

О РАБОТАХ ПАМИРСКОЙ ЭКСПЕДИЦИИ ФИАН 1944 ГОДА ПО ИЗУЧЕНИЮ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ¹⁾

Д. В. Скобельцын

Доклад, который по поручению Дирекции Института я должен сегодня сделать, является своего рода кратким отчётом об экспедиционных работах, проведённых лабораторией атомного ядра ФИАН в 1944 г. в горах Памира, на высоте 3860 м.

Работы эти имели целью решение ряда актуальных задач по исследованию космической радиации на больших высотах.

Широко известно, какое влияние оказало изучение космических лучей за последние 15 лет на эволюцию основных идей в области физики атомного ядра. В ряду общеизвестных крупнейших открытий 30-х гг. открытие Андерсоном позитронов в составе космических лучей сыграло, возможно, ведущую роль, поскольку оно повлекло за собой целый ряд новых замечательных исследований, приведших к открытию ряда новых явлений (в частности, например, искусственной радиоактивности), и в особенности поскольку оно оказало столь решающее влияние на эволюцию некоторых наших основных представлений о природе и процессах превращения элементарных частиц. Существенно большее значение в теоретическом отношении имело, однако, открытие мезотрона (или мезона), приведшее к ещё более глубокому изменению этих представлений.

Идеи мезонной теории дали совершенно новое направление теоретической мысли в области учения об элементарных частицах и силовых полях и привели к замечательному синтезу (пока, правда, быть может только гипотетическому), объединившему в одной картине столь разнородные, казалось бы, явления, как космическое излучение, с одной стороны, и ядерные силовые поля, являющиеся источниками внутриядерной энергии, — с другой.

Я не имею возможности и не предполагаю говорить о тех обобщающих идеях и тех весьма замечательных построениях, которые за последние годы разрабатываются на этой основе теоретиками. Имея

¹⁾ Доклад, читанный 12 июня 1945 г. на торжественном заседании Учёного Совета Физического Института Академии Наук СССР имени П. Н. Лебедева (ФИАН), по поводу 220-летия Института.

в виду предмет моего доклада, мне хотелось бы, однако, особенно подчеркнуть ту глубокую, лежащую в самой основе явлений родственную связь, которая, как можно предполагать, объединяет свойства космического излучения, с одной стороны, и природу процессов, характерных для ядерного вещества, с другой стороны.

Следует особенно отметить, что хотя концепции мезонной теории возникли одновременно с самим открытием мезона, т. е. уже почти десять лет тому назад, однако, в полной мере роль ядерных процессов в явлениях космического излучения начинает выясняться лишь в самое последнее время в связи с некоторыми экспериментальными исследованиями, выполненными в Америке незадолго до начала войны.

Исследования, о которых я сейчас говорю (имея в виду наблюдения М. Шейна, выполненные на высоте 28 км над уровнем моря), заставляют по-новому поставить вопрос, во-первых, о происхождении космического излучения, наблюдаемого в атмосфере земли, и, во-вторых, о природе первичного космического излучения, которое заполняет космическое пространство. В том разделении, которое я сейчас подчёркиваю, с одной стороны, космическое излучение, т. е. частицы высокой энергии, которые мы наблюдаем в атмосфере земли, а, с другой, — первичное излучение в пустом космическом пространстве, состоящее из других частиц, в этом разделении и заключается то существенно новое, что характерно для ситуации, возникшей в связи с неожиданными результатами, полученными в Америке, о которых я только что упомянул.

Если эти результаты верны, то мы неизбежно приходим к следующему положению вещей или во всяком случае к следующим гипотезам:

1. Источником всего того космического излучения, которое мы в основном наблюдаем в нижних слоях атмосферы, является стратосфера или точнее процессы, вызываемые в самых верхних её слоях первичным излучением, которое проникает из космического пространства и практически почти нацело поглощается уже в этих самых верхних — граничных слоях атмосферы.

2. Процессы, приводящие к генерированию в стратосфере частиц, наблюдаемых нами на уровне моря, являются по существу ядерными процессами, т. е. процессами превращения атомных ядер.

3. Частицами, несущими из космического пространства ту колоссальную энергию, которая сразу же после проникновения в стратосферу трансформируется в результате этих процессов, являются хорошо известные нам частицы, из которых построены атомные ядра. Так как имеются прямые экспериментальные данные, говорящие за то, что эти частицы обладают положительным зарядом, то естественнее всего предположить, что такими частицами, из которых состоит первичное космическое излучение, являются протоны. Это, следовательно, те же частицы, которые экспериментаторами-физиками используются как снаряды для бомбардировки атомных ядер и для ускорения которых при-

ходится соорудить сложные, дорогостоящие и громоздкие установки — циклотроны и т. п.

Однако, энергия, накопленная протонами первичного космического излучения, где-то в космическом пространстве в среднем в тысячи раз превосходит ту энергию, которая может быть в настоящее время сообщена этим частицам в циклотроне.

В связи с этим, и процессы, вызываемые частицами первичного космического излучения, по самой природе своей существенно отличаются от тех процессов расщепления атомных ядер, которые мы можем вызывать в лабораторных условиях, пользуясь ядерными снарядами, полученными искусственным путём. Если частицы первичного космического излучения, воздействующие на атомные ядра, с которыми они сталкиваются в стратосфере, как можно предполагать, тождественны с обычными хорошо известными нам протонами, то частицы, возникающие в результате этого воздействия, напротив, являются такими новыми частицами с весьма своеобразными свойствами, которые мы не можем получать искусственным путём и которые в обычных условиях лабораторного эксперимента до последнего времени физиками не наблюдались. Это мезоны или мезотроны — недолговечные, неустойчивые частицы, существование которых, если они находятся в состоянии покоя, длится ничтожное время (порядка миллионной доли секунды) и которые затем самопроизвольно распадаются, превращаясь в пару других частиц — электрон и нейтрино.

Мы имеем возможность изучать свойства мезонов в лабораторных условиях, проводя наблюдения на уровне моря, и в этом направлении достигнуты уже существенные успехи. Однако, в настоящее время в центре внимания стоит вопрос о механизме и природе явлений, приводящих к возникновению мезонов. Наблюдать эти явления зарождения мезонов на уровне моря мы не можем.

Согласно представлениям мезонной теории, мезоны могут излучаться ядерными силовыми полями совершенно так же, как атомы света — фотоны — излучаются полями электромагнитными. Можно предполагать, что налицо весьма глубокая внутренняя аналогия между этими двумя явлениями.

Процессы испускания мезонов атомными ядрами не наблюдаются в обычных условиях потому, что для осуществления их необходима затрата весьма высокой энергии порядка сотен миллионов электрон-вольт, которая искусственным путём, в условиях обычного лабораторного эксперимента, в настоящее время получена быть не может. Средняя энергия частиц первичного космического излучения в десятки или даже в сто раз превышает эту энергию. Первичное космическое излучение является весьма эффективным возбудителем таких процессов испускания мезонов — частиц, которые затем и наблюдаются нами в нижних слоях атмосферы в составе так называемой проникающей компоненты космической радиации. Совершенно несомненно, что быстрые протоны с энергиями порядка миллиардов электрон-вольт, а также и сопутствующие им, вероятно, нейтроны, в силу их способ-

ности весьма активно взаимодействовать с атомными ядрами, вызывают и другие многообразные процессы превращения атомных ядер, которые и наблюдаются на больших высотах в атмосфере.

Хотя в некоторых случаях мы здесь имеем дело с явлениями, механизм которых лишь в количественном отношении отличается от механизма обычной ядерной реакции, однако, в других случаях наблюдаются совершенно своеобразные явления и сложные ядерные превращения, природа которых остаётся загадочной.

Известны, например, наблюдаемые в камерах Вильсона и методом фотографических пластинок звездообразные расщепления или звездообразные ливни, состоящие из нескольких медленных ядерных частиц — протонов или α -частиц — продуктов распада ядра, выбрасываемых из одного общего центра с энергиями порядка обычных ядерных энергий. В этом случае, повидимому, мы имеем дело с обычным характерным для любой ядерной реакции механизмом испускания частиц, по существу аналогичным механизму отделения молекул от поверхности испаряющейся жидкости.

Как известно, согласно концепциям, развитым Бором, ядро можно уподобить капельке квантовой жидкости. Попадание ядерного снаряда в такую капельку вызывает её нагревание. Остывание этой капельки до температуры абсолютного нуля (в ядерном смысле) может идти как за счёт электромагнитного излучения, так и за счёт испарения, т. е. испускания ядерных частиц. Отличие ядерных расщеплений этого рода, вызываемых космическим излучением, от обычных ядерных расщеплений только количественное и связано с тем, что, вследствие существенно большей энергии бомбардирующего снаряда, температура, до которой нагревается ядро в результате его внедрения, существенно выше, чем при обычной ядерной реакции.

Если в данном случае отличие только количественное, то в других случаях, при ещё существенно больших энергиях, мы имеем дело с процессами повидимому совершенно иной природы, имеющими характер ядерных «взрывов», сопровождаемых выбрасыванием большого числа частиц весьма высокой энергии, в составе которых наряду с «тяжёлыми» ядерными частицами — протонами и нейтронами — обнаруживаются, возможно, также и мезоны.

Сейчас накоплен уже богатый материал наблюдений, полученный как фотографическим методом, так и методом камеры Вильсона, который показывает, что перед нами обширная новая область своеобразных явлений превращения атомных ядер, которой до последнего времени не было уделено достаточного внимания и изучение которой обещает совершенно исключительные возможности для решения некоторых фундаментальных проблем атомного ядра. Можно предполагать, что если бы удалось раскрыть во всей полноте механизм ядерных явлений, вызываемых космическим излучением на больших высотах, то тем самым был бы получен ключ к пониманию наиболее сокровенных тайн атомного ядра.

Осуществление подобной программы в полной мере представляет, однако, довольно отдалённую цель. Трудности её осуществления свя-

заны не только с тем, что для успешного разрешения задачи было бы необходимо проводить наблюдения в стратосфере, но также и с тем, что, пока что, экспериментаторы ещё недостаточно вооружены соответствующими техническими средствами исследования.

Если проводить некоторые исторические параллели, то положение вопроса о космической радиации и в особенности тех проблем, которые я сейчас затронул, можно, пожалуй, сравнить с положением, в котором физика атомного ядра находилась во времена открытия Резерфордом искусственного расщепления атомных ядер и наблюдения первых ядерных реакций. Хотя значение этих явлений можно было предугадывать уже тогда, но всё же те сведения, которые тогда можно было получить, и те представления, которые можно было построить, представляются нам сейчас примитивными, так же как примитивны, в сравнении с современными циклотронами и всей современной техникой, и те средства исследования, которыми располагал Резерфорд, когда он в 1919 г. впервые наблюдал вызванное искусственным путём превращение ядра азота.

Разработка новых методов исследования ядерных частиц — продуктов ядерных процессов, вызываемых космическим излучением, представляет на данном этапе весьма актуальную задачу. Этой задаче и были в значительной степени посвящены работы, проводившиеся в течение ряда последних лет лабораторией атомного ядра ФИАН.

Из того, что мной уже сказано, я полагаю ясно, что здесь в лабораториях Физического Института, в этом здании, можно было проводить только лишь подготовительную работу. Для того же, чтобы сколько-нибудь эффективно применить построенную аппаратуру к наблюдению самих явлений, необходимо было эту аппаратуру переносить в пункты, расположенные в горах на возможно большей высоте над уровнем моря. Это необходимо в силу того, что хотя в составе космического излучения, наблюдаемого на уровне моря, и имеются частицы весьма высоких энергий, однако, это такие частицы, которые по своей природе недостаточно активно воздействуют на атомные ядра.

Эти частицы не могут быть эффективным образом использованы как снаряды для бомбардировки ядерных мишеней. Частицы же, являющиеся такими естественными мощными ядерными снарядами, — протоны высоких энергий, имеются лишь в верхних слоях атмосферы. В связи с таким положением вещей Физический Институт им. П. Н. Лебедева уже с 1934 г. приступил к проведению ежегодных высокогорных экспедиций, которые с успехом проводили свои работы сначала (до войны) на Эльбрусе, а в прошлом — 1944 г. — с меньшим успехом вблизи Мургаба в горах Памира.

Хотя высокогорные экспедиции и позволяют проводить наблюдения в сравнительно хороших условиях на высоте около 4000 м, а со значительно большими трудностями вплоть до высот, приближающихся даже к 6000 м, однако, всё же эти высоты ещё недостаточны и отсюда возникает одна из основных трудностей проводимых экспериментов — явления, изучению которых они посвящены, происходят

очень редко — частицы, которые необходимо выделить из общего потока частиц космического излучения, составляют ничтожную часть этого потока.

Другая специфическая трудность, которая также в значительной степени определяет особенности применяемой методики, связана с тем, что проникающая способность изучаемых частиц также очень мала в сравнении с проникающей способностью средних частиц космического излучения — частицы, являющиеся продуктом ядерных процессов, вызываемых космической радиацией, в основном сравнительно медленные, сильно-поглощаемые частицы.

Это их свойство, однако, и позволяет построить такую аппаратуру, которая давала бы возможность выделять их из общего потока частиц высокой энергии, составляющих основные компоненты космического излучения, и регистрировать отдельно от частиц, образующих эти компоненты.

Обычно для наблюдения ионизирующих частиц космического излучения применяются, наряду с камерами Вильсона, так называемые корпускулярные телескопы — такие устройства, которые отмечают прохождение частицы особым сигналом. Этот сигнал получается вследствие того, что прохождение частицы вызывает ионизационные импульсы в счётчиках Гейгер-Мюллера. Расположив надлежащим образом два или большее число счётчиков Гейгер-Мюллера и регистрируя только лишь совпадающие импульсы, в такой системе счётчиков можно выделять частицы в определённом более или менее точно заданном направлении.

Обычные корпускулярные телескопы отмечают прохождение любой частицы независимо от её ионизирующей способности. Существуют, однако, особые так называемые пропорциональные счётчики, которые позволяют отмечать только такие импульсы, которые превышают некоторую наперёд заданную величину.

Медленные и вследствие этого сильно поглощаемые частицы оказываются также и сильно ионизиющими. Так как частицы, составляющие «ядерные» ливни, являются такими сравнительно медленными сильно ионизирующими частицами, то для выделения их и могут быть с успехом использованы «пропорциональные» счётчики. Если заменить в корпускулярном телескопе обычные счётчики пропорциональными, то он и будет отмечать прохождение только таких производящих сильную ионизацию частиц, не регистрируя более быстрые частицы, составляющие преобладающий фон частиц космического излучения. При этом, меняя чувствительность счётчиков, можно произвольным образом отбирать частицы с большей или меньшей ионизирующей способностью. Хотя в принципе схема такого «пропорционального» телескопа весьма проста, однако, в действительности, осуществление его представляет довольно сложную техническую задачу. Такая схема и была впервые применена в лаборатории атомного ядра ФИАН В. И. Векслером. В течение ряда лет перед войной метод пропорционального телескопа разрабатывался им совместно с Н. А. Добротиным.

Весьма существенные новые успехи достигнуты в прошлом году при участии В. А. Хволеса.

Указанным авторам удалось разработать схему, которая позволяет осуществлять осциллографическую запись на фотоплёнке величины совпадающих импульсов, вызываемых прохождением одной и той же ионизирующей частицы последовательно через два пропорциональных счётчика. Так как по величине ионизирующей способности можно судить о скорости частицы, то, имея такую запись, можно определить потерю скорости, которую частица испытывает при прохождении через тормозящую пластинку, поставленную на её пути между двумя регистрирующими пропорциональными счётчиками. А получение этих данных в принципе достаточно для того, чтобы определить массу частицы и тем самым идентифицировать эту частицу. Как известно, именно этим методом Андерсоном, проводившим наблюдения с камерой Вильсона, помещённой в магнитное поле, и было установлено существование новых частиц — сначала позитронов, а затем и мезотронов.

Пропорциональный телескоп, снабжённый схемой, осуществляющей запись величины ионизационных импульсов, уже не является простым регистрирующим прибором, предназначенным только для счёта исследуемых частиц. Он является также прибором, предназначенным для анализа спектрального состава этих частиц.

На рис. 1 изображена схема расположения описанного устройства.

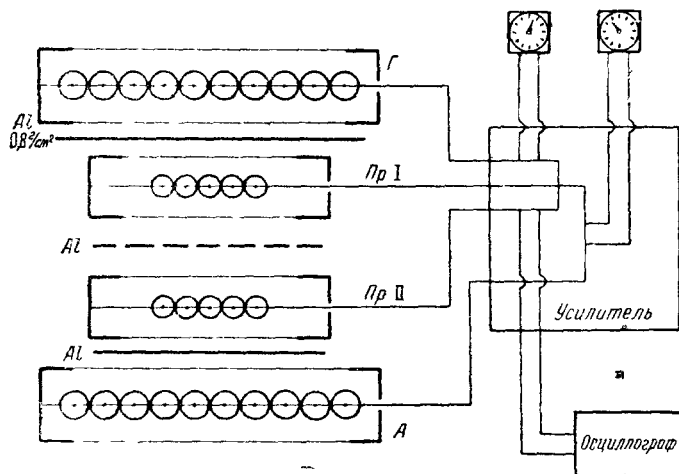


Рис. 1.

Здесь в разрезе показаны несколько рядов или групп счётчиков. Все счётчики, находящиеся в одном ряду или входящие в одну группу, соединены параллельно и тем самым объединены, образуя как бы

один счётчик большого размера. Только две средние группы составлены из пропорциональных счётчиков. Они-то и образуют в совокупности ту схему двойного пропорционального телескопа, о которой всё время шла речь.

Счётчики обычные — непропорциональные, расположенные в самом верхнем и в нижнем рядах, выполняют некоторую вспомогательную роль и о них, пожалуй, в видах сокращения времени я не буду говорить.

Схема предназначена прежде всего для того, чтобы считать сильно ионизирующие частицы, прошедшие через определённые комбинации расположенных рядами одна над другой и показанных на чертеже групп счётчиков.

Этот счёт производится особыми механическими нумераторами, так что число прошедших частиц отсчитывается по указателю прибора на циферблате, которым он снабжён. Такие нумераторы показаны в верхней части чертежа, справа. Один из них считает все те частицы, которые прошли через первые три ряда счётчиков (если идти сверху вниз) — тройные совпадения, а другой — только те из этих частиц, которые поглощаются в пластинке, отделяющей три верхние группы от нижней, и в эту нижнюю группу не попадают — так называемые антисовпадения.

Одновременно осциллографом, присоединённым, как показано на чертеже, производится запись величины импульсов, вызванных в двух — средних — пропорциональных счётчиках, о чём я уже говорил.

Описанный прибор дал возможность выделить определённую группу сильно ионизирующих частиц и определить её абсолютную интенсивность. Эта интенсивность, если её выразить в процентах от полной интенсивности космического излучения, оказывается очень малой.

В составе этой группы обнаружены, примерно, в равном числе как протоны, так и медленные мезоны. Обнаружение медленных мезонов имеет особое, принципиальное значение, поскольку эти мезоны, так же как и наблюдаемые в этих экспериментах протоны, могут возникать лишь где-то поблизости от регистрирующего их прибора. Появление их показывает, таким образом, что процессы генерирования мезонов происходят и на сравнительно небольших высотах, на которых проводились эти наблюдения.

Наконец, применение метода осциллографа дало возможность получить данные (пока что ещё не очень точные) также и о спектральном составе медленных частиц — об их скоростном спектре.

Что касается происхождения частиц, которые описанные устройства дали возможность наблюдать, и самого механизма процессов, в результате которых они возникают, то пока ещё нет возможности сказать об этом что-либо вполне определённое.

Как я уже и отметил, раскрытие этого механизма представляет довольно отдалённую цель, для достижения которой предстоит выполнить ещё очень большую работу и пройти длинный путь. Мы надеемся,

что вторая экспедиция на Памир, которую предполагается осуществить в ближайшие месяцы, позволит нам существенно продвинуться на этом пути.

Работы, о которых до сих пор шла речь, имели целью выделение и изучение таких частиц — продуктов ядерных процессов, вызываемых космическим излучением, энергия которых очень мала в сравнении со средней энергией частиц, составляющих это космическое излучение.

Значительное место в программе высокогорной экспедиции прошлого года заняли работы, посвящённые новой для нас тематике и направленные к изучению противоположной крайней области — области чрезвычайно больших энергий, таких энергий, которые на много порядков превышают среднюю энергию космических лучей.

Я уже отметил, что эта средняя энергия космического излучения в тысячу или в тысячи раз превышает энергии частиц, генерируемых в циклотронах.

Благодаря некоторой, если угодно, случайности, используя некоторые благоприятные возможности, которые нам предоставляет природа, мы в настоящее время можем передвинуться ещё значительно дальше вверх по шкале энергий и узнать кое-что о частицах сверхвысоких энергий, которые, хотя и в совершенно ничтожном числе, но всё же имеются, как мы сейчас знаем, в составе первичного космического излучения.

О каких энергиях идёт речь? Если преобладающая энергия в спектре космического излучения в тысячи раз превосходит энергии, характерные для радиоактивных явлений, то сейчас я имею в виду энергию, которая в свою очередь уже не в тысячу, а в десятки или сотни тысяч или даже в миллионы раз превосходит среднюю энергию самой космической радиации.

Если энергии частиц выражать в электрон-вольтах, то речь сейчас идёт о числах порядка пятнадцатой — семнадцатой степени десяти. Это колоссальная энергия. Простое указание, что энергия частицы выражается числом, равным 10^{15} — 10^{17} eV, ещё не даёт представления о её величине, т. е. нет подходящих и привычных эталонов для сравнения. Быть может следующее сопоставление может дать некоторое представление о этой величине.

В циклотронах удаётся получать токи частиц высокой энергии, интенсивность которых порядка микроамперов (в хороших циклотронах сейчас удаётся уже доводить силу этого тока даже и до значительно большей величины, порядка ста микроамперов).

Представим себе такой фантастический циклотрон, который позволил бы получить хотя бы весьма слабый ток порядка всего только одного микроампера, но при энергии частиц, равной 10^{17} eV, т. е. при энергии, равной той наибольшей энергии, которую по данным имеющихся наблюдений несут частицы космического излучения. Подсчитав, какова была бы мощность пучка частиц, выпущенного подобным циклотроном, мы убедились бы, что эта мощность равна

ста миллионам киловатт. Мощности, в действительности переносимые космическим излучением, наоборот, крайне малы, так как число частиц сверхвысокой энергии в потоке космического излучения совершенно ничтожно.

Быть может следует также прибегнуть к некоторым сравнениям для того, чтобы дать представление и о малости этого числа.

Пользуясь обычными корпускулярными телескопами нормальных размеров, мы имеем возможность наблюдать прохождение через телескоп многих десятков или даже сотен частиц космического излучения средней энергии в минуту. Но если бы мы попытались, расположив такой телескоп где-то на очень большой высоте, наблюдать непосредственно прохождение космической частицы с энергией, превышающей 10^{16} eV, то нам пришлось бы ждать сто лет или столетия для того, чтобы зарегистрировать прохождение через наш телескоп всего только одной такой частицы.

Несмотря на столь неблагоприятные условия, сейчас удаётся не только обнаруживать эти частицы, но и определить, сколько таких частиц приносится за единицу времени из космического пространства, а также изучать их спектр — распределение этих частиц по энергиям. Всё это оказывается возможным, благодаря тому, что такая космическая частица сверхвысокой энергии порождает в атмосфере колоссальное количество новых частиц. Следует оговорить, что я имею в виду не какую-либо частицу вообще, а частицы, способные создавать так называемые лавинные или каскадные ливни. Такими частицами являются электроны или фотоны.

Представляется несомненным, что либо такие частицы (электроны или фотоны) с энергиями порядка от 10^{14} до 10^{16} eV имеются уже в составе первичного космического излучения или же, что они генерируются с энергиями такого порядка уже в самых верхних слоях стратосферы, если первичное излучение однородно и если (как это можно предполагать, согласно тем данным, на которые я уже ссылался), оно состоит из протонов.

В процессе проникновения электронов или фотонов через атмосферу, в результате сочетания и многократного «каскадного» повторения, действия двух механизмов — тормозного излучения (вызываемого электронами) и образования пар — «электрон — позитрон» (за счёт поглощения фотонов), возникают лавины частиц.

Если первичная энергия превышает 10^{14} eV, то такие лавины, развиваясь во всей толще атмосферы, принимают гигантские размеры, разрастаясь до чрезвычайно мощных потоков из сотен тысяч или миллионов частиц, которые покрывают площадь порядка десятков тысяч квадратных метров. Эти гигантские атмосферные ливни были открыты Пьером Ожэ, и самое явление принято обозначать его именем.

Плотность потока частиц в таких ливнях Ожэ весьма велика. Эта плотность настолько велика, что если взять группу соединённых параллельно «пропорциональных счётчиков», о которых была речь (например, тех, которые изображены на схеме рис. 1), то, при воз-

действии на них ливня Ожэ, через поперечное сечение всей такой группы счётчиков пройдёт одновременно несколько частиц, что и будет отмечено появлением ионизационного импульса соответствующей величины.

Появление таких импульсов или ионизационных «толчков» будет наблюдаться отнюдь не один раз за сто лет, как это было бы, если бы счётчики сигнализировали о непосредственном прохождении первичной частицы, а несколько раз или десятки раз в час, так как сигнал, о котором идёт речь, будет получаться и в том случае, если путь первичной частицы (или точнее продолжение её пути) пройдёт и на значительном расстоянии от прибора, в пределах радиуса порядка ста метров — радиуса ливня Ожэ.

Регистрируя ливни Ожэ, мы получаем таким образом возможность использовать для улавливания весьма «дефицитных» частиц необычно высоких энергий площади порядка десятков тысяч квадратных метров.

Суждение о самих первичных частицах, на основе полученных таким способом данных, облегчается благодаря следующим простым соотношениям, которые легко получить, пользуясь теорией лавинных ливней. Как можно показать, радиус поперечного сечения ливня имеет определённую величину, не зависящую от энергии первичной частицы. Полное же число частиц в ливне, а следовательно, и плотность потока частиц в нём (число частиц на единицу площади) находятся в весьма простом соотношении с первичной энергией. При наблюдении на больших высотах число частиц в ливне, а следовательно, и плотность ливня приблизительно пропорциональны первичной энергии.

Меня чувствительность регистрирующих ливни пропорциональных счётчиков, можно отбирать ливни различной плотности, а, следовательно, соответственно и первичные частицы различных энергий. Таким способом можно изучить распределение по энергиям первичных частиц — спектр этих частиц.

Из того, что мной было сказано раньше, ясно, что импульсы в пропорциональных счётчиках могут быть вызваны как ливнями Ожэ, так и отдельными, сильно ионизующими тяжёлыми частицами. Для того, чтобы избавиться от влияния ливней, которые являются помехой в случае, если (как в схеме, показанной на рис. 1) желательно наблюдать отдельные частицы, приходится применять особые устройства.

Схема «антисовпадений», о которой я упомянул вскользь, говоря об установке, изображённой на рис. 1, применяется именно для этой цели. Если, наоборот, объектом наблюдения являются «ливни Ожэ» и желательно поэтому исключить действие отдельных тяжёлых частиц, то достичь этого можно ещё проще, расположив пропорциональные счётчики (или группы их) одну рядом с другой. Совпадающие импульсы в таких условиях будут вызываться только атмосферными ливнями и не могут быть вызваны отдельными частицами. Этим методом и были проведены на Памире наблюдения Л. Е. Лазаревой, под

руководством В. И. Векслера, результаты которых представлены кривой рис. 2.

Экспериментальная кривая — кривая распределения толчков по величине, позволяет получить два результата. Во-первых, она позволяет определить абсолютное число первичных частиц, приходящих из космического пространства. Эти числа показаны по оси ординат

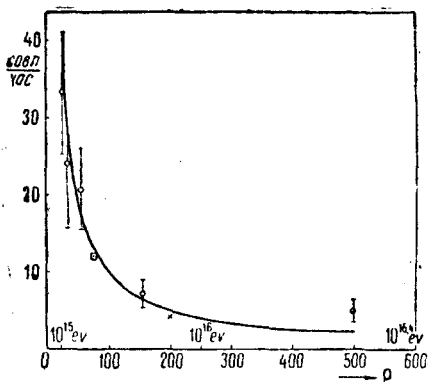


Рис. 2.

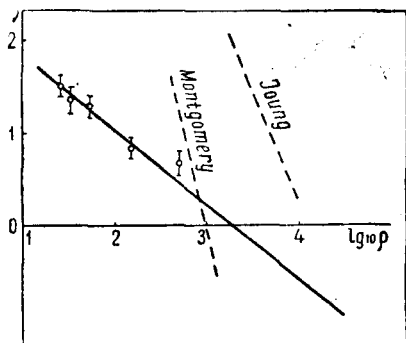


Рис. 3.

слева. Во-вторых, она даёт возможность судить и о том, как эти частицы распределены по энергиям, которые указывают числа, нанесённые по оси абсцисс. Таким образом, полученная кривая по существу есть кривая спектрального распределения первичных частиц.

График рис. 3 даёт ту же кривую, или кривую распределения «толчков» в логарифмическом масштабе. Кривая, изображённая на рис. 2, есть равнобочная гиперболa, которая в логарифмическом графике представлена прямой. Это означает, что распределение интенсивности в первичном спектре может быть с хорошим приближением дано степенной зависимостью.

Необходимо отметить, что эта кривая распределения ионизационных толчков, вызываемых ливнями, или соответствующая кривая распределения по энергиям (для данного интервала энергии) получена впервые и что закон распределения оказался не тем, какой можно было ожидать.

Следует обратить внимание на приведённые на рис. 3 пунктирные кривые, соответствующие данным обычных ионизационных камер. Здесь выбраны показания тонкостенных (в некотором условном смысле) камер, т. е. камер, не защищённых солидной, поглощающей космическое излучение, броней.

Можно было бы ожидать, что «толчки», наблюдаемые в таких камерах, отмечают прохождение ливней Ожэ. В таком случае пунктирные и сплошные прямые должны были бы совпасть. Тот факт, что, наоборот, они резко расходятся (расхождение здесь в сотни раз), показывает, что в случае одиночной ионизационной камеры дей-

ствуется какой-то иной «агент», вызывающий «толчки» (вероятнее всего тяжёлые частицы).

Таким образом, предосторожность, о которой я говорил, и которая сводится к тому, что наблюдаются не одиночные импульсы в отдельной камере, а совпадающие импульсы в двух соседних камерах, оказывается отнюдь не лишней.

Можно с полной уверенностью утверждать, что расхождение между показаниями обычных ионизационных камер и результатами применяемого нами нового метода — расхождение, имеющее определённое принципиальное значение, не является результатом какой-либо ошибки.

Здесь на рисунке 2 показаны крестиком данные, полученные на Памире (Л. Е. Лазаревой совместно с Л. Н. Беллом) совсем иным методом, который обещает различные существенно новые возможности для исследования явления, но о котором за недостатком времени говорить мне не придётся. Речь идёт о наблюдении совпадений, вызываемых ливнем Ожэ в системе (рис. 4), составленной из шести, однако, уже не пропорциональных, а обычных счётчиков Гейгер-Мюллера. Можно показать, что полученное этим способом и отмеченное на диаграмме (рис. 2) крестиком значение, так хорошо укладывающееся на полученную экспериментальную кривую, вместе с тем находится в превосходном согласии со всей большой совокупностью имеющихся сейчас данных, полученных как самим Ожэ, так и другими наблюдателями, использовавшими его метод исследования.

Изложенные результаты привели к существенному уточнению и углублению данных о количественных закономерностях, характерных для ливней Ожэ.

Однако, выполняемые в экспедиционных условиях высокогорные наблюдения в значительной степени имеют характер разведки в совершенно ещё новой неисследованной области и должны также дать указания о новых явлениях. С таким новым явлением и пришлось столкнуться при проведении наблюдений, о которых только что шла речь.

Если, как это можно предполагать, «атмосферные» ливни состоят из электронов и фотонов, т. е., если мы имеем дело с тем каскадным механизмом образования ливня, о котором была речь выше, то должно наблюдаться своеобразное усиливающее действие свинцовых фильтров соответствующей толщины, вводимых над расположением, регистрирующим ливни. Такое усиливающее действие связано с тем, что электроны и фотоны, входящие в состав ливня Ожэ в атмосфере в свинцовых экранах, поставленных на их пути, будут вызывать новые каскадные процессы, связанные с новым размножением лавинных частиц. И действительно, было обнаружено, что если покрыть пластинами свинца (толщиной в 1—1,5 см) обе расположенные одна

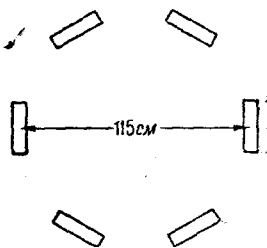


Рис. 4.

рядом с другой группы пропорциональных счётчиков, включённые в схему двойных совпадений, то число совпадений возрастает и при дальнейшем увеличении толщины свинца изменяется, как показывает кривая (рис. 5) с характерным «переходным» максимумом. Эта кривая является прекрасным подтверждением того, что налицо действительно

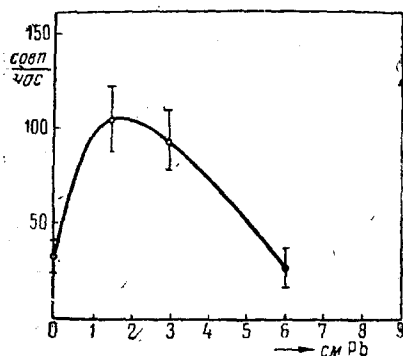


Рис. 5.

между счётчиками фильтра в 12 см свинца должно полностью устранить всякие совпадения, так как ни отдельные сильно ионизирующие частицы, ни лавинные ливни практически не могут проникать через такую толщю свинца.

В действительности, однако, было обнаружено, что около половины числа всех двойных совпадений, наблюдаемых за единицу времени при указанном расположении до введения свинцового поглотителя, остаются и после того, как этот поглотитель введён и счётчики разделены слоем свинца в 12 см.

Пока мы имеем возможность констатировать только лишь этот факт. В задачи ближайшей экспедиции входит проведение исследований с целью изучения явления и выяснения его природы.

Единственная вероятная из возможных гипотез для объяснения указанного результата сводится к тому, что, кроме ливней Ожэ, в атмосфере возникают ещё и другие чрезвычайно концентрированные ливни, по природе своей совершенно отличные от каскадных или лавинных ливней и состоящие (в отличие от этих последних) не из электронов и фотонов, а из проникающих частиц, вероятнее всего мезонов.

В литературе можно найти много разрозненных указаний, говорящих о существовании таких проникающих ливней, имеются и отдельные фотографии подобных ливней в камерах Вильсона.

Однако, наблюдения Памирской экспедиции, явившиеся, повторяю, неожиданными, дают нечто существенно новое. Наблюдения эти проводились в палатке при отсутствии каких-либо плотных перекрытий над прибором, в которых могли бы возникать регистрируемые ливни. Таким образом, оказывается, что проникающие ливни — это такие же атмосферные ливни, как и ливни Ожэ.

тот каскадный или лавинный механизм образования ливня, о котором была речь. Однако, при переходе к большим толщинам наблюдения со свинцовым фильтром привели неожиданно к таким результатам, которые находятся в резком противоречии с картиной каскадных ливней.

Те наблюдения, о которых я сейчас говорю, были проведены в следующих условиях. Счётчики находились один над другим, свинец толщиной до 12 см вводился между ними. Ожидалось, что введение

Вместе с тем, как показывают результаты памирских наблюдений, число проникающих ливней за единицу времени или, точнее, число ионизационных импульсов, ими вызываемых, того же порядка, что и число ливней Ожэ.

Таким образом, налицо новая весьма существенная компонента атмосферных ливней, о которой до сих пор ничего не было известно или во всяком случае такая компонента, значение которой существенно недооценивалось.

Метод, применённый на Памире, позволяет наблюдать свыше десяти прохождений проникающих ливней в час, что открывает прекрасные возможности для изучения явления. Подчёркнутое мной обстоятельство именно то, что описанными наблюдениями установлено существование проникающих атмосферных ливней, имеет определённо принципиальное значение, так как оно само по себе говорит, что в этих случаях мы имеем дело с ливнями, составленными из частиц, чрезвычайно высоких энергий и порождаемых первичными частицами также сверхвысоких энергий, вероятно, приближающихся к тем, которые характерны для ливней Ожэ. Только в случае сверхвысоких энергий и мыслимо образование в атмосфере тех концентрированных потоков частиц, какими должны быть проникающие ливни, регистрируемые описанной установкой. Если в случае ливней Ожэ наблюдаемые эффекты представляют интерес в основном постольку, поскольку они говорят о существовании первичных частиц необычно высоких энергий, тогда как самый механизм явления известен и в основном может быть точно рассчитан, то в случае проникающих ливней мы имеем дело с совершенно новым механизмом, природа которого представляется загадочной. Не исключена возможность того, что явление тесно связано с теми процессами, которые ответственны и за возникновение в атмосфере всей проникающей мезонной компоненты.

Как известно, Гейзенбергом была высказана гипотеза, согласно которой в области очень больших энергий отдельные акты столкновения любых частиц должны сопровождаться появлением — рождением многих новых частиц, образующих ливень «взрывного» характера. Согласно идеям, развитым Гейзенбергом, такие «взрывные» ливни отнюдь не связаны с каким-либо специальным специфическим механизмом, а являются проявлением весьма общих квантовых свойств любых процессов взаимодействия, вытекающих из существования наряду с постоянной Планка ещё другой универсальной константы — некоторой элементарной длины. Аргументы экспериментального характера, выдвинутые Гейзенбергом для обоснования его гипотезы о существовании наряду с лавинными также и «взрывных» ливней, в настоящее время не представляются особо убедительными.

Трудно сказать, имеет ли то новое явление, о котором я говорил, что-либо общее с механизмом Гейзенберга, однако, указанные мной только что факты ясно показывают, что явление ливней отнюдь не исчерпывается (ставшим уже тривиальным) механизмом каскадных

процессов и что существенную роль в области весьма высоких энергий играют ливневые процессы совершенно иной природы, существо которых пока ещё остаётся невыясненным.

В заключение мне остаётся упомянуть лишь совсем кратко ещё об одной работе, выполненной на Памире, которая, хотя быть может и не даёт столь же эффектных результатов, однако, имеет тем не менее существенное значение. Об этой работе следует также упомянуть, поскольку она является до некоторой степени завершением целой серии работ, проводившихся в течение ряда лет, которыми Физическим институтом им. П. Н. Лебедева внесён несомненно существенный вклад в разработку вопроса о «каскадных» ливнях. Речь идёт о тех каскадных процессах, которые должны наблюдаться при проникновении в свинец электронов или фотонов, которые сами входят в состав каскадной «компоненты», имеющейся в воздухе. Каскадные процессы естественно связаны с «деградацией» энергии, которая по мере разрастания лавины распределяется между всё большим и большим числом частиц.

Самый рост лавин, порождаемых частицами высокой энергии, продолжается до тех пор, пока средняя энергия частиц в лавине не снизится до величины порядка некоторой критической энергии, зависящей существенным образом от атомного номера среды, в которой образуются лавины. В случае воздуха эта критическая энергия порядка ста миллионов вольт, а для свинца она порядка всего десяти или семи миллионов вольт. В связи с этим, если лавина, прошедшая уже значительный путь в воздухе и состоящая из частиц с энергией порядка критической (и вследствие этого в воздухе уже не размножающихся), встречает свинец, то процесс каскадного размножения снова возобновляется, в результате чего интенсивность потока частиц должна увеличиться и пройти через «переходный» максимум, аналогичный тому, который показывает и кривая рис. 5, относящаяся к ливням Ожэ. Целый ряд наблюдателей, экспериментировавших с обычными ионизационными камерами, однако, этого максимума не обнаружил, что приводило, казалось, к противоречию с каскадной теорией. Вопрос был полностью выяснен здесь в ФИАН в основном С. Н. Верновым, в сотрудничестве с **О. Н. Вавиловым** с экспериментальной стороны, а также И. Е. Таммом и С. З. Беленьким, выполнившими чрезвычайно ценное и обстоятельное теоретическое исследование.

Этими работами показано, что процесс деградации энергии космического излучения, связанный с проникновением лавин в свинец, идёт так далеко, что, в результате, энергия значительной части частиц оказывается чрезвычайно низкой — порядка всего сотен киловольт. Поскольку энергия частиц, составляющих лавины, в свинце настолько мала, влияние поглощения в стенках прибора и другие условия могут существенным образом исказить ход явлений, что и имело место в случае цитированных мною наблюдений. Для исключения влияния поглощения в стенках, О. Н. Вавиловым были проведены наблюдения

на Памире с ионизационной камерой, стенки которой были сделаны из тонкой фольги.

Переходная кривая, приведённая на рис. 6, полученная О. Н. Вавиловым, показывает резко выраженный «каскадный» максимум. Сравнение с аналогичной кривой с более низким максимумом, которую дали измерения при несколько большей толщине стенок, а также

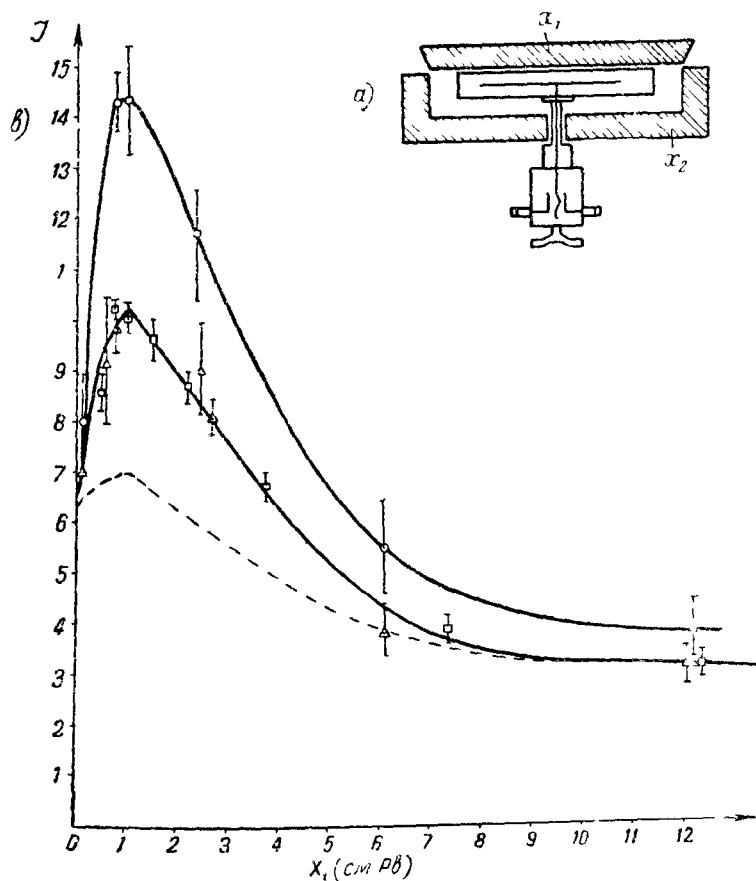


Рис. 6.

непосредственные измерения поглощения в тонких слоях совершенно отчётливо показывают, что значительная доля ионизации, в условиях переходного максимума, создается крайне медленными частицами, которые сильно поглощаются слоями алюминия при толщине порядка всего только десятых долей миллиметра. Все эти результаты, которые, как я уже сказал, завершают целую серию работ, имеют не только узко-специальный интерес, так как точное знание законов каскадных

явлений необходимо для решения различных проблем космического излучения обще-теоретического характера, имеющих большое принципиальное значение. В частности, в известном обзоре Гайзенберга — Эйлера, посвящённом анализу ливневых явлений и обоснованию концепции взрывных ливней, много ошибочного связано с недоучётом тех факторов, о которых я только что говорил и которые с исчерпывающей ясностью вскрыты работами указанной мной группы ФИАН, не получившими может быть ещё той достаточно широкой известности, которую они заслуживают.

На этом я заканчиваю свой беглый и отнюдь не полный обзор результатов, полученных Памирской экспедицией в 1944 году.

Мне остаётся лишь подчеркнуть, что работы, о которых я доложил, проведённые во время войны, следует рассматривать лишь как начало, как первые шаги на пути, который, как мы надеемся, может в ближайшие годы привести к разрешению тех весьма актуальных проблем, которые я пытался охарактеризовать в своём докладе.
