

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**НАБЛЮДЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ПЛАСТИНОК, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ
К ЭЛЕКТРОНАМ**

**Р. Браун, У. Камерини, П. Г. Фаулер, Г. Мюирхед,
К. Ф. Поуэлл и Д. М. Ритсон *)**

В последнее время мы произвели наблюдения с помощью новых эмульсий, предназначенных для ядерных исследований и описанных доктором Берриманом¹. Эти эмульсии, позволяющие обнаружить следы частиц с зарядом e даже в случае минимальной ионизации, представляют собой техническое усовершенствование большого значения. Они дают нам возможность значительно глубже проникнуть в природу ядерных процессов, чем это было доступно со старыми эмульсиями, и, кроме того, значительно расширяют область применения фотографического метода при решении физических и биологических проблем. В части I настоящей статьи описываются наиболее интересные явления, создаваемые заряженными мезонами и обнаруженные при наблюдении космического излучения с помощью новых пластинок. К этим явлениям относятся случаи расщепления, вызванные π^- -частицами и случаи распада μ -частиц. Примерно в 10% всех случаев след частицы, образованный в эмульсии при распаде μ -мезона, имеет длину, превышающую 1000 μ . Изучая кулоновское рассеяние, испытываемое этими частицами в эмульсии, можно оценить их энергию. Характерной особенностью для всех экспонированных пластинок является наличие большого числа следов с плотностью зёрен, соответствующей частицам, находящимся вблизи минимума ионизации.

Эти следы дают возможность очень просто контролировать «увядание» (регрессию) скрытого изображения, изменение степени проявления с глубиной, чувствительность, а также другие характерные свойства эмульсий. В части II описано явление, которое служит ещё одним доказательством существования мезонов с массой большей, чем масса π^- -частиц². Оно заключается в том, что частица с массой (опреде-

*) Nature 163, 47, 82 (1949). Перевод В. А. Троицкой.

лённой по счёту зёрен в эмульсии), равной $\sim 1000 m_e$, испускает три заряженные частицы, одна из которых достигает конца своего пробега в эмульсии и вызывает расщепление ядра. Мы считаем, что это явление соответствует спонтанному распаду тяжёлой частицы. Предполагая, что три заряженные частицы являются единственными продуктами распада, можно проанализировать полученную фотографию, применяя законы сохранения массы и энергии. В пределах ошибок измерений наши наблюдения согласуются с предположением, что три вторичные частицы являются π - или μ -частицами. Прежде чем считать установленной правильность такой интерпретации, необходимо изучить ещё некоторое число подобных случаев. Мы даём, однако, эту предварительную интерпретацию наблюдаемого явления, так как число частиц такого типа по сравнению с числом π - и μ -частиц на умеренных высотах мало (3300 м).

Кроме того, если наши предположения правильны, то по чисто геометрическим соображениям, только небольшая доля таких явлений сможет быть проанализирована с помощью применённого нами метода. Однако другие явления подобного типа, которые, возможно, окажутся менее пригодными для анализа, смогут все же в свете приводимых здесь наблюдений дать ценные сведения, подтверждающие или опровергающие правильность наших предположений.

1. РАСПАД μ -МЕЗОНОВ

В описываемых опытах применялись пластинки с экспериментальными эмульсиями Кодака типа NT4, любезно предоставленные нам д-ром Берриманом. Они были доставлены на Юнгфрау Йох немедленно после изготовления. Часть из них располагалась под свинцом толщиной 10 см на период от 8 до 16 дней, а другая часть экспонировалась незащищённой. Свинец предназначался для того, чтобы уменьшить интенсивность мягкой компоненты. Однако эта предосторожность оказалась излишней, так как число следов на незащищённых пластинках было не слишком велико.

Пластинки проявлялись на Юнгфрау Йох немедленно после их экспозиции. С целью определить наиболее благоприятные условия проявления, разные пластинки проявлялись различными способами. В связи с этим на разных пластинках для одних и тех же частиц имеет место различная плотность зёрен в следах. Вследствие короткой экспозиции число явлений, зафиксированных на единице площади, сравнительно мало. Однако сильно увеличенная, благодаря большой чувствительности эмульсии, плотность зёрен в следах позволяет исследовать пластинки под микроскопом со значительно меньшим увеличением, чем использовавшееся ранее. Так, при поиске мезонов мы применяли объектив с десятикратным увеличением и окуляр с шестикратным увеличением.

Такая установка вместе с бинокулярным микроскопом, даёт общее увеличение, равное всего лишь 90.

Работа при малых увеличениях позволяет ускорить процесс изучения пластинок. При исследовании 300 см^2 новых пластинок было обнаружено много примеров родственных процессов, в которых участвуют заряженные мезоны.

Расщепления, вызванные π^- -частицами

Нам удалось обнаружить 30 случаев расщеплений, вызванных π^- -частицами (рис. 1) и 30 случаев μ -распада π^+ -частиц. Отличительной чертой новых пластинок является большое число отчётливо видных под микроскопом следов медленных электронов. На рис. 1, например, видны два электрона, связанные со звездой, образованной при захвате ядром π^- -частицы.

Следы электронов лишь в редких случаях начинаются в конце следа π^- -частицы, т. е. в точке, в которой происходит расщепление (рис. 2). Так, на 30 случаев расщеплений, вызванных π^- -частицами, только в трёх случаях видны следы связанных с ними электронов.

Наблюдающиеся электроны могут быть приписаны β -распаду остаточного ядра, образованного при расщеплении, или же, возможно, внутренней конверсии γ -лучей. Если мезон теряет иногда свою энергию при испускании электронов Оже, то число таких электронов с энергией большей, чем 15 keV , должно быть мало.

Частицы с малой удельной ионизацией

Кроме явлений, с которыми мы были знакомы ранее, на новых пластинках мы различаем следы большого числа частиц с малой удельной ионизацией, проходящих по направлению от поверхности к стеклу. При этом отклонение, которое они испытывают вследствие рассеяния, не превышает нескольких градусов. Эти следы могут быть приписаны быстрым частицам, скорее всего электронам и мезонам, обладающим удельной ионизацией, примерно равной минимальному значению ионизации для частицы с зарядом e . Для того чтобы подтвердить эту точку зрения, производился подсчёт зёрен в 25 следах такого типа, τ длиной, большей $1000\text{ }\mu$, выбранных произвольно из пластинки № К47. Результаты этого исследования представлены на рис. 3. На графике показана относительная частота появления следов с различными значениями средней плотности зёрен. Пластинка была взята из серии пластинок, экспонированных под свинцом. Из рис. 3 следует, что имеется резко выделенная группа следов со средней плотностью зёрен в $0,22$ зерна на микрон. Мы считаем, что эта группа следов, образована частицами, удельная ионизация которых лежит вблизи минимального значения.

Наблюдения, приведённые на рис. 3, могут быть объяснены тем, что ионизирующая способность частиц, импульс которых больше 2 mc (где m — масса покоя), медленно меняется с изменением энергии. Из рис. 3 следует, что явления, обусловленные «увяданием» (регрессией) скрытого изображения, малы, так как «увядание» ведёт к умень-

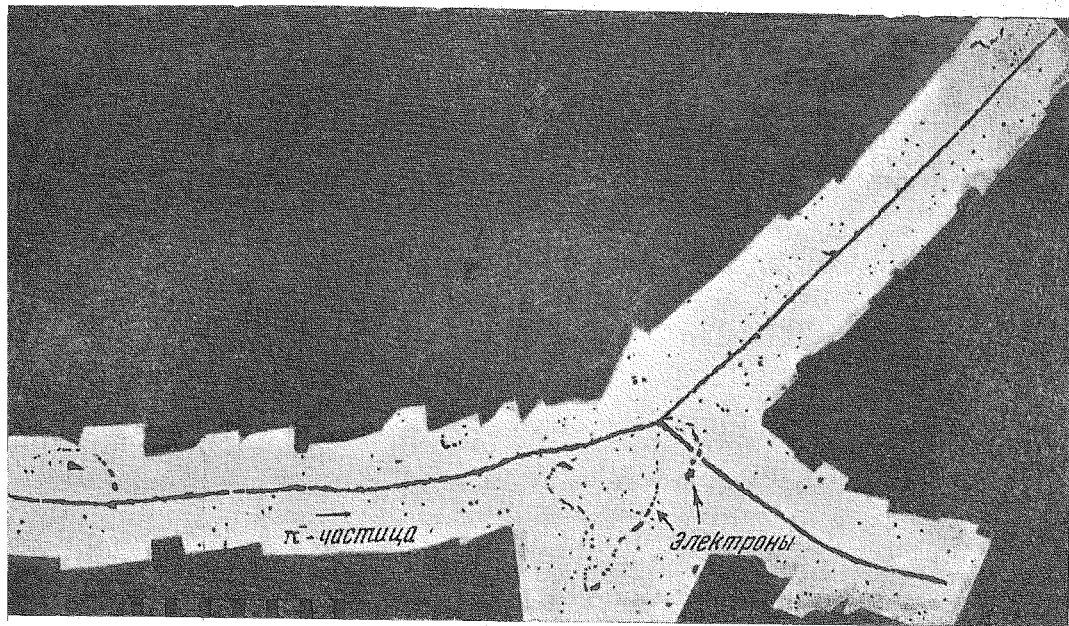


Рис. 1. Расщепление, вызванное π -частицей. На фотографии видны следы электронов, связанных с расщеплением.

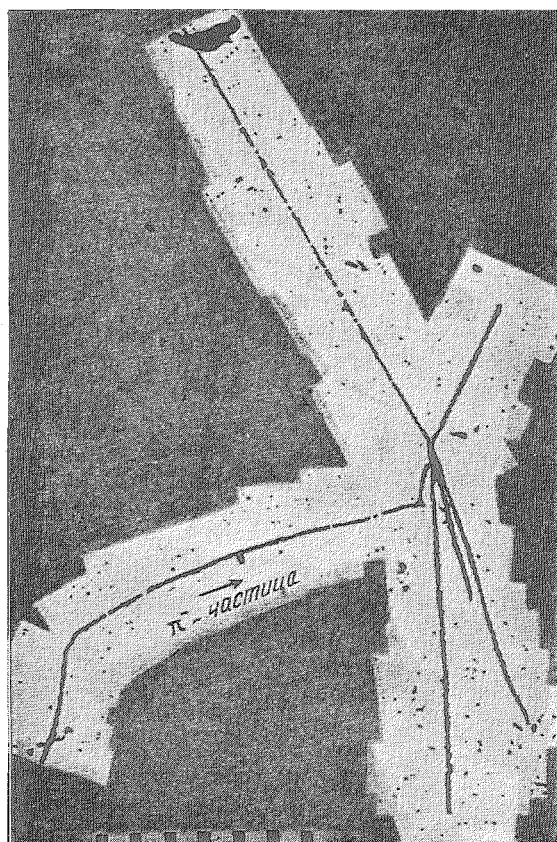


Рис. 2. Расщепление, вызванное π^- -частицей.

шению плотности зёрен. Если бы эти явления были значительны, то вместо найденной резко очерченной группы следов следовало бы для частиц с минимальной ионизацией ожидать размытого распределения плотности зёрен, соответствующего присутствию следов различного возраста. Рассматриваемые следы проходят по направлению

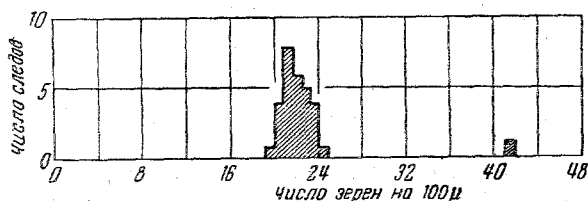


Рис. 3. Гистограмма, показывающая распределение значений средней плотности зёрен в следах частиц с малой удельной ионизацией.

от эмульсии к стеклу. Поэтому они могут быть исследованы с целью определения изменения степени проявления с глубиной. Плотность зёрен вдоль следов измерялась как функция глубины в эмульсии, и на рис. 4 представлены средние результаты для 25 следов. Мы видим, что плотность зёрен, соответствующая минимуму ионизации, изменяется с глубиной, в частности для исследуемой пластинки, от 23,5 на 100 μ на поверхности до 21,5 на стекле. Отсюда следует, что относительные изменения в плотности зёрен следа, вызванные изменениями степени проявления с глубиной, меньше 8%. Кроме того, для следов частиц с малой удельной ионизацией, представляющих особый интерес, можно ввести поправку, учитывающую небольшие наблюдаемые изменения.

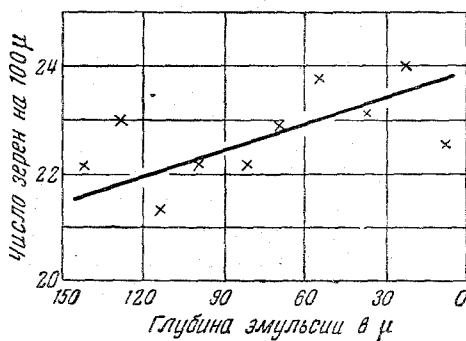


Рис. 4. Средние значения плотности зёрен в отрезках следов 25 частиц с малой удельной ионизацией на различных глубинах в эмульсии.

При исследовании космического излучения с помощью пластинок, чувствительных к электронам, наблюдается большое количество длинных следов с малой плотностью зёрен. Поэтому описанные выше методы могут быть использованы как стандартные способы определения:

- степени регрессии при данной экспозиции;
- степени проявления с глубиной;

в) плотности зёрен, соответствующей минимальному значению удельной ионизации, для частиц с зарядом e .

Результаты, представленные на рис. 3, позволяют сделать ещё один вывод. Величина минимального значения удельной ионизации частицы пропорциональна квадрату её заряда. Остро очерченный пик на рис. 3 говорит о том, что большинство быстрых частиц, обнаруженных в эмульсии, обладает с точностью до 5% равным зарядом. Это обстоятельство с большой достоверностью указывает на то, что заряд этот должен быть равен e .

Распад μ -мезонов

Мы наблюдали следы 100 μ^+ - или μ^- - частиц, которые останавливаются в эмульсии и испускают одну заряженную частицу, обладающую малой удельной ионизацией. На рис. 5 воспроизведена микрофотография такого распада. Явления этого типа легко отличить от образования μ -мезона при распаде π -мезона, потому что след μ -мезона, возникшего при распаде покоящегося π -мезона, обладает значительно большей плотностью зёрен. Кроме того, частицы, образующиеся в конце пробега μ -мезонов и выброшенные в направлении, примерно параллельном поверхности, обычно имеют пробег в эмульсии порядка нескольких тысяч микрон. Эти частицы почти не испытывают рассеяния, и плотность зёрен в их следах примерно равна плотности зёрен, соответствующей минимуму ионизации. Это указывает на то, что их заряд равен заряду электрона. На рис. 6 показана микрофотография, на которой π -частица останавливается в эмульсии и испускает μ -частицу с пробегом, равным примерно 600 μ . На фотографии ясно видна частица с малой удельной ионизацией, вылетающая из конца следа μ -частицы.

В других восьми наблюденных случаях такого типа характеристики всех вторичных частиц неотличимы от характеристик частиц, возникающих в конце пробега μ -мезонов, образовавшихся вне эмульсии и затем вошедших в неё. Эти новые наблюдения, совместно с доказательствами, полученными в предыдущих опытах, являются ещё одним основанием для предположения, что эти μ -мезоны идентичны с какими-либо обычными мезонами проникающей компоненты космического излучения, и что π и μ -мезоны обладают электрическим зарядом, равным e .

Примерно 10% мезонов, остановившихся в эмульсии и образованных вне её, создают частицы, у которых длина следа больше чем 1000 μ . Мы рассматривали возможность определения величины импульса этих частиц по наблюдению изменения направления их движения под влиянием магнитного поля в 50 000 гаусс. Простое вычисление показывает, однако, что отклонения будут иметь тот же порядок величины, что и отклонения, вызываемые рассеянием. Поэтому определение импульса частиц производилось по величине рассеяния в отсутствии

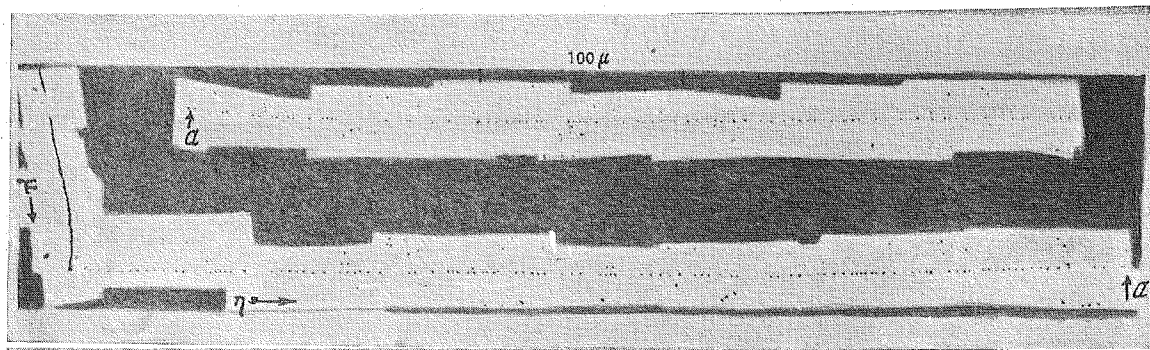


Рис. 5. Характерный образец следа частицы, образованной при распаде μ -мезона и обладающей малой удельной ионизацией. След вторичной частицы дан в двух частях, которые должны быть соединены в точке, обозначенной a .

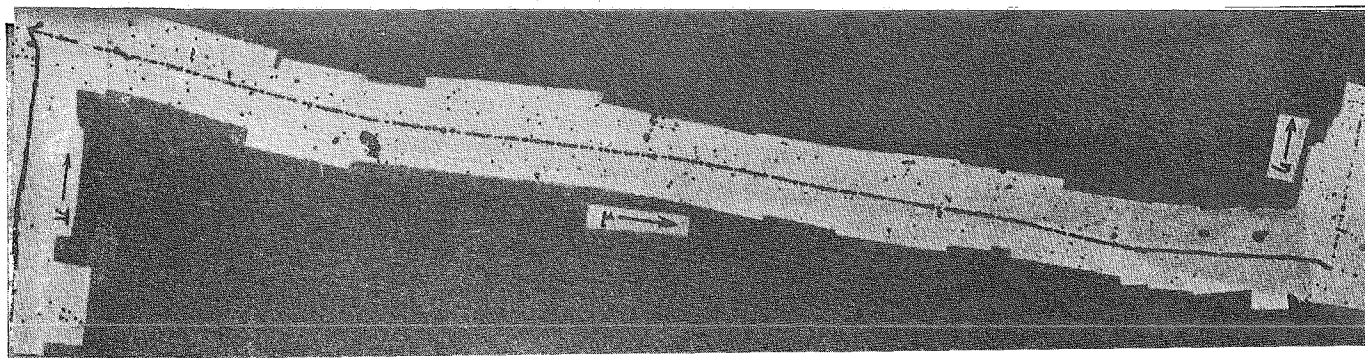


Рис. 6. Последовательный распад $\pi \rightarrow \mu \rightarrow \eta$. Обычно предполагают, что η -частица, возникающая при распаде μ -мезона, является электроном, однако это предположение требует ещё окончательного доказательства. Вблизи конца пробега μ -мезона можно различить несколько зёрен следа вторичной частицы с малой удельной ионизацией, но эта частица не связана с главным событием. Можно различить также следы нескольких δ -электронов, образованных μ -мезоном. Один из таких следов виден вблизи точки распада π^+ -частицы. Во всех случаях, наблюдаемых до сих пор, η -частица выходит из эмульсии.

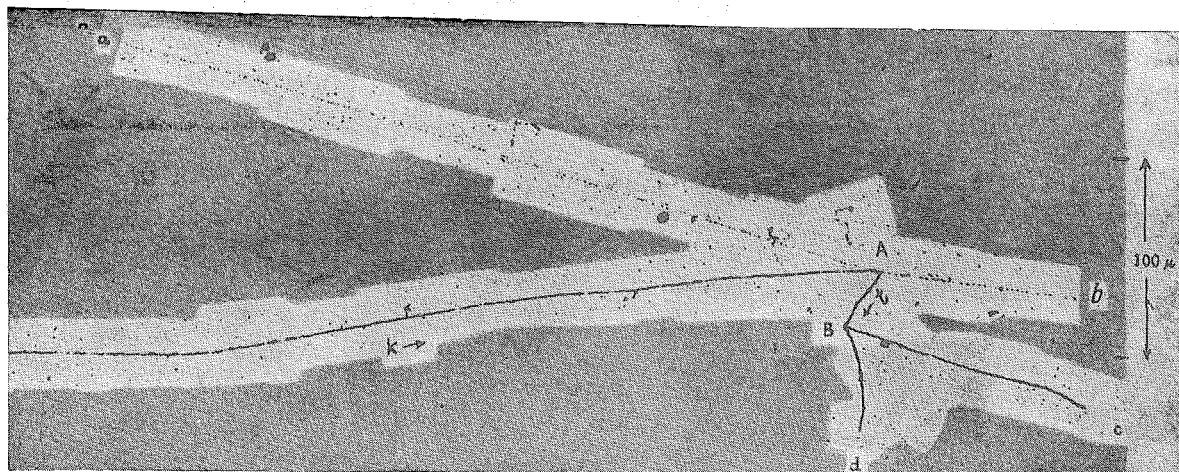


Рис. 7.

магнитного поля⁴. Приводимые ниже значения, являющиеся типичными для данных, получаемых с помощью этого метода, указывают на степень точности, которая может быть получена в благоприятных случаях: 15 ± 3 , 25 ± 5 , 38 ± 6 , 42 ± 2 , 44 ± 4 , 48 ± 6 MeV/c. Отклонения от среднего соответствуют вероятным ошибкам, связанным со статическими флуктуациями. Естественно предположить, что в течение ближайших месяцев мы найдём несколько сотен следов таких частиц, пригодных для измерений, и что эти измерения позволят произвести детальное исследование распределения таких частиц по импульсам. Значения, полученные из изучения первых двадцати следов частиц с пробегом, большим 1000 μ , указывают на то, что импульс распадной частицы не постоянен.

Из всех μ -частиц, остановившихся в эмульсии, примерно 40% не создают различных следов вторичных частиц. Можно предположить либо, что эти частицы были заряжены отрицательно и захватились атомами серебра или брома, прежде чем прошло время, необходимое для их распада, либо, что мы имеем дело с событиями, в которых распадная частица ускользает от наблюдения из-за направления своего движения. Для того, чтобы оценить число случаев, которые должны быть приписаны последней причине, было произведено измерение длин проекций распадных частиц на плоскость, совпадающую с поверхностью эмульсии. Из распределения полученных таким образом значений можно оценить полное число μ -мезонов, образующих вторичные частицы. Эта задача является чисто геометрической и может быть решена подобно тому, как это делалось ранее в случае μ -распада π -мезонов⁵. Мы нашли, таким образом, что из всех наблюдаемых μ -мезонов $65 \pm 10\%$ испускали вторичные частицы, а $35 \pm 10\%$ не давали вторичных частиц. Этот результат находится, видимо, в согласии с предыдущей оценкой доли μ^- -частиц, остановившихся в желатине и бромистом серебре.

Мы упоминали уже, что наблюдения расщеплений, вызванных π -частицами, указывают на то, что образование электронов Оже с энергией, большей 15 KeV при «захвате атомом» отрицательного мезона происходит очень редко. К аналогичному заключению можно прийти, исследуя следы μ -частиц. Среди 100 случаев, в которых мы можем различить след быстрой частицы, возникающей при распаде μ -мезона, нет ни одного случая, в котором был бы виден короткий след электрона, образованного в точке распада. Разумно предположить, что примерно в $1/3$ событий такого типа мы наблюдаем спонтанный распад отрицательного мезона. Отсюда следует, что и для μ^- -частиц испускание электронов Оже с энергией больше 15 KeV в процессе их захвата атомом есть редкое явление. Желательно, разумеется, произвести более детальное исследование этой проблемы, так как в случае μ^- -частиц, распадающихся спонтанно, картина этого явления не искажается β -распадом остаточного ядра, следующим иногда за захватом мезона.

Ливни проникающих частиц

Изучая «звёзды», образованные в новых эмульсиях, мы обнаружили восемь случаев, в которых из одной точки расходятся пять или более заряженных частиц; плотность зёрен в следах этих частиц имеет значение, близкое к минимальному.

Во всех случаях эти частицы двигались вниз в направлениях, составляющих малые углы с вертикалью, так что их следы образовывали узкий конус. Они сопровождалась протонами и α -частицами малой энергии, выброшенными в произвольных направлениях. Мы предполагаем, что каждое из этих явлений соответствует взаимодействию быстрой частицы с ядром серебра или брома, в результате которого происходит образование нескольких проникающих частиц, причём тяжёлые частицы «испаряются» затем из ядра в результате его возросшей «температуры». Эти явления относятся к процессам, доказательства существования которых были даны в недавно опубликованных фотографиях (полученных в камере Вильсона), показывающих образование ливней проникающих частиц (Хазен, Яносси, Рочестр и др. авторы).

На существование таких процессов указывали Гамильтон, Гейтлер и Пенг в своей теории образования мезонов при взаимодействии быстрых нуклонов с ядрами.

Соотношение между плотностью зёрен и удельной ионизацией

Возможность определить удельную ионизацию заряженной частицы из наблюдаемой плотности зёрен в её следе имеет большое практическое значение. Мы видим, что кривые типа изображённых на рис. 3, позволяют нам определить плотность зёрен в следах частиц с зарядом e , обладающих минимальной ионизацией. Далее из наблюдения на той же пластинке следов μ -мезонов и протонов с большим пробегом, мы можем определить плотность зёрен, соответствующую широкой области значений удельной ионизации. Произведя подобные определения, из кривой зависимости пробег — энергия для протонов можно получить величину потери энергии, соответствующую данному значению остаточного пробега частицы известной массы. Таким образом, мы получили результаты, изображённые на рис. 8. Точка, соответствующая минимуму ионизации на этой кривой, показана значком $\dagger$. Ионизация в этом случае определялась по формуле, выведенной Блохом, в предположении, что атомный состав новой эмульсии идентичен с атомным составом эмульсий ильфордовских пластинок. На рис. 8 показана аналогичная кривая для эмульсии Ильфорд C2. Мы видим, что в результате увеличенной чувствительности эмульсии Кодак NT4 имеет место уменьшение разрешающей способности для следов с удельной ионизацией порядка 6 KeV на микрон. На пластинках Кодак след частицы в области большой ионизации представляется как почти непрерывная последовательность

проявленных зёрен, которые не могут быть отдельно разрешены. Таким образом, для определения масс частиц порядка $1000 m_e$, необходимо располагать следами значительно большей длины, чем в случае менее чувствительных эмульсий. Несмотря на трудности, имеющие место при изучении следов частиц с большой удельной ионизацией, калибровочная кривая, показанная на рис. 8, позволяет оценить величину потери энергии, испытываемую слабо ионизирующими частицами, что имеет большое значение в связи с материалом, рассмотренным в части II настоящей статьи.

II. ДАЛЬНЕЙШИЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА СУЩЕСТВОВАНИЯ НЕСТАБИЛЬНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С МАССОЙ, РАВНОЙ $1000 m_e$, И НАБЛЮДЕНИЯ НАД ИХ РАСПАДОМ

Одно из первых явлений, обнаруженных при рассмотрении чувствительных к электронам пластинок, экспонированных на Юнгфрау Йох, показано на микрофотографии рис. 7. Имеются два центра А

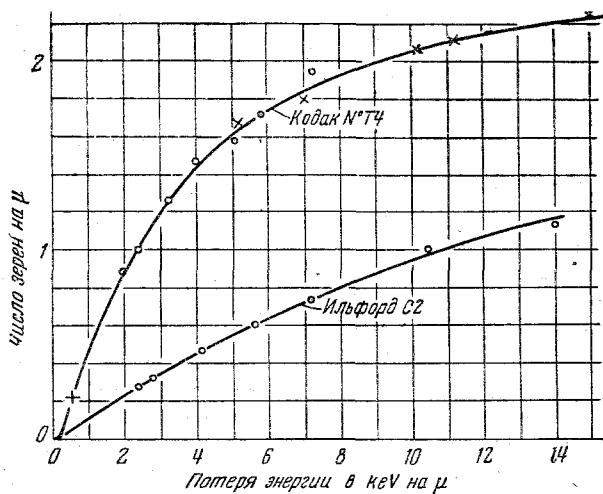


Рис. 8. Соотношение между потерей энергии частицей и плотностью зёрен в следе. Точки, обозначенные кружками, были получены при исследовании следов μ -частиц с пробегом, превышающим 2000μ , а точки, обозначенные крестиками, — из аналогичных измерений с протонами.

и В, соединённые общим следом t , из которых расходятся следы заряженных частиц.

Вследствие краткости экспозиции и небольшого числа случаев распада, имеющих место в пластинке, вероятность того, что наблюдаемые траектории вызваны случайным наложением в одной точке следов

частиц, несвязанных одним и тем же событием, очень мала и имеет порядок 10^{-7} . Поэтому такой вероятностью можно пренебречь. Дальнейшие доводы, подтверждающие это предположение, даны в следующем параграфе. Исследование следа k показывает, что частица, образующая его, приближается к центру A . Пробег частицы в эмульсии превышает 3000μ , и по мере приближения к A имеет место непрерывное возрастание плотности зёрен вдоль следа. Вблизи A плотность зёрен неотличима от плотности зёрен, создаваемой частицей с зарядом e , обнаруженной на той же самой пластинке. Определение направления движения частицы, основанное на подсчёте зёрен, подтверждается наблюдениями над отклонениями на небольшие углы, обусловленными кулоновским рассеянием. Эти отклонения наиболее часты вблизи точки A , а в точках, удалённых от неё, рассеяние менее заметно. Таким образом, можно заключить, что частица k приближалась к точке A , что она обладала одним элементарным зарядом и что в точке A она достигла или была вблизи конца своего пробега. Поэтому мы считаем, что частица k возбудила всю совокупность явлений, отображённых в следах, исходящих из A и B . Можно предполагать, что частица, образующая след t , возникла в звезде A и вызвала расщепление в B . Для того чтобы проанализировать это явление, мы попытались сперва определить массу частицы k .

Определение массы путём подсчёта зёрен

Около года тому назад в нашей лаборатории были поставлены опыты, имевшие своей целью определение отношения масс π - и ρ -мезонов m_π/m_ρ . Это определение производилось путём подсчёта числа зёрен⁵ и путём изучения рассеяния частиц на малые углы при прохождении через эмульсию⁴. Значения, полученные с помощью этих методов, равнялись соответственно $m_\pi/m_\rho = 1,65 \pm 0,11$ и $m_\pi/m_\rho = 1,35 \pm 0,10$. (Указанные пределы ошибок при определении m_π/m_ρ по величине рассеяния меньше, чем приводимые в статье Гольдшмидта, по следующим причинам. Раньше значения масс для различных мезонов, классифицированных феноменологически, давались отдельно. Теперь, однако, известно, что по крайней мере большинство σ -мезонов, представляет собой π -частицы, а ρ -мезоны являются ρ^+ - и ρ^- -частицами. Различные результаты могут быть поэтому объединены и дают значения для m_π/m_ρ с большой статистической точностью.) Последние опыты, выполненные в Беркли, указывают на то, что истинным значением является, повидимому, значение $1,33 \pm 0,02$. Этот результат ставит под серьёзное сомнение надёжность метода, основанного на подсчёте зёрен. Однако вследствие больших преимуществ этого метода и важных заключений, которые на нем основаны, был поставлен ряд опытов с целью определения условий, при которых могут быть получены надёжные результаты. В первых опытах⁵ две наиболее серьёзные экспериментальные трудности были обусло-

влени регрессией скрытого изображения и изменением степени проявления с глубиной. Это заставило нас перейти к изучению только одновременно образованных следов и сравнивать плотность зёрен вдоль следов π - и μ -мезонов одной и той же пары.

В результате этого ограничения следы π -мезонов, пригодные для измерений, были в большинстве случаев короче 400 μ . В последующих опытах удалось получить значительно более благоприятные условия для измерений, благодаря короткому времени экспозиции (в этом случае эффектом регрессии можно пренебречь), а также благодаря методу проявления пластинок, применённому Дилвортом, Оккиалини и Пайном⁷, с помощью которого достигалась примерно одинаковая степень проявления с глубиной. На пластинках, проявленных таким способом, допустимо сравнение плотности зёрен

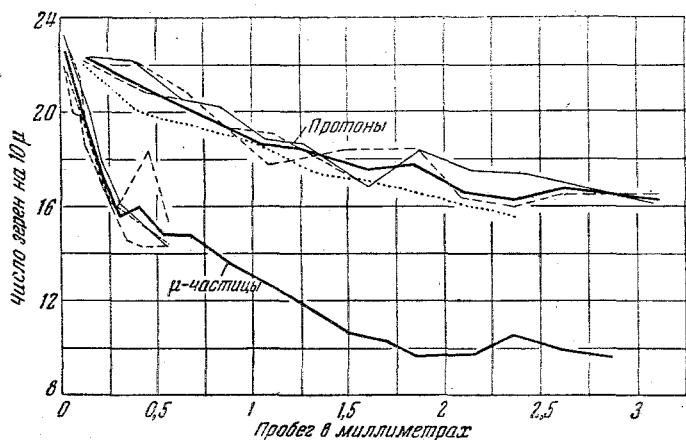


Рис. 9. Зависимости плотность зёрен — пробег для протонов и μ -частиц.

в следах несвязанных частиц. Кроме того, теперь известно, что большинство, а возможно и все мезоны, которые образуют «звёзды», является π -частицами^{6,8} и что большинство ρ -мезонов является ρ^+ - и ρ^- -частицами. При определении m_π и m_μ мы производили поэтому измерения вдоль следов π^+ - и π^- , μ^+ - и μ^- -частиц с длиной, большей 1000 μ , и сравнивали полученные результаты с результатами аналогичных измерений вдоль следов протонов. В этих условиях мы нашли, что $m_\pi/m_\mu = 1,33 \pm 0,05$. Детальное описание наблюдений будет опубликовано отдельно, но для задач, преследуемых в настоящей статье, достаточно отметить, что результаты находятся, повидимому, в хорошем согласии с результатами, полученными другими методами. Из этого можно заключить, что, используя эмульсию Иلفорд С2 в новых условиях, можно получить достоверные результаты. Мы видели, что с новыми эмульсиями Кодака были достигнуты

условия одинакового проявления с глубиной и отсутствия регрессий. Поэтому мы попытались измерить массу частиц методами, аналогичными тем, которые применялись для ильфордовских пластинок. На рис. 9 показаны результаты, полученные из наблюдений четырёх следов протонов и четырёх μ -частиц, обнаруженных на одной и той же пластинке. На этом графике отложено число зёрен, приходящихся на единицу длины следа, в зависимости от значений остаточного пробега. Средние значения для следов одного типа показаны сплошными линиями. Отношение масс обоих типов частиц может быть выведено путём сравнения значений остаточного пробега, при которых плотности зёрен одинаковы. Полученный таким образом результат равен

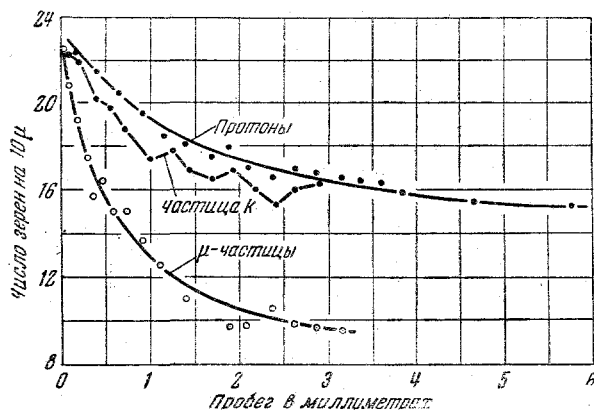


Рис. 10. Зависимости плотность зёрен — пробег для частицы k , протонов и μ -частиц.

$m_\mu = (220 \pm 20) m_e$. Используя аналогичные методы, мы оценили массу частицы k . Результаты измерений представлены на рис. 10. На этом графике показаны средние значения плотности зёрен в следах четырёх μ -мезонов и четырёх протонов, а также соответствующие результаты для частицы k . Все рассматриваемые следы были зарегистрированы на одной пластинке.

В таблице I даны значения массы частицы k , полученные путём сравнения плотности зёрен в следе этой частицы, со средней кривой для протонов. Все полученные таким образом значения являются независимыми, и среднее из них равно $m_k = (1080 \pm 160) m_e$. Пределы указанной выше ошибки выведены следующим образом. Мы сравнивали плотность зёрен в следах четырёх отдельных протонов со средней кривой для тех же частиц (см. рис. 9) и получили таким образом некоторое число независимых значений для кажущейся массы каждой из этих частиц. Распределение этих значений позволяет нам вычислить «вероятную ошибку», связанную с массой, определённой

то наблюдениям над любым данным следом, и выразить её в процентах от кажущейся массы частицы. Затем предполагается, что относительная ошибка для вычисленной массы частицы k имеет то же самое значение. Изучая с помощью ранее описанных методов⁴ рассеяние частиц на небольшие углы, мы определили также массу m_k и получили значение $m_k = (1800 \pm 400) m_e$. Если истинное значение массы частицы равно $1080 m_e$, то вероятность того, что значение, полученное при наблюдении рассеяния, будет равно или будет больше $1800 m_e$, составляет $1/4$. Вследствие больших статистических флуктуаций, характерных для явления рассеяния, мы считаем более достоверными

Таблица I

Отношение m_p/m_k (т. е. массы протона к массе частицы k), полученное путём подсчёта плотности зёрен

Отдельные независимые значения m_p/m_k :					
1,77	1,49	1,64	2,17	1,79	1,32
1,71	1,27	1,69	2,13	1,55	
Среднее значение 1,70; $m_k = (1080 \pm 160) m_e$					

измерения, основанные на подсчёте зёрен. Из этих наблюдений кажется очевидным, что истинное значение m_k лежит между 700 и $1800 m_e$, и мы считаем весьма вероятным, что величина этой массы существенно меньше массы протона. Действительно, на рис. 10 видно, что каждая отдельная точка, дающая плотность зёрен в следе k при некотором значении остаточного пробега лежит ниже соответствующих точек для каждого из четырёх протонов.

Расщепление B

Следы c и d — двух частиц, испущенных из точки B , соответствуют протонам или более тяжёлым частицам, которые образуются, по нашему мнению, в результате расщепления, вызванного частицей t . Эта частица, проходя через эмульсию, испытывала частое рассеяние, что указывает на то, что она обладала малой скоростью. Результаты наблюдений согласуются с предположением, что она достигает конца своего пробега в точке B . Единственной известной медленной заряженной частицей, способной вызвать расщепление типа звезды B , является π^- -частица^{6,8}. Поэтому мы предполагаем, что в точке A был создан отрицательный мезон с массой $286 m_e$, который, достигнув конца своего пробега, вызвал расщепление B .

Превращение А

Для того чтобы объяснить превращение А мы произвели детальное исследование следов испущенных частиц. Из двух следов *a* и *b* первый имеет длину в эмульсии, большую 2000 μ , и оканчивается на поверхности, а второй имеет длину 116 μ и оканчивается на стекле. Плотности зёрен в обоих следах равны, в пределах, определяемых статистическими флуктуациями.

Средняя плотность зёрен в длинном следе *a* равна 49,0 зёрен на 100 μ , т. е. в 2,17 раза больше значения, отвечающего минимуму ионизации для частицы с зарядом *e*. Так как мы не допускаем существования дробных значений элементарного заряда, то мы приходим к выводу, что обе частицы, образовавшие следы *a* и *b*, обладали зарядом, равным *e*. Для того чтобы определить возможные значения

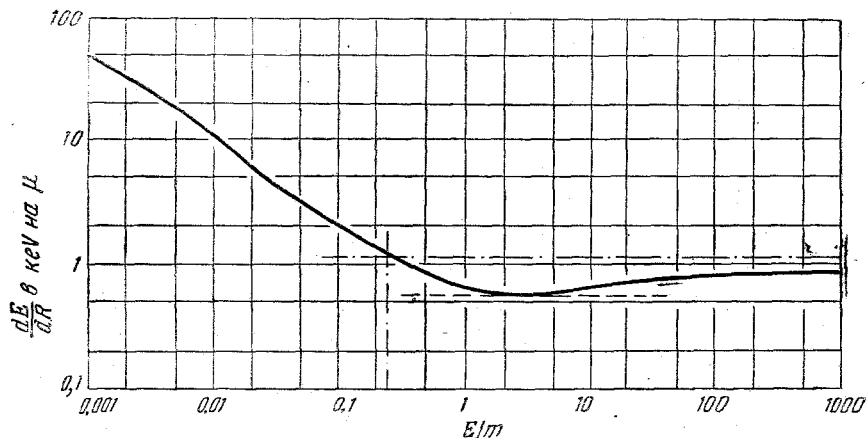


Рис. 11. Зависимость величины потери энергии частицы с зарядом *e* от отношения E/m , где E — кинетическая энергия, а m — масса частицы; обе величины измерены в MeV.

энергии частиц, образовавших следы *a* и *b*, мы вычислили из формулы Галперна и Холла⁹ изменение удельной ионизации частицы, обладающей зарядом *e*, в зависимости от энергии, предполагая, что атомный состав новой эмульсии идентичен с атомным составом пластинок Илфорд С2. Используемая нами формула является модификацией формулы Блоха. Она применяется к частицам, движущимся в твёрдой среде, и даёт результаты, находящиеся в хорошем согласии с опытом для частиц малой энергии. Полученные результаты приведены на рис. 11. На графике удельная ионизация отложена как функция величины E/m , где E — энергия, а m — масса частицы, причём обе величины измерены в MeV. На рис. 11 мы определили возможные значения энергии частиц *a* и *b*, соответствующие наблюдаемым плотностям зёрен в следах, предполагая

последовательно, что частицы представляют собой протоны, π -мезоны μ -мезоны или электроны. Полученные результаты собраны в таблице II. Превращение, вызванное в A частицей k , может быть объяснено двумя способами. Мы можем предположить либо что частица была захвачена ядром, либо что она спонтанно распалась. Воспользовавшись измеренными значениями массы частицы, можно, исходя из закона сохранения массы и энергии, предположить, что в конце своего пробега в эмульсии частица была захвачена ядром, что привело к испусканию двух протонов большой энергии и π -частицы.

Таблица II

Значения энергии и импульса частицы, создающей след α , выведенные из наблюдаемых плотности зёрен и рассеяния при различных предположениях о массе частицы

Род частицы		Протон	π -мезон	μ -мезон	Электрон
Энергия в MeV	а) Меньше энергии, отвечающей минимуму ионизации . . .	235 ± 95	37 ± 13	27 ± 11	$0,13 \pm 0,05$
	б) Больше энергии, отвечающей минимуму ионизации				>1000
Импульс в MeV/c	а) Меньше импульса, отвечающего минимуму ионизации	700 ± 160	109 ± 22	80 ± 15	$0,4 \pm 0,1$
	б) Больше импульса, отвечающего минимуму ионизации				>1000
	в) Из наблюдений над рассеянием	245 ± 40	113 ± 18	100 ± 16	68 ± 11
	г) Из баланса импульсов	98 ± 5	98 ± 5	98 ± 5	98 ± 5

Однако почти наверное освобождение в ядре такого большого количества энергии приведёт к испарению многих нуклонов (процесс, обычно наблюдаемый на пластинках, подвергнутых действию космического излучения). Таким образом, два протона большой энергии будут представлять собой лишь две компоненты сложной звезды (следует отметить, что мы не можем предположить, что частица k была захвачена одним из редких ядер тяжёлого водорода, содержащегося в желатине. При таком взаимодействии алгебраическая сумма зарядов двух начальных частиц должна быть равна 0 или $2e$, а алге-

браическая сумма зарядов вновь образованных частиц равна e или $3e$). Ниже мы увидим, что имеются ещё другие возражения, не позволяющие принять гипотезу о том, что следы a и b были образованы протонами или более тяжёлыми ядрами с зарядом e .

Из приведённых рассуждений следует, что если мы будем описывать превращение, используя частицы, существование которых уже установлено, то мы должны приписать следы a и b либо электронам, либо π - или μ -мезонам. Рассматривая первую из этих возможностей, мы должны предположить, что электроны обладают энергией, большей, чем энергия, соответствующая минимальной ионизации, а именно, большей 1000 MeV. Наблюдаемой ионизации соответствует нижний предел энергии, равный 300 KeV. Частица с такой энергией имела бы пробег в эмульсии, равный всего лишь 100 μ и испытывала бы частое рассеяние. Поэтому предположение, что частицы a и b были электронами, не согласуется с законом сохранения энергии и может быть отброшено. Таким образом, остаётся решить вопрос, образованы ли следы π - или μ -мезонами.

Если частицы a и b были мезонами, то для того, чтобы соблюдался закон сохранения массы и энергии, мы должны предположить, что их кинетические энергии равнялись 27 MeV или 37 MeV, соответственно для случая μ -или π -мезонов (см. рис. 11). В любом случае очень трудно согласовать наблюдения с предположением, что частицы были испущены в результате освобождения в ядре энергии, соответствующей массе покоя частицы k . Поэтому мы вынуждены рассмотреть возможность объяснения наблюдений спонтанным распадом этой частицы.

Предположение о спонтанном распаде k -частицы

Изучая предположение о том, что превращение в A соответствует спонтанному распаду частицы k , мы должны выяснить, каковы относительные направления движения трёх испущенных частиц. Для этой цели необходимо определить усадку эмульсии, т. е. отношение S толщины эмульсии во время экспозиции пластинки к её толщине после проявления, фиксации и просушки. Мы измерили эту величину, исследуя следы α -частиц, образованных в эмульсии случайными радиоактивными загрязнениями. Среди таких «звёзд» некоторые можно опознать как созданные атомом радиотория, из которого вылетает α -частица тория C' . Усадка измерялась путём определения длин проекций соответствующих следов на поверхности эмульсии и их кажущихся углов «входа». Значение найденной таким образом усадки равнялось $S = 2,7 \pm 0,1$. Зная значение S , в благоприятных случаях можно определить первоначальное направление следа в эмульсии до проявления с точностью порядка 1° . Это можно сделать, наблюдая кажущийся угол «входа» частицы и направление проекции её следа на плоскости, определяемой поверхностью эмульсии. С помощью этих методов было обнаружено, что первоначальные напра-

ления движения трёх частиц были компланарны. Отклонение направления движения любой частицы от плоскости, определяемой направлениями движений двух других частиц, меньше чем 4° . Ошибка, с которой производилось это определение, обусловлена главным образом тем обстоятельством, что длина следа t невелика и что частица, образующая его, обладала малой скоростью и часто испытывала рассеяние. Углы между направлениями движения частиц в общей плоскости показаны на рис. 12. Наблюдённая компланарность является основанием для предположений, что три частицы возникают в результате спонтанного распада k -частицы в конце её пробега в эмульсии, что они являются единственными продуктами её распада и что при этом распаде не происходит испускания нейтральных частиц, которые

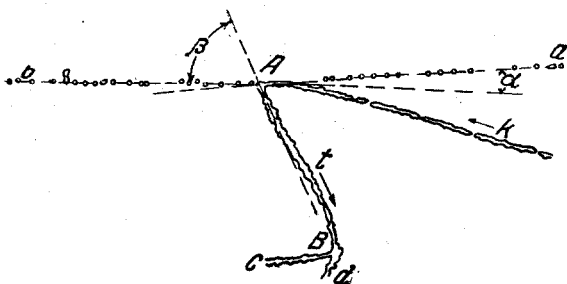


Рис. 12. Воспроизведение явления, изображённого на рис. 8, выполненное с помощью проекционного микроскопа. Действительные углы α и β , измеренные, в общей для всех трёх следов плоскости, равны $\angle \alpha = 9,8^\circ$; $\angle \beta = 76,6^\circ$.

ускользают от наблюдения. Отсюда следует, что векторная сумма импульсов трёх частиц должна быть равна нулю. Если мы правильно приписываем след t π^- -частице, то из наблюдаемого пробега, равного 45μ , следует, что кинетическая энергия выброса равнялась $1,04 \text{ MeV}$. Соответствующее значение импульса частицы равно $17,5 \text{ MeV}/c$. Далее из наблюдаемых направлений движения определялись импульсы частиц, создающих следы a и b . Они оказались равными 98 ± 5 и $104 \pm 5 \text{ MeV}/c$ соответственно. Эти значения следует сравнивать со значениями, соответствующими электронам и мезонам, приведёнными в таблице II и выведенными из наблюдаемой плотности зёрен в следах. Мы видим, что значения, указанные в таблице II для импульсов двух частиц, в предположении, что эти частицы являются электронами, во много раз больше. Отсюда следует, что баланс импульсов далеко не соблюдается, если приписать следы a и b либо протонам, либо электронам. Кроме того, значения импульсов, выведенные из наблюдений над рассеянием частиц, не согласуются с результатами, полученными из подсчёта зёрен, если предположить, что эти частицы являются либо электронами, либо протонами (см. таблицу II).

Согласие между рядом значений для мезонов является поразительным и служит сильным доводом в пользу предположения о спонтанном распаде k -частицы.

Заметим, что если полученный результат рассматривать как случайный, то такая случайность осуществилась в результате крайне редкого совпадения таких несвязанных между собой характеристик, как компланарность направлений движения частиц, пробег частицы t и удельная ионизация, создаваемая частицами, образовавшими следы a и b . Значения импульсов частиц, образующих следы a и b , определённые тремя различными методами, согласуются в пределах ошибок измерений с предположением о том, что имел место спонтанный

Таблица III

Определение массы частицы k для двух предполагаемых схем распада

(1) $k \rightarrow \pi^- + \pi^+ + \pi^0$			
	След a	След b	След t
Частица	π^-	π^+	π^0
Масса покоя в m_e	286	286	286
Энергия в m_e	61	64	2
$m_k = 985 m_e$			
(2) $k \rightarrow \pi^- + \mu^+ + \mu^-$			
	μ^-	μ^+	π^-
Частица	μ^-	μ^+	π^-
Масса покоя в m_e	212	212	286
Энергия в m_e	76	81	2
$m_k = 869 m_e$			

распад k -частицы, в результате которого образовались либо μ -мезоны, либо π -мезоны. Мы можем произвести дальнейшую проверку наших предположений, вычисляя значения массы покоя частицы k , которые соответствуют двум различным предположениям. Полученные результаты приведены в таблице III. (При вычислении энергии частиц, образующих следы a и b , предполагается, что след t образован π^- -частицей с импульсом $17,5 \text{ MeV/c}$; зная относительные направления движения трёх испущенных частиц, можно определить импульсы остальных двух частиц, а следовательно, и энергии, соответствующие какому бы то ни было принятым массам).

Из таблицы III видно, что предположение о двух μ -мезонах даёт для массы покоя k -частицы значение $869 m_e$, а предположение о двух π -мезонах — значение $985 m_e$. Если предположить, что при распаде возникают различные частицы, а именно, один π^- и один μ^- -мезон, то получается промежуточное значение, равное примерно $925 m_e$. Вследствие ошибок в прямом определении величины m_k этот результат не позволяет решить вопрос о схеме распада. Если попытаться объяснить рассмотренное нами превращение с помощью ранее известных частиц, то возможны четыре варианта интерпретации природы частиц, образующих следы a и b . Они схематически рассмотрены в таблице IV.

Случай 3 в таблице IV наименее вероятен по следующим причинам. Если след a принадлежит π -мезону, то мы можем подсчитать импульс

и плотность зёрен, которых мы можем ожидать в следе b . Таким образом, мы получаем значение 34 зерна на 100 микрон вместо наблюдаемого значения $51,0 \pm 6,0$. С другой стороны, в случае 4, когда след a образован μ -мезоном, вычисленная плотность зёрен для следа b равна 64. Эта величина отличается от наблюдаемой только на два стандартных отклонения. Наблюдаемые плотности зёрен лучше всего согласуются с предположением, что обе частицы одного типа. Наблюдения над рассеянием частицы, образующей след a , находятся в лучшем согласии с предположением, что эта частица является скорее π -мезоном, чем μ -мезоном (см. таблицу II), но полученные

Таблица IV

Сравнение подсчитанных и наблюдаемых значений плотности зёрен в следе b при различных предположениях о природе частиц, образующих следы a и b

Длина следа в микронах	Число зёрен	Плот- ность зёрен	Предполагаемые частицы			
			1	2	3	4
След a 2100	1025	$49 \pm 1,5$	π	μ	π	μ
След b 116	59	$51 \pm 6,0$	π	μ	μ	π
Вычисленная плот- ность зёрен в следе b			45	45	34	64
(Значения плотности зёрен даны в зёрнах на 100 микрон)						

результаты опять не могут однозначно решить вопрос о природе частиц. Мы можем объединить этот результат и результаты, полученные при определении масс по счёту зёрен, утверждая, что имеются некоторые доказательства в пользу того, что три распадные частицы являются π -мезонами; однако при этом нельзя исключить возможность распада на один π - и два μ -мезона или два π - и один μ -мезон.

Вероятность наложения несвязанных явлений

В свете анализа, произведённого в предыдущих разделах, мы можем вернуться к первоначальному предположению о том, что это явление не следует рассматривать как случайное наложение следов. Недостаток точности, с которой определится масса частицы k , не позволяет нам исключить возможность того, что частица обладает массой протона, хотя результаты, полученные при подсчёте зёрен, делают эту возможность мало вероятной. Предположим, что протон,

не связанный с частицами, образующими другие следы, оканчивает свой пробег в точке A . Даже при этом предположении наблюдаемое явление очень трудно объяснить обычным образом. В нашей лаборатории наблюдалось много случаев испускания π^- -частиц в звёздах⁸. Однако в рассматриваемом случае мы имеем ядерное взаимодействие, при котором испускаются два мезона большой энергии. Это ядерное взаимодействие не сопровождается испусканием медленных протонов и α -частиц, что требует своего объяснения. Аналогичная трудность возникает, если мы предположим, что частица, образовавшая один из следов a или b , достигает A и вызывает превращение. Если, с другой стороны, следы c и d , расходящиеся из звезды B , соответствуют несвязанному расщеплению, вызванному, например, γ -квантом, то мы можем предположить, что след t вызван протоном. В этом случае мы встречаемся с трудностями, связанными с объяснением особенностей звезды A , которая при этом предположении должна быть образована медленной заряженной частицей. Возникающие при этом трудности были обсуждены в предыдущем параграфе.

Изложенные соображения являются ещё одним доводом в пользу первоначального предположения, что все следы, показанные на микрофотографии, представляют собой последовательность связанных процессов.

Связь между изложенными результатами и другими наблюдениями

Если частица, обладающая элементарным зарядом, испытывает спонтанный распад, то согласно закону сохранения заряда число распадных частиц с зарядом e должно быть нечётным. С этой точки зрения знак заряда первичной частицы может быть либо положительным, либо отрицательным. Если частицы, образовавшие следы a и b , обладают противоположными по знаку зарядами, то первичная k -частица должна быть заряжена отрицательно. Единственная другая возможность заключается в том, что обе эти частицы заряжены положительно. В этом случае частица k также заряжена положительно. Поэтому возможно, что наши наблюдения соответствуют распаду положительно заряженных частиц с массой, примерно равной $900 m_e$, и что в наблюдениях Лепринс-Ринге² частицы с той же массой, заряженные отрицательно, захватываются ядром; при этом образуется звезда и испускается π^- -частица.

Рочестер и Бутлер опубликовали фотографию, полученную в камере Вильсона, которая соответствует, повидимому, спонтанному распаду нейтральной частицы с массой около $900 m_e$ на две противоположно заряженные частицы, масса покоя которых равна примерно $300 m_e$. Поэтому мы решили рассмотреть возможность того, что процесс распада состоит из двух этапов, именно, испускания π^- -частицы малой энергии и последующего распада возникшей нейтральной частицы. При этом, однако, необходимо предположить, что

нейтральная частица имеет время жизни порядка 10^{-14} сек. С другой стороны, нейтральная частица в результате отдачи удалится от первоначальной точки распада, и поэтому две заряженные частицы, в которые она превращается, возникнут в точке, удалённой от начала следа π -частицы. Отсюда следует, что мы не можем отождествить постулированную нестабильную нейтральную частицу с частицей, доказательство существования которой дано в опытах Рочестера и Бутлера. В заключение мы рассмотрим возможную связь между нашими результатами и результатами, сообщёнными Братом и Петерсом², которые получили доказательства существования частиц с массой около $800 m_e$, названных τ -мезонами. Отличительной чертой их опытов является то, что эти мезоны не образуют регистрируемых вторичных частиц в конце своего пробега. Возможно, что при распаде этих частиц также возникают три заряженных мезона, но что при этом превращении имеет место значительно более равномерное распределение кинетической энергии, чем в наблюдаемом нами случае. Отсюда следовало бы, что в эмульсиях Иلفорд С2 продукты распада обычно ускользают от наблюдения. Если эта точка зрения правильна, то мы должны рассматривать обнаруженный нами случай как редкий пример обычной схемы распада этих мезонов, случайно позволивший нам произвести детальный анализ этого явления. Если это так, то τ -мезон Брата и Петерса, регистрируемый с помощью эмульсии, чувствительной к электронам, должен образовывать следы трёх мало ионизирующих частиц, направления движения которых компланарны.

Замечание, добавленное при корректуре

Когда эта статья была написана, доктор Петерс сообщил нам, что он и доктор Брат наблюдали в эмульсии Иلفорд С2, экспонированной на высоте 27 000 м, три следующих случая. Частица, массу которой они считают примерно равной массе их τ -мезонов, повидимому, останавливается и испускает частицу меньшей массы, которая вызывает в конце своего пробега ядерное расщепление. Пробеги вторичных частиц равны в этих трёх случаях 20, 25 и 45 μ соответственно. Авторам не были известны наши результаты, когда они сообщили нам, что их наблюдения, возможно, соответствуют спонтанному распаду тяжёлых мезонов. Согласно их описанию эти явления в точности соответствуют тем, которых следует ожидать в эмульсии С2 в результате спонтанного распада тяжёлых частиц постулированного нами типа: частицы с малой удельной ионизацией не регистрируются ильфордовскими пластинками.

Наблюдения Петерса и Брата являются, повидимому, дальнейшим доказательством предположения, что описанные наблюдения не вызваны случайным наложением следов. Они свидетельствуют также о том, что в ближайшем времени будут найдены дальнейшие примеры, которые позволят произвести детальный анализ.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Berriman, Nature, **162**, 992 (1948).
 2. Leprince-Ringuet, C. R. **226**, 1897 (1948); Rochester and Butler, Nature **160**, 855 (1947); Bradt and Peters, Report to the Bristol Symposium, 1948 (в печати); Alichanian, Alichanov and Weissenberg, J. Exp. and Theoret. Phys. USSR **18** 301. (1948) и др.
 3. Camerini, Muirhed, Powele and Ritson, Nature **162**, 433 (1948).
 4. Goldshmidt-Clermont, King, Muirhed and Ritson, Proc. Phys. Soc. **61**, 138 (1948).
 5. Lattes, Occhialini and Powele, Proc. Phys. Soc. **61**, 173 (1948).
 6. Serber, Report of Solvay Conference for 1948.
 7. Dilmorth, Occhialini and Payne, Nature **162**, 102 (1948).
 8. Occhialini and Powele, Nature **162**, 168 (1948).
 9. Halpern and Hall, Phys. Rev. **73**, 447 (1938).
 10. Livingston and Bethe, Rev. Mod. Phys. **9**, 263 (1937).
 11. Camerini and Lattes (частное сообщение), см. также Поуэлл и Оккиалини, УФН **35**, 213, 384 (1948).
-