

§ 100. Взрывные ядерные ливни и их каскадное развитие в космических лучах

Схема явлений, происходящих в космических лучах, приведенная в конце предыдущего параграфа, не полна; в ней не представлен особенно привлекающий сейчас к себе внимание физиков процесс *каскадного развития ядерно-взрывных превращений*.

Еще в 1928 г. Гофман, изучая ионизацию воздуха, вызываемую космическими лучами, заметил, что несколько раз в сутки на мгновение происходит многократное увеличение интенсивности ионизации, производимой космическими лучами. Применив счетчики Гейгера и поглощающие фильтры, Оже в 1938 г. установил, что при ионизационных толчках Гофмана одновременно появляются большие группы ионизирующих частиц.

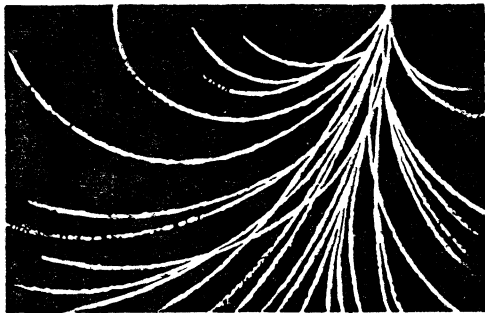


Рис. 378. Взрывной ливень из 28 частиц.

Кроме того, обнаружилось, что ионизационные толчки одновременно охватывают значительные площади, в некоторых случаях до квадратного километра. Появление на обширной площади многомиллионной группы частиц (до миллиарда частиц), движущихся совместно, не может быть объяснено развитием только одной электронно-позитронной лавины. Это может быть только итогом *одновременного зарождения и параллельного развития множества электронно-позитронных лавин*.

Поскольку выяснилось, что внезапное увеличение числа частиц в космических лучах происходит в толще атмосферы и постепенно охватывает большую площадь, все описанное явление в целом стали называть *широким атмосферным ливнем космических частиц*.

Наблюдения и расчеты, выполненные в 1944—1950 гг. группой советских ученых (Н. А. Добротин, В. И. Векслер, Г. Т. Зацепин и др. под общим руководством Д. В. Скобельцына), показали, что в начальной стадии дробление энергии первичных частиц космических лучей всегда происходит вследствие развития ядернокаскадного процесса. Второй стадией является каскадное развитие «дочерних» электронно-позитронных лавин. Когда энергия первичной частицы особенно велика, то развивается широкий атмосферный ливень космических частиц. При меньшей энергии первичной частицы ядернокаскадный процесс обрывается быстрее и число одновременно зарождающихся дочерних электронно-позитронных лавин оказывается

небольшим (тем не менее, и в этом случае они покрывают довольно широкую площадь). Таким образом, широкий атмосферный ливень является только крайним случаем обычных, постоянно развивающихся атмосферных ливней космических частиц.

В ядернокаскадном процессе основным событием является *взрывное расщепление ядер* азота и кислорода воздуха, сопровождающееся выбросом: нескольких заряженных и нейтральных π -мезонов, нескольких нейтронов или протонов (или тех и других) и иногда дейтонов, тритонов, α -частиц. Эти частицы образуют *единичный ядерный ливень*. Уже недалеко от ядра ядерный ливень обогащается: μ^\pm -мезонами от распада π^\pm -мезонов, γ -фотонами от распада π^0 -мезонов, электронами и позитронами от распада μ^\pm -мезонов.

На рис. 378 схематически показана фотография ионизационных следов взрывного ядерного ливня, сделанная посредством камеры Вильсона, помещенной в сильное магнитное поле. Этот ливень насчитывает 28 частиц; по отклонению и кривизне траекторий можно судить о знаке заряда и величине импульса частиц.

Для анализа состава ядерных ливней по характеру ионизационных следов частиц в фотоэмульсии толстослойных пластинок делают микрофотографии этих следов с большим увеличением. Рис. 379 схематически воспроизводит микрофотографию ионизационной звезды, которая образована взрывом ядра серебра в эмульсии; сплошные следы — траектории медленных протонов и других тяжелых частиц, пунктирные — следы слабо ионизирующих частиц: быстрых протонов и π -мезонов.

В ядерных превращениях, вызываемых частицами очень большой энергии, в отличие от превращений, рассмотренных в § 90 и 94, промежуточное ядро не успевает возникнуть и выброс частиц происходит преимущественно в направлении движения налетающей частицы. Столкновение налетающей частицы большой энергии

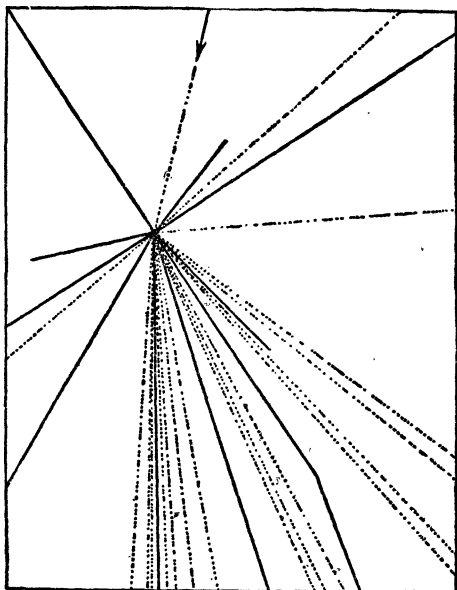


Рис. 379. Ядерный ливень («звезда») из 27 частиц. Рисунок сделан по микрофотографии ионизационных следов в эмульсии толстослойной фотопластинки.

с ядром вызывает *мгновенное разрушение той части ядра, в которую она проникла*. В этом случае выброшенные частицы правильнее рассматривать не как «испарившиеся» из ядра, а как вышибленные из него налетающей частицей (вследствие этого такие превращения называют *ядерными реакциями скальвания*). Однако некоторая часть

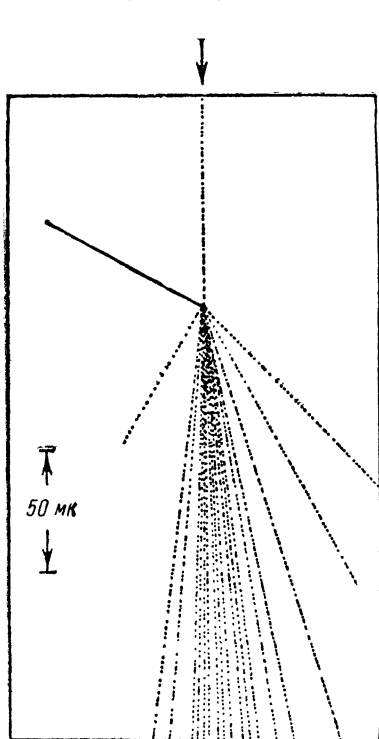


Рис. 380. Ядерный ливень («струя») из 19 частиц. Энергия первичной частицы 300 000 Мэв.

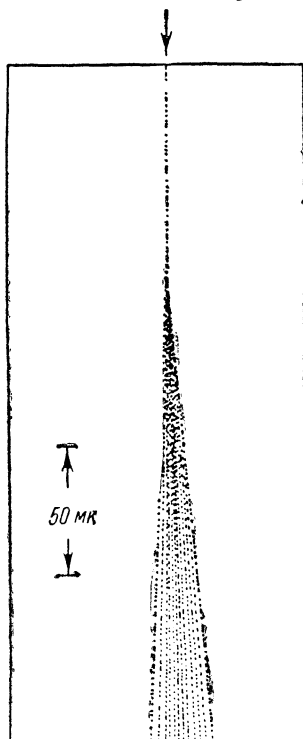


Рис. 381. Ядерный ливень («струя») из 12 частиц. Энергия первичной частицы 3 000 000 Мэв.

энергии налетевшей частицы в реакциях скальвания передается также остальным нуклонам ядра. Поэтому возникающее в реакциях скальвания ядро оказывается в сильно возбужденном состоянии, и это приводит к последующему испарению из него еще одного или нескольких нуклонов.

Рис. 380 и 381 схематически показывают ядерные ливни, вызванные частицами очень больших энергий: 300 000 и 3 000 000 Мэв. Из сопоставления этих рисунков с рис. 379, где показан ядерный ливень, вызванный частицей, имеющей меньшую энергию, ясно видно, как с ростом энергии сужается конус углов вылета образующихся частиц.

Некоторые из частиц ядерного ливня, двигаясь приблизительно в том же направлении, что и первичная частица, и встретив на своем пути атомное ядро, в свою очередь вызывают взрывное расщепление этого ядра, порождая, таким образом, вторичный ядерный ливень. Частицы, способные вызывать ядерные взрывы, называют *ядерноактивными*, а все остальные — *ядернонеактивными*. При всех энергиях μ -мезоны ядернонеактивны. Напротив, π -мезоны, так же как и нейтроны, протоны, дейтоны, α -частицы, при достаточно больших энергиях ядерноактивны.

При особо большой начальной энергии первичного протона вторичные ядерноактивные частицы в свою очередь вызывают взрывной ядерный ливень, то же и третичные и т. д., пока энергия частиц не уменьшится до 5000—10 000 *Мэв*; далее процессы развиваются по схеме на стр. 499.

Наиболее широкие атмосферные ливни, разветвляющиеся к уровню моря в сотни миллионов частиц со средней энергией порядка десятков мегаэлектронвольт, порождаются теми редкими в потоке первичных лучей частицами (протонами или ядрами), энергия которых достигает значений 10^9 — 10^{11} *Мэв* (10^{15} — 10^{17} *эв*).

Ряд исследований указывает, что в ядерных ливнях, вызываемых частицами космических лучей, кроме μ -мезонов и π -мезонов, наблюдаются и более тяжелые заряженные и нейтральные частицы. Поуэлл, Рочестер и другие физики в 1948—1954 гг. сделали более 150 000 снимков с камерой Вильсона и в нескольких десятках случаев обнаружили на этих снимках двулучевые (*V*-образные) следы распада мезонов, имеющих массу, в несколько раз превышающую массу π -мезонов, а также нейтральных и заряженных частиц с массой, превышающей массу нуклонов. Позже следы распада этих *тяжелых мезонов* и *гиперонов* (так стали называть частицы с массой больше массы нуклона) были обнаружены и в опытах с толстослойными фотопластинками, а в последние годы они были получены в опытах с мощными ускорителями частиц. Удалось также исследовать их свойства. В итоге в настоящее время можно считать установленным, что в космических лучах присутствуют тяжелые мезоны и гипероны, перечисленные в таблице на следующей странице.

Следует отметить, что среднее время жизни всех перечисленных здесь частиц (10^{-8} — 10^{-10} *сек*) в огромное число раз (примерно в 10^{12}) превышает то среднее время жизни ($\sim 10^{-20}$ *сек*), которое можно было ожидать для этих частиц согласно принятым в ядерной физике теоретическим представлениям. Поэтому перечисленные частицы называют *странными частицами*. По предположению А.Пайса, подтвержденному опытом, странные частицы всегда возникают по две одновременно («совместное рождение») и, быстро расходясь одна от другой, уходят от того сильного взаимодействия, которое за короткое время (порядка 10^{-20} *сек*) должно было бы привести к их распаду (§ 111, п. 4).

Частица	Масса покоя в массах электрона	Среднее время жизни в сек	Распад
Тяжелые мезоны (спин = 0)			
K^+ -мезон	966,5	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$\left\{ \begin{array}{l} 2\pi^+ + \pi^- \\ \pi^+ + \pi^0 \\ \mu^+ + \nu \end{array} \right. \quad \left(\begin{array}{l} +74,5 \text{ Мэв} \\ +219 \text{ Мэв} \\ +381 \text{ Мэв} \end{array} \right)$
K^- -мезон	966,5	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$\left\{ \begin{array}{l} 2\pi^- + \pi^+ \\ \pi^- + \pi^0 \\ \mu^- + \nu \end{array} \right. \quad \left(\begin{array}{l} +74,5 \text{ Мэв} \\ +219 \text{ Мэв} \\ +388 \text{ Мэв} \end{array} \right)$
K_θ^0 -мезон (тета-ка-мезон)	965	$0,84 \cdot 10^{-10}$	$\pi^+ + \pi^- \quad (+217 \text{ Мэв})$
K_τ^0 -мезон (тау-ка-мезон)	965	$\sim 10^{-7}$	$\left\{ \begin{array}{l} \pi^+ + \pi^- + \pi^0 \\ \pi^\pm + \mu^\mp + \nu \\ \pi^\pm + e^\mp + \nu \end{array} \right. \quad \left(\begin{array}{l} +70 \text{ Мэв} \\ +248 \text{ Мэв} \\ +404 \text{ Мэв} \end{array} \right)$
Гипероны (спин = $\frac{1}{2}$)			
Λ^0 -гиперон (лямбда-частица)	2181	$2,86 \cdot 10^{-10}$	$\left\{ \begin{array}{l} p + \pi^- \\ n + \pi^0 \end{array} \right. \quad \left(\begin{array}{l} +36,6 \text{ Мэв} \\ +40 \text{ Мэв} \end{array} \right)$
Σ^+ -гиперон (сигма-частица)	2325	$7 \cdot 10^{-10}$	$\left\{ \begin{array}{l} p + \pi^0 \\ n + \pi^+ \end{array} \right. \quad \left(\begin{array}{l} +116 \text{ Мэв} \\ +110 \text{ Мэв} \end{array} \right)$
Σ^- -гиперон	2341	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$n + \pi^- \quad (+118 \text{ Мэв})$
Σ^0 -гиперон	2324		$\Lambda^0 + \gamma \quad (+37,9 \text{ Мэв})$
Ξ^- -гиперон (кси-частица)	2585	от 10^{-10} до 10^{-9}	$\Lambda^0 + \pi^- \quad (+67 \text{ Мэв})$

§ 101. Корпускулярный и энергетический спектр космических лучей. Происхождение космического излучения

Подводя итог исследованиям космических лучей, можно сделать следующие заключения об их составе на разных высотах и о значении энергии, характерных для различных частиц.

На каждый квадратный сантиметр верхней поверхности атмосферы Земли падает в средних широтах (45°) примерно 12 частиц в минуту в единице телесного угла. Они несут поток энергии мощностью около 32 эргов в секунду на 1 м^2 в 1 стерадиане и имеют в среднем энергию 10 000 Мэв на одну частицу¹⁾.

Распределение первичных частиц по их энергиям приближенно определяется выражением

$$-\frac{dN}{dE} \approx \frac{A}{E^2},$$

¹⁾ Число, минимальная и средняя энергии первичных частиц различны для разных геомагнитных широт (§ 96), поэтому неодинаково соотношение и между числом вторичных частиц. Сведения о составе лучей и энергетическом спектре вторичных частиц являются еще недостаточно надежными и приводятся только с иллюстративной целью.