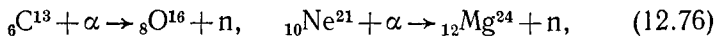
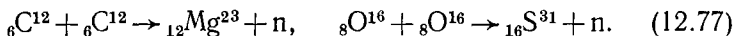


чение нескольких секунд — 10^{20} нейтронов. Между тем ядерная эволюция звезд происходит с определенным дефицитом свободных нейтронов. Поэтому нетривиальным является вопрос о реакциях, снабжающих звезды достаточным количеством нейтронов.

Источниками нейтронов могли бы быть реакции (α, n) на ядрах ${}_6\text{C}^{13}$ и ${}_{10}\text{Ne}^{21}$:



а также реакции горения углерода и кислорода:



В настоящее время, однако, не ясно, могут ли эти реакции обеспечить звезду необходимым количеством нейтронов, особенно в случае r -процесса.

§ 3. Космические лучи

1. Космическими лучами (В. Гесс, 1912) называются заполняющие космическое пространство высокоэнергичные стабильные микрочастицы — протоны, α -частицы и т. д. с энергией от десятка МэВ до $\sim 10^{20}$ эВ и выше. На пути к поверхности Земли космические лучи должны пройти толстый ($\approx 10^3$ г/см²) слой вещества — атмосферу, в которой они претерпевают сложную цепь превращений. Вследствие этого на поверхность Земли падает излучение, по своему составу не имеющее ничего общего с существующим в космическом пространстве. Это излучение часто называют *вторичным космическим излучением*, оставляя термин *первичное космическое излучение* за высокоэнергичными микрочастицами космического пространства.

В окрестности Земли первичное космическое излучение состоит из галактического космического излучения, генерированного в удаленных от Земли, но еще точно не известных объектах, и солнечного космического излучения. В дальнейшем, если не будет специально оговорено, мы под первичными космическими лучами будем понимать галактические космические лучи.

Если отвлечься от искажающего влияния магнитных полей Земли и межпланетного пространства, то в месте нахождения Солнечной системы первичное космическое излучение изотропно по направлению и постоянно во времени. Интенсивность его равняется 2—4 частиц/(см²·с). Пространственная и временная изотропия являются, по-видимому, результатом длительного «блуждания» частиц, в процессе которого стерлась всякая пространственная и временная выделенность источников космических частиц по отношению к Земле.

Анализ химического состава первичного космического излучения сопряжен со значительными техническими трудностями (регистрирующую и анализирующую аппаратуру нужно вынести

наконец, в среднем по Вселенной на один атом группы L приходится $3 \cdot 10^8$ атомов водорода, а в космических лучах всего лишь 650. Факт аномально большого содержания L -элементов в космических лучах можно использовать для определения порядка величины времени блуждания космических частиц в Галактике. Мы рассмотрим подробнее этот вопрос в следующем пункте.

Таблица 12.5. Химический состав космических лучей
 N/N_H — число частиц, приходящихся на одну частицу H -группы.
 Последние два столбца относятся к разным сериям данных.

Группа ядер	Z	N/N_H	N/N_H в среднем по Вселенной	
p	1	650	3360	6830
α	2	47	258	1040
L	3—5	1,0	10^{-5}	10^{-5}
M	6—9	3,3	2,64	10,1
H	≥ 10	1,0	1	1
VH	≥ 20	0,26	0,06	0,05
VVH	≥ 30	$\approx 0,3 \cdot 10^{-4}$	$0,6 \cdot 10^{-5}$	—

Важной характеристикой космических лучей является распределение по энергиям входящих в их состав частиц. Обычно энергетическое распределение космических частиц характеризуют числом $I(\geq E)$ частиц с энергией, большей некоторой заданной энергии E . Соответствующая кривая $I(\geq E)$ называется *кривой интегрального спектра*. Кривая интегрального спектра первичных космических протонов изображена на рис. 12.18. При полных энергиях протонов $E > 5$ ГэВ спектр хорошо описывается функцией

$$I(\geq E) \sim 1/E^{\gamma-1}, \quad (12.78)$$

где $\gamma = 2,5$.

Энергетическое распределение других ядер (не протонов) изучено в меньшей степени. Однако имеющиеся данные не противоречат формуле (12.78), если под E понимать энергию, приходящуюся на нуклон. Из формулы (12.78) видно, что спектр космических лучей простирается до очень высоких энергий. Однако число частиц со сверхвысокими энергиями ($> 10^{19}$ — 10^{20} эВ) очень мало. Например, одна частица с энергией, большей 10^{19} эВ, пролетает через 1 м^2 земной поверхности один раз в 2000 лет, а через площадь в

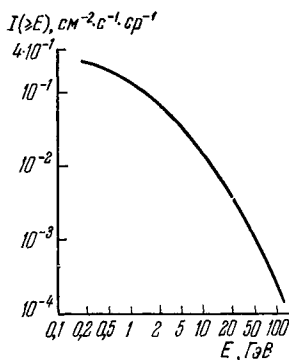


Рис. 12.18. Интегральный спектр протонов в космических лучах.

10 км² один раз в несколько дней. Поэтому данные о частицах сверхвысоких энергий по необходимости менее точные.

Усреднение энергии по спектру, изображенному на рис. 12.18, дает для средней энергии космической частицы значение 10 ГэВ. Интересно отметить, что в окрестности Земли средняя плотность энергии космических лучей

$$W_{\text{кл}} \approx 0,3 \text{ эВ/см}^3, \quad (12.79)$$

что очень близко к средним плотностям световой, магнитной и кинетической энергий движения межзвездного газа.

Важной особенностью энергетического спектра космического излучения является отсутствие частиц с кинетической энергией $E < 1$ ГэВ/нуклон. Эта особенность спектра носит название *высокоширотного обрезания* (см. п. 4) и объясняется, по-видимому, влиянием магнитных полей Солнечной системы.

2. Рассмотрим теперь те следствия, которые вытекают из факта аномально высокого содержания в космических лучах ядер группы L . Так как ядра изотопов бериллия, лития и бора во Вселенной встречаются очень редко, то маловероятно, чтобы в источниках космических лучей эти ядра содержались в аномально большом количестве. Более естественно считать, что ядра группы L образуются при столкновениях тяжелых космических частиц с межзвездным газом (реакции фрагментации, см. гл. IV, § 10, п. 2). Если принять, что все ядра группы L появились в результате столкновений космических лучей с межзвездным газом, то можно оценить то расстояние d , которое проходят космические лучи от источника до Солнечной системы. Как видно из табл. 12.5, на каждые десять тяжелых ядер групп M , N , VH в космических лучах приходится примерно два ядра группы L . Поэтому расстояние d будет по порядку величины определяться формулой

$$d \cdot N_A \sigma_{\text{фрагм}} \approx 1/5, \quad (12.80)$$

где $\sigma_{\text{фрагм}}$ — сечение фрагментации с вылетом ядер L -группы, N_A — число Авогадро. Полагая $\sigma_{\text{фрагм}} \approx 10^{-26}$ см², находим, что

$$d \approx 10 \text{ г/см}^2. \quad (12.81)$$

Для средней концентрации межзвездного газа в Галактике справедлива оценка

$$n \approx 2 \cdot 10^{-26} \text{ г/см}^3. \quad (12.82)$$

Отсюда следует, что космические лучи доходят до Земли с расстояния

$$l_{\text{кл}} \approx 3 \cdot 10^{26} \text{ см} \quad (12.83)$$

и движутся в течение времени

$$\tau_{\text{кл}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ лет.} \quad (12.84)$$

Последняя цифра принимается за время жизни космической частицы в Галактике. Это время играет важную роль при анализе вопроса о происхождении космических лучей. Интересно отметить, что длина $l_{\text{кл}}$ намного превосходит радиус Галактики:

$$l_{\text{кл}} \gg R_{\text{галакт}} \approx 5 \cdot 10^4 \text{ св. лет} = 1,5 \cdot 10^{23} \text{ см.} \quad (12.85)$$

Это связано с тем, что движение протона в Галактике напоминает диффузию частицы в хаотично ориентированных магнитных полях.

3. Особого рассмотрения заслуживает вопрос о содержании в первичных космических лучах легких частиц — электронов и позитронов, так как по магнитно-тормозному излучению электронов и позитронов космические лучи могут быть обнаружены в удаленных от нас участках пространства. Из простых соображений можно ожидать, что в первичных космических лучах будет содержаться некоторое количество электронов и позитронов. В самом деле, в результате столкновения космических частиц с ядрами межзвездного газа будут рождаться положительные и отрицательные пионы, при распаде которых по реакции



появятся электроны и позитроны. Кроме того, в источниках космических лучей наряду с атомными ядрами могут ускоряться также электроны и позитроны.

Экспериментально электроны в космических лучах были обнаружены в 1961 г. Оказалось, что поток электронов составляет около 1,5% потока всех космических частиц; соответственно энергия потока электронов составляет около 1% полной энергии космических частиц. Прямые измерения числа позитронов в космических лучах показали, что позитронов примерно в пять раз меньше, чем электронов. Отсюда следует, что основная доля космических электронов не связана с процессами типа (12.86), а испускается непосредственно источниками космического излучения.

В заключение отметим, что в космических лучах в небольшом количестве обнаружены также γ -кванты ($10 \text{ фотон}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ с $E_{\gamma} \approx \approx 50 \text{ МэВ}$) и, по-видимому, должны быть нейтрино, обнаружить которые очень трудно.

4. Магнитные поля Земли и межпланетного пространства в ряде случаев оказывают заметное влияние на первичное излучение. Влияние магнитного поля Земли сводится к следующему.

Во-первых, оно препятствует вхождению в атмосферу относительно малоэнергичных частиц. Рассматривая движение заряженных частиц в поле магнитного диполя (магнитного поля Земли), можно убедиться, что минимальный импульс p_{min} протона, при котором он может войти в атмосферу под углом θ к геомагнитной

параллели λ , определяется формулой

$$\rho_{\min} = 59,3 \frac{\cos^4 \lambda}{(\sqrt{1 - \cos^2 \vartheta \cdot \cos^2 \lambda} + 1)^2} \text{ ГэВ/с.} \quad (12.87)$$

Например, минимальный импульс $\rho_{\min}^{\text{КВ}}$, при котором протон может войти в атмосферу на экваторе ($\lambda = 0^\circ$), равняется 15 ГэВ/с. Напротив, на магнитном полюсе ($\lambda = 90^\circ$) частица может достигнуть атмосферы с любым импульсом ($\rho_{\min}^{\text{пол}} = 0$).

Существование минимального импульса (12.87) очевидным образом приводит к зависимости интенсивности первичного космического излучения от геомагнитной широты. Эта зависимость получила название *широтного эффекта*. О величине широтного эффекта можно судить по тому, например, что

$$\frac{I(90^\circ) - I(0^\circ)}{I(90^\circ)} \approx 0,36, \quad (12.88)$$

где $I(90^\circ)$ и $I(0^\circ)$ — соответственно интенсивность космических лучей на высоте 10 км на полюсе и на экваторе.

Рис. 12.19 Происхождение восточно-западной асимметрии.

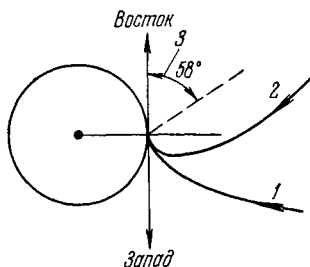
1, 2 — траектории положительно заряженных частиц, 3 — раствор угла конуса Штермера. Такая величина раствора имеет место при энергии протонов 2 ГэВ. Окружность слева — сечение земного шара плоскостью, перпендикулярной оси вращения Земли; ось вращения направлена от плоскости чертежа к читателю.

Во-вторых, магнитное поле Земли делает определенные направления входа частиц в атмосферу запрещенными. В частности, положительно заряженные частицы не могут входить в атмосферу под некоторыми углами к горизонту с востока («запрещенный конус Штермера», рис. 12.19). Это приводит к зависимости интенсивности космического излучения от ориентации регистрирующего прибора относительно стран света — эффекту азимутальной или *восточно-западной асимметрии*. Величину восточно-западной асимметрии характеризуют отношением

$$\frac{I_3 - I_B}{I_3 + I_B}, \quad (12.89)$$

где I_3 — интенсивность космического излучения с запада, I_B — интенсивность космического излучения с востока. На больших высотах это отношение достигает значения 0,25. Обнаружение восточно-западной асимметрии явилось в свое время доказательством того, что первичное космическое излучение состоит из положительно заряженных частиц.

Значительно менее изучено влияние межпланетных магнитных полей. Наиболее существенными из таких полей являются магнит-



ные поля движущихся сгустков плазмы, которые выбрасываются с поверхности Солнца во время хромосферных солнечных вспышек. Эти магнитные поля движутся в пространстве и периодически изменяют условия прохождения космического излучения. Они являются главной причиной различных *временных вариаций* первичного космического излучения — 11-летних, 27-летних и т. д. Считается, что влиянием этих же магнитных полей обусловлено и упомянутое в п. 1 высокоширотное обрезание энергетического спектра первичного космического излучения.

В заключение отметим еще одну особенность движения заряженных частиц в магнитном поле Земли. Для заряженной частицы с любой, но не превышающей нескольких ГэВ энергией в магнитном поле Земли существуют ловушки, т. е. области пространства, характеризующиеся тем, что заряженные частицы не могут ни влетать извне в них, ни вылетать из них. Эти магнитные ловушки имеют форму тороидов, охватывающих Землю в широтном направлении. Их удаленность от поверхности Земли определяется энергией частиц: чем выше энергия, тем ближе к Земле должна быть расположена ловушка.

Очевидно, что магнитные ловушки являются естественным резервуаром для накопления заряженных частиц. Поэтому вблизи Земли следует ожидать существования зон с повышенной концентрацией частиц. Такие зоны, содержащие главным образом протоны и электроны, были действительно обнаружены и получили название *радиационных поясов Земли* (Дж. ван Аллен, С. Н. Вернов и А. Е. Чудаков, 1958).

Нетривиальным является вопрос о том, как происходит инжекция заряженных частиц в ловушки. В настоящее время можно указать три механизма инжекции. Частицы могут попадать в ловушки:

а) за счет неадиабатических процессов (магнитогидродинамические ударные волны и т. д.) взаимодействия выбрасываемых Солнцем сгустков плазмы с магнитным полем Земли;

б) за счет распада нейтронов, приходящих либо от Солнца, либо из атмосферы, где они генерируются космическими лучами (см. п. 8);

в) наконец, за счет ядерных взрывов на больших высотах.

5. Время от времени Солнцем испускаются высокоэнергичные заряженные частицы, главным образом протоны и α -частицы — *солнечные космические лучи*. В периоды максимума солнечной активности за год происходит 5—13 хромосферных вспышек, во время которых испускается космическое излучение. Как правило, солнечные космические лучи имеют небольшую энергию $\lesssim 400$ МэВ, но весьма большую интенсивность $\approx 10^6 - 10^7$ частиц/(см²·с). В отдельных исключительных случаях испускаются частицы с энергией в несколько десятков ГэВ. Так, в частности, было 4 августа 1972 г. Всего за 40 с лишним лет наблюдений (1937—1978) было

зарегистрировано несколько десятков солнечных вспышек, во время которых Солнцем испускались частицы с энергией в несколько ГэВ.

6. Перейдем к рассмотрению поглощения космического излучения в атмосфере. В самых общих чертах процесс поглощения энергии первичных частиц протекает следующим двухступенчатым образом: энергия первичных частиц сначала затрачивается на создание большого числа вторичных частиц, а потом кинетическая энергия последних расходуется на ионизацию атмосферы. То, что энергия первичных частиц в конечном счете действительно расходуется в основном на ионизацию, видно из табл. 12.6, в которой приведен баланс энергии космического излучения.

Таблица 12.6. Баланс энергии космического излучения

Потоки энергии	Величина потока в МэВ·см ⁻² ·с ⁻¹ ·ср ⁻¹
первичных частиц	1400
затрачиваемой на ионизацию	615
затрачиваемой на излучение нейтрино	232
затрачиваемой на возбуждение ядер	80
вторичных частиц на уровне моря	38
Дефицит в потоках энергии обусловлен неточностями измерений.	

Вторичное космическое излучение состоит из адронов (пионов, протонов, нейтронов и т. д.), мюонов, электронов и фотонов. Соответственно у него различают *ядерно-активную* (адронную), *жесткую* (мюонную) и *мягкую* (электронно-фотонную) компоненты *).

Проследим, как происходит генерация различных компонент вторичного космического излучения. Как мы уже указывали (см. гл. VIII, § 5), при прохождении высокоэнергичных заряженных адронов через толстые слои вещества главную роль играют столкновения с атомными ядрами. Соответственно этому главной с точки зрения генерации вторичного излучения является ядерно-активная компонента. Столкновение первичного высокоэнергичного ($\gg 1$ ГэВ) протона с атомным ядром характеризуется следующими особенностями (см. гл. VII, § 7):

а) Протон теряет приблизительно половину своей энергии.

б) Основная доля потерянной энергии затрачивается на множественное рождение релятивистских частиц. Для этих частиц существует специальное название — ливневые частицы. Ливневые частицы состоят главным образом из пионов, хотя в 15—20% случаях встречаются и каоны. О количестве ливневых частиц можно

*) Название «мягкая» и «жесткая» компоненты сохранились с той поры, когда главной характеристикой излучения считалась проникающая способность излучений: проникающая способность мюонной компоненты намного больше электронно-фотонной.

судить по тому, что первичный протон с энергией 10^3 ГэВ порождает в одном столкновении в среднем 10 частиц.

в) Оставшаяся часть потерянной первичным протоном энергии затрачивается на выбивание дельта-нуклонов и возбуждение конечного ядра. Дельта-нуклонами (δ -нуклонами) называются вылетающие при столкновении нуклоны со средней энергией ≈ 160 МэВ. При распаде конечного ядра испускаются протоны, нейтроны, α -частицы и т. д.

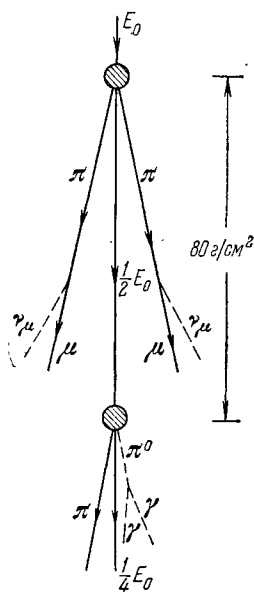


Рис. 12.20. Схема прохождения высокоэнергичной ($\geq 10^3$ ГэВ) первичной космической частицы через атмосферу.

Справа указана длина свободного пробега частицы по отношению к ядерным столкновениям.

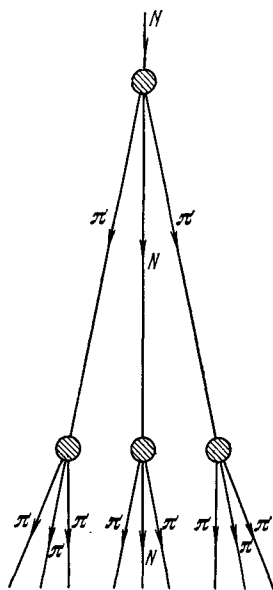


Рис. 12.21. Схема ядерного каскада, развивающегося с участием заряженных пионов; каскад вызывается космической частицей с энергией, большей 10^4 — 10^5 ГэВ.

Длина свободного пробега высокоэнергичного протона в атмосфере равняется приблизительно 80 г/см². Поэтому первичный протон, проходя через атмосферу, может испытать свыше десятка столкновений с ядрами, и каждое столкновение будет сопровождаться потерей половины энергии на обрисованную в б) и в) генерацию адронов (ядерно-активных частиц). Схематическая картина развивающегося ядерного каскада изображена на рис. 12.20. Появляющиеся в каждом акте столкновения δ -протоны и другие малоэнергичные заряженные частицы вследствие ионизационных по-

теперь быстро замедляются и поглощаются. Нейтроны же вплоть до самых низких энергий участвуют в дальнейшем размножении ядерно-активных частиц. Нейтральные пионы из-за очень малого времени жизни ($\approx 10^{-16}$ с) сразу же распадаются. Судьба заряженных пионов зависит от их энергии. Если их энергия столь велика, что из-за релятивистского замедления времени пионы могут, не распавшись, пролететь путь, равный длине свободного пробега в атмосфере (80 г/см^2), то они наряду с первичным протоном будут участвовать в размножении адронов (рис. 12.21). Простые оценки показывают, что для этого энергия пиона должна быть больше 200 ГэВ. Пионы со столь высокой энергией могут интенсивно порождаться только первичными адронами с энергией $\gtrsim 10^4 - 10^5$ ГэВ.

Параллельно с генерацией ядерно-активной компоненты происходит ее «обрастание» мягкой и жесткой компонентами. Основным источником электронно-фотонной компоненты являются нейтральные пионы (π^0). Из-за малого времени жизни они быстро распадаются и порождают по два γ -кванта высокой энергии:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma. \quad (12.90)$$

Интересно отметить, что тем самым γ -кванты генерируются со скоростью процессов, протекающих за счет сильного взаимодействия. Появившиеся высокоэнергичные γ -кванты порождают при столкновениях с атомными ядрами электронно-позитронные пары $e^+ - e^-$, которые в свою очередь испускают тормозные γ -кванты и т. д. Нарастание числа электронов, позитронов и γ -квантов будет происходить до тех пор, пока ионизационные потери электронов и позитронов не станут сравнимыми с их радиационными потерями, т. е. до тех пор, пока энергия электронов и позитронов не уменьшится до критической энергии в воздухе, составляющей приблизительно 72 МэВ (см. гл. VIII, § 3).

Заряженные пионы в конце концов распадаются по реакции

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$$

и генерируют жесткую мюонную компоненту космического излучения. Получающиеся в результате распада высокоэнергичных пионов релятивистские мюоны имеют очень большую проникающую способность, поскольку у них малы как ионизационные потери (что справедливо для всякой релятивистской частицы), так и радиационные (из-за большой массы покоя) (см. гл. VIII, § 3). На рис. 12.22 для иллюстрации приведена кривая зависимости числа мюонов от толщины проходимого ими слоя воды. Как мы видим, заметное количество мюонов остается даже после прохождения слоя воды 1000 м.

7. Зависимость интенсивности различных компонент вторичного космического излучения от толщины пройденного ими слоя атмосферы показана на рис. 12.23. Как видно из этого рисунка, интен-

сивность ядерно-активной компоненты резко уменьшается с увеличением толщины атмосферы, и на уровне моря эта компонента практически обращается в нуль. Электронно-фотонная компонента доминирует на больших высотах, но быстро поглощается и на уровне моря играет меньшую роль, чем мюонная. Для ориентировки в порядках величин укажем, что интенсивности жесткой ($I_{ж}$) и мягкой ($I_{м}$) компонент на уровне моря равны:

$$I_{ж} = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ частиц}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}), \quad I_{м} = 0,7 \cdot 10^{-2} \text{ частиц}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}).$$

Таким образом, космическое излучение на уровне моря приблизительно в сто раз менее интенсивно, чем на границе атмосферы, и состоит в основном из мюонов. Сильное поглощение в атмосфере ядерно-активной и электронно-фотонной компонент и незначительная генерация мюонной компоненты первичными частицами с энергией < 10 ГэВ приводят к тому, что

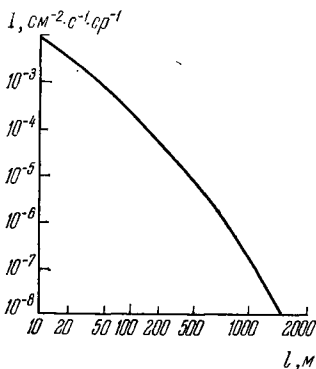


Рис. 12.22. Зависимость интенсивности жесткой компоненты космических лучей от толщины проходящего ею слоя воды.

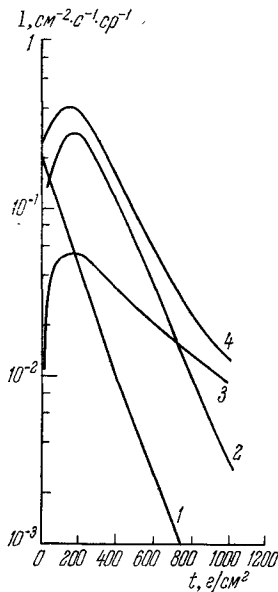


Рис. 12.23. Зависимость интенсивности различных компонент космического излучения от длины t пути, пройденного в атмосфере.

1 — ядерно-активная компонента, 2 — электронно-фотонная, 3 — мюонная, 4 — полная интенсивность; отсчет t ведется от верхней границы атмосферы.

первичные протоны с энергией в несколько ГэВ практически не дают никакого вклада в интенсивность вторичного излучения на уровне моря. С этим связано очень малое влияние солнечных космических лучей на интенсивность космического излучения на малых высотах.

8. В заключение рассмотрим воздействие космического излучения на атмосферу. В процессе генерации и поглощения ядерно-активной компоненты в верхних слоях атмосферы происходят различные ядерные реакции. Благодаря этим реакциям в атмосфере, во-первых, поддерживается некоторое равновесное содержание радиоактивных изотопов, таких, как H^3 , C^{14} , Be^7 , P^{32} , S^{35} , Cl^{36} . В частности, только за счет космического излучения в земной воде концентрация тяжелого изотопа водорода — трития — поддерживается на уровне $10^{-16}\%$. Во-вторых, происходит накопление стабильных изотопов. Для примера укажем, что за время существования Земли ($\approx 4 \cdot 10^9$ лет) космическое излучение увеличило распространенность изотопа лития Li^6 на $0,03\%$, т. е. на величину, вполне измеримую современными масс-спектроскопическими методами.

Создаваемые космическими лучами радиоактивные изотопы можно использовать, во-первых, для проверки постоянства космического излучения в прошлом. Например, анализ органического ила на дне океанов привел к заключению, что в течение последних 35 000 лет интенсивность космического излучения практически не менялась.

Во-вторых, эти изотопы могут быть использованы для датировки различных событий. Один из таких способов датировки исторических событий будет рассмотрен в гл. XIII, § 6.