

О ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ СПЕКТРА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Г.Т.Зацепин, В.А.Кузьмин

В недавних измерениях [1,2] обнаружено мощное изотропное тепловое излучение Вселенной, обладающее, по-видимому, распределением Планка с температурой $T \approx 3^{\circ}\text{K}$. Интенсивность этого излучения такова ($N \approx 550$ фотонов/ см^3 , $kT \approx 2,5 \cdot 10^{-4}$ эв), что возникают специфические эффекты при прохождении через него космических лучей сверхвысоких энергий, в частности обрезание спектра космических лучей в области 10^{20} эв.

При энергии протонов первичных космических лучей E_p достаточно высокой [3], $E_p \sim M_p c^2 (m_\pi c^2 / E_\varphi, \text{эфф})$, происходят процессы фоторождения пионов при взаимодействии протонов с фотонным газом, в результате чего протоны эффективно ($\overline{\Delta E}_p / E_p \approx 20\%$) теряют энергию [4]. Если характерное время для столкновения протона с фотоном становится достаточно малым по сравнению с временем жизни космических лучей этих энергий в Метагалактике, определяемым другими процессами (например, расширение Вселенной), то будет иметь место эффективное обрезание спектра космических лучей. Точное рассмотрение дает для характерного времени столкновения протона с энергией $E_p \gg M_p c^2$ с фотоном при температуре равновесного фотонного газа T :

$$\tau_{p\gamma} = \frac{2\pi^2 c^2 h^3 \gamma^2}{kT \varphi} \text{ сек}, \quad \gamma = E_p / M_p c^2, \quad (1)$$

где

$$\varphi = \int_{E_{\text{порог}} \times m_\pi c^2}^{\infty} dE E \sigma_{p\gamma}(E) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-\frac{nE}{2rkT}} \left(1 + \frac{1}{n} \frac{2rkT}{E} \right), \quad (2)$$

$\sigma(E)$ - полное сечение поглощения фотона энергии E при взаимодействии с протоном; это главным образом сечение фоторождения π^0 и π^+ - мезонов при $E \lesssim 1$ Бэв, при больших энергиях, вплоть до самых высоких, можно принять $\sigma_{pp} = \text{const} = 1 \cdot 10^{-28} \text{ см}^2$.

Вычисленные по формуле (1) значения τ_{pp} для различных энергий протонов изображены на рис. 1 для ряда значений температуры фотонного газа $T = 2, 3, 5, 10, 30$. Видно, что при энергиях протонов

$E_p \gtrsim 10^{20}$ эв взаимодействия с фотонным газом становятся для них достаточно частыми, $\tau_{pp} \approx 10^7$ лет. Это означает, что при возрасте

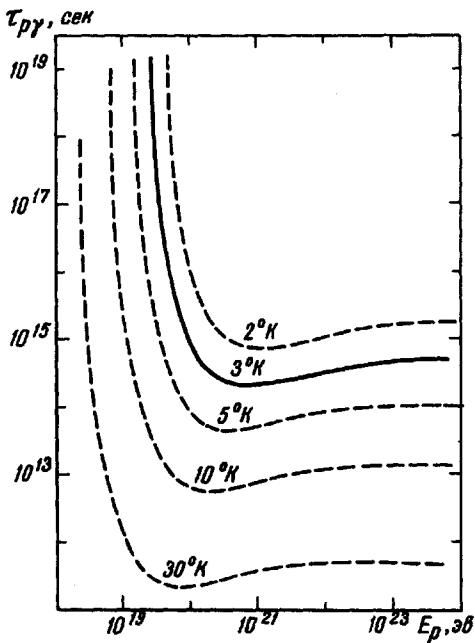


Рис. 1

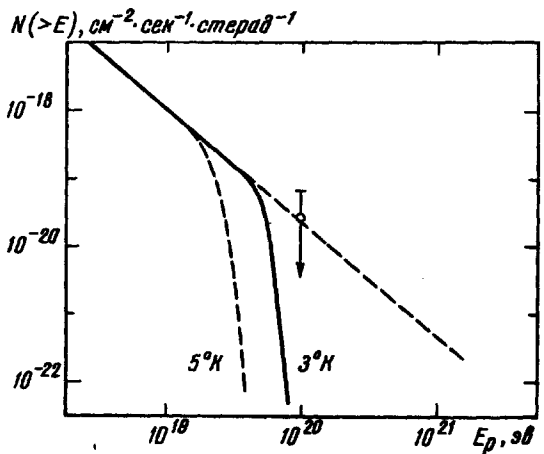


Рис. 2

космических лучей рассматриваемых энергий $t \gtrsim 10^8$ лет их первоначальный спектр в области высоких энергий должен был обрезаться, даже если механизм ускорения был достаточно эффективным в производстве частиц таких энергий. Вопрос о точной форме спектра космических лучей в области энергий $E_p \gtrsim 10^{19}$ эв требует детального рассмотрения с совокупным учетом их генерации, расширения Вселенной и взаимодействия космических лучей с фотонным газом на каждом этапе эволюции Вселенной. Форма спектра будет при этом, разумеется,

зависеть от того, на какой стадии эволюции Вселенной и как быстро происходила генерация частиц сверхвысоких энергий.

Изучение энергетического спектра космических лучей в области верхней границы позволит получить информацию не только о процессах их генерации, но и о развитии Вселенной. Влияние изменения температуры фотонного газа T на положение границы спектра космических лучей приближенно демонстрирует рис. 2; при этом для простоты предположено, что космические лучи в Метагалактике возникли $t \approx 10^9$ лет назад. Экспериментальная точка, полученная ранее [5], представляет одно зарегистрированное событие с энергией 10^{20} эв, с вероятной ошибкой в определении энергии ~ 2 . Пунктирная кривая соответствует случаю, когда космические лучи в течение 10^9 лет распространяются в фотонном газе с температурой 5°K .

Нужно отметить расщепление α - частиц и других ядер [6] при прохождении их через метагалактическое пространство. Это наступает при энергии α - частиц несколько меньше энергии протонов, при которой начинается процесс фоторождения пионов. Весьма большое сечение этого процесса должно приводить к полному исчезновению ядер в составе космических лучей при энергии выше 10^{19} эв.

Примечание . Когда настоящая работа была нами уже написана, мы получили препринт статьи К.Грейзена, в которой проводятся аналогичные рассуждения и получены совпадающие с нашими оценки.

Авторы пользуются случаем поблагодарить К.Грейзена за сообщение неопубликованных результатов.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
26 мая 1966 г.

Литература

- [1] A.A.Penzias, R.W.Wilson. *Astrophys. J.*, 142, 420, 1965.
- [2] P.G.Roll, D.T.Wilkinson. *Phys.Rev.Lett.*, 16, 405, 1966.
- [3] Г.Т.Зацепин. Докл. АН СССР, 80, 577, 1951.

- [4] S.Hayakawa, Y.Yamamoto. Progr. Theor.Phys., 30, 71, 1963.
- [5] J.Linsley. Phys.Rev.Lett., 10, 146, 1963; Proc.Int. Conf.Cosmic Rays, Bombay, 4, 77, 1964.
- [6] Н.М.Герасимова, И.Л.Розенталь. ЖЭТФ, 41, 488, 1961.