

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ПРИРОДА КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ *)

Д. В. Скобельцын

За последние 2—3 года двумя коллективами молодых физиков под руководством проф. С. Н. Вернова и доктора физико-математических наук Н. А. Добротина выполнен весьма обширный комплекс работ по изучению космической радиации, охватывающий широкий круг вопросов, разрабатывавшихся разнообразными методами и в различных лабораториях.

Эти многочисленные работы (исчисляемые десятками), итогам которых и посвящено настоящее обзорное сообщение, проведены в основном Физическим институтом имени П. Н. Лебедева Академии наук СССР, в некоторой, и довольно существенной, части совместно с Московским университетом и при участии Академии наук Узбекской ССР.

Кроме названных мною руководящих лиц, я хотел бы упомянуть также члена-корр. АН СССР В. И. Векслера, внесшего весьма существенный вклад в развитие высокогорных работ группы Физического института в начальной их стадии.

Полагаю, что эта коллективная работа может служить показательным примером тех исключительных возможностей, которые мы, благодаря руководству Партии и Правительства и широчайшей, неизменно предоставляемой нам поддержке, можем сейчас реализовать.

Космическое излучение, состоящее из частиц, накопивших где-то в глубинах мирового пространства громадную, необычную для наших земных условий энергию, вот уже свыше 40 лет привлекает к себе внимание многочисленных исследователей, сосредоточивающих всё более напряжённые усилия на этом передовом фронте ядерной физики.

Однако несмотря на выдающиеся успехи и многочисленные открытия, обогатившие наши знания новыми фактами и новыми представлениями исключительного значения, до самого последнего времени мы не имели сколько-нибудь отчётливой картины или

*) Доклад на Годичном собрании Академии наук СССР 2 февраля 1950 г.

хотя бы основной схемы явлений космического излучения. Более того, даже вопрос о самой природе первичного космического излучения оставался до последнего времени дискуссионным.

Нетрудно указать причину такого положения вещей. Явления, вызываемые космическим излучением в атмосфере, крайне сложны. По мере проникновения в глубь атмосферы космическая радиация подвергается многим последовательным превращениям. В нижних слоях атмосферы наблюдатель имеет дело в основном уже не с частицами первичного излучения, а с частицами, ими порождёнными, и притом такими, которые произошли от первичных частиц не в первом, а в каком-то весьма отдалённом поколении.

До последнего времени основное внимание было обращено на изучение космической радиации в нижних слоях атмосферы, тогда как стратосфера оставалась мало доступной для экспериментирования. Неудивительно поэтому, что попытки построения общей концепции явлений космического излучения не приводили к удовлетворительным результатам.

Для таких построений не доставало прочного фундамента, поскольку первичное звено цепи превращений, претерпеваемых космическим излучением в атмосфере, оставалось нераскрытым.

В настоящее время в результате работ, о которых будет идти речь ниже, мы имеем уже вполне надёжную базу для того, чтобы установить основную схему этих превращений. В итоге этих работ получены данные, позволяющие окончательно решить вопрос о природе первичного излучения, и, что особенно важно, мы уже можем сейчас установить в общих чертах картину тех явлений, которые вызываются в стратосфере первичным космическим агентом, что обеспечивает нам надёжные позиции для раскрытия в дальнейшем механизма процессов превращения космической радиации в атмосфере во всей их сложности.

Чтобы сделать понятным круг идей, положенных в основу указанных работ, мне придётся остановиться в немногих словах на тех, оказавшихся несостоятельными гипотезах, которые в данное время сданы в архив, но которые в течение довольно длительного времени пользовались общим признанием.

Одной из таких гипотез, казавшейся весьма солидно обоснованной, была гипотеза об электронной природе первичного космического излучения.

Предположение о том, что первичными частицами космической радиации являются электроны, вытекало из необходимости объяснить, каким образом высокая энергия частиц космического излучения может сочетаться с их относительно большой поглощаемостью в атмосфере.

Дело в том, что, после того как удалось измерить энергию первичных космических частиц (а дальнейшее изложение, может быть, даст некоторое представление о том, как это было сдела-

но), сразу стало ясно, что процесс поглощения этих частиц в атмосфере не может сводиться к простому торможению, связанному с тем, что заряженные частицы, движущиеся в газе или в какой-либо другой среде, производят её ионизацию, отрывая электроны от тех атомов, с которыми они сталкиваются на своём пути и затрачивая на это определённую энергию. При не очень высокой энергии торможение заряженной частицы целиком и определяется затратой её энергии на ионизацию. Такое «ионизационное» торможение может быть точно рассчитано.

Так вот, если учесть энергию первичных частиц и подсчитать, какую долю её эти частицы рассеивали бы при прохождении через атмосферу Земли, если бы при этом они подвергались только лишь одному ионизационному торможению, то оказывается, что большая часть всех частиц могла бы свободно проникать через всю толщу атмосферы, тогда как в действительности поверхности Земли достигает только малая часть всех частиц, имеющих в стратосфере.

Известен, однако, другой механизм поглощения, который приводит к гораздо более быстрому растрчиванию энергии. Этот механизм, действующий только при очень большой энергии частиц, характерен для таких «лёгких» частиц, какими являются электроны. В силу способности быстродвижущегося электрона излучать свою энергию при столкновении с атомами тормозящей среды, связанное с этой способностью «радиационное торможение» при больших скоростях будет преобладать над ионизационным.

Вмешательство новых механизмов в явление торможения при большой энергии частицы, однако, этим ещё не ограничивается. Если бы действовал только один радиационный механизм поглощения, то движущийся в среде быстрый электрон весьма скоро «обрастал» бы роем сопровождающих его частиц, идентичных по своей природе с атомами света, а именно, роем фотонов высоких энергий, и его энергия весьма быстро трансформировалась бы в энергию электромагнитного излучения. Но фотоны высокой энергии оказываются также сильно поглощаемыми. При своём поглощении они рождают «пары» частиц, состоящие из одного отрицательного и одного положительного электрона. Последовательное повторение процессов рождения фотонов электронами, и наоборот — электронов фотонами, сопутствующими движению первичного электрона, приводит к образованию, в результате повторения, многих каскадов (и такого «каскадного размножения») мощных ливней частиц, если первичная энергия очень велика, или же «ливней», состоящих из нескольких или нескольких десятков частиц при меньшей энергии.

Образование ливней вообще характерно для космического излучения. Как мы увидим, кроме только что описанного электромагнитного механизма образования ливней, который можно назвать

классическим, в космическом излучении мы сталкиваемся и с другими ливнями иной природы и иного происхождения.

На основе каскадной теории, казалось, можно было полностью объяснить ход кривой поглощения преобладающей — мягкой — компоненты в атмосфере, если предположить, что первичное космическое излучение представляет собой поток электронов высокой энергии. Такой электрон, попадая в стратосферу из космического пространства, должен вызвать интенсивный каскадный процесс.

В силу каскадного размножения вместо первичного электрона высокой энергии появляется много других порождённых им электронов меньших энергий. Поэтому если бы в атмосферу Земли приходил из космического пространства поток таких электронов, то число частиц и ионизация, ими вызываемая, сначала возрастала бы по мере продвижения в глубь атмосферы, что создавало бы характерный, так называемый «переходный», максимум. Дальше, однако, энергия образовавшейся лавины быстро деградирует и растрачивается на ионизацию, производимую уже не одной, а многими частицами, составляющими эту лавину.

Энергия первичных лучей известна. Пользуясь лавинной, или каскадной, теорией, можно было рассчитать только что описанную кривую поглощения и убедиться, что налицо неплохое количественное согласие хода рассчитанной таким образом кривой с той кривой поглощения, полученной по данным наблюдений, которая показывает, как растрачивается энергия космического излучения и как ослабляется поток частиц, а следовательно, и интенсивность этого излучения, по мере проникновения в атмосферу.

Кривая, которая даёт ход поглощения космических лучей ниже уровня моря, имеет совсем иной вид. Установлено, что в ней мы имеем уже дело не с электронами, а с мезонами — частицами, впервые открытыми в космическом излучении, масса которых имеет величину, промежуточную между массой электрона и массой протона. Такие частицы — мезоны — каскадному размножению не подвергаются, и кривая поглощения соответствующей — проникающей или жёсткой — компоненты весьма пологая.

После всех этих предварительных замечаний можно обрисовать в общих чертах положение вопроса о природе космического излучения на том этапе, который предшествовал работам, являющимся предметом моего сообщения.

Общим признанием в течение довольно долгого времени пользовалась следующая схема той цепи превращений, претерпеваемых космической радиацией в атмосфере, о которой я говорил вначале: первичный электрон → каскадные электроны и фотоны → мезоны. Теория, основанная, правда, на более или менее произвольных гипотезах, позволяла предусмотреть образование мезонов за счёт поглощения фотонов.

Примерно 10 лет назад возникли, однако, сомнения в правильности этой схемы, и ей было противопоставлено предположение о том, что поток первичных частиц состоит из положительно заряженных элементарных ядерных частиц — протонов. Эти сомнения и эта гипотеза отчасти были основаны на прямых экспериментальных данных. Так, М. Шайн в Америке произвёл ряд наблюдений в стратосфере и нашёл, что его результаты противоречат предположению об электронной природе первичного излучения и указанной выше схеме. Он предложил следующую схему: первичные протоны → мезоны → электроны.

Эксперименты Шайна были безупречны, и результаты его многим казались неубедительными. Кроме того, предложенная им схема приводила к трудностям, из которых укажем две главнейшие.

Возможны эксперименты, позволяющие непосредственно определить знак заряда частиц первичной компоненты, так же как и их энергию. Дело в том, что первичные космические частицы, если они заряжены, при приближении к Земле встречают на своём пути определённую преграду в виде её магнитного поля. Поверхности Земли в любой её точке могут достигнуть только те частицы, которые имеют некоторую определённую, весьма высокую энергию. Если это блокирующее действие магнитного поля уподобить некоторому барьеру (речь идёт о барьере энергетическом), то оказывается, что высота этого барьера для точек поверхности Земли на различных широтах неодинакова. Исследование интенсивности космического излучения на различных широтах и позволяет, основываясь на теории этого, так называемого «геомагнитного» эффекта, получить оценку энергии первичных частиц и, более того, установить распределение этих частиц по энергии.

Что касается знака заряда частиц, то его определение оказывается возможным в силу того, что в экваториальных широтах направления с запада и с востока оказываются неодинаково доступными для большинства частиц первичного космического излучения. Если частицы космического излучения заряжены положительно, то в стратосферу вблизи экватора они будут проникать преимущественно с запада, и наоборот — с востока, если заряд их отрицательный.

В 1939 г. известный американский специалист Джонсон осуществил трудные наблюдения в стратосфере в поисках описанного эффекта так называемой «азимутальной асимметрии», и его не обнаружил (во всяком случае, по данным Джонсона, этот эффект не превышал десятой доли той величины, которую можно было ожидать).

Результаты Джонсона, оставшиеся непровергнутыми и, так сказать, уникальными в течение 10 лет, находились в прямом противоречии с гипотезой Шайна о протонной природе первичного излучения.

Другая трудность, с которой сталкивались гипотеза Шайна и указанная схема, заключалась в том, что не был известен механизм, позволяющий объяснить образование электронов, наблюдаемых в большом количестве уже в самых верхних слоях атмосферы. Оставалось совершенно не ясным, каким образом возникает эта преобладающая в верхних слоях атмосферы так называемая мягкая компонента, состоящая из электронов и сопутствующих им фотонов. Сам Шайн предполагал, что таким механизмом мог бы явиться распад мезонов, одним из продуктов которого оказываются электроны. Однако более основательное изучение вопроса с полной ясностью показало несостоятельность такого объяснения генерации мягкой компоненты в связи с относительной медленностью процесса распада быстро движущихся мезонов.

Для выяснения всех этих вопросов 2—3 года назад проф. С. Н. Верновым было начато задуманное в большом масштабе и осуществлённое широким фронтом изучение космических лучей в стратосфере.

Результаты этих успешно проведённых исследований окончательно решают вопрос о природе первичного излучения.

Стратосферические исследования, о которых идёт речь, основаны на применении доведенного сейчас до высокой степени совершенства и виртуозной техники метода наблюдения космических лучей путём передачи сигналов по радио.

С. Н. Вернову, начавшему свои исследования почти 20 лет назад, принадлежит приоритет в изобретении этого метода наблюдения космических лучей, которым впоследствии, особенно в последнее время, стали широко пользоваться и в Америке.

Начну с простейшего эксперимента, результат которого уже сам по себе вполне однозначно исключает гипотезу об электронной природе первичного излучения. Он основан на наблюдении эффекта, вызываемого каскадным размножением электронов.

Речь идёт о каскадном размножении, которое будет иметь место при прохождении электронов высокой энергии через слой свинца. Задача заключалась в том, чтобы подвергнуть прибор, который может обнаружить такой эффект, действию первичных частиц, для чего нужно было проводить этот, как и другие эксперименты, на очень больших высотах.

В применении к поставленной задаче должно было быть выполнено требование, чтобы электроны высокой энергии, если они приходят из мирового пространства, не успели подвергнуться каскадному размножению в слое стратосферы, находящемся выше уровня, до которого данный прибор удалось поднять. Это условие было выполнено, поскольку наблюдения проводились на высоте 25—27 км над уровнем моря.

На такие высоты приборы поднимаются шарами-зондами. Частицы космического излучения регистрировались миниатюрным

счётчиком частиц Гейгера-Мюллера, в котором попадание каждой частицы вызывает быстро гаснущий затем электрический разряд. Ионизационный импульс, вызванный таким разрядиком, передаётся через радиопередатчик соответствующим радиосигналом на Землю, где регистрируется путём записи на движущейся фотоплёнке приёмным устройством, что позволяет производить счёт частиц, прошедших за определённое время через счётчик, находящийся в стратосфере.

В данном эксперименте счётчик особым действующим автоматически и управляющимся самим этим счётчиком механизмом перемещался и попеременно вводился внутрь полый свинцовой сферы и затем, после того как было насчитано определённое число импульсов, выдвигался обратно из этой сферы, производя затем в течение некоторого времени счёт частиц, не профильтрованных через свинец, и так далее.

Электроны, проходя через свинец, подвергаются каскадному размножению, создавая тот переходный максимум в кривой поглощения, о котором мне пришлось уже говорить. Если в составе излучения, падающего на прибор, имеются электроны, то число отсчётов за единицу времени в счётчике, находящемся внутри свинцовой сферы, окажется в несколько раз больше того, которое наблюдается в счётчике, когда он находится вне этой сферы. Используя эффект размножения в свинце, оказалось возможным разработать метод анализа электронной компоненты, позволяющий по величине эффекта судить об энергии составляющих её частиц. Я только мимоходом касаюсь обширного цикла работ, которые были выполнены с применением не только этого, но ещё и двух других методов решения того же вопроса. В результате всех этих исследований было установлено, что в стратосфере имеются в большом количестве электроны. Энергия их, однако, оказалась примерно в 10 раз меньше минимальной энергии, которую должны были бы иметь первичные космические электроны для того, чтобы, преодолев блокирующее действие земного магнитного поля, достигнуть поверхности Земли.

Наблюдавшиеся электроны не могли притти из космического пространства. Они, следовательно, возникли уже в самой атмосфере Земли, первичные же электроны не были обнаружены. Результаты описанных экспериментов, однако, отнюдь не противоречат предположению о том, что первичную компоненту составляют протоны высоких энергий.

Гипотеза о протонах, как о частицах, составляющих первичное космическое излучение, наталкивалась всё же ещё на противоречие с опытами Джонсона, о которых я упоминал. Для выяснения вопроса и для получения новых данных о частицах более высоких энергий, чем те, с которыми в среднем приходится иметь дело в наших широтах (даже хотя бы и в стратосфере), была органи-

зована экваториальная экспедиция. Приборы на шарах-зондах выпускались с палубы советского судна в океане вблизи экватора.

В данном случае речь идёт о гораздо более сложных экспериментах, которые и были осуществлены группой С. Н. Вернова (Н. Л. Григоровым, С. П. Соколовым и другими) при организационном руководстве также Н. А. Добротина.

Частицы космического излучения регистрировались в данном случае (также, конечно, с передачей сигналов по радио) методом совпадений в счётчиках частиц, образующих систему, условно называемую телескопом, поскольку она регистрирует излучение, идущее в определённом направлении.

На рис. 1 схематически показан ряд цилиндрических счётчиков, образующих этот телескоп, ось которого была установлена под

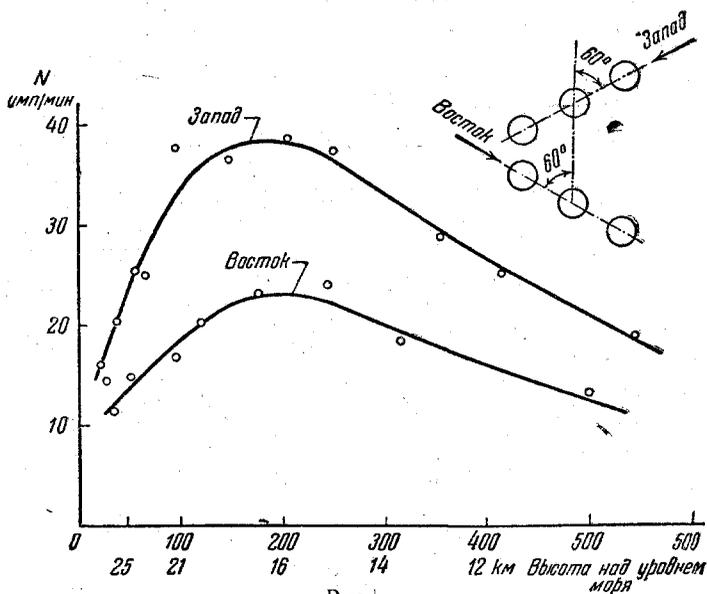


Рис. 1

углом 60° к направлению на зенит. Этот угол оставался постоянным, азимут же через определённые интервалы времени менялся на 180° . Ось телескопа попеременно направлялась то на запад, то на восток. Эти переборки производились автоматически и быстро, причём интервалы времени, в течение которых прибор находился в каждой из двух заданных для него ориентаций, регулировались, как и в других случаях, самим счётным устройством. Переборки из одного положения в другое осуществлялись после того, как накапливалось определённое количество отсчётов, полученных в данной определённой позиции.

Что же касается установки оси телескопа, которая всегда, независимо от вращения прибора, связанного с его полётом, должна была быть направлена на восток или на запад, то она задавалась (и жёстко поддерживалась постоянной) системой фотоэлементов, управлявшейся солнечным лучом, который и служил ориентиром для всей системы.

На рис. 1 видны результаты наблюдений. Кривые показывают интенсивность космического излучения в зависимости от высоты соответственно для западного и восточного азимутов. Интенсивность излучения, приходящего с запада, оказалась больше наблюдаемой в восточном азимуте и превышала эту последнюю на 60% от средней величины в соответствии с тем, что и даёт расчёт для излучения, состоящего из положительных частиц. Установлено, следовательно, что частицы первичного космического излучения заряжены положительно. Работа Джонсона, так много дискутировавшаяся, оказалась неверной.

Таким образом, в итоге описанной выше работы, которую следует, конечно, расценить как крупное событие в нашей науке, окончательно, с предельной достоверностью решён вопрос о природе первичного излучения, носителем которого следует признать протоны высоких энергий. Для других предположений не остаётся места, если только не допускать гипотез о каких-то новых, не наблюдаемых в земных условиях частицах, для чего нет никаких оснований. Правда, тезис о природе первичной компоненты следует сформулировать в более общем виде, а именно как утверждение, что носителями энергии первичного излучения, зарождающейся в глубинах космического пространства, являются положительно заряженные ядра атомов, с подавляющим преобладанием простейших ядер — ядер наиболее распространённых атомов — водорода, т. е. протонов.

Как известно, сейчас методом фотографических пластинок (в светочувствительном слое которых можно обнаруживать следы ядерных частиц) на больших высотах в стратосфере многократно наблюдались уже следы и более сложных многозарядных ядерных частиц. Так, например, на рис. 2 воспроизведена микрофотография следа частицы, — возможно, ядра атома кислорода, — полученная в результате наблюдений, проведённых в стратосфере с пластинками, изучавшимися Г. М. Беловицким и другими в Физическом институте АН СССР, в лаборатории члена-корр. АН СССР И. М. Франка.

Но если вопрос о том, какие частицы, зарождающиеся в мировом пространстве, и с какой энергией достигают границ атмосферы, можно считать решённым, то с ещё большей остротой встаёт вопрос о существовании тех процессов, которые вызываются этими частицами уже в верхних слоях стратосферы и которые обуславливают весьма интенсивное их поглощение.

В результате всей совокупности описываемых мною работ, которые позволили осуществить, так сказать, концентрическое наступление по многим направлениям на этом фронте науки, мы сейчас имеем ответ на только что поставленный вопрос.

Покинем на время стратосферу и спустимся на меньшие высоты, для того чтобы познакомиться с результатами широких исследований, предпринятых в экспедиционных условиях в горах.

К сожалению, ограниченный размер моего сообщения не позволяет мне уделить этим не менее замечательным по масштабам и экспериментальному искусству работам то место, которого они заслуживают по своему объёму и значению. Должен вообще оговорить, что мое изложение не может быть исчерпывающим. К тому же мне снова приходится отклониться от основной линии изложения для некоторых, хотя и кратких пояснительных замечаний.

Я уже упоминал о каскадных электронных ливнях и о каскадной теории этих ливней. Для понимания дальнейшего необходимо иметь в виду следующее.

В таких каскадных ливнях мы имеем дело с процессами, вызываемыми столкновением быстрых электронов, а также фотонов, с ядрами атомов той среды, в которой они движутся. Речь идёт при этом, однако, о процессах, протекающих вне атомных ядер, на некотором расстоянии от них, и вызываемых силами электромагнитного характера, природа которых нам хорошо известна.

Изучение этих классических каскадных явлений представляет исключительный интерес. Но поскольку атомным ядрам в этих явлениях принадлежит лишь пассивная роль, изучение их не даёт каких-либо новых путей для подхода к проблеме атомного ядра и, в частности, для решения вопроса о природе ядерных сил.

Частицы высоких энергий, однако, как показывает расчёт, многократно сталкиваются вплотную с самими атомными ядрами, пронизывая их. Такие частицы могут служить как бы зондами для исследования внутриядерных взаимодействий и вызываемых ими явлений. Быстрые электроны, судя по всей совокупности имеющихся данных, оказываются ядерно-пассивными, т. е. не взаимодействующими с ядерным веществом частицами. По этой причине они и непригодны для использования в качестве таких зондов.

Можно, однако, а priori предполагать, что частицы, составляющие само ядерное вещество, т. е. протоны и нейтроны, часто обозначаемые единым названием «нуклоны», такие частицы высоких энергий могут оказаться эффективными снарядами, бомбардировка которыми атомных ядер может сопровождаться своеобразными процессами, зависящими от специфической природы не изученных ещё нами мощных ядерных сил.

Во время горной экспедиции 1945—1946 гг. в ходе работ В. И. Векслера, Г. Б. Жданова, А. Л. Любимова и других в

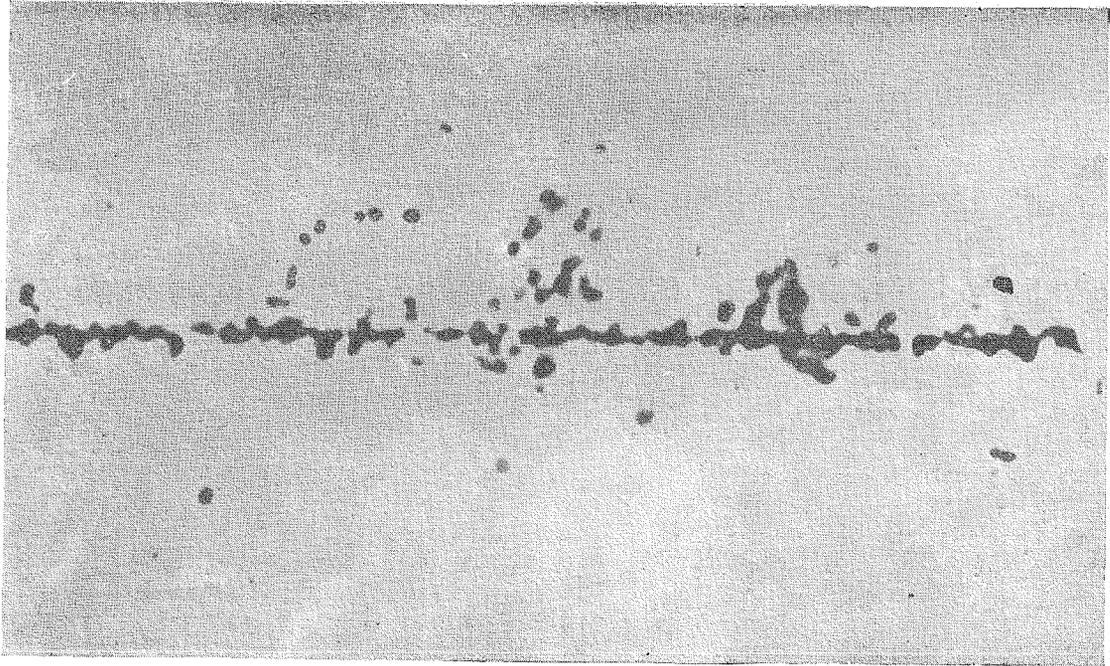


Рис. 2.

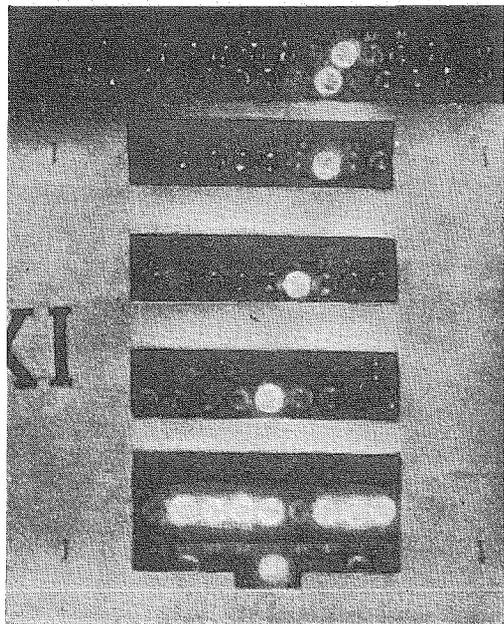


Рис. 3.

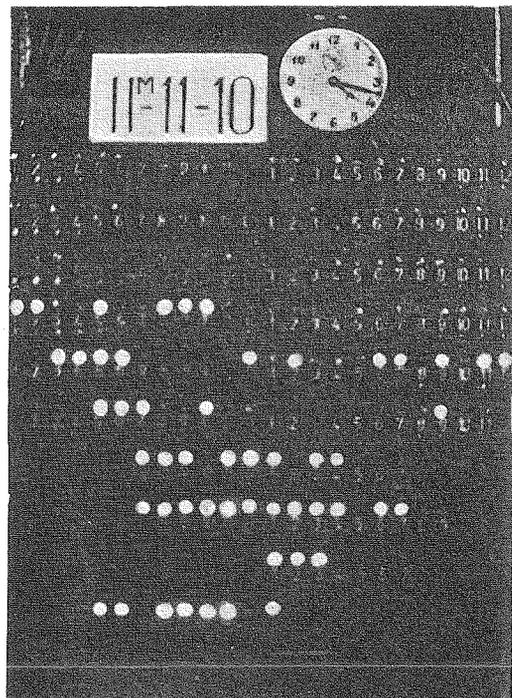


Рис. 4.

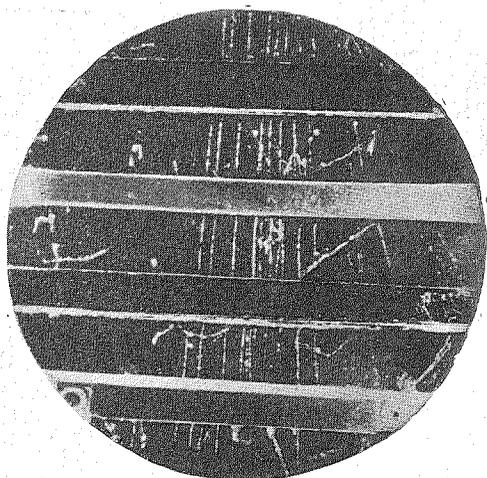


Рис. 5.

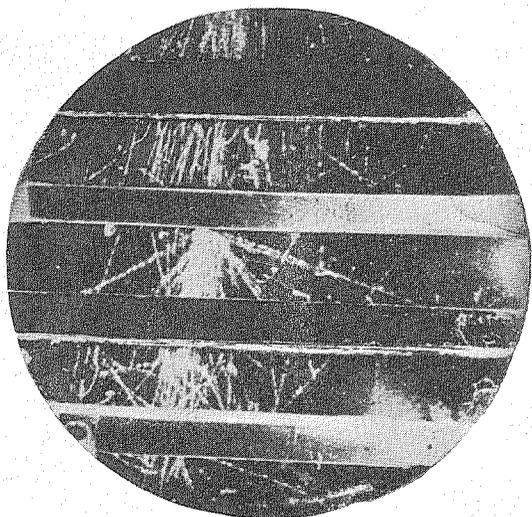


Рис. 6.

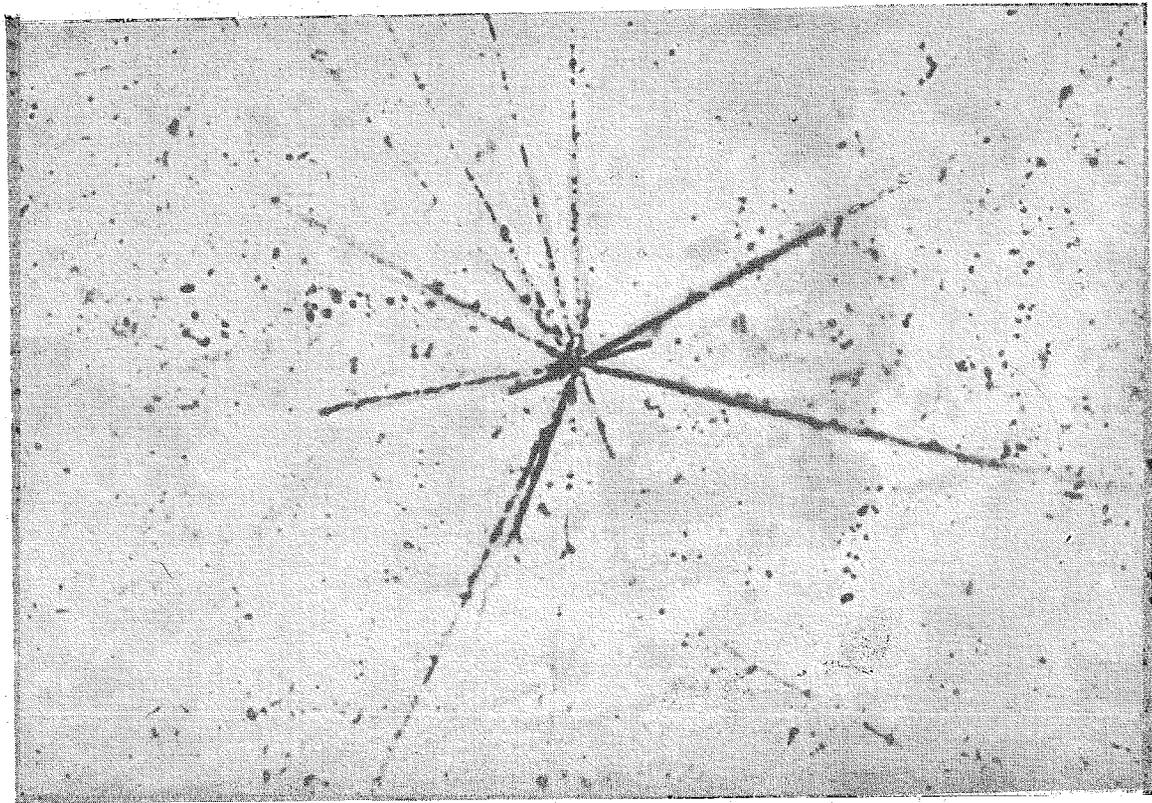


Рис. 7.

результате крайне простых, но удачно поставленных экспериментов было сделано весьма важное открытие.

Эти наблюдения показали, что на больших высотах, наряду с обычными каскадными ливнями, в явлениях космического излучения весьма существенную роль играют также своеобразные ливни совсем другой породы, которые назовём пока «особыми» ливнями.

Отличительная черта этих «особых» ливней заключается в том, что в их состав входят частицы, способные проникать через большие толщи свинца. Слои свинца в несколько сантиметров оказываются совершенно прозрачными для таких частиц. Кроме того, фильтрация через относительно большие толщи свинца излучения, генерирующего эти ливни, не сказывается существенным образом на интенсивности их генерации. В отношении обычных каскадных ливней наблюдается как раз обратное: ливнеобразование прекращается — подавляется, если излучение профильтровать через 10—20 см свинца, а сами частицы, составляющие каскадные ливни, практически полностью поглощаются слоями свинца толщиной в несколько сантиметров.

В результате упорного и разностороннего изучения этого нового явления, осуществлённого под общим руководством Н. А. Добротина коллективными усилиями большой группы работников, создавшей новые, весьма мощные и сложные орудия исследования этих явлений, в настоящее время установлено, что «особые» ливни возникают в результате ядерного процесса «взрывного» характера. Такой ядерный взрыв сопровождается не только развалом поражённого столкнувшимся с ним «космическим снарядом» ядра (и полным распадом этого последнего на его составные части), но и рождением в результате такого катастрофического процесса многих новых частиц.

Из всей совокупности данных, о которых я буду говорить дальше, с высокой степенью вероятности следует, что такого рода процессы и такие «особые» ливни возникают в результате воздействия на атомные ядра или самих первичных частиц космического излучения непосредственно или же других ядерных частиц, созданных космическим излучением уже в атмосфере Земли (в частности, нейтронов), получивших, однако, достаточно высокую энергию, порядка энергии первичных частиц.

Обрисую теперь, хотя и совсем бегло, ту технику, которая дала возможность осуществить основательное и разностороннее изучение всех этих явлений.

Описывая опыты С. Н. Вернова в стратосфере, я упоминал о корпускулярных телескопах, состоящих из двух или трёх счётчиков Гейгер-Мюллера и позволяющих регистрировать космические частицы, проходящие за определённое время в некотором более или менее точно заданном направлении. Появление одно-

временных совпадающих импульсов в таких двух-трёх счётчиках, составляющих телескоп, является сигналом, оповещающим о прохождении частицы в заданном направлении. Для экспериментов по изучению «особых» ливней были созданы гораздо более сложные системы, составленные из десятков счётчиков, — так называемые годоскопы. Сигналы, возникшие от появления совпадающих импульсов в некоторой сравнительно простой, надлежащим образом подобранной системе из нескольких счётчиков, служат в данном случае для «управления» годоскопом. Если этот сигнал, вызванный каким-либо ливнем, получен, то прибор даёт возможность обнаружить, что произошло (одновременно с явлением, вызвавшим данный сигнал) в каждом из счётчиков, входящих в состав годоскопа, в отдельности, т. е. прибор позволяет узнать, вернее непосредственно увидеть, в каком из счётчиков имел место разряд вследствие прохождения через него одной или может быть нескольких частиц. Видеть это непосредственно глазом можно потому, что с каждым счётчиком связана маленькая неоновая лампочка, вспыхивающая в том случае, если в данном счётчике произошёл разряд, вызванный попаданием в него частицы.

Система лампочек, укрепленных на отдельной панели, так что расположение их воспроизводит с некоторым подобием расположение счётчиков, фотографируется всякий раз, когда получается сигнал от управляющей системы.

Рис. 3 и 4 воспроизводят фотографии панелей с вспыхнувшими неоновыми лампочками. На первом из этих рисунков видно прохождение отдельной частицы, оставившей след в виде цепочки вспыхнувших лампочек, расположенных по прямой линии; на втором рисунке зафиксирован результат прохождения ливня из многих частиц.

Кроме годоскопического, был применён и другой, ещё более эффективный в смысле возможности непосредственного наблюдения всей картины явления метод так называемой управляемой камеры Вильсона.

В этом случае импульс от управляющей системы счётчиков приводил в действие камеру Вильсона. Внутри камеры на пути частиц исследуемого ливня поставлены чередующиеся пластины свинца и графита. Следы частиц ливня, прошедшего через камеру (покрывшиеся капельками тумана), можно непосредственно фотографировать. Рис. 5 и 6 показывают картины ливней, полученных таким способом в работах Н. Г. Биргер, С. А. Азимова и других. Все эти ливни, зарождающиеся в блоках свинца, окружающего камеру, и состоящие в некоторых случаях из множества частиц, заполнивших плотным потоком весь объём камеры, являются «особыми» ливнями. Дело в том, что прибор со всех сторон окружён массивной защитой из свинца, которая полностью подавляет ливни от электронов, пришедших извне, и, с другой сто-

роны, ливни, сфотографированные на этих снимках, в значительной части сами состоят из проникающих частиц, способных беспрепятственно, и не вызывая каскадного размножения, проходить через значительные толщи многих сантиметров свинца, как особенно ясно показывает рис. 5.

Я мог бы на этих немногих снимках отметить целый ряд интересных особенностей, достаточных уже для обоснования тех выводов о составе и природе особых ливней, которые были, однако, сделаны на основе гораздо более обширного материала, полученного путём применения различных методов и всестороннего изучения явления в результате многочисленных сложных экспериментов.

Ограничусь изложением лишь главнейших из этих выводов.

Частицы, обнаруженные в составе «особых» ливней, можно подразделить на три группы. Первую группу составляют сильно ионизирующие и сравнительно медленные частицы — продукты разрушения атомного ядра, в котором возник «особый» ливень. Эти частицы — нуклоны, получившие сравнительно небольшую энергию и представляющие собой не что иное, как разлетевшиеся по разным направлениям составные части атомного ядра, распавшегося вследствие происшедшего внутри него взрывного ядерного процесса. Здесь мы имеем дело скорее с побочным продуктом взрывного ливня и наблюдаемая картина в этой части, вероятно идентична той, которую многократно удавалось наблюдать уж, и раньше в фоточувствительном слое специальных фотографических пластинок. Рис. 7 показывает пример картины такого звездообразного расщепления, вызванного в проявленной затем фотографической пластинке, которая взята из коллекции Физического института АН СССР. Можно сказать, что здесь налицо чисто «ядерный» ливень в том смысле, что он составлен из частиц ядерного вещества — отдельных нуклонов, а в некоторых случаях может быть и альфа-частиц.

Большая часть энергии «особого» ливня сосредоточена, однако, в двух других его компонентах, представляющих наибольший интерес. Такими компонентами — второй и третьей — оказываются, с одной стороны, электроны достаточно высоких энергий, и с другой — проникающие частицы.

Неожиданное обнаружение в составе «особых» ливней электронов имеет исключительное принципиальное значение. Наличие этой электронной компоненты говорит о том, что здесь мы сталкиваемся с каким-то существенно новым механизмом, до сих пор совершенно не предусматривавшимся теорией. Учитывая это обстоятельство — двойственную природу «особых» ливней, мы и будем называть их далее электронно-ядерными ливнями.

Не менее существенный интерес представляет и другой результат тщательного изучения электронно-ядерных ливней. Установлено, что в составе проникающей компоненты этих ливней имеются

«ядерно-активные частицы», т. е. такие частицы, которые сами могут вызывать новые электронно-ядерные ливни. Существование этих частиц в составе ливней приводит к возможности осуществления в области очень больших энергий нового каскадного процесса, по своей природе совершенно отличного от того, о котором мне приходилось уже неоднократно говорить, а именно ядерно-каскадного процесса, сводящегося к тому, что частица, возникшая в результате ядерного взрыва, создаёт новый взрыв, сопровождающийся электронно-ядерным ливнем, и т. д.

Вопрос о природе частиц, составляющих электронно-ядерные ливни, явится предметом дальнейших исследований. Что касается ядерно-активных частиц, то естественно предположение, что такими могут быть те же протоны и нейтроны, если в результате взрывного процесса они получили очень большую энергию. Наряду с нуклонами, таким свойством вызывать ядерные процессы, т. е. ядерной активностью, могут также обладать и «тяжёлые» мезоны больших энергий.

Можно считать также установленным, что в проникающей компоненте электронно-ядерных ливней в значительном числе представлены и обычные, «неактивные» в ядерном смысле мезоны. В настоящее время имеются уже прямые доказательства существования этих последних частиц в составе «особых» ливней.

То обстоятельство, что в составе взрывных ливней генерируются электроны достаточно высоких энергий, имеет первостепенное значение для объяснения всего комплекса явлений космического излучения. Я уже упоминал о том, что предположение о протонной природе первичного излучения казалось мало приемлемым в связи с тем, что было трудно понять, каким образом первичные потоны могут создавать те электроны высоких энергий, которые наблюдаются в большом количестве в самых верхних слоях атмосферы. Как мы теперь знаем, трудность эта возникла из-за того, что не был известен и, естественно, не учитывался тот механизм возникновения электронной компоненты, который сейчас обнаружен в электронно-ядерных ливнях. Отмеченные мной открытия позволяют высказать тезис о том, что основная электронная, а также мезонная компоненты, наблюдаемые в атмосфере, зарождаются в стратосфере, в составе электронно-ядерных ливней. К развитию этого тезиса мы ещё вернёмся.

Пока же я хотел бы остановиться на одном следствии только что высказанного положения, которое приводит к возможности наблюдать электронно-ядерные ливни исключительно высоких энергий и в таких условиях, когда мы имеем дело с явлениями уже совсем иного, гораздо более крупного масштаба. Речь идёт о тех ливнях-гигантах, которые были открыты лет 15 назад французским физиком Ожэ. Эти ливни, состоящие из сотен тысяч или миллионов или даже десятков миллионов частиц, развиваются во

всей толще атмосферы. Для изучения их рамки лабораторного помещения оказываются уже недостаточными, и наблюдения приходится переносить в поле.

До последнего времени предполагалось, что такого рода ливни, покрывающие площади порядка в некоторых случаях квадратного километра, а может быть и больше, возникают в результате проникновения в атмосферу космических электронов исключительно высоких энергий и создаются затем путём классического каскадного размножения.

С учётом открытий, о которых я говорил, следует однако предположить, что в действительности в атмосферных ливнях мы имеем дело с грандиозными смешанными электронно-ядерными ливнями, зарождающимися в стратосфере первичными протонами весьма высокой энергии. С этой точки зрения изучение атмосферных ливней приобретает новый актуальный интерес. Сразу же становится понятным наличие установленной давнишними наблюдениями (и досконально изученной в обширном цикле работ в горных условиях) проникающей мезонной компоненты этих ливней. Работы, о которых я сейчас упомянул, давшие весьма ценные новые результаты, были проведены под непосредственным руководством молодого, но весьма уже компетентного нашего специалиста — Г. Т. Зацепина, которым и предложена новая концепция ядерно-каскадного процесса, лежащего в основе этого явления. Уделить этим работам сколько-нибудь достаточное место в моём сообщении я не имею возможности.

До сих пор я не давал каких-либо оценок порядка величины энергии, характерной для явлений космического излучения. Мерой этой величины может служить то напряжение, которое потребовалось бы для того, чтобы разогнать силами электрического поля электрон до скорости, соответствующей данной энергии. Если воспользоваться, как это принято, таким мерилом, то средняя энергия частиц первичного излучения оказывается равной примерно 10 млрд. электрон-вольт.

Что же касается полной энергии, выделяемой в больших атмосферных ливнях, то она ещё в миллион или десятки миллионов раз больше этой средней энергии космического излучения и выражается в электрон-вольтах числом, равным 10 в шестнадцатой или даже в восемнадцатой степени.

По соображениям объёма моего сообщения я вынужден прибегнуть в дальнейшем к ещё более конспективному стилю изложения.

Если наметившаяся в результате изложенного мной общая концепция явлений космического излучения верна и если, в частности, верно то, что протоны, обладающие энергией порядка энергии первичного излучения, могут весьма эффективно вызывать электронно-ядерные ливни, то мы должны ожидать, что в верхних слоях

стратосферы образование смешанных — электронно-ядерных — ливней можно наблюдать несравненно чаще, чем на горных высотах. Это предсказание полностью оправдалось. Сотрудником группы С. Н. Вернова А. Н. Чарахчяном была создана замечательная аппаратура, позволившая осуществить в стратосфере годоскопические наблюдения с передачей сигналов по радио. Его годоскопические установки не столь громоздки и сложны, как те, которыми пользовались в горах, но принцип действия их тот же.

Как мы видели, годоскопические снимки позволяют непосредственно наблюдать то, что происходит в различных счётчиках годоскопической системы. В данном случае это также оказывается возможным, причём наблюдатель на Земле «видит» ту картину, которая вызвана явлением, происшедшим в стратосфере. Таким образом, осуществляется нечто вроде телевидения. Такое сопоставление с телевидением может быть тем более законно, что некоторые элементы техники телевидения здесь налицо. На движущейся фотоплёнке практически непрерывно фотографируется флуоресцирующий экран, по существу тождественный с тем, на котором получается изображение в телевизорах. Сигнал записывается управляемым пятнышком от узкого пучка катодных лучей, который пробегает ширину плёнки в горизонтальном направлении за время $\frac{1}{25}$ сек., возвращаясь затем весьма быстро в исходное положение и повторяя сразу же свой пробег снова. Таким образом, здесь на экране осуществляется определённая развёртка во времени. За это же время — время пробега катодным лучом ширины плёнки — в установке, находящейся в стратосфере, быстро вращающийся моторчик производит переключение передатчика отправительной аппаратуры последовательно от одного счётчика годоскопической системы к другому. Таким образом в течение этого времени все счётчики годоскопа последовательно просматриваются. Каждому счётчику соответствует определённое место развёртки, получаемой на экране. Если данный счётчик не сработал при прохождении ливня через некоторую управляющую систему, на экране получается вертикальный выступ на определённом месте, соответствующем данному счётчику. Сработавшие же счётчики отмечаются тем, что такой выступ отсутствует. Если же управляющая система не сработала, то вычерчивается прямая линия без каких-либо выступов, и записываются барографические сигналы. Каждый раз, когда через годоскоп прошёл ливень, выбираемый управляющей системой, это обнаруживается по выпадению некоторого числа выступов, причём вся картина ливня оказывается таким образом выявленной.

Описанная аппаратура позволила наблюдать электронно-ядерные ливни, вызываемые первичными частицами космического излучения в стратосфере. Этим явлением далее удалось воспользоваться как своего рода индикатором присутствия на данном уровне

в стратосфере первичных частиц. По числу особых ливней, наблюдаемых за единицу времени, оказалось возможным судить о величине пропорционального этому числу потока первичных частиц. Таким образом, С. Н. Вернову и К. И. Добротиной-Алексеевой удалось проследить, как ослабляется этот поток по мере проникновения в глубину атмосферы. Из наблюдений на разных высотах методом, описание которого я вынужден опустить, чтобы не увеличивать размера моего сообщения, ими был получен фундаментальный результат. Впервые была получена кривая поглощения

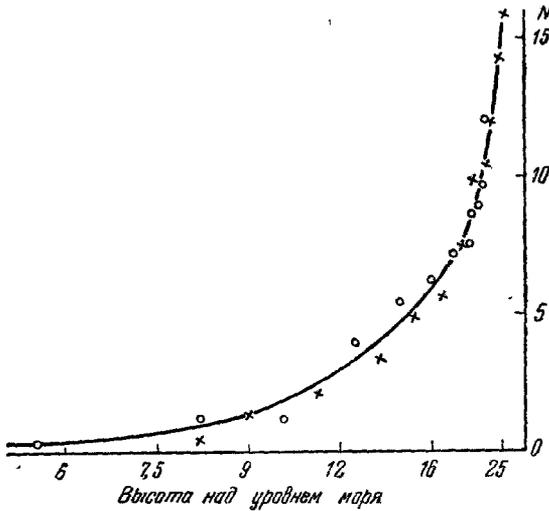


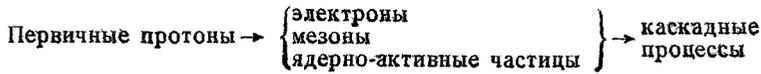
Рис. 8.

в атмосфере первичного космического излучения и было показано, что это излучение весьма быстро поглощается в атмосфере. Причиной столь быстрого поглощения являются взаимодействие первичного космического излучения с ядерным веществом и катастрофические процессы взрывного характера, связанные с трансформацией в отдельном элементарном акте колоссальных порций энергии, которые дают начало электронно-ядерным ливням. Рис. 8 показывает эту кривую поглощения. Она не похожа на кривую, дающую ход полной интенсивности космического излучения в атмосфере, о которой я говорил в начале моего сообщения.

Это различие весьма характерно. Указанная раньше кривая относится к сложному комплексу излучений, порождённых первичным агентом. Здесь же кривая поглощения именно этого первичного агента — первичного космического излучения.

В той схеме явлений космического излучения, которая была приведена мной вначале, приходится теперь, с учётом всех этих

фактов, произвести новую перестановку, после чего схема выглядит так:



Эта перестановка означает существенное изменение наших представлений.

Существенно то, что, как сейчас окончательно установлено, первоисточником явлений, вызванных первичной космической радиацией и развивающихся в атмосфере, оказывается ядерный процесс взрывного характера, который мы в состоянии теперь наблюдать и изучать. Существенно новым является и тот бесспорно уже установленный факт, что результатом такого ядерного взрывного процесса является образование интенсивных потоков электронов высокой энергии. Опираясь на этот факт, мы и можем сейчас считать основную схему явлений космического излучения окончательно разгаданной. Этот факт вместе с тем ставит вопрос о каком-то новом механизме превращения энергии, до сих пор теорией ещё не истолкованном.

Один из возможных механизмов, который теория в состоянии предложить, заслуживает особого внимания. Мы имеем в виду предположение о существовании новых, ещё не наблюдавшихся ранее частиц — чрезвычайно неустойчивых нейтральных мезонов, которые распадаются с образованием фотонов. За последнее время эта гипотеза получает всё большие подтверждения. Из наблюдений, которые я изложил, следует, что если во взрывных ливнях вместе с заряженными образуются и такие нейтральные мезоны (от которых затем, во втором поколении, и возникают электроны, наблюдаемые в составе смешанных ливней), то время жизни этих последних не может быть больше ничтожной доли секунды, выражаемой дробью, числитель которой единица, знаменатель же равен 10 в десятой степени.

По всей вероятности, однако, время жизни таких частиц, если они существуют, ещё значительно меньше.

Из полученного экспериментального материала уже на данной стадии изучения вопроса можно сделать целый ряд интереснейших выводов относительно условий, при которых столкновения с атомными ядрами первичных частиц космического излучения сопровождаются описанными взрывными процессами. Из величины измеренного коэффициента поглощения первичного излучения в воздухе следует, например, что при достаточно большой энергии частицы практически каждое столкновение с ядрами атомов воздуха сопровождается таким взрывным процессом. Более того, имеются основания утверждать, что ядерные взаимодействия сталкивающихся частиц настолько интенсивны, что взрыв происходит уже

в поверхностном слое нуклонов того ядра-мишени, в который проникает столкнувшаяся с ним космическая частица.

Не следует, конечно, думать, что мы сможем уже сейчас или в ближайшее время установить сколько-нибудь отчётливую и детальную картину того, что происходит, и получить какие-либо точные данные о природе явления и о законах, им управляющих. Даже и при более обстоятельном и углублённом изложении я не смог бы сообщить в этом отношении много больше того, что мной уже сказано. На данном этапе это не представляется возможным.

Было бы совершенно ошибочно, однако, сделать отсюда вывод, что затраченные для осуществления описанных мной исследований исключительно напряженный труд и большие средства остались вознаграждёнными. Наоборот, полученные результаты превзошли все наши ожидания, поскольку сделанные открытия прокладывают новые пути в такую неизученную ещё область явлений и к таким новым вершинам знания, овладение которыми в конечном счёте приводит к перестройке основных наших представлений о физической картине мира.

Полагаю возможным сказать, что в результате описанных работ советской физике обеспечены командные позиции и ведущее положение на этом передовом фронте науки.

Достижение этих результатов оказалось возможным благодаря тем исключительным условиям для развёртывания исследовательских работ в необычном масштабе, которые созданы у нас Партией и Правительством, и благодаря той широкой поддержке и помощи, которая неизменно предоставлялась нам щедрой рукой.
