеся этого случая, были получены в США и дали согласие в пределах ошибки, меньшей чем  $10^{-8}$ . Мы сталкиваемся здесь с замечательной ситуацией, что существует немного примеров того, когда теория успешно достигает такого высокого уровня точности в своих предсказаниях, а эксперимент оказывается способным проверить их с той же точностью. Это наиболее светлое место в нашей картине, которая в дальнейшем станет намного темнее.

Я перехожу к слабым взаимодействиям. Это — весьма обширное и очень интересное поле для исследований, но я буду очень краток. Ферми в 1934 г., основываясь на успехе, достигнутом при теоретико-полевом рассмотрении электромагнитных взаимодействий, предпринял аналогичную атаку на теорию слабых взаимодействий, предложив точечное взаимодействие четырех частиц, подчиняющихся статистике Ферми—Дирака, причем он оставил открытым вопрос о конкретном виде коэффициентов, т. е. о выборе так называемых инвариантов.

Следующий огромный шаг был сделан спустя примерно 15 лет, в 1948—1949 гг., когда после выяснения свойств мюона начала использоваться идея об универсальности слабых взаимодействий. Затем в 1957 г. в связи с эффектным открытием нарушения закона сохранения четности в слабых взаимодействиях рассеялась и последняя неопределенность, оставшаяся в теории Ферми. Природа взаимодействия оказалась такой, что в теории остались лишь вектор минус аксиальный вектор, причем это открытие было сделано весьма нетривиальным методом мышления.

Отталкиваясь от загадочных свойств распадов странных частиц, Янг и Ли пришли к идее, что четность не сохраняется в слабых взаимодействиях; после этого уже весьма быстро удалось пролить свет на точный вид взаимодействия нуклонов с лептонами. Этот шаг, дополненный, конечно, открытием в последние годы наличия двух типов нейтрино  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ , привел к весьма удовлетворительной картине тех процессов слабых взаимодействий, в которых не участвуют странные частицы. Теперь можно сказать, что эти взаимодействия находятся в положении, сравнимом с тем, которое было в электродинамике между 1930 и 1948 гг. Известно, как вычислять эффекты слабых взаимодействий в низшем порядке, но неясно, как вычислить эффекты в более высоких порядках, хотя каждый твердо убежден, что поправки ничтожно малы.

К сожалению, в случае слабых взаимодействий с участием странных частиц ситуация резко отличается от описанной выше.

Начиная с 1956—1957 гг. были испробованы различные предположения относительно их структуры, однако медленно накапливающиеся экспериментальные данные ставят перед ними серьезные трудности, поэтому теоретические предсказания здесь могут быть неверными даже по порядку величины. В этой области, так же как и в области сильных взаимодействий, к обсуждению которых мы сейчас перейдем, теоретическое понимание почти полностью отсутствует, и по-видимому, придется подождать до тех пор, пока не будут более полно исследованы экспериментаторами некоторые довольно сложные явления.

Теперь мы переходим к области сильных взаимодействий. И здесь теоретическая ситуация снова оказывается весьма неудовлетворительной; наши предсказания, даже тогда когда их вообще возможно сделать, обычно неверны на фактор два или более. Физика сильных взаимодействий берет свое начало с проблемы ядерных сил (сил, действующих между протонами и нейтронами), к экспериментальному исследованию которых приступили в начале 30-х годов. Самая привлекательная идея использования основных методов квантовой теории поля для подхода к проблеме ядерных сил была высказана в 1935 г. Юкавой. Он предложил теорию поля сильных взаимодействий, основанную на гипотезе, что они передаются с помощью новых частиц, так называемых мезонов, масса которых является промежуточной между массами электрона и нуклона. Вскоре появилась и надежда на подтверждение этой теории, так как в 1936 г. был открыт мезон. Однако, как оказалось несколько позже, это был  $\mu$ -мезон, или мюон, который согласно нашей терминологии является лептоном и вообще не принимает участия в сильных взаимодействиях.

И только в 1947 г. впервые была обнаружена частица, которая была хорошим кандидатом для теории сильных взаимодействий, выдвинутой Юкавой. Это был  $\pi$ -мезон, или пион, открытый Латтесом, Оккиалини, Мюрхедом и Пауэллом. Вскоре после открытия пиона, а также благодаря тому, что в то время теория перенормировок привела квантовую электродинамику на новый, более высокий уровень совершенства, теоретики стали весьма оптимистичными. Они принялись за активную разработку квантовой теории поля ядерных сил и пион-нуклонных взаимодействий по линии, впервые предложенной Юкавой, однако с использованием новых методов и базируясь на новых экспериментальных данных.

За этим последовал период очень высокой активности, а вместе с тем и существенного крушения надежд, так как успех был весьма ограниченным. В качестве примера можно сказать, например, что в то время, как магнитные моменты электронов и мюонов предсказываются квантовой электродинамикой с точностью порядка  $10^{-9}$  (см. выше), теория сильных

взаимодействий не может достигнуть даже точности порядка 100% для аналогичной характеристики протона.

Эту неблагоприятную ситуацию обычно объясняют тем, что методы теории возмущений неприменимы к сильным взаимодействиям из-за того, что последние очень сильны. Тем не менее весьма беспокоит тот факт, что прогресс в развитии альтернативных математических методов, которые позволили бы извлечь количественные результаты из уравнений теории поля, является таким медленным.

В свете последних достижений (хотя в теории очень мало заметно какое бы то ни было продвижение) мы получили от экспериментаторов по крайней мере некоторое оправдание за такой небольшой прогресс, так как ими было найдено намного больше мезонов. Прежде всего, начиная с 1947 г. были обнаружены странные частицы, в частности странные мезоны. Затем в течение последних трех лет были найдены и новые мезоны со странностью, равной нулю, в частности  $\rho$ -,  $\omega$ - и  $\eta$ -мезоны. С точки зрения первоначального предложения Юкавы каждый из этих мезонов со странностью нуль имеет равное право на участие в ядерных силах. Возможно, именно поэтому не представляется удивительным тот факт, что мы не преуспели в наших попытках объяснить ядерные силы и сильные взаимодействия в терминах лишь одних пионов. Теперь у нас есть большое семейство сильно взаимодействующих частиц, и теоретический прогресс, возможно, будет оставаться очень медленным до тех пор, пока мы не достигнем достаточно полного эмпирического знания о составе и свойствах этого семейства.

Тем временем теоретическая работа продолжалась в двух направлениях: на основе дисперсионных соотношений и принципов симметрии.

Эти оба направления претендуют на меньшее, нежели теория поля, они пытаются использовать некоторые концепции и методы теории поля, но не претендуют на вычисление всех эффектов, исходя лишь из нескольких основных уравнений. Техника дисперсионных соотношений, вызванная к жизни аналогией с ранними работами в области электродинамики, является методом, с помощью которого можно разумно сопоставлять разнообразные сведения, полученные из многих реакций с различными частицами. Дисперсионная техника имела хотя и ограниченный, но несомненный успех в области энергий ниже  $1 \text{ Гэв}$ , где она позволила поставить в соответствие друг другу огромное количество реакций, так как здесь мы можем предположить, что число виртуальных частиц, которыми происходит обмен, не слишком велико. В случае нуклонов и мезонов с нулевой странностью, а также до некоторой степени в случае странных частиц дисперсионные соотношения оказались очень плодотворными при низких энергиях. Недавно появилась некоторая надежда на то, что дисперсионная техника может быть применена и в области очень высоких энергий, когда Чу, Фраучи, Грибов, Померанчук, Гелл-Манн и Закарайсен предложили экстраполировать в эту область замечательные результаты, полученные Редже чисто математическим путем в квантовой теории рассеяния, основанной на уравнении Шредингера. На основе такой смелой экстраполяции было получено замечательное предсказание о дифракционном рассеянии сильно взаимодействующих частиц, именно о сужении дифракционного пика. Первая экспериментальная проверка этого предсказания, проведенная с достаточной степенью точности, подтвердила предсказанное сужение (эксперимент в ЦЕРНе по рассеянию протонов на протонах). Второй эксперимент (рассеяние  $\pi$ -мезонов на протонах, Брукхэвен), к сожалению, не обнаружил никакого сужения пика, так что в настоящий момент ситуация довольно неопределенная.

Еще раз мы встречаемся со знакомой ситуацией в физике сильных взаимодействий, когда наши теоретические методы не могут дать точных предсказаний, что наглядно иллюстрируется положением дел с дифракционным рассеянием. Дифракционный пик при рассеянии протонов на протонах, как было найдено, сужается, а при рассеянии пионов на протонах не сужается. Если вы сейчас спросите даже наиболее оптимистичного специалиста, будет ли сужаться пик в рассеянии каонов на протонах, он попросит разрешения подождать до получения экспериментальных результатов \*).

### 3. СУЩЕСТВЕННАЯ РОЛЬ ПРИНЦИПОВ СИММЕТРИИ И ПРАВИЛ ОТБОРА

С меньшими претензиями, но с большим практическим успехом, нежели в области дисперсионных соотношений, теория сильных взаимодействий использовала другой метод, который был весьма важен на многих этапах развития физики. Это — применение принципов симметрии и соответствующих законов сохранения и правил отбора. Как вы знаете, и в классической, и в квантовой физике существование определенных симметрий подразумевает справедливость некоторых законов сохранения. Эта чисто математическая теорема была сформулирована в общем виде в 1918 г. математиком Е. Нетер. Именно поэтому принципы симметрии весьма полезны для упорядочения эмпирических фактов. Данная теорема связывает их с правилами отбора, которые имеют следствия, наблюдаемые непосредственно на эксперименте.

Этот подход оказался исключительно полезным в той неясной ситуации, в которой находилась теория поля в области сильных взаимодействий.

Изучение симметрий в физике элементарных частиц привело нас к картине, о которой я упомяну кратко, так как она очень достопримечательна и показала большую стабильность в течение того времени, которое принесло множество новых экспериментальных открытий.

Прежде всего существуют симметрии и соответствующие им законы сохранения, которые справедливы для всех взаимодействий, к ним относятся релятивистская инвариантность и инвариантность относительно обращения времени, сохранения электрического заряда, барионного заряда, лептонного заряда, а теперь, кроме того, возможно, и нового заряда, связанного с существованием двух различных видов нейтрино и называемого иногда мюонным зарядом.

Существует и другой класс симметрий, таких, которые нарушаются при слабых взаимодействиях, но сохраняются при электромагнитных и сильных взаимодействиях. Сюда относятся пространственное отражение и симметрия по отношению к замене частицы на античастицу, а также сохранение странности. Наконец, существуют симметрии, которые нарушаются как при слабых, так и при электромагнитных взаимодействиях, но сохраняются при сильных взаимодействиях. Достаточно хорошо установлена лишь одна симметрия такого типа, симметрия по изотопическому спину, отвечающая инвариантности по отношению к вращениям в некотором символическом трехмерном пространстве. Замечательным представляется тот факт, что она была впервые предложена в начале 30-х годов, когда из сильно взаимодействующих частиц были известны лишь протон

\*) Эти экспериментальные результаты получены недавно. Замечено небольшое сужение дифракционного пика при  $K^+p$ -рассеянии. В случае рассеяния антипротонов на протонах никакого сужения не наблюдается (см. K. J. Foley, S. J. Lindenbaum, W. A. Love, S. Ozaki, J. J. Russell, L. C. L. Yuan, Phys. Rev. Lett. 11, 503 (1963)). (Прим. перев.)

и нейтрон, и с тех пор успешно расширила область своей справедливости на многочисленные мезоны и барионы, открытые за последние 30 лет.

Недавно было предпринято множество попыток найти другие симметрии аналогичного вида. Одной из возможностей, которая кажется многообещающей, является так называемая октетная симметрия. Это некоторая модификация, предложенная Гелл-Манном и Неemanом, схемы симметрии, введенной впервые Сакатой. Она основана на унимодулярной унитарной группе в трехмерном пространстве. Одним из ее предсказаний является математическое соотношение между массами, которое Вайскопф упомянул в конце своей статьи \*). Оно представляет собой линейное соотношение между массами нуклона и  $\Lambda$ -,  $\Sigma$ - и  $\Xi$ -гиперонов, которое замечательным образом согласуется с экспериментом.

Итак, существует весьма примечательная иерархия трех классов симметрий, некоторые из которых справедливы для всех взаимодействий, а другие нарушаются электромагнитными и слабыми взаимодействиями. При этом слабые взаимодействия разрушают больше симметрий, нежели электромагнитные взаимодействия. Эта взаимосвязь между симметриями и силой взаимодействий является очень благоприятным обстоятельством, так как она позволила нам далеко продвинуться в анализе экспериментальных результатов в терминах теоретических правил отбора. В отсутствие настоящей теории использование принципов симметрий и правил отбора заняло важное место во всех теоретических рассуждениях по физике элементарных частиц.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение я хочу обсудить те проблемы, которые являются самыми темными местами в обрисованной мною картине, так как именно в них может скрываться наиболее сильная надежда на будущие успехи. Если спросить, какова ситуация в настоящий момент с пониманием теории сильных взаимодействий, а также того раздела слабых взаимодействий, который имеет дело со странными частицами, то мы должны будем сделать заключение, что все наши попытки еще очень далеки от того, что надо требовать от хорошей теории, именно, чтобы она с неплохими шансами на успех предсказывала явления. С другой стороны, поразительным фактом является то, что в последние годы было сделано огромное число экспериментальных открытий. Так как ускорители частиц высоких энергий сделали возможным постановку детальных и точных опытов, то были найдены многие новые частицы, большинство из которых являются нестабильными, однако со временем жизни, достаточным для проявления своей индивидуальности. Мы также изучили, насколько разнообразны те пути, с помощью которых эти многочисленные частицы рождаются, распадаются и взаимодействуют друг с другом. Очевидно, мы впервые сталкиваемся с полем, которое удивительно разнообразно, разветвлено и исключительно сложно. Единственная мощь, которую теоретик может оказать в этой области в настоящий момент, состоит в том, чтобы разработать общий язык и хотя бы ограниченный математический формализм, которые бы позволили физикам понимать друг друга, чтобы предлагать эксперименты и анализировать их результаты. Этот язык, однако, возможно, будет очень похож на язык ребенка, который имеет мало опыта в новом для него и большом мире, но уже хочет обсуждать его и должен это делать.

Ситуация, хотя и весьма плачевная с точки зрения современной теоретической активности, может, однако, в другом отношении рассматри-

\*) См. предыдущую статью на стр. 343.

ваться как очень обнадеживающая. Сам факт, что так много замечательных результатов было получено из опыта, а также тот факт, что они так плохо укладываются в рамки концепций и уравнений, которые мы знаем, являются, по моему мнению, очень сильными указаниями на то, что мы действительно входим в новую главу физики. По мере того, как экспериментаторы будут продолжать исследование этой новой области, проникая далее к новым частицам и более высоким энергиям, они постепенно будут вычерчивать все лучшие карты новой территории. Затем, как уже случилось в физике в прошлом, изучение этой более хорошей и более полной карты приведет к созданию новых концепций и новых путей развития теории, так что те явления, которые так сильно озадачивают нас сейчас, станут основными источниками будущего фундаментального знания.

---