

УДК 539.171.017

ПРОБЕГ ПОГЛОЩЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ОДИНОЧНЫХ ГАММА-КВАНТОВ С ЭНЕРГИЕЙ 10 – 60 ТэВ НА УРОВНЕ г. ЧАКАЛТАЯ В БОЛИВИИ

Р. Альяга¹

В рамках коллаборации Памир – Чакалтая на основании результатов измерений с идентичными рентгенэмульсионными камерами вычислено значение пробега поглощения (λ_{abs}) одиночных гамма-квантов в диапазоне энергий 10 – 60 ТэВ. Определение λ_{abs} проводилось путем сопоставления вертикальных интенсивностей гамма-квантов на Памире (600 г/см^2) и г. Чакалтая (540 г/см^2) и по угловому распределению одиночных гамма-квантов на г. Чакалтая.

Характер поглощения ядерно-электромагнитных каскадов (ЯЭК), инициированных в атмосфере частицами первичного космического излучения (ПКИ) высокой энергии, определяется как свойствами ПКИ (состав, энергетический спектр), так и характеристиками сильного взаимодействия. Поэтому изучение пробега поглощения λ_{abs} различных компонент ЯЭК является хорошим способом экспериментального определения сечения неупругого взаимодействия $\sigma_{in}(E)$ и коэффициента неупругости $K_{tot}(E)$ в адрон-ядерных взаимодействиях при сверхускорительных энергиях. В настоящей работе представлены результаты анализа экспериментальных данных, полученных методом рентгенэмульсионных камер (РЭК), экспонировавшихся на г. Чакалтая в Боливии (5200 м над уровнем моря, 540 г/см^2).

Зависимость λ_{abs} от $\sigma_{in}(E)$ и $K_{tot}(E)$ носит достаточно сложный характер, выделить зависимость от каждой переменной порознь не удастся, поэтому оценку $\sigma_{in}(E)$ и

¹ Университет св. Андрея, Ла-Пас, Боливия.

$K_{tot}(E)$ по экспериментальным данным о λ_{abs} можно получить, сравнивая экспериментальные значения λ_{abs} с вычисленными по различным моделям, в которых предполагаются различные механизмы взаимодействия и различные характеристики ПКИ [1, 2]. Для экспериментального определения λ_{abs} возможны два подхода в предположении экспоненциальной зависимости интенсивности числа событий с энергией E_γ выше заданной $I(\geq E_\gamma, H, \Theta)$ от глубины поглотителя H (Θ – зенитный угол). Один из них состоит в том, что идентичными РЭК определяется вертикальная интенсивность $I(\geq E_\gamma, H, O)$ на двух глубинах в атмосфере (H_1, H_2), а затем пробег поглощения из соотношения

$$\lambda_{abs} = (H_2 - H_1) / \ln \left\{ \frac{I(\geq E_\gamma, H_1, O)}{I(\geq E_\gamma, H_2, O)} \right\}. \quad (1)$$

В другом методу производится измерение дифференциального углового распределения зарегистрированных событий на одной глубине $\frac{dI(\geq E_\gamma, H, \Theta)}{d\Omega} = A \cos \Theta \exp(-H/\lambda_{abs} \cos \Theta)$, (где $d\Omega$ – телесный угол). Это выражение удобно представить в виде

$$\ln \frac{dI(\geq E_\gamma, H, \Theta)}{d \cos^2 \Theta} = A_1 - \frac{H}{\lambda_{abs}} \sec \Theta \quad (2)$$

(дополнительный множитель $\cos \Theta$ возникает из выражения для эффективной площади при регистрации событий плоским детектором).

Наличие измерений на Памире [3] и Чакалтая позволяет использовать оба метода. Заметим однако, что указанные два метода не являются полностью независимыми, т.к. в первом методе при пересчете от глобальной интенсивности к вертикальной необходимо знание углового распределения.

В рамках совместной работы "Эмульсионный эксперимент Памир – Чакалтая" исследования с РЭК проводятся в Боливии на г. Чакалтая на высоте 5200 м над уровнем моря (540 г/см^2). В работе используются РЭК двух типов (рис. 1): а) двухэтажная РЭК с площадью 20 м^2 , в которой в верхней части (Г-блок) имеются пластины свинца общей толщиной 6 см и в нижней части (Н-блок) – 5 см, прослоенные рентгенографической пленкой; б) тонкая РЭК (Г-блок) с площадью 40 м^2 , которая состоит из слоев свинцового поглотителя общей толщиной 7 см, прослоенных (начиная с глубины 2 см) рентгенографической пленкой. Суммарная экспозиция обеих камер составляет $76,5 \text{ м}^2 \cdot \text{год}$. В камерах использовалась такая же двухсторонняя рентгенографическая пленка РТ-6-1 размером $50 \times 100 \text{ см}^2$, что и в РЭК на Памире. Анализ результатов проводился в Физическом институте им. П. Н. Лебедева по методике, которая принята в сотрудничестве эксперимента "Памир" [3].

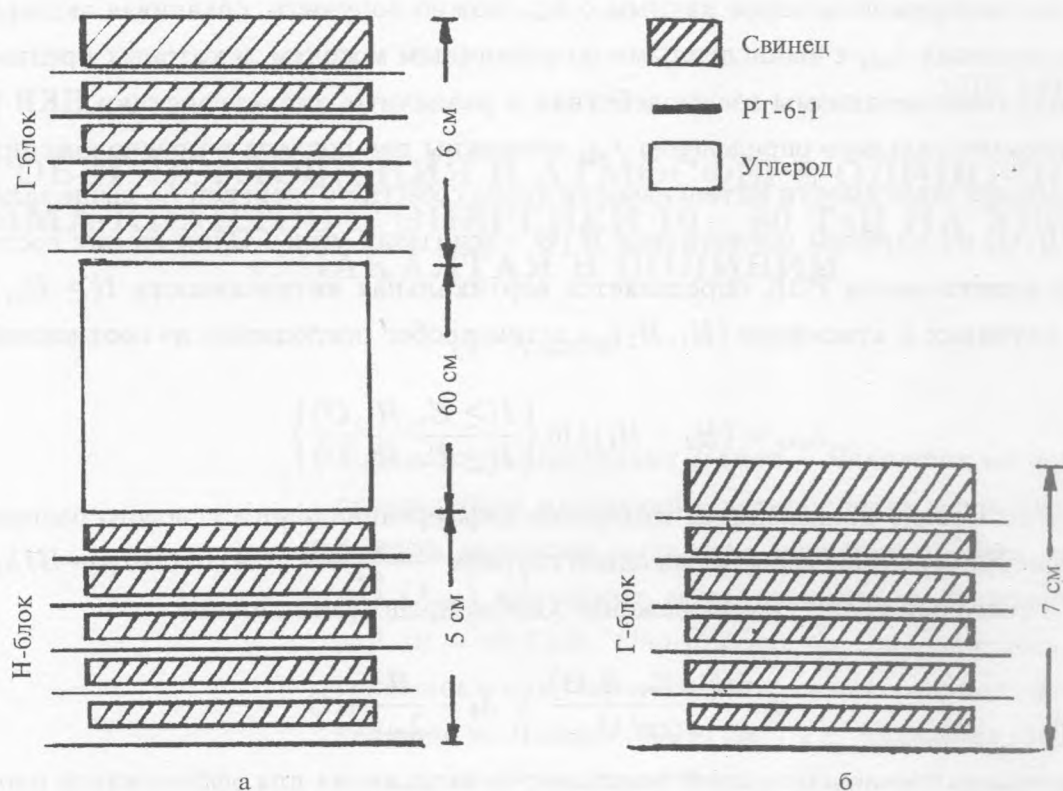


Рис. 1. Рентгенэмульсионные камеры, экспонировавшиеся на г. Чакалтая.

Работа с пленкой начинается с визуального поиска пятен потемнения от электронно-фотонных каскадов (ЭФК). При просмотре сравнивались две рентгеновские пленки, лежащие друг над другом в одном пакете на глубине 5 см (или ≈ 10 каскадных единиц). Основным критерием того, что событие действительно связано с ЭФК, служило наличие одинаковых (по форме, оптической плотности) пятен на обеих пленках и совпадения углов падения.

Зенитный угол Θ падения ЭФК определяется по измерениям в рентгенографической пленке, покрытой фотоэмульсией с обеих сторон пластиковой подложки, из соотношения $\text{tg}\Theta = \Delta x/l$, где Δx – сдвиг в горизонтальной плоскости между пятнами потемнения в верхнем и нижнем слоях эмульсии, l – расстояние между ними по вертикали, равное сумме толщины подложки и толщины слоя фотоэмульсии до проявления. Как показывают измерения, величина l колеблется в пределах 10%, что приводит к изменению λ_{abs} до 20%. В настоящей работе для пленки РТ-6-1 принято среднее значение $l = 209 \pm 7$ мкм.

Измерения производились с помощью микроскопа МБС-2 с погрешностью 3,8°.

Основная характеристика фотографической пленки – кривая почернения $D(n)$, т.е. зависимость почернения элемента площади пленки от плотности числа электронов n , прошедших через этот элемент, – описывается двухпараметрической кривой $D(n) = D_{\infty}(1 - e^{-ns})$, где s – эффективная площадь зерна эмульсии, D_{∞} – максимальное потемнение, до которого может быть засвечена пленка при бесконечной экспозиции. На пленку наносятся калибровочные метки радиоактивным источником, и по ним определяются параметры D_{∞} и s кривой почернения данной пленки. Формула, которая позволяет вводить также поправки на стандартизацию фотометра и рассеянный свет, имеет вид [4]

$$D_c = 4 \left\{ 1 - \exp \left[\frac{3,25}{s} \ln \left(1 - \frac{D_m}{D_{\infty} - 0,95D_b} \right) \right] \right\},$$

здесь D_m – измеренная оптическая плотность пятна, D_c – исправленная на нестандартность фотометра и рассеянный свет, D_b – оптическая плотность фона, а $D_{\infty} = 3,7$ и $s = 2,61 \pm 0,02 \text{ мкм}^2$ – экспериментальные параметры кривой почернения для пленки данной проявки.

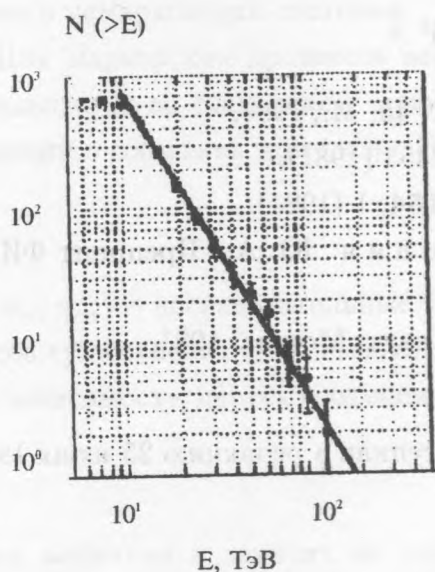


Рис. 2. Энергетический спектр одиночных гамма-квантов.

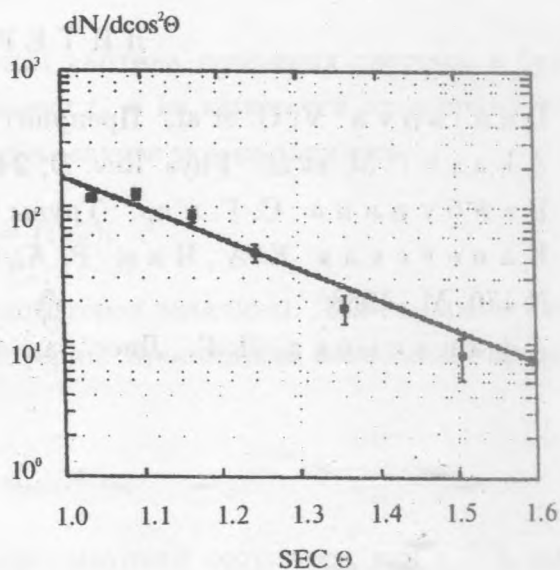


Рис. 3. Угловое распределение гамма-квантов с $E_{\gamma} \geq 12,6 \text{ ТэВ}$.

За время экспозиции РЭК было зарегистрировано 796 каскадов от одиночных гамма-квантов из атмосферы. По этим данным был построен интегральный энергетический спектр (рис. 2), который в области $E_\gamma \geq 12,6 \text{ ТэВ}$ аппроксимируется функцией $N(> E_\gamma) = N_0(E_\gamma/12,6)^{-2,25 \pm 0,05}$, где E_γ измеряется в ТэВ .

Вертикальная интенсивность имеет вид $I_0(> E_\gamma, H, 0) = N(> E_\gamma)/ST\omega$, где S – площадь установки, T – время экспозиции и ω – эффективный телесный угол, который приближенно выражается формулой $\omega = 2\pi(1 - \cos^{m+1} \Theta)/(m+1) = 0,65$. Отсюда находим $I_0 = 8,7 \pm 0,7 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$.

На рис. 3 приведено экспериментальное угловое распределение гамма-квантов с $E_\gamma > 12,6 \text{ ТэВ}$ ($N = 441$) в переменных $\ln[\Delta I(> E_\gamma, H, \Theta)/\Delta \cos^2 \Theta]$, $\sec \Theta$. Для построения гистограммы использовалось разбиение на интервалы $\Delta \cos^2 \Theta = 0,09$. Видно, что в соответствии с формулой (2) распределение в этих переменных хорошо аппроксимируется прямой линией, подбирая которую методом наименьших квадратов, получаем $\lambda_{abs} = 112 \pm 17 \text{ г/см}^2$.

В работе [5] приведен энергетический спектр гамма-квантов в диапазоне $E_\gamma = 5,5 - 60 \text{ ТэВ}$ на высоте Памира (600 г/см^2). Используя эти результаты, можно по формуле (1) определить пробег поглощения гамма-квантов в воздухе методом сравнения интенсивности на двух высотах при $E_\gamma \geq 12,6 \text{ ТэВ}$, что дает $\lambda_{abs} = 117 \pm 51 \text{ г/см}^2$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Denisova V. G. et al. Препринт ФИАН N 45, М., 1994.
- [2] Akashi M. et al. Phys. Rev. D, **24**, no. 9, 2353 (1981).
- [3] Байбурина С. Г. и др. Труды ФИАН, **154**, 1 (1984).
- [4] Каневская Е. А., Нам Р. А., Смородин Ю. А. Препринт ФИАН N 170, М., 1988.
- [5] Афанасьева Л. Г. Дисс. кан. физ-мат. наук, Москва, 1981.

Поступила в редакцию 25 июня 1996 г.