

состоит из He_2^4 и He_2^3 . В группе легких ядер (L) объединены ядра лития, бериллия и бора. Средние ядра (M) объединяют ядра углерода, кислорода, азота, фтора; ядра с порядковым номером $Z \geq 10$ составляют группу тяжелых (H) ядер. Потоки (I) перечисленных групп ядер приведены в табл. 11.

Таблица 11

Группа ядер	Z	\bar{A}	I
p	1	1	1300
α	2	4	94
L	3—5	10	2,0
M	6—9	14	6,7
H	10	31	2,0
VH	20	51	0,5

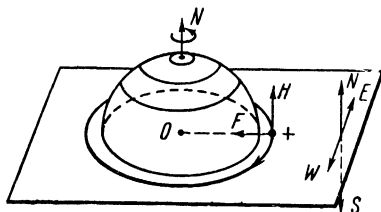


Рис. 109. Воздействие магнитного поля Земли на заряженные космические частицы

Химический состав космических лучей имеет две важные особенности: во-первых, в космических лучах в 10^5 раз больше элементов группы L, чем в среднем, в природе, — эти элементы быстро «выгорают» в звездах. Во-вторых, космические лучи значительно богаче тяжелыми и очень тяжелыми элементами, чем небесные тела. Объяснить эти две особенности можно, предполагая, что космические лучи до Земли проходят расстояние порядка $3 \cdot 10^{26}$ см за время порядка $3 \cdot 10^8$ лет и ядра группы L возникают из-за расщепления более тяжелых ядер при столкновении с ядрами атомов межзвездной среды. Можно предположить, что обилие тяжелых ядер объясняется тем, что ими богаты источники космических лучей или тем, что в источниках тяжелые ядра ускоряются эффективнее, чем легкие.

§ 56. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Большинство космических частиц, попадая в атмосферу, испытывает неупругие столкновения с ядрами атомов воздуха, образуя вторичное излучение. Пробег первичных частиц до взаимодействия колеблется от 60 г/см^2 (для протонов) до 21 г/см^2 (для тяжелых ядер). Поэтому на высотах ниже 20 км космическое излучение практически полностью имеет вторичный характер.

Первичные протоны и ядра с относительно небольшими энергиями ($\approx 10^9 \text{ эв}$) при попадании в атмосферу вызывают ядерные расщепления, в результате которых возникают вторичные протоны и нейтроны с меньшими энергиями. Вторичные частицы замедляются главным образом за счет ионизационных потерь и упругих столкновений.

Столкновение первичных протонов и ядер более высокой энергии ($\geq 10^{11} \div 10^{12}$ эв) с ядрами N и O, входящими в состав воздуха, сопровождается множественным рождением новых частиц высокой энергии. При этом образуются преимущественно π -мезоны, а также нуклоны, нуклон-антинуклонные пары, гипероны и K-мезоны.

Быстрые мезоны в свою очередь вступают в ядерные взаимодействия.

Поскольку толщина земной атмосферы приблизительно в 15 раз превышает ядерный пробег нуклонов высокой энергии (т. е. их средний пробег между соударениями с ядрами атомов воздуха), то взаимодействия вторичных радиоактивных частиц происходит многократно и их число лавинообразно нарастает. Энергия первичного потока дробится до тех пор, пока энергия радиоактивных частиц не станет близкой к 10^9 эв. При этих энергиях начинают уже преобладать процессы упругого рассеяния нуклонов и распада π^0 -мезонов, и поэтому лавина частиц перестает расти. π -мезон, распадаясь, дает начало μ -мезонной компоненте космических лучей. При распаде π^0 -мезона возникают два γ -кванта высокой энергии. Эти γ -кванты образуют электронно-позитронные пары и комптон-электроны, вызывая тем самым электронно-фотонный ливень, сопровождающий ядерный каскад.

Кроме π^0 -мезонов, источниками электронно-фотонной компоненты являются тормозные γ -кванты, быстрые δ -электроны (электроны, получившие при ионизации атома энергию, достаточную для вторичной ионизации) и лептонные продукты распада нестабильных мезонов. Каскадное размножение происходит бурно, так что средняя энергия частиц электронно-фотонного ливня быстро уменьшается. Ливень затухает, когда средняя энергия его частиц достигает критического значения, равного для воздуха 72 Мэв, ниже которого ионизационные потери преобладают над радиационными (см. гл. 4).

Таким образом, ливень космических частиц порожденный первичной радиоактивной частицей весьма высокой энергии содержит генетически связанные ядерную и электронно-фотонную компоненты. Такой ливень называется обыкновенно широким атмосферным ливнем. Благодаря кулоновскому рассеянию электронов поперечные размеры ливня у поверхности Земли могут достигать нескольких сотен метров. Однако центральную часть ливня составляют радиоактивные частицы высокой энергии, сохраняющие в основном направление первичной частицы.

Наблюдение широких атмосферных ливней позволяет регистрировать такие редкие события, как прохождение частиц с энергиями $10^{18} \div 10^{19}$ эв. Обычно ливень наблюдается и изучается системой счетчиков разного типа, расставленных на большой площади и включенных на совпадение. Увеличение площади регистрации особенно важно для изучения первичных частиц максимальной энергии, число которых тем меньше, чем больше их энергия. Так, на площадь 10 м² частица с энергией $E \geq 10^{19}$ эв падает раз в не-

сколько дней. Метод широких атмосферных ливней является единственным, используемым при изучении космических лучей с энергией, большей $10^{14} \div 10^{15}$ эв.

Для меньших энергий проводится и прямое исследование элементарных взаимодействий с помощью фотографических эмульсий, камер Вильсона, ионизационных камер, но оно ограничивается энергиями 10^{12} эв из-за трудности регистрации относительно редких событий.

В настоящее время в результате различных исследований выявлен целый ряд общих характеристик актов множественной генерации частиц при столкновении нуклона с нуклоном или ядром атмосферы. Наиболее существенные из них следующие:

1. Эффективное сечение процесса в области энергии $\geq 10^{10}$ эв постоянно и равно геометрическому сечению (возможные отклонения не превышают 20—30%) (см. § 30).

2. Генерируются главным образом π -мезоны.

3. Вторичные частицы вылетают резко направленными потоками в направлении движения первичной частицы и в обратном направлении (в системе центра инерций), так что поперечные импульсы частиц сравнительно малы и почти не меняются вплоть до энергий $\approx 10^{15}$ эв.

4. Среднее число частиц n , рождающихся в акте, или, как говорят, множественность, медленно растет с энергией налетающей частицы в лабораторной системе; по-видимому, $n \sim E_L^{1/3}$ или $n \sim E_L^{1/4}$ (в интервале энергий $E_L = 10^{10}$ эв до $E_L = 10^{15}$ эв).

5. В большинстве случаев налетающий нуклон теряет на образование новых частиц лишь часть своей энергии ($\approx 0,5$), остальную долю энергии он сохраняет.

Однако все это надо рассматривать как средние данные, и отдельные акты могут чрезвычайно сильно различаться по своему характеру.

Теоретическое осмысливание процессов множественного рождения частиц и их характеристик представляет собой предмет многих исследований, далеких еще от полного решения проблемы.

§ 57. СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА УРОВНЕ МОРЯ

На уровне моря принято разделять космические лучи на мягкую и жесткую компоненту в зависимости от степени их поглощения в веществе.

В основе этого разделения были положены опыты Росси по определению проникающей способности космических лучей. Для регистрации вертикально идущих частиц был составлен из гейгеровских счетчиков так называемый «телескоп» (рис. 110), который регистрировал только тройные совпадения. Между счетчиками помещался свинцовый фильтр переменной толщины. Изучалась