

*показание
Nature 14093*

313 ± 16	$1,65 \cdot \frac{5}{\mu}$	290 ± 80
16^{-8}	$\frac{200}{\mu}$	270 ± 40
$\sigma = 10^{-28}$	330 ± 30	

НАБЛЮДЕНИЯ НАД ТРЕКАМИ МЕДЛЕННЫХ МЕЗОНОВ В ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ЭМУЛЬСИЯХ*)

К. М. Г. Латтес, Г. П. С. Оккиалини, К. Ф. Поуэлл
и Ф. К. Франк **)

ВВЕДЕНИЕ

В некоторых недавних экспериментах было показано, что останавливающиеся в фотографических эмульсиях заряженные мезоны иногда приводят к образованию вторичных мезонов. Эти опыты были продолжены изучением пластинок, экспонированных в Боливийских Андах на высоте 5500 м, и было найдено, в общей сложности, сорок случаев процесса, приводящего к образованию вторичных мезонов. В одиннадцать из них вторичная частица остановилась в эмульсии и, таким образом, можно было определить её пробег. В части I настоящей статьи описываются измерения треков и показывается, что они дают данные, говорящие в пользу существования мезонов с различными массами. В части II приводятся дополнительные данные по образованию мезонов, позволяющие показать, что многие из наблюдаемых мезонов локально генерируются при «взрывном» расщеплении ядер. Эти данные дают также возможность обсуждать вопрос о связи между различными типами мезонов, обнаруженных на фотографических пластинках, и проникающей компонентной космической радиации, исследованной в опытах с камерой Вильсона и счётчиками.

1. СУЩЕСТВОВАНИЕ МЕЗОНОВ С РАЗЛИЧНЫМИ МАССАМИ

Как и в наших прежних сообщениях, под понятием «мезон» будет подразумеваться любая частица с массой, промежуточной между массой электрона и массой протона. Следует подчеркнуть, что, используя этот термин, мы вовсе не хотим утверждать, что соответствующая частица обязательно сильно взаимодействует с нуклонами или что она тесно связана с внутриядерными силами.

*) Перевёл Л. Н. Белл.

**) Части I и II настоящей статьи написаны К. М. Г. Латтесом, Г. П. С. Оккиалини и К. Ф. Поуэллом и опубликованы в Nature, 160, 453, 486 (1947). Часть III, написанная Ф. К. Франком, опубликована в Nature, 160, 525 (1947). (Прим. ред.)

Нами теперь наблюдено всего 644 трека мезонов, остановившихся в наших пластинках. Из них 451 трек был обнаружен в пластинках различных типов, экспонированных на высоте 2800 м на Пик дю Миди в Пиренеях; остальные 193 трека были получены

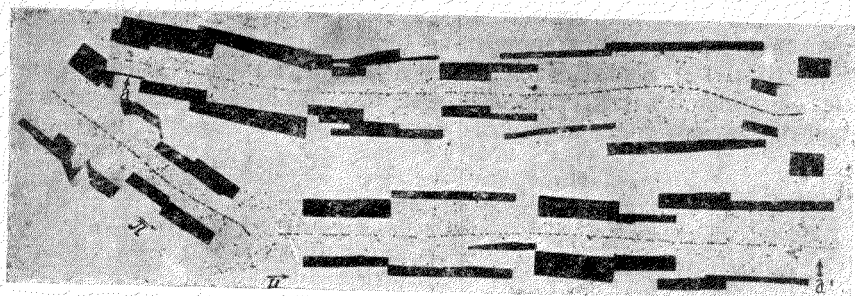


Рис. 1. Трек μ -мезона. Трек показан в двух частях. Место стыка указано буквой *a* и стрелкой.

в подобных пластинках, экспонированных в Чакалтайе (Боливийские Анды) на высоте 5500 м. 451 трек в пластинках, экспонированных на высоте 2800 м, был обнаружен при рассмотрении 5 см²

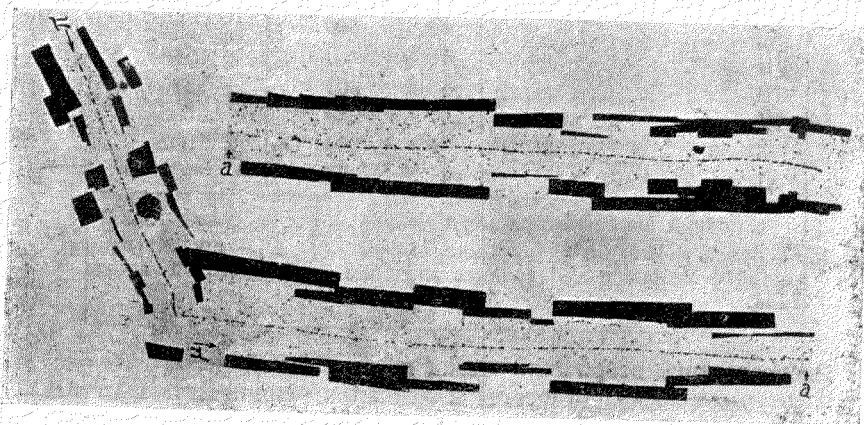


Рис. 2. Трек μ -мезона. Трек показан в двух частях. Место стыка указано буквой *a* и стрелкой.

эмульсии. Это соответствует падению примерно 1,5 мезона на 1 см² в день, причём эта цифра является нижним пределом, так как часть треков может остаться незамеченной благодаря разрушению латентного изображения или вследствие малой длины трека. Истинное число их, следовательно, будет несколько выше. Во всяком случае,

это значение совпадает по порядку величины с тем, которого следует ожидать в опытах по запаздывающим совпадениям на высоте 2800 м, если для оценки брать данные, полученные на уровне моря, и делать разумные предположения относительно увеличения числа медленных мезонов с высотой. Таким образом наблюдаемые нами мезоны заведомо являются составной частью космических лучей. Микрофотографии двух примеров образования вторичных мезонов (№№ III и IV) показаны на рис. 1 и 2. В таблице I даны детальные сведения о характеристиках всех наблюденных до сего времени случаев, в которых вторичная частица остановилась в эмульсии.

Таблица I

№ события	Пробег в эмульсии (в микронах)	
	Первичного мезона	Вторичного мезона
I	133	613
II	84	565
III	1040	621
IV	133	591
V	117	638
VI	49	595
VII	460	616
VIII	900	610
IX	239	666
X	256	637
XI	81	590

Средний пробег вторичного мезона $614 \pm 8\mu$; коэффициент разброса $\sqrt{(2\Delta i)^2/n} = 4,3\%$, где $\Delta i = R_i - R$; R_i — пробег вторичного мезона и R — среднее значение для n частиц этого типа.

Распределение вторичных частиц по пробегам показано на рис. 3. Приведенные значения относятся к длинам проекций истинных траекторий частиц на плоскость, параллельную поверхности эмульсии. Истинные пробеги, однако, не могут сильно отличаться от вышеприведенных значений, так как на протяжении основной части своей длины каждый трек наклонен к плоскости эмульсии под малым углом. Кроме результатов, относящихся к медленным мезонам, остановившимся в эмульсии (изображенных на рис. 3 черными квадратиками), указаны длины ряда треков мезонов, возникших в результате того же процесса, но вышедших из пределов эмульсии в конце своего прогона (изображены на рис. 3 незачерненными квадратиками).

μ -распад мезонов

Два важных вывода следуют из этих измерений. Наши наблюдения показывают, что вторичные мезоны испускаются по всем направлениям с одинаковой вероятностью. Это позволяет вычислить вероятность того, что траектория мезона, созданного в такого рода процессе и наблюдаемого нами, останется на протяжении, большем

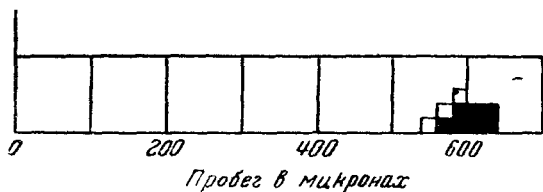


Рис. 3. Распределение 10 вторичных мезонов по пробегам. Мезоны, обозначенные значком ■, остановились в эмульсии; 3 мезона, обозначенные □, вышли из эмульсии около конца своего пробега. Средний пробег вторичных мезонов — 606 микронов. Результаты, относящиеся к событиям №№ VIII и XI, не включены в рисунок.

500 μ , внутри эмульсии толщиной в 50 μ . Если мы допустим, для первого приближения, что траектории прямолинейны, мы получаем для этой вероятности значение порядка 1:20. В действительности заметное кулоновское рассеяние мезонов в эмульсии увеличит вероятность «ухода». Таким образом те шесть случаев, наблюдаемых нами в пластинках, экспонированных на высоте 2800 м, в которых вторичные частицы проходят в эмульсии путь, больший 500 μ , соответствуют 120 ± 50 случаям этого типа. Наши наблюдения, следовательно, доказывают, что распад с образованием вторичных мезонов широко распространен среди тех мезонов, которые останавливаются в эмульсии.

Далее, существует замечательное постоянство длин пробегов вторичных мезонов: различия в отдельных значениях весьма близки к тем, которые следовало бы ожидать в результате разброса пробегов частиц, испускаемых с одинаковой скоростью. Отсюда мы заключаем, что вторичные мезоны имеют одинаковые массы и испускаются всегда с одной и той же кинетической энергией.

Если в процессе другого типа испускаются мезоны меньшего пробега, то они должны создаваться значительно реже, чем мезоны, наблюдаемые нами, ибо геометрические условия и большая средняя плотность зёрен треков способствовали бы их обнаружению. На самом же деле такие мезоны с короткими пробегами нами не были обнаружены. Мы, однако, не можем быть вполне уверенными, что не образуются мезоны больших пробегов. Как меньшая ионизация в начале трека, так и в ещё большей степени трудности их обнаружения на значительном участке трека существенно затрудняли бы наблюдение такой группы или групп. Так как значительную часть

мезонов, как мы видели, можно приписать наблюдаемому процессу, разумно предположить, что другие способы распада, если они существуют, менее часты, чем способ распада, наблюдаемый нами. Таким образом налицо твёрдые данные, говорящие в пользу образования одной единственной однородной группы вторичных мезонов с постоянной массой и одинаковой кинетической энергией. Это убедительно указывает на существование элементарного процесса, не связанного со взаимодействием первичного мезона с каким-либо определённым ядром в эмульсии. В дальнейшем будет удобно называть этот процесс μ -распадом. Мы обозначим первичные мезоны символом π и вторичные — символом μ . В настоящее время у нас ещё нет данных, которые позволили бы установить знак электрического заряда этих частиц. Во всех случаях, в которых частицы останавливались в эмульсии, не было замечено, чтобы остановка произошла в результате расщепления ядра с испусканием тяжёлых частиц.

Зная зависимость пробега протона в эмульсии от его энергии и беря определённое значение для массы частицы, можно вывести энергию испускания вторичных мезонов на основе их наблюдаемых пробегов. Вычисленные таким образом значения для различных масс приведены в таблице II.

Таблица II

Масса в m_e	100	150	200	250	300
Энергия в MeV	3,0	3,6	4,1	4,5	4,85

Для протонов с энергиями выше 13 MeV нет общепринятых данных для зависимости пробега от энергии и приходится довольствоваться экстраполяцией соотношения, установленного для малых энергий. По нашим оценкам, приведённые в таблице II энергии правильны с точностью до 10%.

Данные, говорящие в пользу различия масс
 π - и μ -мезонов

Ещё раньше было отмечено¹, что трудно объяснить μ -распад взаимодействием первичного мезона с ядром атома эмульсии, приводящим к образованию мезона с большей энергией и той же массой, что у первичного. Поэтому было предложено рассматривать наши наблюдения как указание на существование мезонов с различными массами. Так как довод в пользу этого предположения полностью основывался на принципе сохранения энергии, были рассмотрены и другие возможные процессы, которые, независимо от прочих

аргументов в их пользу, могли привести к выделению необходимого количества энергии.

Ф. К. Франк пересмотрел такие возможности более детально, и его результаты даны в третьей части настоящей статьи. Его анализ показывает, что очень трудно объяснить наши наблюдения процессом ядерного расщепления или каким-либо процессом «синтеза» ядер с выделением энергии связи в результате проникновения протонов в ядра лёгких элементов вследствие предполагаемого соединения отрицательного мезона с ядром водорода. Мы находим, что этот общий аргумент в пользу существования мезонов различных масс можно подкрепить теперь данными, основанными на счёте числа зёрен.

Мы многократно подчёркивали¹, что необходима большая осторожность при определении массы частиц по плотности зёрен. Основной источник ошибок при таком определении заключается в неустойчивости скрытого изображения, созданного в галогидосеребряных зёрнах в результате прохождения быстрой частицы. В случае процесса μ -распада имеет место существенное упрощение. Естественно предположить, что оба мезонных трека образуются в малом интервале времени, один за другим, и подвергаются разрушению в одинаковой степени. Весь двойной трек в рассматриваемом процессе укладывается в очень малой области эмульсии, и условия обработки, следовательно, тождественны для обоих треков, если не считать зависимость степени проявления от глубины. Эти факторы обеспечивают выгодные условия для определения отношения масс π - и μ -мезонов.

При определении плотности зёрен в треке мы считали число индивидуальных зёрен в ряде последовательных интервалов трека длиной в 50μ каждый; для наблюдения использовалась оптика с большим увеличением ($\times 2000$) и с наибольшей имевшейся в нашем распоряжении разрешающей способностью. Типичные результаты для протонов и мезонов показаны на рис. 4. Эти результаты были получены для треков в одной и той же пластинке и, как видно, разделение кривых, относящихся к частицам различных типов, вполне удовлетворительное. Разброс результатов для различных частиц одного и того же типа может быть приписан различной степени разрушения латентного изображения, связанного с различием во времени прохождения частиц через эмульсию в течение шестинедельной экспозиции.

Применяя эти методы к случаям процесса μ -распада, в которых пробеги вторичных мезонов оканчиваются в эмульсии, мы находим, что во всех случаях кривая, представляющая наблюдения над первичным мезоном, лежит выше кривой для вторичного мезона. Мы можем, следовательно, заключить, что существует значительная разница в плотности зёрен в треках первичного и вторичного мезонов, а, следовательно, и различие в массе частиц. Это заключение, конечно,

основано на предположении, что заряд у π - и μ -мезонов одинаковый. Плотность зёрен на концах треков частиц обоих типов совместима со взглядом, что заряды имеют величину e .

Более точное определение масс π - и μ -мезонов может быть произведено в тех случаях, когда длина трека первичного мезона

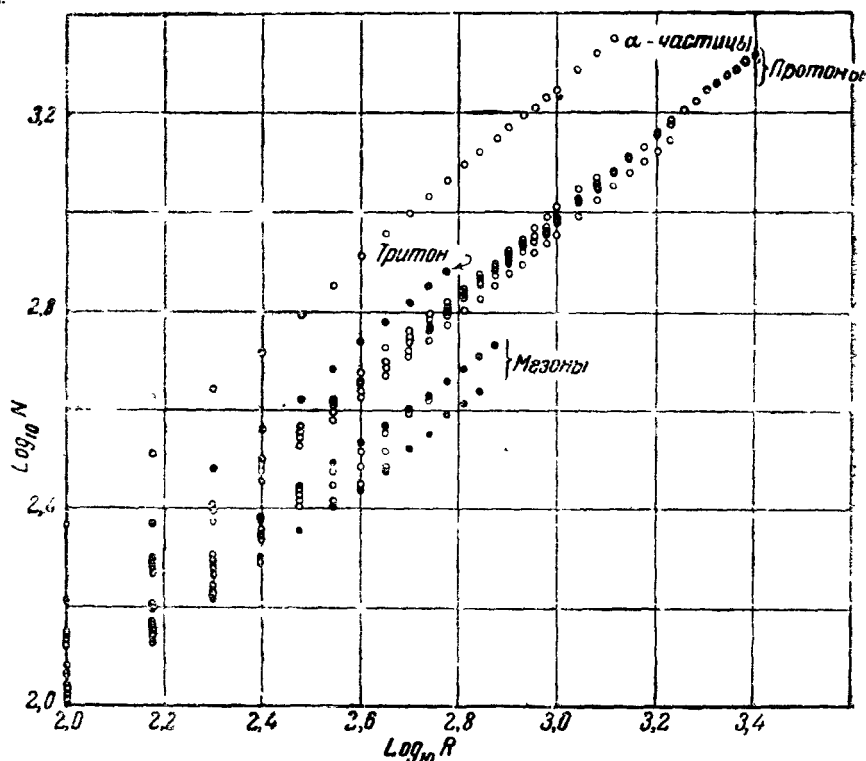


Рис. 4. Зависимость логарифма полного числа зёрен в треке от величины остаточного пробега R (в делениях шкалы). 1 деление шкалы = 0,85 микрона.

в эмульсии порядка 600 μ . Вероятность такого выгодного случая довольно мала и единственные наблюдаемые до сих пор случаи приведены в таблице I под №№ III и VIII. На рис. 1 приведена мозаика микрофотографий только части первого из этих случаев, так как длина следа μ -мезона в эмульсии превышает 1000 μ . Логарифмы числа зёрен в треках первичного и вторичного мезонов для этого случая в функции логарифма остаточного пробега представлены на рис. 5. Сравнивая те остаточные пробеги, для которых плотности зёрен в обоих треках одинаковы, можно определить отношение масс. Мы получили, таким образом, $m_{\pi}/m_{\mu}=2,0$. Подобные

измерения для события № VIII дали значение 1,8. При обсуждении смысла полученного результата следует иметь в виду, что, кроме стандартных отклонений в числе сосчитанных зёрен, существуют и другие источники ошибок. Например, некоторые трудности возникают в результате того, что распределение галоидосеребряных

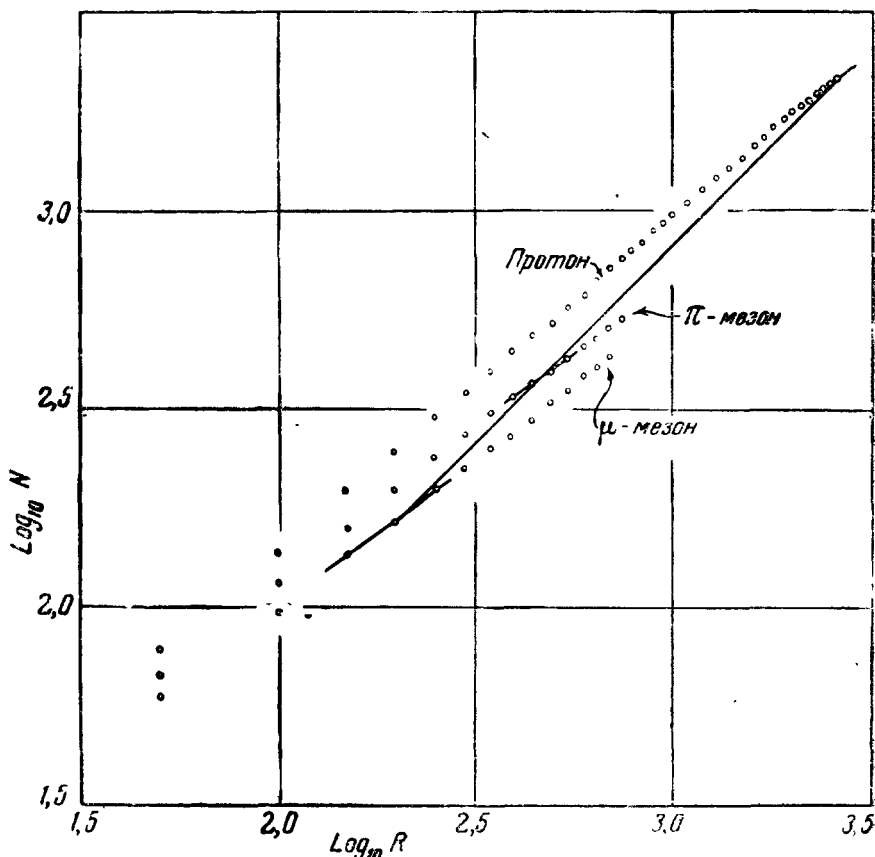


Рис. 5. Зависимость полного числа зёрен в треке от величины остаточного пробега R (в делениях шкалы). 1 деление шкалы = 0,85 микрона. Линия, идущая под 45° , пересекает кривые для мезонов и протона в точках одинаковой плотности зёрен.

зёрен в эмульсиях не вполне равномерное. Существуют «островки», в которых концентрация зёрен существенно выше или ниже, чем средние значения, причём эти отклонения значительно превышают отклонения, связанные со случайными флуктуациями. Измерения других случаев μ -распада существенно менее надёжны вследствие огра-

ниченности длины пути в эмульсии; они дают результаты, которые меньше приведённых. Мы считаем, однако, маловероятным, чтобы истинное отношение имело такую низкую величину, как 1,5.

Предыдущий результат имеет большое значение для интерпретации процесса μ -распада. Предположим, что он соответствует спонтанному распаду более тяжёлого π -мезона, причём импульс μ -мезона равен и противоположен по знаку импульсу испущенного фотона. Для любого заданного значения массы μ -мезона можно вычислить энергию вылета этой частицы по её наблюдаемому пробегу и отсюда определить её импульс. Это определяет импульс, а следовательно, и энергию испущенного фотона; масса π -мезона тогда следует из соотношения

$$c^2 m_\pi = c^2 m_\mu + E_\mu + h\nu.$$

Можно таким способом показать, что отношение m_π/m_μ меньше 1,45 для любого значения m_μ в интервале между 100 и $300 m_e$, где m_e — масса электрона (см. табл. III). Подобный же результат получается, если предположить, что частица с малой массой, как, например, электрон или нейтрино, испускается в направлении, противоположном направлению вылета μ -мезона.

Таблица III

Предполагаемая масса m_μ в m_e	E (MeV)	$h\nu$ (MeV)	m_π	$\frac{m_\pi}{m_\mu} \pm 3\%$
100	3,0	17	$140 m_e$	1,40
150	3,6	23	203	1,35
200	4,1	29	264	1,32
250	4,5	34	325	1,30
300	4,85	39	387	1,29

С другой стороны, если предположить, что равенство импульсов при μ -мезонном распаде обеспечивается в результате вылета нейтральной частицы с массой, равной массе μ -мезона, то вычисленное отношение оказывается равным примерно 2,1:1.

Наши предварительные измерения, следовательно, указывают на то, что нельзя рассматривать испускание вторичного мезона как результат процесса спонтанного распада первичной частицы, при котором сохранение импульса обеспечивается вылетом фотона или частицей с малой массой покоя. С другой стороны, полученные результаты совместимы с предположением, что испускается нейтраль-

ная частица с массой, примерно равной массе μ -мезона. Окончательное суждение станет возможным только после открытия новых случаев μ -распада, дающих благоприятные условия для определения числа зёрен.

II. ПРОИСХОЖДЕНИЕ МЕДЛЕННЫХ МЕЗОНОВ

В первой части настоящей статьи мы показали, что существует два типа мезонов, и было выдвинуто предположение, что тяжёлые π -мезоны распадаются с испусканием более лёгких μ -мезонов. Во второй части мы обсудим происхождение медленных мезонов, наблюдаемых в фотографических пластинках, и их отношение к мезонам, составляющим проникающую компоненту космических лучей, для которых имеются данные камер Вильсона и счётчиков. Мы также приведём микрофотографии, которые показывают, что часть медленных мезонов, испускаемых ядрами при «взрывном расщеплении», может проникнуть в другие ядра и вызвать их вторичное расщепление. Большинство пластинок, экспонированных на высоте в 5500 м, имело эмульсию с примесью бора и, в основном, рассмотрены пластинки именно этого типа. Природа примешанного материала существенно влияет на скорость разрушения скрытого изображения, но благодаря вышеописанной процедуре удаётся сравнивать результаты опытов на различных высотах.

Расщепления, вызванные мезонами

Из 644 мезонов, остановившихся в наших эмульсиях, 145 привели к образованию вторичных частиц. В 40 случаях характеристики трека вторичной частицы указывают, что она является мезоном. Мы поэтому считаем, что эти случаи были вызваны распадом π -мезонов, хотя в некоторых случаях длина пробега вторичной частицы слишком мала, чтобы можно было ручаться за точность идентификации. В остальных 105 случаях мезоны производят расщепления с испусканием тяжёлой частицы. Ещё раньше нами были опубликованы фотографии таких расщеплений; на рис. 6 показан случай с испусканием одиночного протона. Хотя нет доказательств, что они все одного типа, всё же будет удобно обозначать условно все медленно движущиеся мезоны, вызывающие ядерные расщепления, как σ -мезоны. Так как характерное ядерное взаимодействие между мезонами и нуклеонами можно считать эффективным только на малых расстояниях и так как кулоновское отталкивание препятствовало бы медленному положительному мезону приблизиться к ядру, мы считаем, что наблюдаённые расщепления, вызванные σ -мезонами, указывают на отрицательный заряд последних. В другом параграфе будет показано, что некоторые данные указывают, что π -мезоны и, по крайней мере, часть σ -мезонов представляют собой соответственно положительно и отрицательно заряженные частицы одного типа.

На рис. 7 показана относительная частота появления расщеплений с различным числом вылетающих тяжёлых заряженных частиц, причём считается, что расщепления созданы мезонами. В. Гейтлер заметил, что наблюдаемые случаи, вероятно, не представляют всех случаев расщеплений, в действительности вызванных медленными мезонами на рассматриваемом участке пластинки. В некоторых случаях, например, одиночный быстрый нейтрон может появиться в результате взаимодействия отрицательного мезона с протоном ядра. Далее, по тем

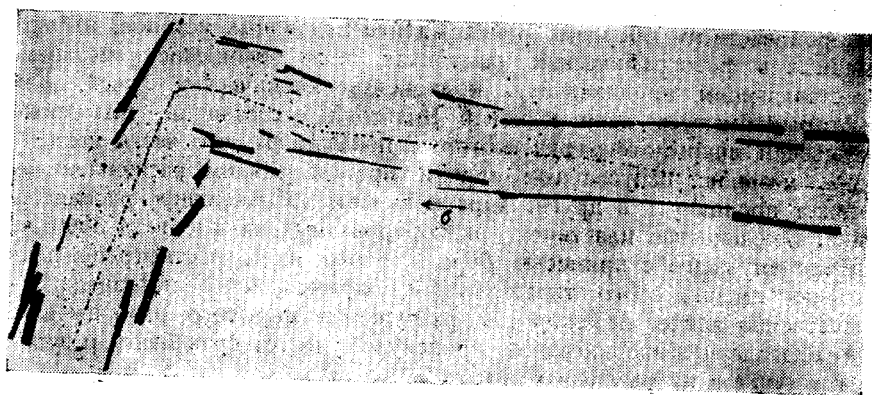


Рис. 6. σ -мезон, останавливаясь, приводит к расщеплению с вылетом одиночной, сильно ионизирующей частицы, вероятно протона.

же причинам, что и рассмотренные ниже, мы, вероятно, иногда не замечаем одиночных быстрых протонов, вылетающих из ядра, вследствие большого угла наклона трека по отношению к плоскости эмульсии.

Интересно сравнить распределение, показанное на рис. 7, с результатами, полученными Гарднером², который изучал расщепления, вызванные в фотографических эмульсиях дейтонами, ускоренными в 184-дюймовом синхро-циклотроне. В этих опытах обычно наблюдались расщепления с испусканием двух, трёх или четырёх заряженных частиц; только в немногих случаях вылетают пять заряженных частиц. Наши результаты поэтому совместимы в этом отношении с той точкой зрения, что поглощение π -мезона иногда приводит к выделению из ядра количества энергии, соответствующего массе покоя частицы порядка $400 m_e$.

Полное число следов мезонов в эмульсии

При обсуждении вопроса о происхождении мезонов, наблюдаемых в наших опытах, важно определить частоту появления различных типов их, и для этой цели мы не можем использовать число наблюдаемых треков без соответствующих поправок. Если наклон трека

велик и если длина его проекции на плоскость эмульсии меньше 50μ , есть некоторая вероятность, что он не будет замечен или же не будет достаточных оснований считать его следом мезона. Некоторая доля мезонов, следовательно, не будет сосчитана. Эта «потеря» треков будет не одинаково влиять на наблюдения мезонов различных типов. В случае σ -мезонов, например, наблюдение треков облегчается существованием вторичных частиц от расщеплений, которые привлекают внимание исследователя к данному событию. Аналогично, в тех случаях, когда π -мезоны создают μ -мезоны, останавливающиеся в эмульсии, наблюдение трека μ -мезона обеспечивает возможность наблюдения первичного π -мезона, хотя этот трек и короткий.

Чтобы преодолеть эти трудности, мы поступаем следующим образом. На рис. 8 изображено распределение длин проекций на плоскость эмульсии треков тех мезонов, которые останавливаются без образования вторичных тяжёлых частиц.

Эти результаты получены с 50μ -пластинками с примесью бора, экспонированными на Пик дю Миди.

Простые геометрические соображения позволяют сравнить распределение на рис. 8 с тем распределением, которое следовало бы ожидать, если бы все без исключения треки наблюдались в данном объёме эмульсии.

Мы будем предполагать, что треки прямолинейны и пробеги частиц бесконечно велики, а также, что положения концов и направления треков беспорядочно распределены. Тогда легко показать, что число треков $N(t) \delta t$, длины проекций которых лежат в интервале $t, t + \delta t$, даётся соотношением

$$N(t) \delta t = \frac{\Sigma N_0}{d} \left(1 + \frac{t}{(d^2 + t^2)^{1/2}} \right) \delta t \dots \quad (1)$$

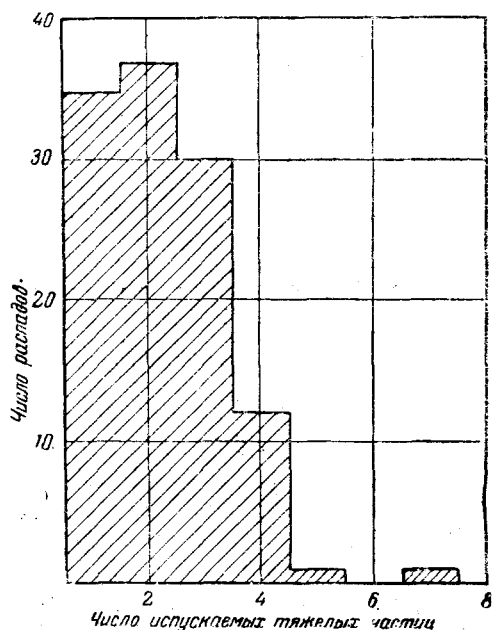


Рис. 7. Относительная частота созданных мезонами расщеплений, в которых испускаются N заряженных тяжёлых частиц.

где ΣN_0 — полное число треков в рассматриваемом участке и d — толщина эмульсии. Далее, число треков ΣN_t , проекции которых

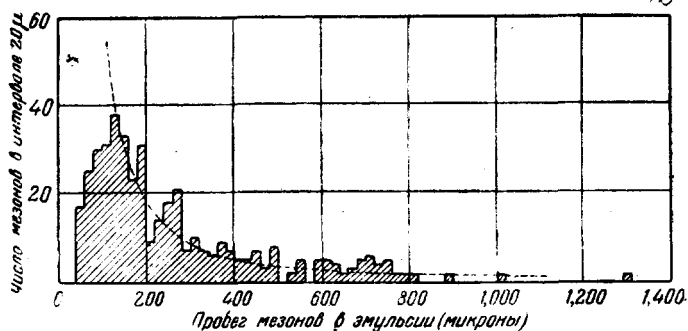


Рис. 8. Гистограмма, дающая распределение наблюдаемых длин проекций мезонных треков на поверхность эмульсии. Пунктирная линия показывает ожидаемое распределение в предположении, что треки прямолинейны.

больше t , связано с полным числом треков ΣN_0 уравнением

$$\Sigma N_t = \Sigma N_0 [(d^2 + t^2)^{1/2} - t] \dots \quad (2)$$

Из уравнения (2) можно вычислить величину ΣN_0 по наблюдаемым значениям ΣN_t , соответствующим измерениям, представленным на рис. 8; результаты показаны в таблице IV.

Таблица IV

Эмульсии типа С-2 с примесью бора. Мезонные треки без вторичных тяжёлых частиц. Экспозиция 40 дней на Пик дю Миди. Полный объём исследованной эмульсии $3,5 \text{ см}^3$.

$t (\mu)$	ΣN_t	ΣN_0	Число мезонов в 1 см^3 в день
400	42,5	679 ± 104	5,7
300	62	748 ± 95	
200	96,5	783 ± 77	
100	185,5	795 ± 58	
80	199,5	709 ± 49	
60	212	569 ± 41	
40	224	465 ± 31	

Пунктирная линия на рис. 8 вычислена с помощью уравнения (1) для 795 мезонов, оканчивающихся в эмульсии. Из рисунка

и таблицы IV видно, что результаты совместимы с предположением, что никакие мезонные треки этого класса, с длиной проекции, превышающей 100 μ , не остаются незамеченными. С другой стороны, для более коротких треков существуют серьезные «потери». Мы, таким образом, можем предположить, что полное число треков в эмульсии можно определить из наблюдений над треками, для которых t больше 100 μ ; при этом мы используем результат $\Sigma N_0 = 795$, полученный на основе величины ΣN_{100} , как наиболее надёжное значение. Это число включает в себя те треки π -мезонов, для которых не были замечены треки вторичных мезонов и также любые σ -мезоны, которые производят расщепления без видимых вторичных частиц.

Из подобных наблюдений над σ -мезонами, приводящими к видимым расщеплениям, мы заключаем, что полное число таких частиц на измеренной площади эмульсии равняется 122 ± 20 и, следовательно, полное число медленных мезонов всех типов равняется 917 ± 70 .

Число π -мезонов

Анализ предыдущего параграфа также может быть применён для определения полного числа π -мезонов в эмульсии. Так, в пластинках с бором, экспонированных на Пик дю Миди, мы наблюдали шесть треков π -мезонов, для которых длина трека вторичного μ -мезона превышает 500 μ . Используя уравнение (2), мы находим, что эта цифра соответствует появлению 120 ± 50 событий этого класса в изученной площади эмульсии. Во многих из этих случаев трек μ -мезона будет очень коротким, и он останется незамеченным, так же как и трек связанного с ним π -мезона. Полное число случаев, выведенное нами, необходимо сравнивать, следовательно, с полным числом мезонов, равным 917, потому что, как мы видели, рассмотрение треков тех μ -мезонов, для которых длина трека больше 500 μ , гарантирует, что мы обнаружим след первичного π -мезона, как бы мал ни был его пробег в эмульсии.

Другую оценку числа π -мезонов можно получить из тех наблюдаемых случаев, для которых вторичный μ -мезон имеет ограниченный пробег в эмульсии. Полученный таким образом результат равняется 115 ± 20 , каковое значение не сильно отличается от значения, полученного первым способом. Комбинируя оба результата, мы получаем для числа π -мезонов значение 117 ± 20 .

Относительное число медленных мезонов различных типов на 2800 м и 5500 м над уровнем моря

Из 917 медленных мезонов, которые, как мы предполагаем, должны находиться в измеренной площади эмульсии пластинок, экспонированных на Пик дю Миди, мы видели, что 122 ± 20 должны быть приписаны σ -мезонам и 117 ± 20 π -мезонам. Примерно равное число

μ -мезонов от распада π -мезонов, остановившихся в стекле или другом веществе в непосредственной окрестности эмульсии, будут оканчиваться в эмульсии. Эти результаты сведены в таблице V и показывают, что происхождение примерно одной трети всех наблюдаемых мезонов можно объяснить, как π - и σ -мезоны, остановленные в измерительных пластинках, и как μ -мезоны, возникающие при их распаде. Остальные треки, если не считать малого числа, возможно обусловленного расщеплениями, вызванными σ -мезонами с испусканием нейтронов, остаются необъясненными.

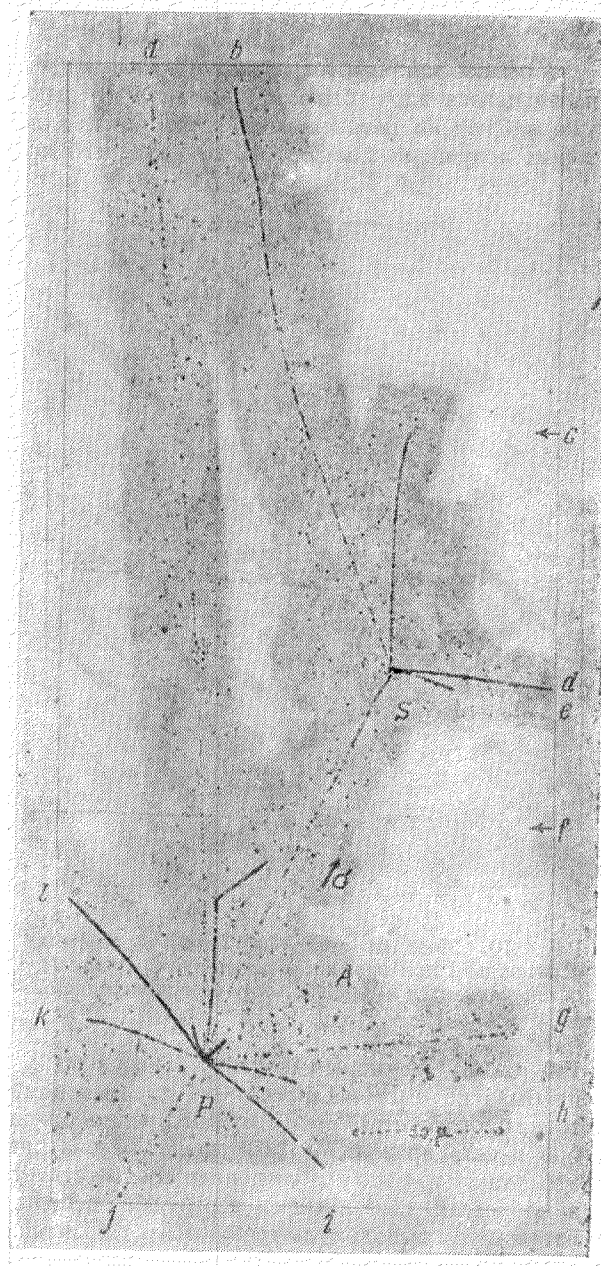
Очень похожие результаты были получены с пластинками, экспонированными на высоте 5500 м; соответствующие цифры приведены в таблице V. Эти результаты показывают, что в распределении наблюдаемых на разных высотах мезонов по классам нет существенной разницы. Однако в условиях экспозиции на обеих высотах имелись различия; кроме того, время между экспозицией и проявлением также было разным в обоих случаях. Мы поэтому не можем быть вполне уверенными в правильности абсолютных интенсивностей, данных в таблице.

Таблица V

Сводка результатов, полученных при рассмотрении эмульсий с бором, экспонированных 40 дней на Пик дю Миди (2800 м) и в Коха-бальба в Боливии (5500 м). Толщина эмульсии на 2800 м равна 50 μ . Исследованный объем эмульсии — 3 см^3 . Толщина эмульсии на 5500 м равна 100 μ ; исследованный объем эмульсии — 1,1 см^3

	На 2800 м		На 5500 м	
	Оцененное полное число	Число в 1 см^3 в день	Оцененное полное число	Число в 1 см^3 в день
Мезоны всех типов	917 ± 70	$6,5 \pm 0,5$	269 ± 25	$6,1 \pm 0,6$
(а) π -мезоны	117 ± 20	$0,8 \pm 0,2$	40 ± 20	$0,9 \pm 0,5$
(б) σ -мезоны	122 ± 20	$0,9 \pm 0,2$	46 ± 9	$1,0 \pm 0,2$
(в) μ -мезоны от распада остановившихся π -мезонов	117 ± 20	$0,8 \pm 0,2$	40 ± 20	$0,9 \pm 0,5$
(г) Не классифицированные	561 ± 100	$4,0 \pm 0,7$	143 ± 40	$3,3 \pm 0,9$
(д) Число ядерных расщеплений с 5 или больше заряженными частицами	—	10,5	—	—
(е) Полное число наблюдаемых π - и σ -мезонов	—	$1,7 \pm 0,5$	—	—
(ж) Оцененное число медленных мезонов, возникающих в расщеплениях в пластинках установки	—	$0,6 \pm 0,3$	—	—

Рис. 9. Мозаика микрофотографий. σ -мезон, испущенный при взрывном расщеплении ядра P , в конце своего пробега создаёт второе расщепление S . Треки, обозначенные „ b “, „ c “ и „ k “, обусловлены протонами, которые останавливаются в эмульсии. Большинство других треков оканчивается на одной из поверхностей эмульсии.



Вылет мезонов из расщеплённых ядер

Мозаика микрофотографий, показывающая вылет мезона из распадающегося ядра, была приведена в предыдущем сообщении. Нами уже наблюдалось пять случаев этого рода, включая два случая, в которых испущенный мезон на конце своего пробега вызывает расщепление ядра. Микрофотографии этих двух событий показаны на рис. 9 и 10, причём число заряженных частиц из вторичных «звёзд» равно соответственно 4 и 2. По терминологии, употребляемой в настоящей статье, можно сказать, что эти два события доказывают, что σ -мезоны могут быть созданы при расщеплении ядер частицами высокой энергии, имеющимися в космических лучах.

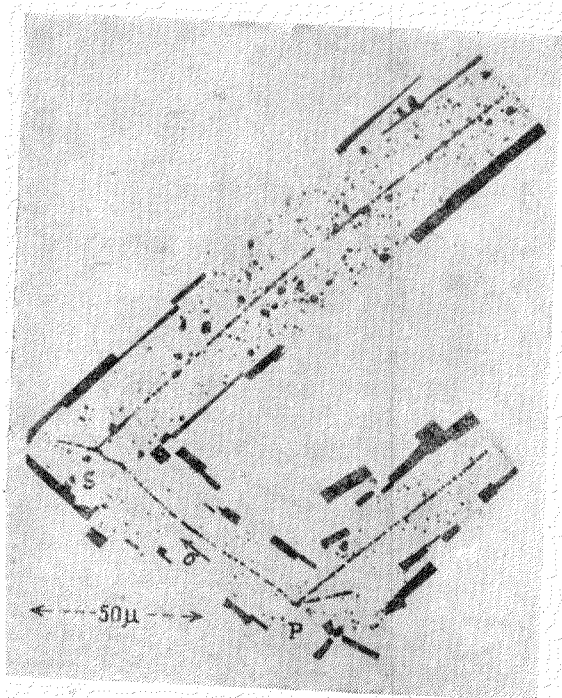


Рис. 10. Мозаика микрофотографий. σ -мезон, испущенный при взрывном расщеплении ядра P , останавливается и создаёт второе расщепление S .

Мы также наблюдали случай, когда один из испущенных мезонов на конце своего пробега приводит к образованию одиночной быстрой вторичной частицы. В этом случае длина следа вторичной частицы в эмульсии до перехода в стекло была всего

150 μ . Мы не можем поэтому утверждать, что вторичная частица была не быстрым протоном, а μ -мезоном, хотя плотность зёрен трека согласуется с последним предположением и на наш взгляд оно и есть правильное объяснение рассматриваемого события. Если это так, то это наблюдение соответствует генерации π -мезонов в процессах, связанных со взрывным расщеплением ядер. Для окончательных выводов потребуются дальнейшие наблюдения. Если наш настоящий взгляд правильный, мы должны ожидать появления таких случаев распада испущенного π -мезона, для которых вто-

ричная частица остановится в эмульсии после прохождения пути примерно в 600 μ .

Два из пяти мезонов, испущенных при взрывном расщеплении ядер, остановились без образования вторичных частиц с видимыми треками. Мы видели, что σ - и, возможно, π -мезоны могут образоваться при взрывном расщеплении; возникает важный вопрос, могут ли мезоны других типов, например, μ -мезоны, тоже возникать в таких процессах. Мы считаем, что наши данные недостаточны для ответа на этот вопрос. Два рассматриваемых испущенных мезона остановились около поверхности эмульсии. Если бы они были π -мезонами, вероятность обнаружить трек соответствующего μ -мезона, в случае его существования, была бы меньше 0,5.

Образование мезона требует, предположим, энергию порядка 100 MeV. Как мы уже подчёркивали, вероятность испускания такой частицы с кинетической энергией порядка нескольких MeV должна быть мала. Далее, можно надеяться идентифицировать такой мезон только в том случае, если он будет испущен в направлении, почти параллельном поверхности эмульсии. Новые наблюдения, таким образом, говорят в пользу той точки зрения, что испускание мезонов обычно связано со взрывным расщеплением ядер. Вероятность наблюдать два медленных мезона, вылетающих из одного и того же ядра, должна быть мала, даже если образование сразу нескольких мезонов в результате взаимодействия быстрой частицы с ядром происходит, как многие считают, довольно часто.

Происхождение медленных мезонов

Нами наблюдено уже 4000 случаев взрывных расщеплений ядер (в пластинках, экспонированных на высоте в 2800 м), для которых полное количество выделяемой энергии, судя по числу вылетающих заряженных частиц и их пробегам, больше чем энергия, выделяемая в подобных событиях, сопровождаемых испусканием медленных мезонов. В толще твёрдого вещества, например того, которое образует коробку для фотографических пластинок, будут возникать ядерные взрывы, сопровождаемые испусканием медленных мезонов. Часть из этих мезонов остановится в эмульсии фотопластинки. Представляет большой интерес определить, какую долю наблюдаемых нами мезонов можно приписать таким процессам.

Для первого приближения можно считать, что в твёрдом веществе остановятся те из испущенных мезонов, пробеги которых меньше линейных размеров рассматриваемой массы. Далее, концы мезонных треков будут распределены в массе твёрдого вещества случайно и их плотность будет равняться плотности первичных ядерных взрывов. Мы оцениваем энергию мезона, необходимую для прохождения слоя твёрдого вещества, окружавшего наши пластинки при экспозиции, примерно в 50 MeV. Мезоны, вылетающие с меньшей энергией,

остановятся в эмульсии или стекле, мезоны же с большей энергией можно считать уходящими вообще.

В пластинках, экспонированных на Пик дю Мида, мы наблюдали 4 расщепления, для которых энергия испущенного мезона лежала между 1 и 3 MeV. Учитывая ещё и геометрию, можно оценить, что это число соответствует по крайней мере 12 случаям этого типа, происходящим в рассматриваемом объёме эмульсии; остальные же не были обнаружены из-за больших углов наклона треков мезонов. Если мы допустим, что энергии испущенных мезонов распределены беспорядочно между 0 и 50 MeV с равной вероятностью, то ожидаемое число мезонов с энергиями между 1 и 3 MeV будет соответствовать появлению в наших эмульсиях мезонов в конце своего пробега в количестве $0,6 \pm 0,3$ в 1 см^3 в день. Эта оценка основана на некоторых величинах, которые точно неизвестны, но согласие, по порядку величины, с числом π - и σ -мезонов всё же замечательно. Это говорит в пользу того взгляда, что значительная часть наблюдаемых мезонов этого типа создаётся в локально генерируемых расщеплениях. Наблюдения недостаточно точны, чтобы дать нам возможность определить долю π - и σ -мезонов, которые должны быть приписаны аналогичным процессам в веществе, окружающем пластинки во время экспозиции и удалённом от пластинок на расстояние в несколько метров; этот вопрос особенно интересен в связи с вопросом об определении времени жизни этих мезонов.

Интерпретация наблюдений

Вследствие сложности явления и ограниченного числа наблюдаемых нами треков различных типов мезонов, мы не можем делать окончательных выводов относительно многих вопросов, возникающих в результате наших наблюдений. Мы тем не менее рассмотрели ряд возможных интерпретаций настоящих опытов и опытов с камерами Вильсона или счётчиками. Следующая рабочая гипотеза является простейшей из рассмотренных нами гипотез, позволяющих учесть все основные экспериментальные результаты без серьёзных противоречий.

Мы предполагаем, что π - и большинство σ -мезонов являются соответственно положительными и отрицательными частицами одинакового типа, образованными в процессах, связанных со взрывным расщеплением ядер вроде тех, которые наблюдаются нами. Положительные π -мезоны подвергаются μ -распаду и образуют μ -мезоны, о судьбе которых наши данные ничего не говорят. С другой стороны, отрицательные π -мезоны, которые в наших опытах фигурируют как σ -мезоны, захватываются ядрами и создают расщепления с испусканием тяжёлых частиц. Эта гипотеза позволяет нам объяснить примерное равенство числа π - и σ -мезонов, которое можно вывести из наших наблюдений и также тот факт, что относительная частота появления мезонов различных типов не меняется заметным образом с высотой.

Далее, так как те частицы, которые создаются при распаде остановившихся π -мезонов, рассматриваются как обладающие положительным зарядом, надо ожидать, в соответствии с наблюдениями, что они не будут реагировать с ядрами и создавать расщепления с испусканием тяжёлых частиц.

Остаётся объяснить происхождение тех мезонов, которые не являются ни π -, ни σ -мезонами и которые не могут быть приписаны μ -мезонам, возникающим при распаде π -мезонов, остановившихся в установке из фотопластинок. Мы их приписываем μ -мезонам, возникающим в результате распада движущихся положительных и отрицательных π -мезонов, генерируемых в ядерных процессах, которые происходят на некотором расстоянии от установки. В таком предположении наши наблюдения могут быть уложены в простую непротиворечивую схему, во многих отношениях подобную схемам, предложенным другими авторами³.

Если предлагаемая точка зрения правильна, мы сможем приписать проникающую компоненту, наблюдаемую на уровне моря, частицам такого же типа, как и μ -мезоны, образованные π -мезонами с большой энергией, возникшими в высоких слоях атмосферы и распавшимися при полёте. Можно считать, что эти μ -мезоны имеют как положительный, так и отрицательный заряд. Если принять общие выводы, обычно делаемые на основе опытов по запаздывающим совпадениям, то мы должны ожидать, что те отрицательные μ -мезоны, которые останавливаются в зерне пластинки, должны захватываться тяжёлыми ядрами. С другой стороны, те мезоны, которые останавливаются в желатине, должны подвергаться β -распаду. В настоящее время невозможно точно определить относительную вероятность этих двух процессов, так как для этого требуется знание атомных тормозных способностей различных компонент эмульсии для интервала энергий ~ 20 KeV; соответствующих измерений в этой области энергии, однако, нет. Далее, Фрейлих обратил наше внимание на то обстоятельство, что кривая зависимости пробега от энергии будет различной для положительных и отрицательных мезонов, так как последние не захватывают и не теряют электронов при прохождении через эмульсию. Грубые оценки показывают, однако, что вероятность остановки мезона в желатине примерно в два раза больше вероятности его остановки в галоидосеребряном зерне. При этих допущениях мезоны в строке (г) таблицы V составляют примерно пять шестых таких μ -мезонов, которые останавливаются в эмульсии; оставшаяся шестая часть взаимодействует с ядрами. Если мы допустим, что эти последние мезоны, как и отрицательные π -мезоны, приводят к расщеплениям с испусканием тяжёлых частиц, то они будут причислены к σ -мезонам. В камерах Вильсона, однако, не наблюдались случаи расщепления медленными мезонами на уровне моря. Возможно, поэтому, что взаимодействие отрицательных μ -мезонов с ядрами приводит к процессу, отличному от расщепления, вызываемого σ -мезонами.

Если принять предложенную выше точку зрения, то остаётся объяснить, почему отрицательные π -мезоны, несмотря на малое время жизни, приписываемое им, подвергаются ядерному захвату как в желатине, так и в бромистом серебре, в то время как отрицательные μ -мезоны, которые, по предположению, имеют больший период жизни, подвергаются β -распаду до захвата лёгкими ядрами. Эту трудность мы сможем разрешить, только допустив, что время, необходимое отрицательному мезону для приближения к ядру, меньше чем время жизни обоих типов мезонов. В настоящее время величина этого промежутка времени всё ещё дискутируется. Если, однако, допустить, что близкое прохождение около ядра может произойти раньше распада мезона, независимо от типа последнего, то необходимо будет далее допустить, что взаимодействие μ -мезонов с нуклеонами гораздо слабее, чем у π -мезонов. Если генетическая связь между различными типами частиц описана нами правильно, т. е. π -мезоны распадаются с образованием μ -мезонов, которые, в свою очередь, испускают β -частицы, ответственные за запаздывающие совпадения, — то из опытов со счётчиками следует, что сумма времён жизни π - и μ -мезонов должна равняться $2 \cdot 10^{-6}$ сек. Единственные имеющиеся данные, относящиеся к константам распада обоих типов в отдельности, получаются из того факта, что время полёта π - и μ -мезонов в наших эмульсиях порядка 10^{-11} сек. Следовательно, время жизни обоих типов во всяком случае больше этого значения.

Предположим, в виде одной возможности, что время жизни π -мезона равняется $2 \cdot 10^{-6}$ сек, а для μ -мезонов оно гораздо меньше. Тогда большинство мезонов космических лучей на уровне моря, наблюдаемых с помощью счётчиков или в камерах Вильсона, необходимо приписать π -мезонам. В этом случае, чтобы не нарушать согласия с опытами по запаздывающим совпадениям, мы должны предположить, что те отрицательные π -мезоны, которые останавливаются в желатине, испытывают μ -распад, в то время как те, которые остановились в зёрнах бромистого серебра, производят расщепления. Это заставляет нас ожидать появления в 5 раз больше π -мезонов, чем μ -мезонов. Далее, по этой гипотезе часть отрицательных π -мезонов будет испытывать μ -распад, испуская отрицательные μ -мезоны, которые могут взаимодействовать с ядром. Чтобы объяснить отсутствие расщеплений от наблюдаемых нами одиннадцати мезонов, которые безусловно появились в результате μ -распада, и часть из которых мы должны считать отрицательно заряженными, необходимо или приписать им достаточно малое время жизни или же предположить, что они не реагируют с нуклеонами.

Если и устраняются вышеупомянутые трудности, то всё же остаются два серьёзных возражения этой гипотезе. Во-первых, вопреки опыту, следовало бы заметить μ -распад мезонов в камерах Вильсона. Во-вторых, в настоящее время мы не можем предложить объяснение противоречия между слабым взаимодействием мезонов с нуклеонами

на уровне моря, которое вытекает из опытов по запаздывающим совпадениям и опытов других типов, и фактом наблюдаемой генерации τ -мезонов. Ввиду этих значительных трудностей мы отвергаем вторую гипотезу в пользу первого допущения, что π -мезоны имеют малое время жизни и сильно взаимодействуют с нуклеонами.

Мы уже подчёркивали, что на современной стадии наших знаний не представляется возможным делать окончательные выводы. На самом деле, очень вероятно, что обсуждаемые явления гораздо более сложны, чем мы это представляли здесь. Следовательно, важно продолжить наблюдения, чтобы уменьшить статистические ошибки и также, чтобы всякими возможными способами определить массу мезонов различных типов. В этой связи можно отметить, что большое число имеющихся в настоящее время треков позволяет применять статистические методы. Таким образом π - и μ -мезоны, вероятно, составляют отдельные классы; поэтому будет возможно произвести статистическое изучение рассеяния частиц при их прохождении через эмульсию с целью определения их массы. Возможно, что σ -мезоны, которые, как мы предполагаем, состоят в основном из отрицательных π -мезонов, также содержат некоторое число отрицательных μ -мезонов. Однако, в этом случае статистическое изучение рассеяния на малые углы также позволило бы решить этот вопрос и доказать, имеют ли большинство σ -мезонов ту же массу, что и π -мезоны или нет. Такие исследования, а также опыты для определения времени жизни π -и σ -мезонов проводятся в настоящее время.

Выводы

Мы можем резюмировать наши результаты следующим образом. Мы считаем, что наши наблюдения устанавливают:

- 1) что существует 2 типа мезонов, обозначаемых нами как π - и μ -мезоны и обладающих разными массами;
- 2) в согласии с наблюдениями Перкинса, что часть медленных мезонов может проникнуть в ядра и образовать расщепления с испусканием тяжёлых частиц, мы считаем, что эти мезоны отрицательно заряжены и условно их называем σ -мезонами; наконец,
- 3) что τ -и, возможно, π -мезоны могут создаваться в процессах, связанных со взрывным расщеплением ядер.

Наши наблюдения указывают:

- 4) что π - и значительная доля τ -мезонов суть, соответственно, положительно и отрицательно заряженные частицы одного типа, которые сильно взаимодействуют с нуклеонами, причём отрицательно заряженные мезоны захватываются и лёгкими и тяжёлыми ядрами с образованием расщеплений, сопровождаемых испусканием тяжёлых частиц;
- 5) что более тяжёлые π -мезоны испытывают спонтанный распад, сопровождаемый испусканием более лёгких μ -мезонов; в этом процессе распада импульс μ -мезона компенсируется импульсом нейтральной частицы примерно той же массы.

Кроме того, основные черты настоящих экспериментальных результатов и результат, полученный в опытах по запаздывающим совпадениям и в камерах Вильсона, могут быть объяснены в предположении, что

б) большая часть мезонов, наблюденных на уровне моря, является μ -мезонами, образованными при распаде летящих π -мезонов, и

7) что время жизни положительных и отрицательных π -мезонов мало и лежит в интервале между 10^{-6} и 10^{-11} сек.

III. ГИПОТЕТИЧЕСКИ ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБЪЯСНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ НАД „ВТОРИЧНЫМИ МЕЗОНЫМИ“

Латтес, Оккиалини и Поуэлл *) показали, что довольно часто мезоны космических лучей, останавливающиеся в эмульсии фотографической пластинки, создают вторичные мезоны с кинетической энергией порядка 4 MeV, не сопровождаемые другими видимыми частицами. Для интерпретации этого наблюдения, повидимому, требуется существование двух сортов мезонов, причём источник наблюдаемой кинетической энергии вторичной частицы лежит в разности масс обеих частиц. Ввиду важности этого заключения нами сделана попытка объяснить наблюдения каким-нибудь разумным процессом, не требующим введения новой элементарной частицы, а именно, таким процессом, в котором энергия получается из материала фотографической пластинки, а не от самого мезона. Ниже мы приводим доводы, которые позволяют довольно уверенно отрицать возможность существования таких процессов.

Мы приходим к выводу, что для элементов, существующих в достаточном количестве в эмульсии, ни один из следующих процессов не может обусловить выделение требуемого количества энергии.

1) Процессы β - или K -захвата: эти процессы неприемлемы из-за известных дефектов масс лёгких ядер и общих закономерностей для тяжёлых ядер, имеющих в эмульсии. В подобных процессах энергия должна выделяться (хотя и в количествах, недостаточных для объяснения опытов) для K^{40} , Rb^{87} , Lu^{176} , Os^{187} и для каждой из следующих пар: In^{113} , Cd^{113} ; Sn^{115} ; In^{115} ; Te^{123} , Sh^{123} ; ни один из этих элементов не присутствует в достаточном количестве. Невероятно, чтобы какое-нибудь естественное ядро обладало более устойчивым смежным изобаром, не обнаруженным ещё в природе.

2) Индуцированное испускание одиночных нуклонов: неприемлемо из-за известных дефектов масс лёгких ядер и общих закономерностей для более тяжёлых; в естественных ядрах такие процессы всегда поглощают энергию.

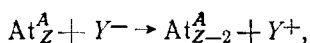
3) Индуцированное испускание α -частиц: исключено для лёгких ядер из-за известных дефектов масс. Вообще не исклю-

*) См. части I и II настоящей статьи. (Прим. ред.)

чено для тяжёлых ядер, так как дефекты масс не известны с достаточной точностью и по соотношению Гейгера-Нутталла время жизни источников α -частиц малой энергии слишком велико для его определения. Однако, если нет ядер тяжелее серебра, то энергии, превышающие 2 MeV, исключены на основе этого, так как они привели бы к спонтанному распаду с заметной скоростью. Кроме того, кулоновское отталкивание от ядра средней массы во всяком случае сообщило бы α -частице энергию, достаточную, чтобы частица оставила заметный след.

4) Индуцированное деление: и в этом случае кулоновское отталкивание заведомо создало бы видимый трек осколков деления; кроме того, крайне невероятно, чтобы мезон мог возбудить такой процесс, скажем в серебре, — единственном элементе, который имеет значение в смысле запасов энергии.

5) Процессы, сопровождаемые изменением заряда на 2 единицы, как, например,



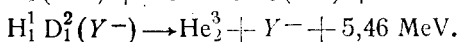
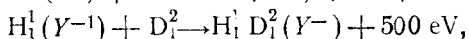
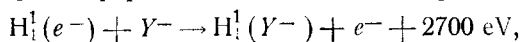
где Y^- и Y^+ обозначают отрицательный и положительный мезоны. Следует ожидать, что если этот процесс и происходит, то энергия должна выделяться примерно в половине ядер, имеющих стабильные изобары с зарядом, уменьшённым на две единицы. В случае перехода Zn^{64} в Ni^{64} измеренные дефекты массы дают выход энергии порядка $9,8 \pm 3$ MeV. Необходимые для этого процесса условия не удовлетворяются ни одним из ядер, имеющих в достаточном количестве в фотографической эмульсии, а именно, изотопами водорода, бора, углерода, азота, кислорода, серебра, брома, иода и серы; из них только S_{16}^{36} , являющаяся наиболее редким (0,016%) из изотопов серы, которая сама встречается только в незначительных количествах, имеет устойчивый изобар A_{18}^{36} . Он же требует, чтобы имел место обратный процесс, начинающийся с положительного мезона, что мало вероятно.

6) Индуцированный распад естественных устойчивых ядерных изомеров; это означало бы существование изомеров с временами жизни в 10^{12} раз большими и запасы энергии в 10 раз большие любых известных значений — весьма невероятное сочетание.

Этим, повидимому, исчерпываются возможности, связанные с деградацией ядер. С другой стороны, чтобы исключить процессы «синтеза» ядер, в которых протон добавляется к другому ядру, требуется более тщательное рассмотрение: почти все процессы этого рода экзотермические. Возможность таких процессов следует из особых свойств комбинации протон — отрицательный мезон, которую можно назвать мезонным атомом водорода или, если угодно, возбуждённым нейтроном.

Мезон, останавливающийся в эмульсии, теряет кинетическую энергию от, скажем, 100 000 eV до 2000 eV, что соответствует доле микрона. Это торможение может произойти в бромистом серебре или желатине со сравнимой вероятностью. В последнем случае он вероятнее всего окажется в окрестности протона, число которых превышает больше чем в два раза числа всех других ядер в желатине. Он должен, следовательно, сперва оказаться на водородоподобной орбите около протона. Результирующий компактный нейтральный атом (его радиус в «кулоновском нижнем состоянии» составит примерно $1/200$ боровского радиуса, — т. е. $2,6 \cdot 10^{-11}$ см и энергия связи будет примерно в 200 раз больше, чем у атома водорода т. е. 2700 eV) на расстояниях, превышающих 10^{-10} см, будет похож на медленный нейтрон. Он сможет легко проходить через электронное облако атомов и близко приблизиться к ядрам без кулоновского отталкивания. Действительно, поляризация мезонного атома в поле другого ядра должна привести к первоначальному притяжению.

Следующий шаг, вероятнее всего, должен заключаться в захвате мезона ядром более высокого заряда и в отталкивании протона. Однако также должна быть некоторая вероятность того, что протон будет захвачен и вылетит мезон. По крайней мере в одном случае, а именно, когда второе ядро представляет собой дейтон, вероятность второго процесса должна быть большой. В самом деле, аналогично молекулярному иону водорода H_2^+ , комбинация дейтона, протона и мезона должна быть устойчивой в отношении кулоновских взаимодействий при внутримолекулярных расстояниях $10^{-8}/200 = 5 \cdot 10^{-11}$ см. На таком расстоянии и при низком потенциальном барьере оба ядра должны легко соединиться, причём мезон приобретает кинетическую энергию в процессе, который можно назвать «внутренней конверсией». Таким образом формально можно ожидать реакции:



Весьма мало вероятно, чтобы малые количества дейтерия, имеющиеся в нормальной эмульсии, явились причиной наблюдаемых явлений. Соответствующий процесс, но со вторым протоном (с образованием дейтерия, так как He^2 неустойчив) требует испускания позитрона и нейтрино, которые уносили бы с собой основную часть имеющихся (и без того недостаточных) 1,43 MeV. Для тяжёлых ядер детали взаимодействия будут более сложными, так как, среди других обстоятельств, прилипание к молекулярному иону произойдёт только тогда, когда последний находится в возбуждённом состоянии.

Мезонный атом водорода будет притягиваться ко второму ядру благодаря поляризации. Некоторое количество энергии может идти на образование молекулярной комбинации в результате эффекта Оже,

который перестаёт действовать, когда ядро и мезон сойдутся на расстояние, значительно меньшее радиуса K -оболочки для электронов. Эта комбинация диссоциирует, когда мезон, в результате радиационного перехода, падает на уровень, на котором он оказывается концентрированным вокруг ядра с большим зарядом. Время этого перехода должно быть порядка $(\hbar c/e^2)(\lambda/r)^2(1/\omega)$, что составляет примерно $10^8 Z^{-2}$ периодов испущенного излучения (как и в водородоподобных спектрах) независимо от того, рассматриваем ли мы мезоны или электроны. Характеристическая частота должна быть в 200 раз больше частоты соответствующего электронного спектра, т. е. например, $10^{18} Z^2$, а частота молекулярных колебаний в $200^{1/2}$ раз больше частоты в случае электронной связи атомов водорода, т. е. примерно $3 \cdot 10^{17}$. Мы отсюда оцениваем, что время жизни в связанном состоянии должно быть порядка $10^{-10} Z^{-4}$ сек или примерно $3 \cdot 10^7 Z^{-4}$ периодов колебаний мезонного молекулярного иона.

Потенциальный барьер, который должен быть преодолен протоном, простирается от некоторого расстояния между ядрами в возбужденном молекулярном ионе (r_1) до расстояния, при котором ядра соприкасаются (r_0). В этом интервале расстояний мезон всё ещё даёт некоторое экранирование и мы принимаем поэтому, что потенциальная энергия $E = (Z-1)e^2/r$. Мы считаем r_1 равным тому расстоянию, при котором поляризующее действие второго ядра на мезонный водород (которое мы рассматриваем как линейную функцию напряженности поля) создаёт эквивалентное смещение мезона, равное его борзовскому радиусу, $a_Y = 2,6 \times 10^{-11}$ см. Таким образом

$r_1 = 3a_Y \sqrt{Z/r} = 5,5 \times 10^{-11} Z^{1/2}$ см. Для r_0 нами взято значение $1,45 \times 10^{-13} (A^{1/2} + 1)$ см, где A — массовое число второго ядра. Следовательно, если мы напишем $\lambda^* = \hbar \sqrt{2M(E - E_0)}$ (M — масса протона) и пренебрежём первоначальной кинетической энергией E_0 , прозрачность барьера для протонной волны должна быть порядка

$$\exp \left\{ - \pi \int_{r_0}^{r_1} (1/\lambda^*) dr \right\} = \exp \left\{ - \frac{2\pi e \sqrt{2M(Z-1)}}{\hbar} (r_1^{1/2} - r_0^{1/2}) \right\} = \\ = \exp \left\{ - 3,33 \sqrt{Z-1} (7,4 Z^{1/4} - 0,4 \sqrt{A^{1/2} + 1}) \right\},$$

что равняется примерно 10^{-27} для B_3^{11} . Это выражение, которое вообще довольно неточно, например из-за неопределённости r_1 , даёт вероятность того, что при падении одного протона последний пройдет через барьер. Умножая на число колебаний до диссоциации, мы найдём, что вероятность проникновения перед диссоциацией будет в этом случае 10^{-21} . Этот результат может отличаться от истинного значения на несколько порядков, но всё же остаётся тот результат, что если взятая модель вообще в какой-либо мере соответствует истинному положению вещей, то вероятность проникновения ничтожна для всех ядер, исключая дейтон. Для последнего подобный расчёт при

пренебрежении внутренним экранированием, т. е. когда вместо $Z-1$ берётся 1, даёт вероятность проникновения, равную 10^{-9} на колебание, так что прохождение может произойти примерно в 10^{-8} сек.

Специфические силы мезона здесь не учитывались. Существует очевидная возможность, что мезон будет подвергнут ядерному захвату или уничтожению, прежде чем оба ядра смогут взаимодействовать; эта вероятность, однако, уменьшается тем, что за всё время, необходимое для этого процесса, мезон находится в возбуждённых состояниях. Если, с другой стороны, мезонные силы приводят к некоторому более близкому союзу протона с мезоном, чем рассмотренный нами (отличный от нейтрона), то он вполне сможет взаимодействовать с любым ядром.

Для насыщенных ядер C_6^{12} и O_8^{16} энергия прилипания протона мала (соответственно 1,96 и 0,51 MeV). Для почти-всех других ядер она порядка 5 MeV или больше. Следующее наиболее часто встречающееся ядро в желатине есть N_7^{14} , которое даёт 7,3 MeV, что было бы достаточно для объяснения опытов, если бы образовалось O_8^{15} с возбуждением порядка 3,5 MeV. Бор также присутствовал в этих эмульсиях и мог бы дать больше чем нужное количество энергии путём прилипания протонов, но в этом случае наиболее вероятные реакции проходят с испусканием α -частиц.

Этот процесс во всяком случае может быть отвергнут статистически. Из общего количества в 380 мезонов, остановившихся в эмульсии, четыре вторичных мезона имели треки длиной по крайней мере в 500 μ внутри 50 μ эмульсии и с хорошо согласующимися между собой выходами энергии. Геометрические соображения показывают, что было по крайней мере в 30 раз больше таких случаев, когда вторичный мезон выходил из эмульсии, проходя меньший путь; в этом случае он мог бы остаться незамеченным или же быть неотличимым от протона. С другой стороны проекция конца трека мезона длиной в 50 μ не осталась бы незамеченной. Таким образом четыре наблюдаемых вторичных мезона представляют в действительности 120 ± 60 мезонов (отклонения относятся к вероятной ошибке), в то время как 380 наблюдаемых остановившихся мезонов представляют не больше 900 мезонов, действительно остановившихся в эмульсии. Для беспорядочно направленных прямых треков, кончающихся на всевозможных глубинах в безграничном слое толщины H , статистическая доля всех треков, кончающихся в этом слое и имеющих пробеги, горизонтальные проекции которых внутри слоя превышают R , будет $\sqrt{R^2/H^2 + 1} - R/H$. При $R/H=1$ это даёт 0,414. (При $R/H > 1$ хорошим приближением будет $H/2R$, но если $R/H \gg 1$, кривизна треков приведёт к некоторому снижению этой величины.)

Таким образом выходит, что образование вторичного мезона с энергией в 4 MeV происходит в 13 ± 7 процентов всех случаев остановки мезона в эмульсии. Повидимому только половина мезонов

отрицательны и из них только половина может образовать мезонные атомы водорода (так как H составляет 40 атомных процентов всей эмульсии); если мы предположим, что взаимодействие со вторым протоном мало, так что мезонный водород с наибольшей и почти одинаковой вероятностью будет притягиваться к углероду, азоту или кислороду (причём каждое восьмое ядро в желатине есть N^{14}), мы будем иметь ожидание примерно 3%, если каждое столкновение мезонного атома водорода приводит к захвату протона и если в каждом случае имеет место «внутренняя конверсия» освобождаемой энергии, приводящая к образованию вторичного мезона с энергией в 4 MeV. Неучтённые обстоятельства ещё менее вероятны и поэтому даже при имеющемся малом числе наблюдённых случаев статистически мало вероятно, чтобы они представляли этот процесс.

Далее, эта простая теория показывает, что следует ожидать ещё большего числа хорошо заметных вторичных мезонов с энергией в 2 MeV и возможно $\frac{1}{2}$ MeV, появляющихся в результате прилипания про-

тона к C_6^{12} или O_8^{16} ; однако простым и вероятным добавлением к теории будет предположение, что эти реакции относительно «запрещены».

Следует добавить, что такие процессы могут иметь значение при других обстоятельствах; если будет правильным предположить, что мезоны могут существовать в течение, скажем, 10^{-8} сек на водородоподобных орбитах около протона, то существует конечная вероятность, что мезон сможет индуцировать ядерную реакцию синтеза, вызывая прилипание протона к дейтону. Однако, имея дело с двумя или ещё большим числом мезонов космических лучей, потребуются пересмотреть весь фактический материал о мезонах.

Добавление при корректуре. Более поздние наблюдения позволяющих уточнить «исправленную наблюдённую» долю мезонов, образующих вторичные мезоны: вместо 13 ± 7 процентов получаем $12,8 \pm 2,5$ процентов (117 ± 20 из 917 ± 70), что только придаёт большую уверенность в правильности пренебрежения другими возможными процессами.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. C. M. G. Lattes, G. P. S. Occhialini and C. F. Powell, Nature, 159, 93, 186, 694 (1947).
 2. E. Gardner, Phys. Rev. (в печати).
 3. Bethe and Marshak, Phys. Rev. (в печати).
Moller и Pais также рассмотрели возможность генетической связи между различными типами частиц промежуточной массы.
-