

и наблюдения очень разнообразны. Это и наземные счётчиковые установки большой площади для регистрации т. н. широких атм. ливней (см. ниже), и мировая сеть нейтронных мониторов, и счётчиковые телескопы, ионизац. камеры, фотоядерные эмульсии, поднимаемые на аэростатах, геофизич. ракетах, на ИСЗ и межпланетных автоматич. станциях. С развитием космич. техники и радиохимич. методов стало возможным изучать характеристики КЛ по радиоизотопам и трекам, образуемым ими в метеоритах, лунном грунте и т. п.

Используются также косвенные методы изучения КЛ — по наблюдениям радиоизлучения космич. электронов, по данным о гамма-излучении от распада нейтральных пионов, образуемых КЛ в межзвёздном пространстве, по эл.-магн. излучению солнечных вспышек, по эффектам ионизации, вызываемым КЛ в ниж. части ионосферы Земли (особенно в полярных широтах при вторжении СКЛ) и др.

Состав космических лучей. Более 90% частиц КЛ всех энергий составляют протоны, 7% — ядра гелия (α -частицы) и лишь небольшая доля (~1%) приходится на ядра более тяжёлых элементов (эти цифры относятся к частицам с энергией $\epsilon_k \geq 2,5$ ГэВ/нуклон). Относит. содержание ядер элементов в КЛ приведено в таблице.

Относительное среднее содержание ядер элементов в КЛ, на Солнце и в звёздах

Элемент	СКЛ	ГКЛ	Солнце	Звёзды
¹ H	4600*	685	1445	925
² He	70*	48	91	150
³ Li	—	0,3	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
⁴ Be — ¹⁰ B	0,02	0,8	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
⁶ C	0,54*	1,8	0,6	0,26
⁷ N	0,20	0,8	0,1	0,20
⁸ O**	1,0*	1,0	1,0	1,0
⁹ F	<0,03	<0,1	10 ⁻³	10 ⁻⁴
¹⁰ Ne	0,16*	0,30	0,054	0,36
¹¹ Na	—	0,19	0,002	0,002
¹² Mg	0,18*	0,32	0,05	0,04
¹³ Al	—	0,06	0,002	0,004
¹⁴ Si	0,13*	0,12	0,065	0,045
¹⁵ P — ²¹ Sc	0,06	0,13	0,032	0,024
¹⁶ S — ²⁰ Ca	0,04*	0,11	0,028	0,02
²² Ti — ²⁸ Ni	0,02	0,28	0,006	0,033
²⁶ Fe	0,15*	0,14	0,05	0,06

* Данные наблюдений для интервала энергий $\epsilon_k = 1-20$ МэВ/нуклон, остальные цифры в этой колонке относятся к $\epsilon_k > 40$ МэВ/нуклон. Точность значений ~10-50%.

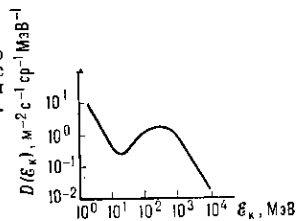
** Количество ядер кислорода принято за единицу.

Такой состав КЛ приблизительно соответствует ср. распространённости элементов во Вселенной с двумя существенными отклонениями: в КЛ значительно больше лёгких ядер (Li, Be, B) и тяжёлых ядер с $Z \geq 20$. Большое количество ядер Li, Be, B по сравнению со ср. распространённостью связано, вероятно, с расщеплением тяжёлых ядер при столкновениях с ядрами атомов межзвёздной среды. Из наблюдаемого количества ядер лёгкой группы и изотопного состава ядер Be получены оценки расстояния, проходимого КЛ в межзвёздной среде (~3 г/см², или ~3·10²⁵ см), и времени жизни КЛ в Галактике ($\leq 10^8$ лет). КЛ содержит также $\leq 1\%$ релятивистских электронов с энергиями $\epsilon_k \geq 1$ ГэВ, а также позитроны, причём наблюдаемое отношение их интенсивностей составляет ~0,1. В 1979-1981 получены эксперим. свидетельства того, что в КЛ значит. количество антипротонов ($\geq 10^{-4}$ по отношению к протонам).

Энергетический спектр имеет вид немонотонной кривой с максимумом при $\epsilon_k \approx 300-500$ МэВ/нуклон и минимумом при $\epsilon_k = 20-30$ МэВ/нуклон (рис. 1). Уменьшение интенсивности КЛ при $\epsilon_k \leq 400$ МэВ/нук-

лон объясняют модуляцией, оказываемой межпланетными магн. полями, переносимыми солнечным ветром, хотя вид первичного спектра за пределами Солнечной системы неизвестен. Характерный провал в спектре в интервале 10-40 МэВ — вероятно, результат наиболее эфф. рассеяния частиц на неоднородностях межпланетного магн. поля.

Рис. 1. Дифференциальный спектр космических лучей (протонов) с $\epsilon_k \leq 10$ ГэВ в межпланетном пространстве вблизи орбиты Земли в 1965.



В области энергий левее минимума (10 МэВ) спектр испытывает сильные и частые нерегулярные вариации, вызванные потоками СКЛ. Энергетич. спектр СКЛ у Земли сильно меняется от вспышки к вспышке, имеет приблизительно степенной характер с показателем степени 3-7 (см. *Солнечные космические лучи*). В спокойные периоды, когда потоки СКЛ обладают минимальной интенсивностью и относительно стабильны, в межпланетном пространстве существует квазистационарный фон малоэнергичных КЛ со спектром, показанным на рис. 1 (левее минимума).

Ниж. граница энергии СКЛ неопределённа и составляет $\leq 10^6$ эВ. Верх. предел энергии СКЛ $\approx 2 \times 10^9$ эВ; имеются отд. указания о регистрации солнечных протонов с энергией до 10¹⁰ эВ.

В области энергий выше 10¹⁰ эВ дифференц. спектр уже не подвержен модуляции и хорошо описывается степенной ф-цией с показателем степени $\gamma \approx 2,7$ вплоть до 10¹⁵ эВ. При $\epsilon_k \approx 10^{15}$ эВ в спектре имеется излом, спектр становится более крутым ($\gamma \approx 3,2$). В области $\epsilon_k \geq 10^{18}$ эВ форма спектра известна плохо, но есть указания на то, что спектр вновь становится более пологим. При $\epsilon_k \geq 10^{19}-10^{20}$ эВ спектр должен резко обрываться из-за ухода частиц в межгалактич. пространство и взаимодействия с фотонным реликтовым излучением. Поток частиц сверхвысоких энергий очень мал: на площадь 10 км² за год падает в среднем не более одной частицы с $\epsilon_k \geq 10^{20}$ эВ.

Форма энергетич. спектра α -частиц и более тяжёлых ядер близка к форме спектра протонов; это означает, что хим. состав КЛ слабо зависит от энергии, однако данные о составе КЛ в области высоких энергий весьма скудны. Спектр электронов при достаточно высоких энергиях также близок к степенному с $\gamma = 2,7$.

Вариации КЛ. Проникая в Солнечную систему, первичные ГКЛ вступают во взаимодействие с межпланетным магн. полем гелиосферы, к-рое формируется намагниченной плазмой, движущейся радиально от Солнца (*солнечный ветер*). В Солнечной системе устанавливается равновесие между конвективным потоком КЛ, выносимым солнечным ветром наружу, и потоком, направленным внутрь системы. Влияние межпланетного поля «чувствуют» частицы сравнительно небольших энергий ($\epsilon_k < 10^{10}$ эВ), ларморовский радиус к-рых сравним с размерами неоднородностей межпланетного магн. поля. Параметры гелиосферы изменяются с изменением солнечной активности в течении 11-летнего цикла, и в ГКЛ наблюдается модуляция интенсивности, наз. 11-летней вариацией. Интенсивность КЛ изменяется в противофазе с солнечной активностью. Амплитуда вариаций различна для разных энергий, а интегральный поток ГКЛ меняется приблизительно в два раза.

Кроме 11-летней наблюдаются ещё 27-дневная, солнечно-суточная вариации, *Форбуша эффект* и др. 27-дневная вариация КЛ с амплитудой ~10% в меж-