

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ПРОБЛЕМА МЕЗОНА И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УЧЕНИЯ О КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ *)

И. Е. Тамм

§ 1. Мезонами или мезотронами (эти термины равнозначны и равноупотребительны) принято называть элементарные частицы, обладающие так называемой «промежуточной массой», т. е. частицы, более тяжелые, чем электроны, и вместе с тем более лёгкие, чем протоны. Повидимому, не все мезоны обладают одной и той же массой и спином; представляется более вероятным, что существует несколько различных видов мезонов.

В настоящее время с полной достоверностью установлено существование заряженных (положительных и отрицательных) мезонов с массой, близкой к 200 m (m —масса электрона). Однако есть также убедительные данные о существовании заряженных мезонов с другой массой **); наконец, есть веские теоретические доводы в пользу предположения о существовании нейтральных мезонов (которых иногда называют «нейтретто»).

Вопрос о свойствах мезонов, несомненно, является одним из самых важных и центральных вопросов современной экспериментальной и теоретической физики. Это обусловливается не только тем естественным интересом, который возбуждает каждый вновь открытый вид основных «кирпичей мироздания» — элементарных частиц, но и целым рядом других причин.

Во-первых, мезоны входят в состав космических лучей, составляя на уровне моря около 70% этих лучей; поэтому разнообразные процессы, происходящие при прохождении космических лучей через земную атмосферу, в существенной своей части определяются свойствами мезонов. В связи с этим вопрос о природе и свойствах мезонов является в настоящее время центральным для физики космических лучей,

*) Эта статья представляет собой введение к сборнику «Мезон», издаваемому Гостехиздатом и написанному сотрудниками Теоретического отдела ФИАН. Следующая за этой статья В. Л. Гинзбурга также написана для этого сборника.

***) Согласно наблюдениям А. И. Алиханова и А. И. Алиханяна и их сотрудников, на высоте 3200 м заметная доля мезонов в космических лучах обладает массой порядка 500—1000 m .

т. е. для той области физики, которая вызывает особый интерес потому, что в космических лучах встречаются частицы, энергия которых на несколько порядков превосходит энергию всех известных нам частиц другого происхождения.

Во-вторых, насколько можно судить в настоящее время, с проблемой мезонов теснейшим образом связана важнейшая проблема современной физики — проблема ядерных сил, т. е. сил сцепления между нуклонами (протонами и нейтронами) в атомных ядрах. Повидимому, соотношение между ядерными силами и мезонами соответствует примерно соотношению между электромагнитными силами взаимодействия заряженных частиц и световыми квантами (фотонами). Из свойств фотонов и из законов их излучения и поглощения заряженными частицами можно определить силы электромагнитного взаимодействия зарядов; подобно этому из свойств мезонов и из законов их излучения и поглощения нуклонами можно будет по всей вероятности определить ядерные силы.

Наконец, третья причина, обуславливающая особый интерес проблемы мезона, заключается в следующем. Современная квантовая механика, несомненно, правильно и последовательно описывает громадный круг физических явлений, в частности законы движения и взаимодействия нерелятивистских частиц (т. е. частиц, скорость которых мала по сравнению со скоростью света). В противоположность этому релятивистская квантовая теория, в частности теория силовых полей (электромагнитного поля, мезонного поля или поля ядерных сил и т. д.), находится в весьма неудовлетворительном состоянии. Это проявляется в том, что вычисление по современной теории целого ряда физических величин приводит к бесконечным, т. е. физически бессмысленным выражениям. Некоторые из этих так называемых «бесконечностей» связаны с тем, что в релятивистской теории мы не можем инвариантным образом приписать элементарной частице конечные размеры, а должны трактовать её как материальную точку. Между тем собственная энергия точечной частицы, например, электрическая энергия точечного электрического заряда, бесконечна как в квантовой, так и в классической теории. Помимо этих, так называемых «классических бесконечностей», есть и бесконечности существенно квантового происхождения; так, например, квантовые флуктуации напряжённости электромагнитного поля оказываются бесконечно большими даже в отсутствии электрических зарядов. Как классические, так и квантовые бесконечности приводят, в частности, к тому, что при пользовании теорией возмущения высшие приближения оказываются не только не малыми, но даже бесконечными и т. д.

Несмотря на эти серьёзные недостатки современной релятивистской квантовой теории, существует довольно обширная область явлений, к которой мы научились с успехом применять эту теорию. Так, например, теория процессов, происходящих при прохождении релятивистских электронов и позитронов через вещество (рассеяние их, ионизация веще-

ства, тормозное излучение и последующее образование гамма-квантами пар электронов и позитронов, эффект Комптона и т. д.), прекрасно подтверждается опытом.

Напротив, область применимости современной релятивистской теории к свободным мезонам и к мезонным полям ядерных сил гораздо уже, чем применимость её к электронам, позитронам и электромагнитному полю. Это обуславливается двумя причинами. Во-первых, применимость современной теории к электромагнитным явлениям существенно связана с малостью постоянной тонкой структуры $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$, благодаря чему в большинстве случаев оказывается достаточным ограничиться одним лишь первым приближением теории возмущений, в которой разложение ведётся по степеням α . Напротив, величина $\frac{g^2}{\hbar c}$, соответствующая в мезонной теории постоянной тонкой структуры α (g означает «мезонный» заряд нуклона), в десятки раз больше, чем α , и поэтому теория возмущения плохо применима (а, может быть, и вовсе неприменима) к мезонным полям. Во-вторых, для того чтобы объяснить существенную зависимость ядерных сил от спина нуклонов и большую величину поперечного сечения для образования мезонов быстрыми протонами в верхних слоях атмосферы, обычно предполагают либо что спин мезонов равен 1, либо что взаимодействие нуклонов с мезонами, обладающими спином 0, аналогично взаимодействию электрических или магнитных диполей (а не взаимодействию электрических зарядов). Оба эти предположения приводят, однако, к тому, что современная квантовая теория оказывается в сущности вовсе неприменимой к мезонам *).

Именно эта неприменимость или плохая применимость современной теории к мезонам и является одной из причин особого интереса к проблеме мезона. Можно надеяться, что как раз изучение мезонов создаст необходимую экспериментальную базу для построения будущей релятивистской теории элементарных частиц, способной устранить из неё те фундаментальные трудности, с которыми в менее резкой форме мы сталкиваемся и в квантовой теории электромагнитного поля.

§ 2. В настоящее время единственным источником мезонов являются космические лучи. Источник этот обладает ничтожной интенсивностью (на 1 см^2 земной поверхности падает примерно один мезон в минуту) и не поддаётся контролю; космические мезоны распределены по очень широкому интервалу энергий и сопровождаются быстрыми частицами другой природы. Поэтому изучение космических мезонов является крайне трудной экспериментальной задачей. Вместе с тем мезоны крайне недолговечны и самопроизвольно распадаются на один электрон или позитрон и на одно нейтрино (средняя длительность жизни нерелятивистского мезона $2,15 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$). Поэтому решительных

*) См. об этом статью В. Л. Гинзбурга «Теория мезотрона», стр. 174.

успехов в изучении мезонов можно ожидать только тогда, когда удастся генерировать мезоны в лабораторных условиях, подобно тому, как генерируются позитроны путём облучения вещества гамма-квантами. Ведь и мезоны, входящие в состав космических лучей, генерируются в земной атмосфере, ибо самопроизвольный распад мезонов устраняет возможность прихода их на землю из удалённых областей пространства.

Так как масса мезонов (по крайней мере того сорта мезонов, который преобладает в космических лучах на уровне моря) примерно в 200 раз больше массы электрона, то энергия покоящегося мезона равна приблизительно 10^8 eV. Для генерации мезонов нужно облучать вещество гамма-квантами, или, что по всей вероятности окажется более эффективным, протонами или нейтронами, энергия которых превышает этот предел. Быстрые успехи техники получения сверхбыстрых частиц (циклотрон, бетатрон, синхротрон и т. д.) позволяют рассчитывать, что в самое ближайшее время удастся «изготавливать мезоны» в лабораторных условиях*). Это обусловит настоящий переворот в состоянии физики элементарных частиц.

§ 3. Чтобы уяснить особенности теперешнего этапа развития физики космических лучей, необходимо напомнить историю этой крайне быстро эволюционирующей области физики за последнее десятилетие. К началу 1937 г. состояние вопроса было примерно следующим.

Были обнаружены и исследованы различные геомагнитные эффекты, в частности широтный геомагнитный эффект, т. е. зависимость интенсивности космических лучей от геомагнитной широты. Эффекты эти обусловлены отклонением заряженных первичных космических частиц (т. е. частиц, падающих на землю из мирового пространства) магнитным полем земли (практически всё отклонение космической частицы происходит на той части её траектории, которая лежит далеко за пределами земной атмосферы). Таким образом было установлено, что, если не все первичные частицы, то, во всяком случае, существенная их часть заряжена. По величине геомагнитного эффекта было установлено, что энергия первичных частиц достигает десятков миллиардов электронвольт. Далее было установлено, что интенсивность космических лучей быстро возрастает с высотой над уровнем моря и на высоте 20—30 км превышает интенсивность у поверхности земли в сотни раз. Число отрицательных и положительных частиц в космических лучах оказалось примерно одинаковым.

Что касается массы частиц, входящих в состав космических лучей, то надо иметь в виду, что надёжно измерить массу можно только у сравнительно медленных частиц, кинетическая энергия которых существенно

*) Сообщение М. Шейна и группы его сотрудников (Phys. Rev., 70, 435 (1946)) о том, что в опытах с генерируемыми бетатроном, гамма-квантами в 10^8 eV, им удалось в трёх случаях наблюдать возникновение мезонов, опровергается экспериментами Филлендера с сотрудниками (Phys. Rev., 70, 790, (1946)).

меньше их массы покоя. Измерения массы космических частиц, производившиеся на уровне моря, показали, что многие из этих частиц несомненно являются электронами и позитронами и лишь очень небольшой процент — протонами.

В связи с этим широко было распространено представление, что заряженные частицы космического излучения на всём протяжении земной атмосферы в преобладающей своей части являются электронами и позитронами. Те же нередкие случаи, когда измерения массы частиц приводили к значениям, промежуточным между массами электрона и протона, приписывались в то время неправильности теории, привлекавшейся для вычисления массы.

Вообще многие процессы, происходящие при прохождении космических частиц через земную атмосферу и другие среды, в первую очередь поглощение этих частиц и образование ливней космических лучей, казались в то время резко противоречащими теории.

Как известно, не очень быстрые заряженные частицы при прохождении через вещество теряют свою энергию, главным образом, на ионизацию и возбуждение атомов среды. Наряду с этими «ионизационными» потерями существуют также потери энергии на тормозное излучение. Когда электрон или позитрон пролетает вблизи атомного ядра, он под влиянием кулонового взаимодействия с ядром испытывает ускорение, а всякий неравномерно движущийся заряд (если $\frac{d^2\mathbf{v}}{dt^2} \neq 0$) излучает электромагнитные волны. Интенсивность излучения пропорциональна квадрату ускорения, т. е. пропорциональна $\left(\frac{Ze^2}{m}\right)^2$, где Ze — заряд атомного ядра, а m — масса пролетающей около него частицы. Таким тормозным излучением является, например, сплошной рентгеновский спектр, испускаемый электронами при торможении их в антикатоде рентгеновской трубки. При не очень больших энергиях частиц потери энергии на излучение гораздо меньше потерь на ионизацию. Однако, по мере роста энергии заряженной частицы, соотношение между этими двумя видами потерь меняется на обратное и потери на излучение, растущие пропорционально кинетической энергии E тормозящейся частицы, далеко обгоняют потери на ионизацию, которые достигают минимума при $E \sim mc^2$ и лишь незначительно возрастают при дальнейшем увеличении энергии E . То значение энергии частицы E , при котором потери обоих видов становятся одинаковыми, называется критической энергией E_{cr} . Так как (как только что указывалось) тормозное излучение пропорционально Z^2 , где Z — порядковый номер атомов среды, а потери на ионизацию пропорциональны числу электронов в атоме, т. е. пропорциональны Z (мы отвлекаемся здесь от учёта множителей, зависящих от Z логарифмически), то относительная роль тормозного излучения тем больше, и соответственно этому значение E_{cr} тем меньше, чем больше порядковый номер атомов среды: для воздуха $E_{cr} \sim 80$ MeV, для свинца $E_{cr} \sim 7$ MeV.

Надо иметь в виду, что тормозное излучение обратно пропорционально квадрату массы тормозящейся частицы, а потери на ионизацию крайне релятивистских частиц (т. е. частиц, скорость которых v удовлетворяет требованию $1 - \frac{v}{c} \ll 1$) от их массы практически не зависят; поэтому критическая энергия пропорциональна квадрату массы тормозящейся частицы. Приведённые только что числа относятся к электронам и позитронам. Так как свойства очень быстрых электронов и позитронов почти тождественны, то в дальнейшем часто термином «электрон» будут обозначаться электроны обоих знаков заряда (т. е. как собственно электроны, так и позитроны).

Пробегом частицы данной энергии называется средняя длина пути частицы в данном веществе, на котором частица растрачивает всю свою начальную кинетическую энергию. Теоретически вычисленные длины пробегов быстрых электронов и позитронов оказались гораздо меньше определённых на опыте пробегов космических частиц. Так, например, при прохождении электрона через толщу земной атмосферы он должен, согласно теории, потерять энергию порядка 10^{13} eV, тогда как широтный геомагнитный эффект свидетельствует, что первичные космические частицы обладают энергией порядка 10^{10} eV, т. е. в тысячу раз меньшей.

Вторая фундаментальная трудность состояла в том, что теория была бессильна объяснить механизм образования ливней космических лучей. Электрон или позитрон большой энергии, падая, скажем, на свинцовую пластинку, порождает в ней целый пучок вторичных электронов и позитронов, летящих приблизительно в том же направлении, как и первичная частица*). Такой пучок генетически связанных между собой электронов и позитронов и называется ливнем. Ливни могут порождаться также и фотонами; возникают они и в земной атмосфере. Число частиц в ливне может варьировать от 2 — 3 до сотен и даже тысяч. Наконец, в 1938 г. Оже установил существование, правда относительно весьма малочисленных, так называемых широких атмосферных ливней или ливней Оже, горизонтальное сечение которых достигает десятков тысяч квадратных метров, а число частиц в них может исчисляться миллионами.

Как большая проникающая способность космических лучей, так и существование ливней представлялись столь противоречащими теории, что было широко распространено убеждение в неприменимости дираковской теории электрона к электронам и позитронам больших энергий; предполагалось, что границы её применимости близки к $137 mc^2$ (m — масса электрона, $137 = \frac{1}{\alpha} = \frac{\hbar c}{e^2}$).

§ 4. 1937 г. был переломным для физики космических лучей. По одному из тех случайных совпадений, которые встречаются

*) Чем больше энергия вторичной частицы, тем меньше отклоняется её направление полёта от направления первичной частицы.

иногда в истории науки, в первой половине этого года независимо друг от друга появились три работы, разъяснившие основные трудности теории. В самом начале 1937 г. были опубликованы 2 теоретические работы — одна Баба и Гейтлера, другая Карлсона и Оппенгеймера, объяснившие механизм образования ливневой космической лучей. В мае того же года Неддермайер и Андерсон сообщили об открытии ими в космических лучах новой проникающей частицы — мезона.

Мы не можем останавливаться здесь на том, сопоставление каких экспериментальных данных привело Неддермайера и Андерсона к их фундаментальному открытию; отметим только, что в цепи их рассуждений решающее значение имел тот факт, что проникающая способность релятивистской заряженной частицы данной энергии должна быть тем больше, чем больше её масса покоя. Действительно, тормозное излучение, как уже указывалось выше, обратно пропорционально квадрату массы тормозящейся частицы. Так как масса мезона примерно в 200 раз больше массы электрона, то потери мезонов на излучение примерно в $200^2 = 4 \cdot 10^4$ раз меньше потерь электронов той же энергии. Таким образом, оказывается, что вплоть до очень больших энергий (порядка $3 \cdot 10^{11}$ eV в свинце и $4 \cdot 10^{12}$ eV в воздухе) мезоны при прохождении через вещество практически не дают тормозного излучения, а тратят энергию только на ионизацию среды. Эти потери составляют лишь малую долю потерь на излучение, испытываемых быстрыми электронами. Так, например, быстрая заряженная частица (независимо от её массы) при прохождении толщи земной атмосферы тратит на ионизацию всего около $2 \cdot 10^9$ eV, тогда как, благодаря потерям на излучение, минимальная энергия, необходимая электрону для прохождения сквозь толщу атмосферы, достигает $5 \cdot 10^{12}$ eV. Таким образом, большая масса мезонов обеспечивает их большую проникающую способность*). Мы знаем теперь, что энергия первичных космических лучей, падающих на поверхность атмосферы, переносится к поверхности земли, в основном, не мало проникающими электронами и позитронами, а проникающими мезонами. Подавляющее большинство электронов и позитронов, входящих в состав космических лучей у поверхности моря, зарождаются не у поверхности атмосферы, а в её нижних слоях, причём порождаются они проникшими в эти слои мезонами.

Принято различать две основные компоненты космических лучей — жёсткую, или проникающую, и мягкую. Компоненты эти разграничены не очень чётко; экспериментаторы, обычно, считают мягкими

*) При прохождении через вещество мезоны могут растрчивать свою энергию не только на ионизацию и излучение, но и на специфически мезонно-ядерные процессы. Однако эти специфические потери не играют существенной роли для мезонов с энергией порядка 10^9 eV, преобладающих в нижних слоях атмосферы. О поведении мезонов очень больших энергий мы знаем очень мало.

те космические лучи, которые поглощаются примерно 10 см свинца, а жёсткими те, которые проходят через такой слой свинца. Так называемая ионизирующая (т. е. состоящая из заряженных частиц) часть жёсткой компоненты состоит из быстрых мезонов и протонов; в нижних слоях атмосферы протонов мало, в самых же верхних слоях они, вероятно, составляют преобладающую часть космических лучей. Мягкая же ионизирующая компонента космических лучей состоит на уровне моря в основном из электронов и позитронов, малая проникающая способность которых обуславливается потерями на излучение. Кроме того, в состав мягкой ионизирующей компоненты входят относительно медленные мезоны и протоны, число которых быстро возрастает при подъёме от уровня моря к большим высотам.

Помимо ионизирующих (т. е. заряженных) частиц в состав космических лучей входят и нейтральные (неионизирующие) частицы. Проникающая неионизирующая компонента состоит из нейтронов и, вероятно, из нейтральных мезонов; мягкая же неионизирующая компонента состоит в основном из фотонов.

Малая проникающая способность фотонов тесно связана с механизмом образования ливней космических частиц. Как было впервые установлено работами Баба и Гейтлера и Карлсона и Оппенгеймера, механизм этот состоит в следующем. Быстрый электрон или позитрон, пролетая вблизи ядра какого-либо атома среды, с большой вероятностью излучают фотон большой энергии (тормозное излучение). В свою очередь фотон большой энергии, пролетая вблизи атомного ядра, с большой вероятностью «материализуется», т. е. порождает пару электрон-позитрон (сам фотон при этом, конечно, исчезает). Каждая частица такой вторичной пары, так же как и первичная, излучает тормозные фотоны большой энергии, которые в свою очередь образуют пары, и т. д. Получается лавинообразно нарастающий пучок электронов, позитронов и фотонов, летящих (если их энергия достаточно велика) примерно по направлению полёта первичной частицы. Энергия первичной частицы распределяется между частицами такого ливня, число которых продолжает нарастать, пока средняя энергия ливневых частиц не упадёт настолько, что ионизационные потери энергии заряженных ливневых частиц не начнут преобладать над потерями на излучение. В этой стадии и на этом расстоянии от места зарождения ливня число частиц N в нём достигает максимума и (при условии $E \gg E_{cr}$) равно $N = \frac{0,3 E / E_{cr}}{\sqrt{\ln E / E_{cr}}}$, где E — энергия первичной частицы, а E_{cr} — критическая энергия вещества, в котором образуется ливень. Далее происходит постепенное поглощение ливня — размножение ливневых частиц постепенно прекращается, а потери на ионизацию понижают их энергию до предела, ниже которого эти частицы уже не регистрируются измерительными приборами.

Понятно, что ливень может порождаться фотонами, а не электронами или позитронами.

Малая проникающая способность фотонов большой энергии обусловливается именно большой вероятностью их материализации в пару. Длина пути в данном веществе, на котором быстрый электрон или позитрон в среднем излучает один фотон большой энергии (так называемая ливневая единица длины*), примерно равна (точнее, на одну треть меньше) средней длине пути, которую проходит в том же веществе фотон большой энергии до того, пока он превращается в пару. Ливневая единица длины в свинце равна 0,5 см, в воздухе — около 300 м.

Электронно-позитронно-фотонные ливни, о которых всё время шла речь, входят, естественно, в состав мягкой компоненты космических лучей, которой они и порождаются. Как раз ливнеобразование и обуславливает малую проникающую способность мягкой компоненты в отличие от недающих тормозного излучения (а потому и неливнеобразующих и, стало быть, проникающих) мезонов. В настоящее время одним из главных экспериментальных критериев того, является ли данная заряженная частица (столь быстрая, что её массу нельзя оценить по вызываемой ею ионизации среды) мезоном или электроном, служит следующий признак: если эта частица, проходя через слой свинца в 2—3 см, не порождает в нём ливень, то она мезон или протон, а не электрон.

Создание каскадной теории ливней, результаты которой прекрасно согласуются с экспериментом, и открытие проникающей космической частицы — мезона — устранили прежние сомнения в применимости дираковской релятивистской теории к электронам очень большой энергии.

§ 5. Как уже отмечалось, преобладающая часть мягкой компоненты космических лучей в нижних слоях атмосферы не приходит сверху, а порождается в этих же слоях жёсткой компонентой — мезонами. Существуют три основных способа генерации мягкой компоненты мезонами.

Во-первых, быстрый мезон выбивает электроны из внешних электронных оболочек атомов среды, лежащих на его пути. Большинство электронов этого происхождения медленны и лишь небольшую долю их составляют быстрые. Если они обладают энергией порядка 1 MeV и выше, то их называют δ -электронами. Если энергия δ -электрона превышает критическую энергию для данной среды, то этот δ -электрон порождает ливень.

*) Точнее, на одной ливневой единице длины электрон, энергия которого много больше, чем $\frac{137mc^2}{Z^{1/3}}$, в среднем излучает один фотон, энергия которого превышает $\frac{1}{e} = \frac{1}{2,3}$ часть энергии электрона и, кроме того, фотоны меньших энергий.

Во-вторых, мезоны очень большой энергии (порядка 10^{11} eV) дают заметное тормозное излучение, т. е. порождают фотоны большой энергии, которые в свою очередь порождают ливни.

В негазообразных средах образование δ -электронов является основным механизмом генерации мягкой компоненты. Но при генерации этой компоненты в воздухе преобладающее значение имеет третий механизм — распад мезона.

Уже довольно давно было известно, что космические лучи поглощаются в атмосфере значительно больше, чем в эквивалентном по массе слое твёрдых или жидких веществ. Согласно теории, развитой Гейзенбергом и Эйлером в 1938 г., эта аномалия объясняется спонтанным распадом мезонов, аналогичным радиоактивному распаду тяжёлых ядер. Впоследствии распад мезонов был доказан непосредственными измерениями средней длительности жизни медленных мезонов (см. статью Е. Л. Фейнберга в сборнике «Мезон»), которая оказалась равной $\tau_0 = 2,15 \cdot 10^{-6}$ сек.; при распаде мезон превращается в один электрон или позитрон (в зависимости от знака заряда мезона) и одно нейтрино*). Если мезон движется с большой скоростью, то время его жизни τ , измеренное движущимся вместе с ним наблюдателем, будет иметь ту же длительность τ_0 ; однако, благодаря релятивистскому эффекту замедления хода движущихся часов, время жизни τ мезона, измеренное «неподвижным» наблюдателем, будет равно $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{\tau_0 \cdot E}{\mu c^2}$,

где v — скорость, E — энергия и μ — масса мезона. Чем быстрее мезон, тем дольше он живёт.

Если мезон не очень медленен (так что скорость его сравнима со скоростью света), то он пролетает сравнительно тонкие слои твёрдых или жидких веществ столь быстро, что практически не успевает в них распасться. Напротив, пути мезонов в атмосфере исчисляются километрами и время, потребное для прохождения таких расстояний со световой скоростью, велико по сравнению с τ_0 ; поэтому значительная часть мезонов распадается при прохождении сквозь земную атмосферу. Возникновение при распаде мезонов, электронов и позитронов (так называемых электронов распада) является главным механизмом генерации мягкой компоненты в атмосфере.

Аномальное поглощение космических лучей в атмосфере объясняется, во-первых, тем, что распад проникающих мезонов превращает их в сильно поглощаемую мягкую компоненту, и, во-вторых, тем, что половина энергии распадающегося мезона передаётся нейтрино и поэтому вовсе теряется для наблюдения, так как нейтрино не вызывают никаких доступных экспериментально обнаружению эффектов.

*) Не исключено, хотя и мало вероятно, что при распаде мезона получается не одно, а несколько нейтрино.

Так как мезоны самопроизвольно распадаются, то они не могут приходить из космических пространств, а должны генерироваться первичными космическими лучами в верхних слоях земной атмосферы. Что же нам известно о первичных космических лучах? Анализ данных по широтному геомагнитному эффекту показывает, что около 60% энергии космических лучей, падающих на поверхность земной атмосферы, приходится на первичные заряженные частицы, кинетическая энергия которых не превышает $1,7 \cdot 10^{10}$ eV. Предполагается, что и остальные 40% общей энергии космических лучей тоже в основном приносятся заряженными частицами столь большой энергии ($> 1,7 \cdot 10^{10}$ eV), что широтный эффект на них не сказывается. Далее, анализ данных по азимутальному геомагнитному эффекту (т. е. разницы в интенсивности космических лучей, падающих с востока и с запада под данным углом к вертикали) показывает, что космические лучи, доходящие до нижних слоёв атмосферы, порождаются в основном положительно заряженными первичными частицами.

Наиболее распространённая в настоящее время точка зрения состоит в том, что подавляющее большинство первичных космических частиц является положительно заряженными протонами*). Эта точка зрения основывается на опытах М. Шейна и его сотрудников, обнаруживших почти полное отсутствие быстрых электронов и позитронов в самых верхних слоях атмосферы (на высоте 25—35 км). Результаты Шейна, повидимому, подтверждаются недавними, ещё не опубликованными измерениями С. Н. Вернова.

Таким образом, наиболее вероятная схема прохождения космических лучей через атмосферу состоит в следующем: первичные протоны со средней энергией порядка 10^{10} eV генерируют в верхних слоях атмосферы мезоны, которые частью проникают в нижние слои атмосферы, составляя собою жёсткую компоненту космических лучей, частью распадаются по пути. Мягкая же компонента, состоящая из электронов и фотонов, является третичной и генерируется вторично (т. е. мезонами) как при распаде мезонов, так и путём образования δ -электронов (и в гораздо меньшей степени путём тормозного излучения мезонов).

§ 6. Схема эта, по всей вероятности, в общих чертах соответствует действительности. Однако экспериментальное изучение многих процессов, связанных с прохождением космических лучей через вещество, находится ещё в самом начале и таит в себе, повидимому, столь много неожиданностей, что, как мне кажется, в настоящее время начинается новая фаза в развитии учения о космических лучах.

*) Тот факт, что в верхних слоях атмосферы азимутальный эффект отсутствует, может объясняться тем, что в этих слоях образуется очень много медленных мезонов, которые, во-первых, сами сильно рассеиваются, и, во-вторых, при своём распаде испускают электроны более или менее изотропно по всем направлениям.

Действительно, процессы в космических лучах могут быть разделены на три класса: к первому относятся электромагнитные процессы — ионизация и возбуждение атомов среды заряженными частицами, выбивание ими δ -электронов и излучение ими тормозных фотонов под воздействием кулоновых сил атомных ядер и атомных электронов, образование фотонами электронно-позитронных пар, эффект Комптона, Резерфордское рассеяние заряженных частиц на атомных ядрах и т. д. Ко второму классу относится спонтанный распад мезонов и, наконец, к третьему классу — процессы, которые можно назвать мезонно-ядерными или просто ядерными, потому что они определяются ядерными силами или тесно с ними связаны. К таким ядерным процессам относится в первую очередь генерация мезонов протонами, нейтронами и мезонами же, а также расщепление атомных ядер космическими лучами*).

Современная теория электромагнитных процессов не внушает сомнений и хорошо подтверждается опытом. Поэтому свойства и поведение мягкой компоненты космических лучей (вернее, электронно-фотонной части этой компоненты) нам известны сравнительно хорошо. То же относится и к электромагнитным процессам (ионизация, образование δ -электронов и т. д.), возбуждаемым мезонами.

Всё же и в этом круге вопросов остаётся ряд неясностей. Во-первых, если спин мезона равен не 0 или $1/2$, а 1, то при очень больших энергиях мезонов (порядка 10^{11} eV) тормозное излучение их и вероятность образования ими δ -электронов должны настолько возрастать, что к этим процессам не может быть применима современная теория (см. статью В. Л. Гинзбурга «Теория мезона»). Впрочем, предположение о том, что мезон обладает спином 1, которое одно время было широко распространено, повидимому, опровергается опытом.

Во-вторых, в своеобразном положении находится теория широких атмосферных ливней — так называемых ливней Оже, число которых быстро нарастает с высотой над уровнем моря. Современные представления об этих ливнях сводятся к следующему. Ливни эти создаются первичными частицами сверхвысоких энергий, порядка 10^{14} — 10^{16} eV, составляющими незначительную часть первичного излучения. Эти частицы либо сами являются электронами или фотонами, либо создают таковые в верхних слоях атмосферы. Электрон или фотон сверхвысокой энергии создаёт в земной атмосфере мощный ливень, в максимуме которого число ливневых частиц доходит до 10^4 — 10^6 . Этот ливень представляет собою идущий приблизительно в вертикальном направлении снап частиц; в самой верхней части ливня сечение его растёт, а затем начинает уменьшаться обратно пропорционально плотности воздуха; в нижних слоях атмосферы радиус ливня должен

* Можно указать и процессы смешанного характера, например, возможное образование пар мезонов фотонами.

быть порядка 100 м. Такая геометрическая форма ливня получается на основании следующих соображений. Направление полёта тормозных фотонов и электронно-позитронных пар большой энергии, генерируемых в ливне, весьма мало отклоняется от направления полёта генерирующих их частиц. Только ливневые частицы сравнительно малых энергий летят под значительным углом к оси ливня. Пробегом этих частиц и определяется ширина ливня. Так как пробег частицы в воздухе обратно пропорционален его плотности, то и ширина ливня должна изменяться в том же соотношении.

На этих представлениях основывается теория ливней Оже, в развитии которой выдающаяся роль принадлежит советским теоретикам (Л. Д. Ландау, И. Я. Померанчук, С. З. Беленький, А. Б. Мигдал). До самого последнего времени согласно этой теории с опытом казалось настолько хорошим, что в этом согласии усматривали прямое подтверждение применимости современной теории электромагнитных процессов вплоть до грандиозных энергий в 10^{14} — 10^{16} eV. Однако в последнее время, повидимому, выясняется, что в образовании ливней Оже существенную роль играют не только электромагнитные процессы, учитываемые каскадной теорией ливней, но и процессы мезонно-ядерные.

На это указывает, во-первых, связь с ливнями Оже так называемых широких проникающих ливней. Проникающие ливни, т. е. ливни проникающих частиц, по всей вероятности мезонов, резко отличаются от обычных электронно-позитронных ливней. Они могут быть разделены на два класса — узкие проникающие ливни, радиус которых равен примерно $\frac{1}{2}$ м и о которых речь будет впереди, и широкие проникающие ливни, радиус которых не известен, но во всяком случае не меньше нескольких метров. Установленная на опыте корреляция этих широких проникающих ливней с ливнями Оже, повидимому, объясняется тем, что фотоны или электроны больших энергий могут генерировать мезоны — процесс, не учитываемый современной теорией ливней Оже.

В гораздо большей мере неправильность этой теории выявляется последними измерениями Ю. Зацепина и других на Памире. Эти измерения установили, что радиус ливней Оже на высоте 3860 м над уровнем моря во всяком случае существенно превышает 600 м, что никак нельзя согласовать с теоретическим значением радиуса в 100 м. Причины этого расхождения теории с опытом неясны; возможно, что они связаны опять-таки с неучитываемой теорией генераций мезонов фотонами и электронами большой энергии.

Хотя, таким образом, свойства и поведение фотонов и электронов сверхвысоких энергий в ряде отношений остаются неясными, всё же, как уже говорилось, процессы электромагнитного характера в космическом излучении известны нам сравнительно хорошо.

Что касается распада мезона, то известна длительность жизни мезонов с массой порядка $200 m$, несомненно преобладающих в нижних слоях атмосферы. Гипотетично, но весьма правдоподобно, что эти мезоны распадаются на один электрон или позитрон и на одно нейтрино. Это всё, что требуется знать о распаде. Однако, вероятно, в верхних слоях атмосферы существуют мезоны другой массы, о распаде которых мы в сущности ничего не знаем.

Наиболее скудны наши сведения о третьем классе процессов — о процессах мезонно-ядерных. Сколько-нибудь надёжной теории этих процессов пока не существует, экспериментальное же их изучение находится в самом начале.

Начнём с генерации мезонов первичными частицами. Средняя энергия мезонов на уровне моря равна примерно $2 \cdot 10^9 \text{ eV}$; при прохождении через атмосферу каждый мезон теряет примерно столько же энергии ($\sim 2 \cdot 10^9 \text{ eV}$) на ионизацию. Стало быть, если даже, как это принято считать (правда, по не очень убедительным мотивам), преобладающая часть мезонов зарождается в самом верхнем слое атмосферы, масса которой составляет около $1/10$ всей массы атмосферы, то средняя начальная энергия мезонов, доходящих до уровня моря, равна в месте их зарождения примерно $4 \cdot 10^9 \text{ eV}$. Между тем, анализ широтного геомагнитного эффекта на уровне моря показывает, что преобладающая часть этих мезонов генерируется первичными частицами, энергия которых превышает $1,7 \cdot 10^{10} \text{ eV}$. Таким образом, средняя энергия мезонов существенно меньше энергии генерирующих их первичных частиц. Если учесть, что в верхних слоях атмосферы, по всей вероятности, резко возрастает число медленных мезонов, не доходящих до уровня моря, а распадающихся по дороге, то оказывается, что энергия первичной частицы (допустим, что она является протоном) распределяется в среднем, скажем, между десятком вторичных мезонов.

В столбе земной атмосферы сечением в 1 см^2 содержится $4,3 \cdot 10^{25}$ атомов N и O. Эффективный поперечник сечения для взаимодействия быстрых протонов с атомными ядрами не может превышать площади геометрического сечения этих ядер, равного в случае N и O примерно $4,2 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$. Следовательно, быстрый протон на протяжении $1/10$ земной атмосферы не может испытать больше $1/10 \times 4,3 \cdot 10^{25} \times 4,2 \cdot 10^{-25} \sim 2$ столкновений. Если протон действительно генерирует на этом протяжении около десятка мезонов, то в каждом акте столкновения с атомами воздуха он должен создавать в среднем около пяти мезонов. Подобная генерация многих частиц в одном акте не имеет места в электромагнитных процессах.

Хотя, вероятно, не все сделанные выше предположения верны*), но во всяком случае из приведённых оценок явствует, что вероятность

*) Возможно, что генерация мезонов интенсивно происходит не на $1/10$ атмосферы, а на большем протяжении. Возможно, что первичные протоны

генерации мезонов при соударении первичной космической частицы с атомами воздуха должна быть весьма велика (порядка геометрического сечения этих атомов).

Если и верно, что преобладающая доля мезонов генерируется в самых верхних слоях атмосферы, то всё же, как выяснилось в самые последние годы, несомненно, что в промежуточных слоях атмосферы интенсивно происходят процессы «ядерного» характера по нашей классификации, почти совершенно отсутствующие у поверхности моря. Важнейшими из такого рода процессов являются генерация мезонных ливней с одной стороны и расщепление атомных ядер с другой стороны.

Мезонные ливни наблюдаются на высоте 3—4 км над уровнем моря непосредственно в камере Вильсона. По всей вероятности и так называемые узкие атмосферные (т. е. зарождающиеся в атмосфере) ливни, наблюдающиеся в большом количестве на тех же высотах с помощью счётчиков Гейгера, также состоят в основном из мезонов. Эти ливни, в обнаружении и изучении которых выдающаяся роль принадлежит советским учёным (высотные космические станции на Алагёзе — руководители А. И. Алиханов и А. И. Алиханян и на Памире — руководители Д. В. Скобельцин и В. И. Векслер), резко отличаются от обычных атмосферных ливней мягкой компоненты (ливни Оже) тем, что радиус их горизонтального сечения равен примерно $1\frac{1}{2}$ м, тогда как радиус ливней Оже не меньше нескольких сот метров. Теоретические подсчёты показывают, что электронно-фотонные ливни никак не могут быть столь узкими; большая проникающая способность частиц в узких ливнях указывает на то, что они состоят из мезонов; наконец не опубликованные пока непосредственные измерения массы частиц, входящих в состав узких ливней, с помощью большого магнита Алагёзской высотной космической станции, повидимому, окончательно доказывают, что масса этих частиц равна примерно 200 *m*.

Узость ливней может быть объяснена только тем, что они зарождаются на сравнительно небольшой высоте над измерительным устройством, а относительно большое число их свидетельствует, что процессы генерации мезонов на высоте порядка 4 км происходят несравненно интенсивнее, чем это предполагалось ещё несколько лет тому назад *).

На тех же высотах в 3—4 км резко возрастает также число ядерных расщеплений, вызываемых космическими лучами. Одним из

при прохождении через атомное ядро выбивают из него по нескольку протонов и нейтронов, которые уже в дальнейшем генерируют мезоны. Вообще, наши сведения о процессах, происходящих в высших слоях атмосферы, настолько скудны, что они не исключают целого ряда мыслимых возможностей.

*) В отличие от широких проникающих ливней, о которых упоминалось выше, узкие ливни не коррелируют с ливнями Оже.

наиболее удобных способов наблюдения этих расщеплений является изучение так называемых «звёзд», т. е. звездообразных следов (треков), оставляемых в фоточувствительном слое фотопластины протонов и α -частицами, разлетающимися из расщепившихся ядер атомов этого слоя. Определённая часть этих расщеплений несомненно производится мезонами. Это подтверждается в частности не опубликованными пока результатами измерений треков частиц в звёздах, произведёнными П. И. Лукирским и Перфильевым. Измерения эти позволяют вычислить общую энергию и общий импульс протонов и α -частиц в звезде; оценивая, кроме того, энергию и импульс вылетающих при расщеплении ядра нейтронов, не оставляющих следов в фотопластинке, можно вычислить энергию и массу частицы, вызывающей расщепление. По данным П. И. Лукирского, эта масса, определённая по измерениям звёзд некоторого определённого типа, лежит в пределах между 140 *m* и 200 *m*.

Вместе с тем несомненно, что значительная, а, возможно, и преобладающая часть ядерных расщеплений производится сравнительно медленными (с энергией в несколько сот миллионов электрон-вольт) протонами и в особенности нейтронами. Число таких протонов и нейтронов быстро возрастает с высотой над уровнем моря; роль их в космических лучах и характер и закономерность процессов, производимых ими при прохождении через вещество, изучены ещё совершенно недостаточно.

§ 7. В нашем кратком обзоре современного положения учения о космических лучах мы отнюдь не стремились к исчерпывающей полноте. Мы совершенно не затронули не только вопросов, несущественных для нашей основной темы*), но и таких важных, хотя и мало ещё изученных, вопросов, как, например, состав и свойства космического излучения на больших глубинах под поверхностью земли, выяснение которого должно дать очень существенные сведения о свойствах мезонов большой энергии и, быть может, о нейтральных мезонах. Нам представляется, однако, что наш обзор может дать правильное представление об основных задачах, стоящих в настоящее время перед физикой космических лучей. Подведём же некоторые итоги.

В настоящее время сравнительно хорошо изучены и теоретически объяснены состав и свойства космических лучей вблизи от уровня моря. Происходящие на этих высотах процессы относятся по нашей классификации главным образом к процессам электромагнитным и к распаду мезонов массы 200 *m*. Поэтому изучение космических лучей вблизи от уровня моря даёт мало сведений о специфически мезонно-ядерных процессах (генерация мезонов, расщепление ядер мезонами и нуклонами и т. д.). Таким образом существенного прогресса в наших сведениях об ядерных процессах можно ожидать

*) Например, вопроса о происхождении космических лучей, о котором мы знаем в сущности только то, что ряд простейших предположений о происхождении космических лучей не выдерживает критики.

только от дальнейшего развития и расширения экспериментальных работ по космическим лучам на средних и больших высотах.

При этом необходимо отметить, что, как показали работы последних лет, отнюдь нельзя считать, что процессы в космических лучах на средних высотах (начиная примерно с 3-х км), по крайней мере качественно, не отличаются от процессов на уровне моря. Напротив, мезонно-ядерные процессы (в число которых по нашей классификации входят, например, все процессы генерации мезонов) играют существенную роль не только в высших слоях атмосферы, но и на средних высотах. На этих же высотах заметную роль, согласно неопубликованным пока данным А. И. Алиханяна, начинает играть тяжёлый вид мезонов с массой порядка 500—1000 *m*. Свойства этих мезонов нам пока ещё совершенно неизвестны.

Вместе с тем необходимо отметить, что пока нет убедительных экспериментальных данных ни в пользу, ни против предположения о существовании в космических лучах нейтральных мезонов (нейтрето). Вопрос этот чрезвычайно важен, ибо в пользу этого предположения говорят веские соображения, основанные на современных представлениях о природе ядерных сил.

Быстрое развитие прерванных войной высотных космических исследований и, в особенности, вполне обоснованные надежды осуществить генерацию мезонов в лабораторных условиях, о которых говорилось в начале этой статьи, позволяют рассчитывать, что в ближайшее время будет создана экспериментальная основа для построения рациональной теории мезонов.
