

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

537.591+539.12

**КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ \*)****Е. Л. Фейнберг****I. ВВЕДЕНИЕ**

Успехи физики элементарных частиц на протяжении более тридцати лет неразрывно связаны с повышением энергии исследуемых частиц. Это обусловлено двумя простыми причинами. Во-первых, для генерации новых частиц, в частности нестабильных, короткоживущих, необходимо превысить порог генерации, определяемый массой частиц данного рода — их энергией покоя. Во-вторых, для того чтобы изучать их пространственную структуру, нужно, учитывая волновые свойства частиц, переходить ко все более коротким волнам (как в микроскопе), т. е. к большим энергиям.

Соответственно этому каждый новый этап физики элементарных частиц был связан с экспериментальным преодолением некоторого энергетического порога.

В качестве источника быстрых частиц на всех этапах фигурировали, с одной стороны, все усовершенствовавшиеся лабораторные источники — ускорители, с другой — космические лучи. Параллельно шли два процесса: повышалась энергия частиц, поставляемых ускорителями, и одновременно росла энергия тех космических лучей, с которыми удавалось работать достаточно надежно (в частности, измеряя энергию, массу частиц, углы вылета и т. п.). Можно заметить три основные закономерности.

1. Как правило, качественно новые результаты, новые частицы, новые процессы обнаруживались в космических лучах, а детальное изучение явлений завершалось на ускорителях. Лишь в последнее десятилетие на ускорителях были получены самостоятельные качественно новые результаты.

2. Такое соотношение ролей двух методов исследования было обеспечено тем, что характерная энергия космических лучей, при которой в данный момент велись эффективные исследования, всегда примерно на два порядка превышала энергию частиц, даваемых в тот же период наилучшими ускорителями. Но в изучении отдельных проблем (например, в измерении полного сечения некоторых взаимодействий) в настоящее время опережение достигает 5—6 порядков.

3. Область энергий, в которой велись интенсивные исследования, повышалась примерно на  $1\frac{1}{2}$ —2 порядка в десятилетие. С начала 30-х годов по настоящее время на ускорителях она повысилась от 0,5 до  $3 \cdot 10^4$  Мэв, т. е. в  $\sim 10^5$  раз, в космических лучах — от  $\sim 5$  Мэв (открытие позитрона) до  $\sim 10^6$  Мэв, т. е. тоже в  $\sim 10^5$  раз.

\*) Доклад на объединенной сессии по космическим лучам трех отделений АН СССР: Отделения ядерной физики, Отделения общей и прикладной физики и Отделения наук о Земле, 5 марта 1965 г.

Можно отметить и еще одно обстоятельство. Хотя космические лучи как объект исследования очень неудобны — они неуправляемы, многие параметры часто неизвестны и потому опыты не вполне однозначны и т. п., — еще не было случая, чтобы факт, установленный в космических лучах и широко признанный экспериментаторами-космиками, не был впоследствии подтвержден на ускорителях.

Эти закономерности можно проследить шаг за шагом.

В начале 30-х годов в космических лучах был открыт позитрон, и релятивистская квантовая механика стала надежной наукой. Это было связано с преодолением порога энергии в лабораторной системе  $E_L \gg mc^2 \approx 0,5 \cdot 10^6$  эв, где  $m$  — масса электрона. Детальная проверка теории была осуществлена в течение последующих почти десяти лет при помощи лабораторных источников частиц высокой энергии.

В последующие годы существовали (как мы теперь знаем, необоснованные) сомнения в применимости квантовой электродинамики в области  $E_L \gg 137 mc^2$ . Они были опровергнуты, и справедливость теории была подтверждена в середине 30-х годов в результате изучения каскадных электромагнитных ливней в космических лучах.

Одновременно переход в эту область энергий означал также переход к  $E_L \gg \mu c^2$ , где  $\mu$  — масса мезона. Соответственно в космических лучах был открыт  $\mu$ -мезон, обнаружена его нестабильность, измерены масса и время жизни. Хотя это рассматривалось как блестящее подтверждение гипотезы Юкавы о ядерных мезонах, уже тогда, в конце 30-х годов, в космических лучах было показано, что имеется существенное расхождение, наводящее на мысль о существовании помимо  $\mu$ -мезонов других — ядерно-активных мезонов со временем жизни на два порядка меньшим.

Как эти частицы —  $\pi$ -мезоны, так и многие другие были открыты в космических лучах в 1947—1950 гг. На ускорителях они были найдены только когда была освоена область энергий выше порога их генерации в системе центра инерции соударяющихся нуклонов,  $E_c = Mc^2 \gg \mu c^2 \sim 10^8$  эв,  $E_c = \sqrt{\frac{1}{2}(E_L + Mc^2)Mc^2}$  ( $M$  — масса нуклона), т. е. в лабораторной системе  $E_L \gtrsim 10^9$  эв. В космических лучах были найдены многие схемы распадов мезонов, времена жизни, массы и приближенно оценена интенсивность взаимодействия.

Гипероны были найдены в космических лучах в это же время и несколько позже. На ускорителях же для этого потребовалось освоить энергии  $E_c \gg Mc^2$ , т. е.  $E_L \sim 10^9 \div 10^{10}$  эв. В космических лучах были открыты явления, приведшие к концепции странности. Не следует забывать, что даже вопрос о несохранении четности был поставлен данными по  $K$ -распаду в космических лучах.

Изучение взаимодействий при  $E_L \gtrsim 10^{10}$  эв одновременно привело к открытию множественной генерации мезонов в одном акте — факт, принципиально важный для теории. В последующем, с пуском ускорителей на  $(1 \div 3) \cdot 10^{10}$  эв, вся эта область сильных взаимодействий перешла в руки физиков-«ускорительщиков», использующих гораздо более надежные и прецизионные методы, и был получен ряд новых детальных результатов.

Конечно, такой путь изучения элементарных частиц не охватывает всего. При достаточной прецизионности измерений не всегда нужно превосходить определенный порог, чтобы получить фундаментальный результат. Существует, так сказать, «майкельсоновский» путь, использованный при подготовке теории относительности. Здесь эффект измеряется, скажем, величиной  $v^2/c^2 \sim 10^{-8}$ , но благодаря надежности опыта этого достаточно для установления физического результата. Подобно этому, сдвиг уровней

в атоме водорода, измеряемый величиной  $\alpha^2 R_y \sim 10^{-4}$  эв и определенный с точностью до  $10^{-4}$  от этой величины, является важнейшим для теории элементарных частиц подтверждением релятивистски инвариантной квантовой электродинамики. Но если речь идет о п о р о г о в ы х эффектах вроде получения новых частиц или о множественной генерации, то переход к высоким энергиям часто бывает неизбежным.

Успехи в создании ускорителей протонов с лабораторной энергией 10—30 Гэв и полученные с их помощью ценнейшие результаты в последние годы приглушили внимание к космическим лучам как к источнику сведений по физике элементарных частиц. Распространилось мнение, что уже достигнута область энергий, которая обеспечивает получение всех необходимых данных, поскольку соударение нуклонов стало возможным изучать при  $E_c \sim 5$  Гэв, что намного превосходит их энергию покоя.

Однако, по-видимому, в последнее время намечается некоторое изменение в этой точке зрения. Поэтому целесообразно обсудить вопрос: существуют ли среди фундаментальных проблем физики элементарных частиц такие, решение которых, во-первых, требует перехода к более высоким энергиям, чем дают современные ускорители, и, во-вторых, которые можно было бы разрешить средствами физики космических лучей?

## 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОВРЕМЕННОЙ ПРОБЛЕМАТИКИ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Современная проблематика в теории элементарных частиц вращается в основном, пожалуй, вокруг трех тесно связанных фундаментальных вопросов.

1. Является ли взаимодействие полей в сколь угодно малом пространственно-временном интервале вполне локальным или же, наоборот, за порогом некоторых весьма малых расстояний или промежутков времени что-то нарушается, например, так, что на этих малых интервалах распространение сигнала происходит со скоростью, превышающей скорость света в вакууме  $c$ ? Этот вопрос иногда формулируют и в таком виде: существует ли некоторая новая (по абсолютной величине очень малая) неизвестная нам фундаментальная мировая константа  $l_0$  размерности длины или времени? Если она существует, то отсюда следует, что «в малом» нарушается обычная формулировка принципа причинности, согласно которой невозможна передача взаимодействия со скоростью, превышающей  $c$ . Эту проблему можно сформулировать и так: действительно ли плоха в своих основах современная квантовая теория релятивистских полей, основанная на принципах локальности и причинности, или теория хороша, но мы не умеем должным образом с ней обращаться, например, просто не умеем решать уравнения, включающие сильно взаимодействующие поля (поскольку здесь нет малого параметра и теория возмущений, пригодная в обычной электродинамике, неприменима)?

2. Какова структура элементарных частиц и чем она обусловлена? Каково пространственное распределение свойств (заряда, магнитного момента) в разных частицах, распределение их полей при взаимодействиях? Каков механизм их взаимодействия, механизм генерации новых частиц при высоких энергиях?

3. Вопрос вопросов: как понять существующий спектр масс, спинов, зарядов и четностей частиц, какова динамическая природа этого различия частиц?

Конечно, на пути к этим высоким общим целям задача сводится в значительной мере к тому, чтобы найти взаимные связи и теоретически

описать конкретные процессы взаимодействия частиц разного рода при разных энергиях, изучить их сечения, массы, спины и другие свойства частиц и т. п.

Исследования идут по всем этим линиям. Как известно, последний год ознаменовался бурным развитием и значительными успехами в построении феноменологической схемы существующих частиц, их систематики на основе вскрытых свойств симметрии частиц. Так удалось получить формулы, удивительно точно воспроизводящие измеренные соотношения между некоторыми характеристиками элементарных частиц, до того остававшимися совершенно несвязанными.

Какие же проблемы из этих трех областей могут быть прояснены с помощью исследований в космических лучах?

Конечно, в основном мы должны здесь руководствоваться общим принципом: эти исследования, имеющие дело с неуправляемым, нерегулируемым и трудно регистрируемым источником, всегда давали и, видимо, могут дать в будущем главным образом такие результаты, которые не связаны с прецизионным измерением малых количественных эффектов. Нельзя, однако, забывать, что хотя такие «грубые» опыты и составляют главную прерогативу космических лучей, в ряде случаев опыты в космических лучах дают и довольно точные количественные результаты.

В качестве примеров укажем, что постоянство сечения взаимодействия нуклонов с ядрами атомов воздуха установлено опытами с широкими атмосферными ливнями космических лучей в интервале энергий  $10 \div 10^6$  Гэв с точностью порядка 30%, что постоянство среднего поперечного импульса частиц, рождающихся в процессе множественной генерации, в интервале энергий  $5 \div 10^4$  Гэв установлено с еще большей точностью, и т. д. Вступившие недавно в строй, новые строящиеся и проектируемые установки, использующие камеру Вильсона в магнитном поле и разнообразную электронику, позволяют изучать акты взаимодействия при энергиях порядка  $5 \cdot 10^{11}$  эв в количестве тысяч в год. Менее полный анализ допускают наблюдения с помощью ядерных фотоэмульсий в области энергий до  $10^{13}$  эв и выше и т. д.

### 3. НОВЫЕ ЧАСТИЦЫ

Прежде всего следует остановиться на проблеме, являющейся традиционной для физики космических лучей, — на возможности отыскания новых частиц. В настоящее время эта проблема приобретает особенно большое значение в связи с последними успехами теории симметрий элементарных частиц. Здесь нет возможности излагать вопрос о симметриях. Важно отметить, что в весьма распространенной формулировке оно основывается на представлении о некоторых первичных частицах-полях, из сочетания которых возникают наблюдаемые нами частицы. В самом простом варианте предположенной систематики фигурируют кварки — частицы с дробными зарядами  $+\frac{2}{3}e, -\frac{1}{3}e$  и  $-\frac{1}{3}e$ , где  $e$  — элементарный заряд. Дробные заряды могут быть изгнаны из теории наложением дополнительного запрета, например, введением некоторого нового квантового числа. Но даже и при этом остается вопрос о новых «базисных» частицах с целочисленным зарядом, отличных от наблюдавшихся до сих пор частиц. Они могут быть устойчивы, иметь массу, большую массы нуклона, и проявляться в различного рода сильных взаимодействиях. Поиски этих частиц в космических лучах представляют чрезвычайно важную и очень привлекательную задачу. Попытки искать их на ускорителях дали отрицательный результат. Это может значить, однако,

только то, что масса их очень велика и потому особенно необходимо использовать космические лучи.

Затем следует проблема поисков тяжелого бозона, ставящаяся теорией слабых взаимодействий. О ней будет сказано несколько ниже.

Наконец, нужно упомянуть о поисках монополя Дирака, ведущихся безуспешно уже много лет. Более 30 лет тому назад Дирак обратил внимание на то, что квантовая механика открывает возможность существования частицы с магнитным зарядом вполне определенной величины. Его свойства теоретически изучены.

Сообщая об этом, Дирак, как говорят, сказал: «Трудно представить себе, чтобы природа не использовала этой возможности». Отличие от проблемы кварков или других базисных частиц состоит в том, что магнитный монополь — это изолированная возможность, он не необходим для какой-либо теории, а только возможен. Базисные же частицы — пока что важный элемент всего, хотя и далеко не завершенного, но уже очень привлекательного учения о симметриях, которое к настоящему времени дало много замечательных результатов.

Завершая этот перечень возможных новых частиц, можно сюда же отнести и объект, который по многим данным уже замечен в космических лучах. Именно, имеются веские свидетельства в пользу того, что при столкновении нуклонов с энергией выше  $20 \div 30 \text{ Гэв}$  в системе центра инерции ( $3 \cdot 10^{11} - 10^{12} \text{ эв}$  в л. с. к.) мезоны генерируются преимущественно в виде быстро распадающихся сгустков из многих ( $\sim 10^3$ ) частиц. По-видимому, эти сгустки, если они действительно существуют, в такой же степени заслуживают названия частиц, как уже найденные на ускорителях резонансы, распадающиеся на 2, или на 3, или даже на 4  $\pi$ -мезона.

Перейдем теперь к систематическому обзору различных взаимодействий.

#### 4. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛЕЙ

В физике элементарных частиц приходится иметь дело с взаимодействиями трех типов:

а) Сильные или мезонные взаимодействия, характерные для нуклонов,  $\pi$ -мезонов, гиперонов и т. д. Типичное сечение такого взаимодействия частиц при энергиях, много больших энергии покоя, мало меняется и имеет порядок  $10^{-26} \text{ см}^2$  (например, для упругого рассеяния пион—нуклон в сверхрелятивистской области  $\sigma \approx (0,5 \div 1) \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$ ).

б) Электромагнитные, играющие главную роль для электронов, позитронов,  $\mu$ -мезонов и взаимодействующих с ними фотонов. Их сечения часто падают с энергией, а при энергиях порядка энергии покоя частиц они обычно меньше сечений сильно взаимодействующих частиц (но, например, для рассеяния фотона очень большой энергии  $E$  на покоящемся электроне,  $E \gg mc^2$ , имеем  $\sigma \approx 25 \cdot 10^{-26} mc^2 / E \ln(E/mc^2) \text{ см}^2$ ).

в) Слабые взаимодействия, характерные для взаимодействия нейтрино с другими частицами. По теории, вплоть до энергии (в системе центра инерции) порядка  $300 \text{ Гэв}$  они сильно растут с энергией, но все же очень малы. (Для рассеяния нейтрино с энергией  $E$  на покоящемся электроне  $\sigma \approx 5 \cdot 10^{-45} E/mc^2 \text{ см}^2$ .)

Мы разберем проблематику и возможности физики космических лучей для каждого из этих типов сил. Мы увидим, что для электромагнитных взаимодействий возможности здесь ограниченные, а для сильных и слабых космические лучи в ряде отношений, по-видимому, останутся незаменимыми, пока не будут построены новые ускорители с энергией, на несколько порядков превосходящей существующие. Это никак не может произойти раньше, чем через 10—15 лет.

## 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Теория чисто электромагнитных взаимодействий — квантовая электродинамика — является наиболее разработанной, наиболее последовательной теорией квантовых полей. При некоторой неудовлетворительности фундаментальных основ она превосходно во многих деталях подтверждается всеми известными экспериментальными данными. Вместе с тем, поскольку существуют частицы — электроны и  $\mu$ -мезоны обоих знаков, для которых электромагнитные взаимодействия являются главными (они на много порядков значительнее, чем другие взаимодействия этих частиц), проверка квантовой электродинамики в опытах с этими частицами представляет собой прекрасную возможность проверки некоторых основных положений теории, таких, как локальность и причинность на малых расстояниях, и т. п. В квантовой электродинамике эти частицы предстают как практически точечные центры, для которых их поле и их взаимодействия можно рассчитывать с любой необходимой точностью. Искать нарушения этого поля на малых расстояниях можно, с одной стороны, отыскивая вклад этих нарушений в свойства отдельной частицы — например, в ее магнитный момент или в энергию ее стационарных состояний (сдвиг уровня электрона в атоме водорода), для чего совсем не требуется высоких энергий; с другой стороны, — по взаимному рассеянию, аннигиляции и т. п. таких частиц. В этом последнем случае чем выше энергия, тем меньше исследуемые расстояния. (Как уже говорилось, это совершенно подобно микроскопу. Поскольку «рассматриваемый объект» испытывает значительную отдачу, речь идет об энергии в системе центра инерции соударяющихся частиц.)

В настоящее время наилучшие результаты в этом вопросе дает весьма прецизионное измерение магнитного момента  $\mu$ -мезона (величина  $g-2$  —  $g$ -фактор Ланде — измеряется с точностью до малых долей процента). Это опыт «майкельсоновского типа» в указанном выше смысле. При современной точности измерений никаких отклонений от обычной квантовой электродинамики это измерение не обнаруживает вплоть до расстояний порядка  $10^{-14}$  см. Подобный же предел справедливости теории дают опыты по рассеянию электронов и мюонов на протоне (где, однако, нужно учитывать размазанность заряда протона), по генерации пар  $\mu$ -мезонов  $\gamma$ -квантами с энергией  $5 \text{ Гэв}$  при больших углах разлета и т. п.

Все эти опыты дают прецизионные результаты, на которые космические лучи не могут претендовать. Это не их область \*).

Тем не менее уже сейчас можно указать по крайней мере один частный конкретный эффект, представляющий интерес для теории. Именно, обнаружено, что  $\mu$ -мезоны весьма высокой энергии, проникающие глубоко под землю, генерируют  $\pi$ -мезоны. Объясняется это тем, что при столь

---

\*) Есть, правда, интересный класс электромагнитных явлений, невозможных при низких энергиях. Это — явления, связанные с тем, что генерация тормозных квантов, образование электронных пар, рассеяние в кулоновском поле и т. п. происходят при сверхвысоких энергиях  $E$  под ничтожно малыми углами  $\theta \sim mc^2/E$ , т. е. при  $10^{12} \div 10^{15} \text{ эв}$   $\theta \sim 10^{-6} \div 10^{-9} \text{ рад}$ . Подобно тому как это бывает при скользящем падении рентгеновских лучей на поверхность оптической дифракционной решетки, здесь каждый элементарный акт разыгрывается в очень большой области, захватывающей очень много атомов среды. Из-за этого обычные процессы резко меняют свой характер, если они происходят не на изолированном атоме в газе, а в плотной среде. Предсказанные рядом теоретиков эффекты были обнаружены в космических лучах, а теперь некоторые из них, по-видимому, будут использованы на ускорителях, например, для получения монохроматических  $\gamma$ -лучей и т. п. Интересно, что волновые свойства частиц проявляются здесь только при б о л ь ш и х энергиях, т. е. при малых длинах волн. Однако, изыщные сами по себе, эти явления пока ничего не дали для фундаментальных проблем теории элементарных частиц.

высокой энергии,  $E \gg \mu c^2$ , релятивистски сжатое электромагнитное поле мезона имеет в основном черты пакета  $\gamma$ -квантов высокой энергии: это поле почти точно поперечное и магнитный вектор в нем перпендикулярен электрическому. Такие « $\gamma$ -кванты» на ядрах среды дают фотогенерацию пионов. Поэтому изучение эффекта позволяет сделать заключение о сечении  $\sigma$  процесса:  $\gamma + \text{нуклон} = \text{нуклон} + \text{пион}$ . Уже несколько лет тому назад в космических лучах было получено указание, что это сечение при энергии псевдокванта  $E \gtrsim 10 \text{ Гэв}$  не сильно отличается от сечения  $\gamma$ -квантов, измеренного в ускорителях, т. е. при  $E \lesssim 0,5 \text{ Гэв}$  (здесь нужны электронные ускорители, которые только недавно подошли к области  $5 \text{ Гэв}$ ). Однако эти измерения в космических лучах довольно трудны, а учет размеров нуклона и продольной части электромагнитного поля не вполне надежен. Поэтому полученное пока указание нельзя считать уверенным. Здесь скорее можно говорить о реальной перспективе получения важной для физики величины при недоступной для ускорителей энергии. Можно ожидать, что будут найдены и другие подобные возможности изучения отдельных электромагнитных процессов при сверхвысоких энергиях в космических лучах.

## 6. СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Взаимодействия нейтринного типа принадлежат к числу исключительно важных с принципиальной стороны. Хорошо изученные при малых энергиях — порядка  $1 \text{ Мэв}$ , эти взаимодействия теоретически описываются существенно иначе, чем электромагнитные или сильные. Именно, первичным, элементарным процессом в этой теории является превращение двух ферми-частиц в две такие же или другие ферми-частицы. Например, в терминах фейнмановских диаграмм рассеяние нейтрино на электроне — это процесс рис. 1, который не может быть разложен на более простые. В то же время, например, рассеяние  $\gamma$ -кванта на электроне и вообще

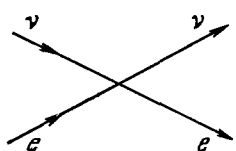


Рис. 1.

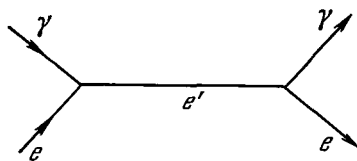


Рис. 2.

любое электромагнитное взаимодействие содержит только тройные вершины — рис. 2. Таким образом, элементарный акт — это взаимодействие бозе-частицы (фотон) с ферми-частицей (электрон), дающее ферми-частицу. Только тройные вершины входят и в мезон-нуклонные взаимодействия. Это различие принципиально: четырехфермионное взаимодействие неперенормируемо. Это значит, что попадающиеся в теории бесконечности не могут быть элиминированы, устранены из конкретных подсчетов столь же ловко, столь же однозначно и релятивистски инвариантно, как в электромагнитных и сильных взаимодействиях. Эта особенность имеет очень глубокое значение. С одной стороны, именно она была использована Гейзенбергом в его попытке построить единую теорию полей всех частиц. Но, с другой стороны, существует стремление избавиться от этого своеобразия слабых взаимодействий. Была выдвинута гипотеза, что существует некоторая, еще неоткрытая частица, электрически заряженный бозон —  $W$ -мезон, которая образует промежуточное звено в слабых взаимодействиях. Именно, предполагается, например, что рассеяние

$\nu e \rightarrow \nu e$  в действительности идет как схема рис. 3. Благодаря этому теория становится теорией более обычного типа (правда, последовательно ввести  $W$ -мезон так, чтобы теория стала перенормируемой, пока еще не удалось).

Поиски  $W$ -частицы в свободном состоянии производились на ускорителях, но безуспешно. Был сделан вывод, что если эта частица и существует, то ее масса превышает  $\sim 4$  массы нуклона. В таком случае, если учесть кинематические соотношения, характеризующие процесс ее генерации, ее придется искать на пределе энергии самых больших современных ускорителей или при еще больших энергиях, и космические лучи здесь очень нужны.

Есть и другой путь выяснения справедливости четырехфермионной теории слабых взаимодействий. Ее особый характер обуславливает рост

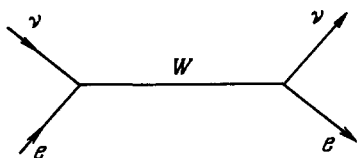


Рис. 3.

сечений по мере роста энергии частиц. При энергии в системе центра инерции в  $300 \text{ Гэв}$  (в л. с. к.  $10^{14} \text{ эв}$ ) этот рост должен привести к тому, что теория возмущений перестанет быть верной и множественные процессы станут столь же существенны, как простейшие возможные (правда, их сечение все равно еще останется чрезвычайно малым.). Проверка этого простого вопроса — действительно ли

сечения слабых взаимодействий растут с энергией в сверхускорительной области — представляет поэтому исключительный интерес для теории. Прямая такая проверка возможна, по-видимому, только в космических лучах. Эти чрезвычайно трудные исследования уже начались. Они трудны потому, что измеряемое сечение ничтожно мало (в  $10^{-10}$  и более раз меньше обычных мезонных), а поток нейтрино столь высокой энергии в атмосфере ничтожно слаб\*). Правда, и здесь возможен подход «майкельсоновского» типа. Можно теоретически подсчитать, какие искажения в свойства заряженной частицы, например  $\mu$ -мезона или электрона (в магнитный момент и т. п.), вносит примесь слабых взаимодействий. Они соответствовали бы искажению поля частицы на расстояниях порядка  $10^{-16} \text{ см}$ . Однако, в отличие от электродинамики, теория слабых взаимодействий не может дать здесь точных количественных предсказаний именно потому, что она «плохая» — неперенормируемая.

Из сказанного видно, что опыты с нейтрино сверхускорительных энергий имеют для теории огромную ценность.

## 7. СИЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Если энергия двух сталкивающихся сильно взаимодействующих частиц достаточно велика, ~~то в~~ <sup>тогда</sup> в одном акте рождается не одна, а много новых частиц — пионов, нуклонных пар и т. п. Это — важнейшая особенность сильных взаимодействий (именно поэтому они и называются «сильными»). Между тем в электромагнитных взаимодействиях это не так: вероятность излучения двух фотонов при столкновении электрона с ядром, как правило, на два порядка меньше, чем вероятность излучения одного, вследствие чего электромагнитные процессы можно рассчитывать весьма точно — здесь применима теория возмущений. Значение этого факта так велико, что там, где он неверен — при излучении чрезвычайно мягких фотонов (что практически мало существенно), употребляют выражение

\*) В этих опытах, проводимых глубоко под землей (чтобы заэкранироваться от потока мешающих частиц и наблюдать только эффект, производимый нейтрино), регистрирующая площадь сцинтилляционных счетчиков составляет сотни  $m^2$ .



«инфракрасная катастрофа». В области сильных взаимодействий, как было обнаружено в космических лучах еще в сороковых годах, эта «катастрофическая» ситуация имеет место всегда. Поэтому, хотя формально уравнения теории можно написать и лагранжиан взаимодействия, по-видимому, известен, пользы от этого не очень много. Мы не умеем убедительно и строго рассчитывать множественные процессы, присутствующие либо явно, как явление генерации многих пионов, либо скрыто в цепи вычислений, как поляризация нуклон-мезонного вакуума и в тому подобных «виртуальных состояниях». Более того, принципиальная обоснованность теории, от обсуждения которой в электродинамике можно уклониться, став на путь перенормировок, в случае сильных взаимодействий подвергается серьезному сомнению.

Поэтому здесь, в ожидании будущей хорошей и общей теории, изыскивают частные методы, приспособленные к отдельным проблемам. Допуская возможность того, что, может быть, общие уравнения квантовой теории поля здесь непригодны в основах, применяют не эти уравнения, а некоторые соотношения, менее содержательные, но зато основанные лишь на общих принципах локальности и причинности, например так называемые дисперсионные соотношения и т. п. Каждая частная теоретическая гипотеза, выводящая за рамки этих общих соотношений, представляет особый интерес как возможный кирпичик в здании будущей теории и подвергается серьезной опытной проверке. Мало какие из этих гипотез выдержали пока испытание экспериментом. Замечательно, однако, что там, где были использованы сами эти считающиеся заведомо верными общие соотношения теории поля, они не противоречат эксперименту. Очевидно, что именно описанная ситуация представляет наибольший научный интерес, указания эксперимента в сочетании с анализом выдвигаемых гипотез, моделей и приближений к строгим соотношениям приобретают огромное значение.

Внимание к космическим лучам как методу физики элементарных частиц, как уже говорилось, ослабело в последние 5—8 лет, когда появились ускорители для нуклонов на 10—30 Гэв, т. е. в системе центра инерции двух соударяющихся нуклонов для  $E_c \sim 3 \div 5$  Гэв. Тем самым, как казалось, был превышен последний естественный порог энергии  $E_c \sim 1$  Гэв  $\approx Mc^2$ . Сильные взаимодействия стали доступны прецизионным лабораторным исследованиям в релятивистской области, и можно было думать, что дальнейшее повышение энергии не даст ничего принципиально нового. Эта точка зрения подкреплялась и теми важнейшими данными, которые давали сами космические лучи. Как об этом уже упоминалось, изучение космических лучей показало, что сечение взаимодействия нуклонов с ядрами атомов воздуха остается постоянным вплоть до энергий порядка  $E_L \sim 10^{15}$  эв. Следовательно, оно не меняется (или очень слабо меняется), когда энергия меняется в миллион раз.

Однако именно исследования на ускорителях, давшие за последние годы так много ценного, подтвердив, в частности, полученные ранее данные физики космических лучей, подтвердили и указания на неправильность такой успокаивающей концепции.

С точки зрения данных, полученных на ускорителях, здесь важны три факта.

Во-первых, это история метода полюсов Редже. Года три тому назад была выдвинута и затем широко разработана очень изящная и казавшаяся многообещающей частная теория, в основе которой лежала определенная гипотеза о свойствах амплитуды волны, упруго рассеянной в процессе соударения сильно взаимодействующих частиц. Гипотеза носила довольно формальный характер, была феноменологической

и говорила о том, какими особыми точками (на не имеющей прямого физического смысла плоскости комплексного орбитального момента) может обладать амплитуда упругого рассеяния. Эта теория приводила к некоторым вполне конкретным предсказаниям о свойствах упругого рассеяния частиц и о полных (включая неупругое) сечениях взаимодействия частиц разного сорта. Сначала опыты на ускорителях блестяще подтвердили предсказание этой теории в случае упругого рассеяния протон — протон. Однако впоследствии оказалось, что рассеяние других частиц ( $\pi^+$  — протон,  $\pi^-$  — протон,  $K^-$  — протон, антипротон — протон) отнюдь не имеет требуемого характера. Между тем важнейшим выводом теории была универсальность упругого рассеяния для частиц любого типа, если только речь идет о сильных взаимодействиях и если их энергия намного превышает энергию покоя. Этот результат показывает, что: а) либо гипотеза о свойствах особых точек в принципе неверна, б) либо исследованная область энергий недостаточно велика, что мы еще не находимся в асимптотической области. Дальше будет еще сказано, как можно иначе понять этот результат, если не ограничиваться феноменологической трактовкой, а попытаться найти механизм взаимодействия. Пока же мы можем констатировать, что даже с точки зрения этого подхода в области ускорителей еще не достигнуты достаточно высокие энергии и необходимо идти к более высоким энергиям.

Во-вторых, измерение полных сечений взаимодействия частиц разного сорта показало, что в большинстве случаев они даже при энергии  $\sim 30 \text{ Гэв}$  еще не удовлетворяют соотношению, выводимому из общих положений теории и называемому теоремой Померанчука. Согласно этой теореме, если полные сечения по мере роста энергии достигают постоянного значения, сечения соударения частиц и античастиц должны сравняться, т. е. должно стать

$$\sigma_{AB} = \sigma_{\bar{A}B},$$

где  $A, B$  — частицы,  $\bar{A}$  — античастица. Ни постоянства сечений, ни этого равенства сечений при  $30 \text{ Гэв}$ , т. е. в ускорительных опытах, еще нет.

В-третьих, из довольно общих положений теории был сделан вывод, что по мере роста энергии должно асимптотически достигаться одно важное свойство амплитуды упругого рассеяния — она должна становиться почти чисто мнимой. (Это свойство имеет простой физический смысл: чисто мнимая амплитуда рассеяния на черном шаре, т. е. дифракционная амплитуда, целиком обусловленная поглощением, неупругими процессами. Рассеяние же в прозрачной, непоглощающей среде или рассеяние частицы в потенциальном поле имеет вещественную амплитуду.) Опыты на ускорителях показали, что даже при  $30 \text{ Гэв}$  вещественная часть амплитуды составляет еще 30% от мнимой, т. е. не мала.

Все эти три факта показывают, что недостаточно достичь энергии, много большей энергии покоя протона, чтобы оказаться в асимптотической области, что никакие «простые» свойства процесса упругого рассеяния и взаимодействия даже при энергии  $30 \text{ Гэв}$  еще не наступают.

Это значит, что помимо энергетического порога  $E \sim Mc^2$  может существовать какой-то новый, еще выше расположенный порог. Указания на его существование можно получить из следующих соображений.

Во-первых, и в методе полюсов Редже, относящемся к упругим соударениям, и в приближенном методе трактовки сильных взаимодействий, о котором мы еще будем говорить, в одномезонном приближении появляется характерный параметр  $\ln(E_L/Mc^2)$ . Характеристики процесса

заметно меняются, только когда становится  $\ln \frac{E_L}{Mc^2} \gg 1$ . Если мы потребуем  $\ln \frac{E_L}{Mc^2} \approx 4$ , то получим  $E_L \sim 10^{11}$  эв.

Во-вторых, средняя множественность генерации, как показывают опыты в космических лучах, растет с энергией примерно как

$$\bar{n} \sim \left( \frac{E_L}{\mu c^2} \right)^{1/4},$$

и среднее число рождаемых в одном акте частиц  $\bar{n}$  имеет порядок пяти при  $E_L \sim 10^{11}$  эв. Поэтому такое важное свойство, как одновременное рождение очень многих частиц, проявляется лишь в сверхускорительной области.

В-третьих, как уже упоминалось, в космических лучах получены веские указания на то, что при соударении двух нуклонов рождающиеся  $\pi$ -мезоны испускаются не непосредственно нуклонами, а некоторым сгустком мезонной материи, отделяющимся от обоих нуклонов, причем это явление наступает при  $E_L \sim 10^{11} \div 10^{12}$  эв.

Все это заставляет предположить, что при переходе к энергии порядка  $10^{11} \div 10^{12}$  эв мы можем ожидать новых результатов, которые могут представить значительный интерес для физики элементарных частиц. Для ускорителей еще ряд лет эта область останется недоступной.

Для того чтобы более детально разобраться в возникающей здесь проблематике, остановимся на механизме взаимодействия нуклонов и пионов высокой энергии.

Прежде всего нужно напомнить, что, в отличие от электромагнитных взаимодействий, каждый источник сильного мезон-нуклонного поля, например нуклон, создает вокруг себя сильно возмущенную область вакуума — облако виртуальных пионов, нуклон-антинуклонных пар и т. д. Этот сгусток мезонно-нуклонной материи имеет пространственную структуру, которая уже довольно хорошо прощупана, например, с помощью рассеяния электронов с энергией порядка  $1 \div 5$  Гэв на ускорителях и более грубо — другими методами. Такой сгусток, представляющий реальный физический нуклон, разрежен на периферии, где велика вероятность обнаружить не более чем один  $\pi$ -мезон. Средний радиус физического нуклона — около  $0,8 \cdot 10^{-13}$  см. По-видимому, примерно такой же порядок имеет и радиус пиона, однако изучить пион, прощупывая его быстрыми электронами, так, как это сделано для нуклона, не удастся: пион нестабилен, его время жизни порядка  $10^{-8}$  сек и мишенью в прямых опытах он служить не может.

Нуклон высокой энергии релятивистски сжат в направлении движения: нуклоны в ускорителях сжаты в 10—30 раз, а в космических лучах изучаются нуклоны с энергией  $10^{15}$  эв и более, представляющие собой тонкий листок, толщина которого в миллион раз меньше его диаметра.

Уже из размазанности нуклона вытекает важное обстоятельство: прямые соударения сильно взаимодействующих частиц не могут так просто приблизить нас к обнаружению нелокальности или существования фундаментальной длины, если она меньше чем  $10^{-13}$  см (а электродинамические опыты показывают, как уже говорилось, что она меньше чем  $10^{-14}$  см). Действительно, даже при параметре соударения порядка  $10^{-13}$  см, когда нуклоны задевают друг друга только «краями», их взаимодействие уже является настолько сильным, что происходит множественное рождение частиц.

Следует подчеркнуть, что в космических лучах уже давно было обнаружено (сначала в области энергий порядка 10 Гэв, а затем — на

несколько порядков большей), что такие процессы множественного рождения  $\pi$ -мезонов при соударении нуклонов, как правило, не нарушают фундаментально состояние соударяющихся нуклонов: они сохраняют более половины своей первоначальной энергии и пролетают вперед. Можно сказать, что соударения нуклонов, как правило, происходят с параметром удара порядка  $10^{-13}$  см (что и дает сечение соударения  $\sigma \approx 4 \cdot 10^{-26}$  см<sup>2</sup>) и не являются для них катастрофическим. Их называют периферическими. Однако типичен широкий разброс характеристик акта соударения и, по-видимому, существуют и «центральные», катастрофические соударения, ведущие к образованию единой системы, из которой и излучаются частицы.

Выделенность периферических, слабо возмущающих нуклон соударений составляет экспериментальный факт, который со значительной степенью убедительности был прослежен и при небольших энергиях — порядка  $2 \div 5$  Гэв. В этой связи был развит приближенный метод описания

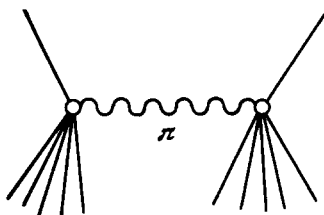


Рис. 4.

генерации  $\pi$ -мезонов в нуклонных соударениях. Он носит название приближения одномезонного обмена и может быть символически описан как обмен одним мезоном между соударяющимися частицами (рис. 4).

Можно сказать и так: каждый нуклон чаще всего попадает на периферию другого нуклона, и здесь он встречает разреженное пионное облако, в котором соударяется только с одним пионом. Другим предельным случаем в принципе является обмен столь большим числом  $\pi$ -мезонов, что сердцевины, «кernels», нуклонов сами вовлекаются в общее взаимодействие. Это приводит к процессу совсем другого типа. Он был рассмотрен более 10 лет тому назад Гейзенбергом, Ферми и Ландау. И хотя до сих пор не было получено вполне убедительных доказательств его существования в области космических лучей, он так важен и интересен, что на нем следует остановиться.

Созданная упомянутыми авторами теория процесса исходит из того, что в одном акте соударяющиеся нуклоны разменивают свою энергию между большим числом генерируемых частиц (а в космических лучах встречаются случаи с генерацией многих десятков частиц). Образуется система со многими степенями свободы, которую можно трактовать статистически и термодинамически. Это — черное тело, которому можно приписать температуру, и излучаемые им  $\pi$ -мезоны должны быть распределены по энергиям согласно формуле Планка. Ландау сделал важный шаг в этой теории в том отношении, что учел сильное взаимодействие разлетающихся частиц между собой. Формально это означало рассмотрение разлетающегося сгустка мезонно-нуклонной материи в согласии с релятивистской гидродинамикой при определенном уравнении состояния.

Неквантовое, гидродинамическое рассмотрение процессов внутри нуклона, да еще сжатого до тонкого листка, — удивительный по изяществу пример последовательного применения принципов физики. При

всей парадоксальности, этот подход совершенно точен и последователен. Он гипотетичен только потому, что предполагает: а) что такое состояние действительно возникает в начальный момент соударения — а это опытом все еще не доказано: в большинстве случаев соударение нуклон—нуклон периферическое; б) что процессы вполне локальны, нет фундаментальной длины и потому допустимо рассматривать сколь угодно малые элементарные объемы; кроме того, конкретные формулы теории включают два частных элемента; в) конкретное уравнение состояния; однако впоследствии теория была обобщена Милехиным на любое уравнение состояния; г) предположение, что вязкость не играет роли; это предположение, по-видимому, неверно; учет вязкости приводит к изменению некоторых конкретных формул (некоторое изменение множественности генерации и углов разлета), что, однако, не имеет принципиального значения.

Если принять упомянутые две исходные гипотезы, именно, во-первых, что среди неупругих процессов помимо периферических, одномезонных при сколь угодно высоких энергиях существуют и центральные, гидродинамические; во-вторых, что амплитуда упругого рассеяния при сверхвысоких энергиях, как это кажется весьма вероятным (см. выше), является чисто мнимой, то можно прийти к очень интересным выводам. Именно можно, исходя из общих соотношений для амплитуд процессов, последовательно связать упругие и неупругие рассеяния так, чтобы проследить, какие свойства упругого рассеяния вытекают из неупругих взаимодействий периферического типа, с одной стороны, из соударений центрального типа — с другой. Оказывается, периферические неупругие взаимодействия ведут к упругим взаимодействиям реджевского типа, а центральные — к нереджевским упругим. Это разъясняет возможную причину неудачи метода Редже, о которой упоминалось ранее: он учитывает только часть процессов, только те, которые обусловлены периферическими неупругими соударениями. Примесь же центральных соударений различна для разных частиц.

Эта точка зрения нашла подтверждение в результатах опытов в космических лучах: там для неупругих взаимодействий было оценено, что в пион-нуклонных соударениях периферические соударения не играют такой крупной роли, как в протон-протонных. В согласии с этим упругое рассеяние для пион-протонных соударений и не должно иметь реджевский характер, а для протон-протонных — должно. Это и имело место в ускорительных опытах.

Далее, из этого же исследования вытекает, что при сверхвысоких энергиях  $\pi$ -мезоны должны генерироваться в виде сгустков мезонной материи, распадающихся независимо на  $\pi$ -мезоны и имеющих массу, в несколько раз превосходящую массу нуклона. Такие сгустки, как уже говорилось, по-видимому, наблюдались в космических лучах, однако до сих пор все еще не очень уверенно. Они получили название fire-ball'ов («огненные шары» или «метеоры»). Однако генерироваться в отрыве от нуклонов они могут только при очень высоких энергиях — порядка  $10^{11}$ — $10^{12}$  эв, и число их очень медленно растет с энергией.

Мы приходим, таким образом, к любопытной картине, во многом соответствующей экспериментальным данным. Отсюда видно, как важно было бы установить, существуют или не существуют центральные соударения гидродинамического типа (в описанной теории важно, чтобы они имели место хотя бы для пион-пионных соударений).

Из сказанного следует, что при переходе к сверхускорительным энергиям мы можем ожидать раскрытия все новых интересных черт процессов сильных взаимодействий.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На протяжении более чем трех десятилетий исследования в области космических лучей играли существенную, пионерскую роль в физике элементарных частиц. И сейчас проблематика в этой области настоятельно требует дальнейшего их развития.

Разумеется, в очень многих вопросах эти исследования никак не заменяют исследований на ускорителях. Их задача — открывать новые факты в недоступной для ускорителей области, иногда определяя лишь относительно грубые характеристики процессов. По отношению же к проблеме развития ускорительной техники исследования в космических лучах играют роль разведчиков, помогающих уяснить основные пути дальнейших работ на ускорителях, в частности обосновывающих необходимость сооружения ускорителей.

---