

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

§ 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.

где $A = \text{const}$. Следовательно, число частиц, имеющих энергию более E , уменьшается обратно пропорционально E : $N \approx A/E$.

Протонов с энергией меньше 800 Мэв в первичных лучах нет; возможно, что они отбрасываются действием магнитного поля Солнца.

В потоке первичных частиц, хотя и в ничтожном количестве, встречаются частицы с энергиями, в миллионы раз превышающими среднюю энергию первичных частиц (т. е. с энергиями порядка 10^{10} Мэв). Наличие таких частиц противоречит гипотезе, которую защищал Милликен, что космические лучи возникают при разрушении ядер тяжелых элементов. Действительно, внутриядерная энергия для самых тяжелых элементов только в 20 раз больше средней энергии первичных частиц космических лучей ($m_{\nu}c^2 \approx 240 m_{\text{прот}}c^2 = = 240 \cdot 1836 m_{\text{эл}}c^2 = 4,4 \cdot 10^5 m_{\text{эл}}c^2 \approx 2,2 \cdot 10^5 \text{ Мэв}$).

Примерно 83—84% первичных частиц — протоны, 15% — α -частицы и 1—2% — ядра более тяжелых элементов¹⁾ с атомными номерами до 26 (железо). Средняя энергия ядер превышает среднюю энергию протонов; она приблизительно пропорциональна заряду ядра. Последнее свидетельствует о том, что частицы приобретают ускорение в каких-то межзвездных силовых полях.

В межзвездном пространстве интенсивность первичных космических лучей во всех направлениях одинакова.

В верхних слоях атмосферы число частиц (для средних широт) возрастает приблизительно в $3^{1/2}$ раза и на высоте 14 км (где оно является максимальным) составляет около 6500 на 1 м^2 в секунду. Здесь поток частиц приближенно имеет состав, указанный в помещенной ниже таблице. Энергетический спектр «дочерних» частиц (π -мезонов, μ -мезонов, γ -фотонов распада π^0 -мезонов, δ -электронов) в основном воспроизводит спектр первичных частиц.

Плотность корпускулярного потока космических лучей уменьшается к уровню моря (для средних широт) по отношению к плотности первичного потока в 10 раз, а энергия, доставляемая корпускулярным потоком (т. е. без учета большой энергии γ -фотонов), уменьшается в 50 раз. На уровне моря наблюдается всего примерно 200 частиц на 1 м^2 в секунду; в том числе:

электроны и позитроны	~ 50,	т. е.	25%
медленные мезоны	~ 10		5%
медленные протоны	~ 2		1%
быстрые мезоны ²⁾	~ 140		69%

¹⁾ Хотя число ядер и α -частиц невелико, но они значительно тяжелее протонов, и поэтому их суммарная масса в космических лучах почти равна суммарной массе протонов. Процентное содержание ядер в первичных лучах приблизительно такое же, какова распространенность элементов в природе: преобладают ядра кремния, магния, углерода, кислорода. На больших широтах (где средняя энергия первичных частиц достигает $20\,000 \text{ Мэв}$ на нуклон и число их в $2^{1/2}$ раза превышает число частиц на широте 45°), приблизительно $1/3$ энергии космических лучей доставляется ядрами (включая α -частицы) и $2/3$ — протонами.

²⁾ На уровне моря число π -мезонов в 10 раз меньше числа μ -мезонов,

**Состав космических лучей для средних широт на высоте 15—20 км
над уровнем моря (по ориентировочным оценкам)**

Род частиц	Число частиц		Характерные значения энергии частицы в <i>Мэв</i>
	на 1 м ² в 1 сек	в % от общего числа	
Жесткая компонента			
Быстрые мезоны ¹⁾	1000	15	Для 50% более 2000—3000; для значительной доли 300—700 Первичные: для 50% более 5000—6000; вторичные: большинство 350—800
Быстрые протоны и другие ядерноактивные частицы ²⁾	650	10	
Все частицы жесткой компоненты	1650	25	
Мягкая компонента			
Электроны и позитроны, в том числе порожденные в каскадном процессе или непосредственно от распада μ -мезонов	650	10	Для начала лавины 500—1000 500—1000 До 2000 *) До 300 До 350 До 1000 и более с острым максимумом спектра при 70—150
от γ -фотонов распада π^0 -мезонов	2250	35	
от δ -электронов	650	10	
Медленные мезоны	650	10	
Медленные протоны и другие частицы	650	10	
γ -фотоны			
Все частицы мягкой компоненты	4850	75	

¹⁾ Включая π -мезоны, являющиеся ядерноактивными частицами. На небольших высотах (2—5 км) их примерно в 10 раз меньше, чем μ -мезонов; в самых верхних слоях атмосферы, напротив, они находятся в преобладающем количестве.

²⁾ Приблизительный состав нуклонов и ядер (быстрых и медленных) на высоте 15 км по отношению к общему числу частиц: протонов 6%, дейтронов, тритонов и α -частиц 3%, нейтронов 2%. На уровне моря число нейтронов в 100 раз меньше.

*) При энергиях порядка 2000 *Мэв* сверхбыстрые электроны проникают через слой свинца 10 см, так что они только условно могут быть отнесены к мягкой компоненте.

Исследования советских ученых (Д. В. Скобельцына, Н. А. Добротина и др.) показали, что в момент развития широкого атмосферного ливня (§ 100), кроме большого мгновенного возрастания плотности корпускулярного потока космических лучей, резко изме-

няется и их состав: процентное соотношение между частицами на уровне моря приближается к тому, которое обычно наблюдается в стратосфере. Поскольку широкий атмосферный ливень вызван первичными частицами исключительно большой энергии, то все процессы, сопровождающие дробление этой энергии, простираются в атмосфере на большую глубину и на мгновение картина этих процессов на уровне моря становится сходной с той, которая при средних энергиях первичных частиц имеет место на высоте 15 км.

Со времен открытия космических лучей было высказано много гипотез об их происхождении. Однако почти все эти гипотезы оказались неверными. До настоящего времени происхождение космических лучей остается нерешенной проблемой.

Установлено, что некоторая часть космического излучения возникает в пределах нашей солнечной системы. Ее источником является Солнце, что доказывается увеличением интенсивности космических лучей в периоды усиления солнечной активности. Однако излучение Солнца составляет небольшую часть в общем потоке космических лучей, приходящих на Землю. Остальная же часть этого потока возникает где-то далеко за пределами солнечной системы.

Главной трудностью в объяснении происхождения космических лучей является то, что некоторые космические частицы обладают огромной энергией и необходимо ответить на вопрос, где и при каких условиях они были ускорены до таких значений энергии.

Согласно распространенным сейчас взглядам ускорение космических частиц происходит в существующих во Вселенной магнитных полях, создаваемых «облаками» межзвездного ионизированного вещества¹⁾. По косвенным оценкам напряженность этих магнитных полей порядка 10^{-5} э.

Однако для ускорения частиц в межзвездных космических полях до огромных энергий они должны обладать достаточно большой начальной энергией. Источником частиц с такой энергией могут служить вспышки новых звезд (в нашей Галактике вспыхивает примерно 50 новых звезд в год).

¹⁾ Существование межзвездных магнитных полей доказывается фактом поляризации света далеких звезд. Межзвездные магнитные поля могут создаваться перемещением облаков межзвездного ионизированного вещества (Э. Ферми, 1949 г.). Протяженность таких облаков, судя по астрофизическим данным, иногда составляет десятки световых лет. Возможно возникновение межзвездных магнитных полей вследствие турбулентных движений ионизированного вещества в межзвездных облаках (Я. П. Терлецкий и А. А. Логунов, 1953 г.). Приходится, однако, признать, что достаточно обоснованной картины возникновения межзвездных магнитных полей мы пока не имеем.