

ионосферу); влияние на космические лучи межпланетной и межзвездной среды и магнитных полей; радиационные пояса вблизи Земли и других планет; происхождение космических лучей. Важнейшим средством изучения этих проблем является детальное исследование наблюдаемых на Земле и вблизи от нее разнообразных вариаций в потоке космических лучей.

§ 55. ПЕРВИЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ У ЗЕМЛИ

Согласно экспериментальным данным средняя энергия первичных космических частиц имеет порядок 10^{10} эв, энергия же отдельных очень редких частиц достигает 10^{19} эв и, возможно, даже больше. Поток первичных космических лучей на границе асмосферы на высоких широтах равен $(0,7 \div 1)$ частиц/см²·сек. Общий поток энергии, приносимый космическими лучами на Землю, ничтожно мал в сравнении с энергией, получаемой Землей от Солнца и сравним с энергией видимого света звезд ($1,5 \cdot 10^6$ кВт).

Геомагнитные явления. В выяснении природы первичного космического излучения чрезвычайно важную роль сыграли так называемые геомагнитные эффекты, т. е. зависимость интенсивности космических лучей и их энергетического спектра от геомагнитных координат точки наблюдения, а также зенитной и азимутальной ориентации регистрирующих приборов.

Магнитное поле Земли в первом приближении представляет поле магнитного диполя с магнитным моментом $8,1 \cdot 10^{25}$ гаусс·см, наклоненного на угол $11,5^\circ$ к земной оси и смещенного относительно нее и от центра Земли приблизительно на 300 км.

Заряженные частицы космических лучей при своем движении из мирового пространства вблизи Земли испытывают отклоняющее действие ее магнитного поля и это сказывается на распределении интенсивности космических лучей по земной поверхности.

Теория движения заряженных частиц в магнитном поле Земли первоначально разрабатывалась Штермером и в дальнейшем была развита Лемертом и Валлартой. Задача сводилась к вычислению траектории заряженных частиц с различными импульсами в поле магнитного диполя Земли при различных начальных условиях.

Широтный эффект. Заряженные частицы, идущие от внеземного источника, будут испытывать максимальное отклонение в магнитном поле Земли, когда они подходят к Земле в плоскости геомагнитного экватора.

Если импульсы этих частиц меньше некоторой величины, отклонение будет настолько сильным, что они вообще не попадут на поверхность Земли. По мере продвижения к полюсам Земли угол между траекторией частиц, движущихся в вертикальной плоскости, и магнитными силовыми линиями Земли уменьшается (рис. 106) и отклоняющее действие магнитного поля будет ослабе-

вать. На полюсе частицы, идущие по вертикали вдоль силовых линий, вообще не будут испытывать никакого отклонения.

Вытекающая отсюда естественная зависимость интенсивности космических лучей от геомагнитной широты места наблюдения

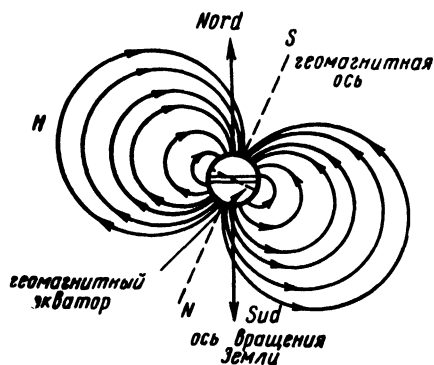


Рис. 106. Магнитное силовое поле Земли

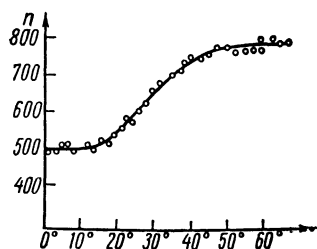


Рис. 107. Зависимость числа тройных совпадений в минуту у поверхности Земли от геомагнитной широты

носит название широтного эффекта (рис. 107). Теория Штермера дает следующую связь между геомагнитной широтой места наблюдения λ и минимальным импульсом, которым должна обладать частица, чтобы, двигаясь по вертикали, попасть в эту точку:

$$p = 14,9 \cos^4 \lambda \quad (p \text{ дается в } 10^9 \text{ эв/с}).$$

Таким образом, на экваторе минимальный импульс входящих частиц $p \approx 14,9 \cdot 10^9 \text{ эв/с}$, на широте 45° $p \approx 3,6 \cdot 10^9 \text{ эв/с}$.

Широтный эффект подробно был изучен с помощью шаровзондов, запускаемых в стратосферу. Поднимать аппаратуру на большую высоту было необходимо потому, что на уровне моря широтный эффект сильно маскируется различными вторичными процессами.

В результате изучения широтного эффекта было получено несколько фундаментальных результатов.

1. Было показано, что первичная компонента на 90% состоит из заряженных частиц (а не фотонов, как считали вначале) с импульсом, большим $15 \cdot 10^9 \text{ эв/с}$.

2. Сопоставление данных, полученных на нескольких широтах, позволило определить вид энергетического спектра первичных частиц космического излучения.

В дальнейшем энергетический спектр уточнялся по изучению широких атмосферных ливней (см. § 45) и в работах на спутниках. Было установлено, что поток космических лучей в области

кинетических энергий $E_k > 1 \text{ Гэв}$ на нуклон монотонно и довольно быстро падает с ростом энергии (рис. 108). Интегральный энергетический спектр имеет вид

$$I_A(> E) \approx \frac{k}{E^{\gamma-1}}, \quad (118)$$

где I_A — поток частиц с атомным весом A и полной энергией, приходящейся на один нуклон, большей E . В среднем во всей области энергий до 10^{19} эв γ лежит вблизи $\gamma = (2,5 \div 2,8)$.

Для относительно мягких частиц с энергией $E_k < 1 \text{ Бэв}$ на нуклон спектр уже не определяется выражением (118). Поток перестает расти с уменьшением энергии. Этот эффект — отсутствие в первичных космических лучах у Земли частиц с малой энергией — носит название высокоширотного обрезания спектра; он обусловлен магнитными полями в солнечной системе.

Восточно-западная асимметрия. Поток заряженных частиц отклоняется магнитным полем в направлении, перпендикулярном к полю и к направлению движения частиц. Если частицы заряжены положительно, то магнитное поле Земли отклоняет их к Востоку, если отрицательно — к Западу (рис. 109). Следовательно, если большинство частиц имеет положительный заряд, то находящийся на Земле наблюдатель обнаружит более высокую интенсивность космических лучей, идущих с запада, чем с востока. Этот эффект должен быть более заметен в районе экватора.

В 1949 г. проводились измерения на шарах-зондах в районе экватора. Для фиксации направления на восток использовалась специальная фотоэлектрическая система, следившая за Солнцем. Телескоп был наклонен под углом 60° к вертикали. Обнаруженная асимметрия в распределении частиц показала, что большинство первичных частиц заряжено положительно.

Химический состав первичного излучения. Состав первичного излучения изучался непосредственно с помощью ионизационных камер, счетчиков и ядерных эмульсий, поднятых на воздушных шарах и ракетах. Эти исследования показали, что 90% первичных частиц являются протонами, около 7% составляют α -частицы и только 3% приходится на долю всех тяжелых ядер. В табл. 11 приведен состав первичных космических лучей, имеющих энергии в пределах от $2,5 \text{ Бэв}$ на нуклон до 10^{13} Бэв на нуклон.

Существующие методы не дают возможности определить атомный вес ядер в космических лучах. Поэтому, строго говоря, группа p в таб. 11 объединяет протоны, дейтоны и ядра трития, группа α

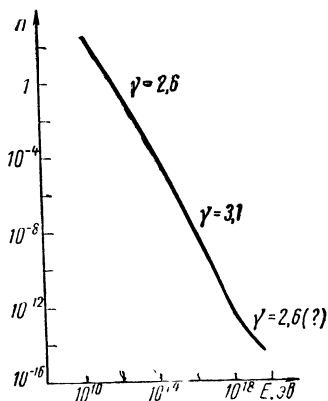


Рис. 108. Энергетический спектр первичного космического излучения (n в числе частиц на 1 м^2 в 1 сек в стер)

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

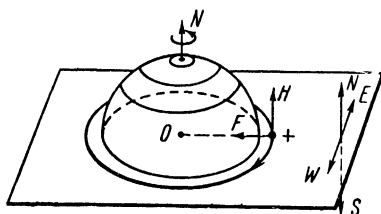


Рис. 109. Воздействие магнитного поля Земли на заряженные космические частицы

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.