

ГЛАВА XIII КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

§ 96. Методы исследования и первые итоги изучения космических лучей

Детальное изучение космических лучей всегда представляло особый интерес для ядерной физики. Это и понятно: в явлениях, связанных с космическим излучением, наблюдается неиссякаемое разнообразие ядерных процессов, причем некоторые из этих процессов вызываются частицами, приходящими в земную атмосферу с огромными энергиями, реализация которых пока еще недоступна в лабораторных условиях.

В § 91 было рассказано об открытии космических лучей и об обнаружении в их составе позитронов. Упомянутый там метод фотографирования ионизационных следов частиц в камере Вильсона, помещенной в сильное магнитное поле (впервые примененный Д. В. Скобельцыным в 1927 г.), в последующие годы в сочетании с использованием счетчиков Гейгера для автоматического привода в действие камеры Вильсона сделался основным методом исследования космических лучей.

Из большого числа экспериментальных устройств, предназначенных для изучения космических лучей, следует особо отметить *«телескопическую» установку*, сконструированную в 1932 г. Блеккетом и Окиалини. Установка Блеккета в последующие годы с некоторыми изменениями применялась многими экспериментаторами. В этой установке (рис. 363) камера Вильсона расположена между двумя счетчиками Гейгера и помещена в магнитное поле, направление силовых линий которого показано на рисунке. Ионизационные следы космических частиц в камере Вильсона фотографируются автоматически. Это достигается с помощью реле, включенного в усилитель счетчиков. Устройство регулируется так, чтобы реле могло срабатывать только при получении одновременных импульсов от обоих счетчиков. Через $0,01$ сек после получения обоих импульсов реле включает механизм, приводящий в движение поршень камеры Вильсона для получения в ней разрежения. Еще через $0,01$ сек включается осветитель, при свете которого фотографируются ионизационные следы. Таким образом, привести в действие фотографическую

установку могут только те частицы, которые пронизали оба счетчика и, следовательно, прошли камеру Вильсона (стрелка на рис. 363).

Другой простой метод регистрации частиц, пролетающих в определенном направлении (без фотографирования их ионизационных

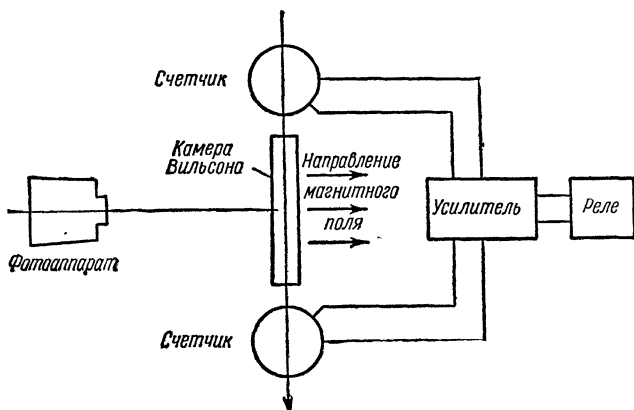


Рис. 363. Схема телескопической установки для наблюдения космических лучей.

следов), был предложен еще ранее Росси (1930 г.). Схема этого, также часто применяемого прибора — *счетчика совпадений* показана

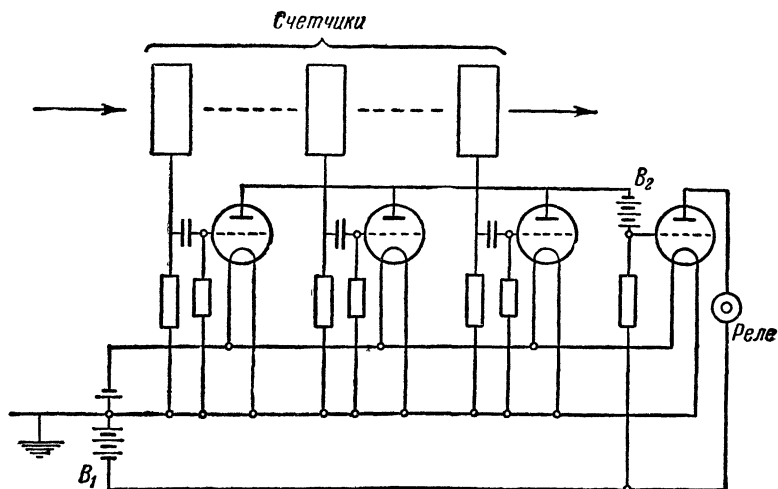


Рис. 364. Схема счетчика совпадений.

на рис. 364. Три счетчика Гейгера подключены к сеткам трех электронных ламп, питаемых анодной батареей V_1 . Сетка последней, четвертой лампы подключена к анодной цепи трех предыдущих

ламп через батарею B_2 , подающую на сетку этой лампы такой отрицательный потенциал, что лампа оказывается запертой. Когда частица космических лучей пронизывает все три счетчика, то возникающий разрядный ток запирает первые три лампы и цепь батареи B_2 размыкается; в этот момент потенциал сетки последней лампы становится положительным, лампа отпирается и ее анодный ток приводит в действие реле. Если частица космических лучей пролетает не через все три счетчика, а только через один или два из них, то цепь батареи B_2 не будет разомкнута и реле не сработает, т. е. такие случаи не будут регистрироваться.

Для измерения ионизирующего действия космических лучей пользуются *ионизационными камерами*, как и в случае радиоактивного излучения. Ионизационная камера представляет собой конденсатор, между электродами которого в замкнутом объеме находится газ, облучаемый исследуемым излучением (рис. 365). Применяют самые разнообраз-

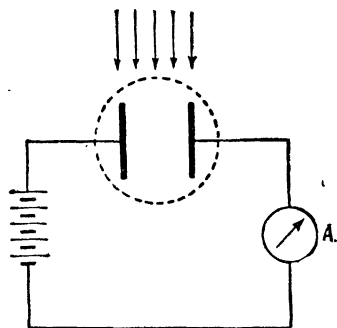


Рис. 365. Схема работы ионизационной камеры.

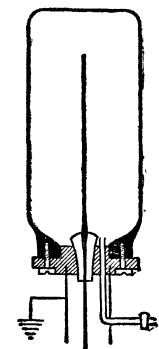


Рис. 366. Цилиндрическая ионизационная камера.

ные по форме и объему камеры, но метод измерения ионизации во всех случаях однотипен и заключается в нахождении ионизации по току насыщения. Пусть проникающие в камеру лучи создают каждую секунду в каждом кубическом сантиметре ее рабочего объема v (между электродами конденсатора) n пар ионов. Если приложенное к электродам камеры напряжение достаточно велико для того, чтобы увлечь к электродам все образующиеся ионы, то величина тока насыщения $I_{\text{нас}}$ будет пропорциональна создаваемой ионизации n :

$$I_{\text{нас}} = env,$$

где e — заряд иона.

Ионизационные камеры для исследования космических лучей чаще всего представляют собой цилиндрический конденсатор, одним электродом которого служит корпус камеры, а другим — металлический стержень, расположенный по оси камеры (рис. 366).

Этот электрод тщательно изолируют и присоединяют к чувствительному нитяному электрометру. Стенки камеры обычно делают из нержавеющей стали толщиной в десятые доли миллиметра при диаметре камеры в несколько сантиметров. Для увеличения ионизирующего действия проникающих в камеру частиц ее наполняют аргоном или углекислотой под давлением 10—20 атм.

Камеры почти такой же конструкции применяют и для исследования радиоактивных излучений (β -излучения), причем в этом случае в доньшке камеры против центрального электрода делают небольшое окошко (для доступа излучения радиоактивного препарата), которое герметизируют алюминиевым листком толщиной в несколько микрон.

Точное измерение тока насыщения в ионизационной камере часто производят, определяя *время спада заряда*, сообщенного конденсатору камеры. Так как величина этого заряда $Q = CV$, где C — емкость камеры и V — разность потенциалов на электродах в электростатических единицах, то, очевидно,

$$I_{\text{нас}} = C \frac{\Delta V}{\Delta t}.$$

Следовательно, измеряя чувствительным электрометром быстроту уменьшения потенциала ΔV вследствие разрядного тока за время Δt , можно найти ток насыщений.

Обычно начальная разность потенциалов, подаваемая на электроды, составляет несколько сотен или даже 1000—2000 в.

Флуктуационные явления, и в частности флуктуационные изменения самого измеряемого тока, ограничивающие чувствительность наиболее совершенных гальванометров (т. II, § 68), при указанном

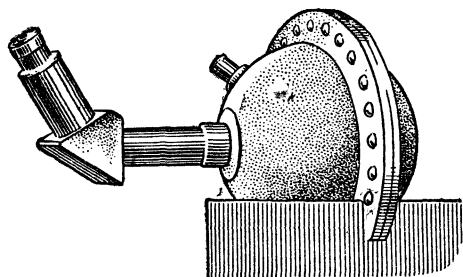


Рис. 367. Переносная ионизационная камера с электрометром.

методе определения тока насыщения в ионизационных камерах не препятствуют точности измерений, так как при достаточно большом объеме камеры и достаточно длительных интервалах времени Δt все флуктуационные колебания сглаживаются. На практике метод определения величины тока насыщения в ионизационной камере по времени спада заряда позволяет измерять токи порядка 10^{-16} и даже 10^{-18} а, т. е. в десятки тысяч раз меньшие, чем минимальный ток, который может быть измерен самым чувствительным гальванометром.

В переносных ионизационных камерах для измерения ионизирующего действия космических лучей электрометр, по показаниям которого определяют время спада заряда, и гальваническую батарею с электромагнитным индуктором заряда монтируют вместе с ионизационной камерой, заключая весь прибор в защитный металлический чехол. Чтобы наблюдать смещение посеребренной кварцевой нити электрометра, такие приборы снабжают микроскопом (рис. 367).

С помощью описанных выше устройств можно определить ионизацию, создаваемую космическими лучами, а следовательно, и их интенсивность в месте расположения установки.

Многие исследователи изучали интенсивность космических лучей на различных высотах. Результаты этих измерений для вертикального направления представлены графически на рис. 368. Здесь по оси абсцисс отложены высоты, измеренные барометрическим давлением; по оси ординат — ионизирующее действие космических лучей, выраженное числом пар ионов, образуемых ими в 1 см^3 за 1 сек . Величины ионизации отложены по оси ординат в логарифмическом масштабе. До давления 40 см Hg , что соответствует подъему до 5 км , изображенная кривая имеет прямолинейный участок. Следовательно, в этой области поглощение космических лучей подчинено обычному показательному закону [формула (11) § 89], причем коэффициент поглощения μ по порядку величины примерно в 10 раз меньше, чем для наиболее жестких (ториевых) γ -лучей.

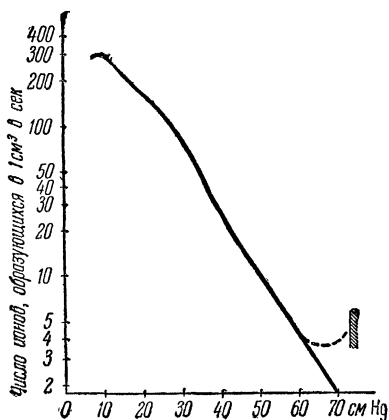


Рис. 368. Поглощение космических лучей в атмосфере.

В области давлений от 40 до 15 см Hg (что соответствует высотам подъема от 5 до $10,5 \text{ км}$) кривая, изображенная на рис. 368, имеет небольшой горб; здесь показательный закон поглощения лучей оправдывается менее строго. При высотах, превосходящих $10,5 \text{ км}$, ионизация, вызываемая космическими лучами, растет с высотой значительно медленнее, чем следовало бы в случае применимости показательного закона поглощения. На высоте около 15 км ионизация, вызываемая космическими лучами, достигает максимума; на больших высотах она несколько убывает.

Что касается числовых значений ионизации воздуха, то на больших высотах они весьма малы. Вблизи поверхности земли хорошо обеспыленный атмосферный воздух при нормальных условиях (и при отсутствии побочных ионизирующих факторов) содержит около 1300 пар ионов в 1 см^3 . Число i пар ионов, ежесекундно воссоединяющихся и ежесекундно образующихся, связано с числом n пар ионов, содержащихся при равновесии в 1 см^3 , соотношением

$$i = an^2, \quad (1)$$

где a — коэффициент воссоединения (коэффициент рекомбинации) ионов, равный для атмосферного воздуха нормальной плотности $3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{сек}$. Из приведенного соотношения следует, что вблизи

поверхности земли при нормальных условиях ежесекундно образуется примерно пять пар ионов в 1 см^3 атмосферного воздуха. Большая часть этой ионизации воздуха вызывается радоном, содержащимся в атмосферном воздухе вблизи поверхности земли в количестве около 10^{-16} кюри в 1 см^3 , и только 1,8 пар ионов в 1 см^3 образуется здесь ежесекундно под действием космических лучей. Так как радон попадает в атмосферный воздух из почвы, то уже на небольшой высоте ионизация, вызываемая его радиоактивным излучением, практически становится равной нулю, тогда как ионизация, вызываемая космическими лучами, быстро возрастает. Изменение суммарной ионизации с высотой показано на рис. 368 пунктиром.

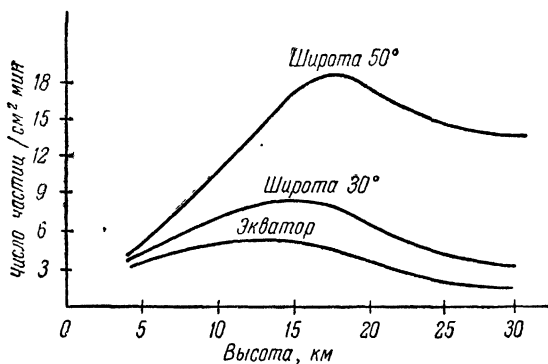


Рис. 369. Широтный эффект для частиц, проходящих через слой свинца 10 см .

На высотах около 15 км число пар ионов, образуемых космическими лучами в 1 см^3 в секунду, достигает 300, т. е. величина ионизации космическими лучами стратосферы на этих высотах почти в 160 раз превышает ионизацию, создаваемую ими у поверхности земли. Вся толща атмосферы в отношении поглощения космических лучей эквивалентна 10-метровому слою воды. Слои атмосферы, лежащие выше 30 км , в отношении поглощения космических лучей эквивалентны слою воды толщиной всего 18 см .

С 1936—1937 гг. сначала Комптоном, потом другими исследователями были организованы систематические измерения интенсивности космических лучей в различных местах земного шара. Эти измерения показали, что в средних широтах интенсивность космических лучей у поверхности земли на 10—15 % больше, чем у экватора; на высоте 5 км широтный эффект (т. е. увеличение интенсивности космических лучей с удалением от экватора) составляет 30—40 %, а на больших высотах — 25 — 50 км (как было доказано измерениями, проведенными С. Н. Верновым, А. Н. Чарахьяном и др.), число проникающих в земную атмосферу космических частиц в средних широтах в несколько раз больше, чем у экватора (рис. 369).

Открытие широтного эффекта позволило установить, что первичное космическое излучение состоит из заряженных частиц. Действительно, заряженные частицы в магнитном поле Земли должны испытывать отклоняющее действие, детальный расчет которого был произведен Леметром для различных углов, образуемых направлением движения первичных частиц с горизонтом.

Сопоставление вычислений Леметра с измерениями широтного эффекта на различных высотах над уровнем моря показало, что космическое излучение, приходящее в верхние слои атмосферы, состоит из заряженных частиц, имеющих энергии порядка миллиардов (10^9) и более электроновольт. Отклоняющее действие магнитного поля Земли приводит к тому, что частицы не всех энергий могут достигать поверхности Земли. Минимальная энергия первичных частиц, при которой они еще могут преодолеть отклоняющее действие магнитного поля Земли, зависит от широты места и достигает наибольшего значения на экваторе, равного для вертикального направления 15 000 Мэв. Для средних широт она имеет порядок 3000—5000 Мэв.

Поэтому у верхней границы атмосферы на широте 50° число частиц космических лучей примерно в 10 раз больше, чем на экваторе, но средняя энергия их раза в три меньше. В итоге на средних широтах поток энергии космических лучей приблизительно в 3 раза превышает поток энергии в районах экватора.

Ослабление широтного эффекта при уменьшении высоты над уровнем моря объясняется тем, что в нижних слоях атмосферы в составе космических лучей преобладают частицы вторичного происхождения, возникающие в результате поглощения первичных частиц в атмосфере. Вследствие меньшей начальной энергии каждая первичная частица в среднем поясе образует меньше вторичных частиц, чем в районе экватора; поэтому на уровне моря число частиц в космических лучах мало различается для разных широт.

Расчеты показали, что если первичными частицами являются протоны, то вследствие искривления их траекторий магнитным полем Земли число протонов, приходящих (на экваторе и в тропическом поясе) с запада, должно почти в 2 раза превосходить число протонов, приходящих с востока. Это явление, получившее название *восточно-западной асимметрии*, было впервые экспериментально исследовано в 1939 г. американским ученым Джонсоном, проводившим наблюдения на различных, но не очень больших высотах в экваториальном поясе. Джонсон установил, что «ост-вест-эффект» действительно существует, но количественные результаты его наблюдений оказались почти в 10 раз меньше ожидаемых. В связи с этим в 40-х годах существовало предположение, что первичными частицами космических лучей являются электроны.

В 1948 г. исследование восточно-западной асимметрии было повторено советскими учеными С. Н. Верновым и Н. А. Добротинным, применившими разработанную ими весьма точную аппаратуру.

Они создали телескопическую установку, которая поднималась шарами-зондами на высоту 20—30 км и была оснащена устройствами, позволяющими непрерывно передавать по радио на землю результаты измерений. Ось, проходящая через три счетчика Гейгера телескопической установки, составляла угол 60° с вертикалью и во время полета шара могла поочередно находиться в двух положениях: восточном и западном. Для сохранения определенного направления оси телескопической установки было применено реле с тремя фотоэлементами, на которые действовали лучи Солнца, служившего, таким образом, ориентиром. Исследования Вернова и Добротина, в противоположность несовершенным измерениям Джонсона, показали, что на достаточно больших высотах (15—20 км) интенсивность космических лучей, приходящих с запада, значительно превышает интенсивность лучей, приходящих с востока, как это и должно быть при *положительном* заряде первичных частиц.

С наибольшей убедительностью природа первичного космического излучения была установлена в результате применения *метода толстослойных фотопластинок*. Этот метод изучения космических лучей и ядерных процессов разработан Л. С. Мысовским, А. П. Ждановым и др. на основе наблюдений, показавших, что α -частицы, попадая в эмульсию фотопластинки под острым углом к ее поверхности, оставляют в ней характерный след, становящийся видимым в микроскоп после проявления. Пробег α -частицы в фотоэмульсии вследствие большой плотности среды составляет несколько десятков микрон. У обычных фотопластинок слой светочувствительной эмульсии имеет толщину всего около 20 мк. Для ядерных исследований изготавливают пластинки с тридцатикратной и более толщиной светочувствительного слоя (до 600 и даже 1000 мк) и применяют мелкозернистые эмульсии, позволяющие запечатлеть след протонов.

Изучение следов космических частиц в толстослойных фотопластинках, поднятых при помощи ракет на высоту 100 км, не оставляют сомнения в том, что *первичными частицами космического излучения являются главным образом протоны и в меньшем количестве α -частицы и ядра других более тяжелых элементов.*

Интенсивность первичных космических лучей равна примерно 100 000 Мэв в минуту на 1 см^2 в единице телесного угла.

По порядку величины энергия, приносимая на Землю космическим излучением, примерно равна энергии, получаемой Землей от звезд ¹⁾.

В среднем в 1 мин. на 1 см^2 поверхности атмосферы Земли в единице телесного угла падает 10 первичных частиц (со средней энергией 10 000 Мэв). Пронизывая слои атмосферы, первичные частицы

¹⁾ На один квадратный километр поверхности земной атмосферы космическое излучение доставляет мощность в среднем около 3,2 вт, а на всю поверхность земного шара — несколько меньше полутора миллионов киловатт.

вызывают превращения встречающихся им на пути атомных ядер азота, кислорода и других элементов, что приводит к возникновению *вторичных частиц*. На высоте 14 км число вторичных частиц в космических лучах достигает максимума, а на меньших высотах быстро уменьшается, так как здесь происходит их интенсивное поглощение плотными слоями воздуха.

Часть вторичных космических лучей состоит из электронов, позитронов и фотонов, которые почти полностью задерживаются слоем свинца толщиной 10 см; эту часть называют *мягкой компонентой космических лучей*; другую, проходящую через указанный фильтр без существенного ослабления, — *жесткой компонентой*. На уровне моря космические лучи на $\frac{2}{3}$ состоят из жесткой компоненты, но на высоте 14 км, напротив, интенсивность мягкой компоненты более чем в 3 раза превышает интенсивность жесткой компоненты (рис. 370).

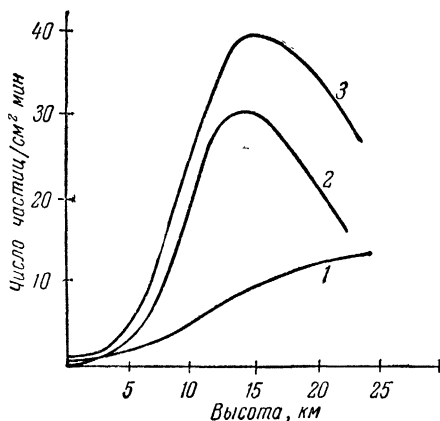


Рис. 370. Интенсивность жесткой компоненты (кривая 1), мягкой компоненты (кривая 2) и суммарная (кривая 3) космических лучей (для геомагнитной широты 50° N).

§ 97. Каскадное образование электронно-позитронных пар в космических лучах. Потери энергии электронами на тормозное излучение

В 1933—1935 гг. (т. е. в те же годы, когда Жолио-Кюри в своих опытах с радиоактивными лучами обнаружил возникновение электронно-позитронных пар; § 91) Росси и другие физики установили, что образование электронно-позитронных пар постоянно происходит в космических лучах. Оказалось, что в космических лучах этот процесс часто развивается *каскадно* (в особенности при поглощении космических лучей такими плотными веществами, как свинец): взаимодействие электрона и позитрона первой возникшей пары с веществом приводит к образованию новых электронно-позитронных пар, и, таким образом, число частиц стремительно нарастает — создается *электронно-позитронная лавина*.

Пролетая вблизи атомного ядра, электроны, позитроны и другие заряженные частицы испытывают изменение своей скорости по величине и направлению, а, как известно из электродинамики, заряд, движущийся ускоренно, должен излучать энергию. В результате