

О ПРОИСХОЖДЕНИИ ИЗЛОМА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СПЕКТРЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

А. Д. Ерлыкин, С. К. Мачавариани

Аналитически показано, что полное поглощение адронной компоненты широких атмосферных ливней и переход к чисто электромагнитному каскаду не могут приводить к наблюдаемому резкому излому в энергетическом спектре космических лучей. Этот факт, а также отсутствие доказанных ядерно-физических моделей позволяет утверждать, что излом имеет астрофизическое происхождение.

Ключевые слова: космические лучи, энергетический спектр, излом.

Введение. Излом был открыт в 1958 году на установке для изучения широких атмосферных ливней в Московском государственном университете (МГУ). Ещё в самой первой статье её авторы Г. В. Куликов и Г. Б. Христиансен отмечали, что “приведённые данные свидетельствуют о возможном с большой вероятностью *резком* изменении характера спектра в изученном нами диапазоне числа частиц $N = 8 \cdot 10^4 - 1.5 \cdot 10^6$ ” [1].

Это замечание тем более удивительно, что измерения проводились в МГУ, то есть практически на уровне моря, и измерялась не первичная энергия, а полное число частиц в ливне, которое должно быть пропорционально энергии первичной частицы. Даже если бы излом в первичном энергетическом спектре был резким, флуктуации в развитии ливня неизбежно должны были приводить к сглаживанию резкости излома в спектре полного числа частиц.

За более чем шестьдесят лет, прошедшие со времени открытия, были опубликованы десятки работ, описывающих возможное происхождение излома. Всё разнообразие предложенных моделей можно свести к нескольким классам:

– астрофизические модели, предполагающие, что излом связан с изменением типа источников космических лучей или их пространственно-временных характеристик. Сюда же относятся модели, в которых излом вызван изменением характеристик распространения космических лучей в межзвёздной среде;

– ядерно-физические модели, предполагающие изменение характеристик взаимодействия частиц по мере повышения их энергии, рождение новых частиц или достижение максимальной энергии ускорения источником;

– феноменологические модели, в которых форма энергетического спектра всех частиц конструируется на основе предположений о массовом составе и парциальных спектрах различных компонент космических лучей. Из-за их простоты феноменологические модели популярны и имеют эвристическую ценность.

Теоретический анализ. В этой статье мы проанализируем одну из недавно предложенных феноменологических моделей [2]. В этой модели обращается внимание на более быстрое развитие и поглощение адронной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ), в результате чего на наиболее поздней стадии развития в ливне остаётся только электромагнитная компонента (электроны, позитроны и гамма-кванты) и мюоны. Без подпитки адронами число частиц уменьшается и в спектре ШАЛ может наблюдаться излом. Поглощение энергии нуклонной и пионной компонент можно описать уравнениями [3]:

$$dE_n/dZ = -E_n/L_n, \quad (1)$$

$$dE_\pi/dZ = -E_\pi/L_\pi + 2/3 E_n/L_n,$$

$$dE_\gamma/dZ = E_n/L_n + 1/3 E_\pi/L_\pi.$$

Здесь Z – глубина атмосферы, E_n, E_π и E_γ – энергия нуклонной, пионной и электромагнитной компонент, L_n и L_π – пробеги для поглощения нуклонов и пионов. Эти пробеги равны $L_n = \lambda_n/K$ и $L_\pi = \lambda_\pi/K_\gamma$, где λ_n и λ_π – пробеги для взаимодействия, а K и K_γ – полный коэффициент неупругости для нуклонов и парциальный коэффициент неупругости пионов для передачи их энергии в электромагнитную компоненту.

При составлении этой системы уравнений предполагалось, что нуклоны сохраняют долю $\langle 1 - K \rangle$ своей энергии, а пионы сохраняют $2/3$ и передают $1/3$ своей энергии в электромагнитную компоненту. Очевидно, что описание развития ядерно-электромагнитного каскада приведённой системой уравнений сильно упрощено. В ней нет мюонной компоненты, ионизационных потерь, зависимости параметров от энергии. Однако основные качественные черты развития каскада система описывает верно и эта феноменологическая модель будет использоваться для дальнейшего анализа.

Если на границе атмосферы при $Z = 0$ $E_n = 1$, а $E_\pi = E_\gamma = 0$, то решение системы достаточно просто:

$$E_n(Z) = \exp(-Z/L_n),$$

$$\begin{aligned}
 E_{\pi}(Z) &= 2/3 L_{\pi}/(L_{\pi} - L_n)(\exp(-Z/L_n) - \exp(-Z/L_{\pi})), \\
 E_{\gamma}(Z) &= 1/3 (1 - \exp(-Z/L_n)) + 2/3 (1 - L_{\pi})/(L - L_n) \exp(-Z/L_{\pi}) + \\
 &\quad + L_n/(L_{\pi} - L_n) \exp(-Z/L_n). \tag{2}
 \end{aligned}$$

Легко убедиться, что $E_n + E_{\pi} + E_{\gamma} = 1$ для всех глубин Z атмосферы. Продольное развитие этих компонент в атмосфере показано на рис. 1.

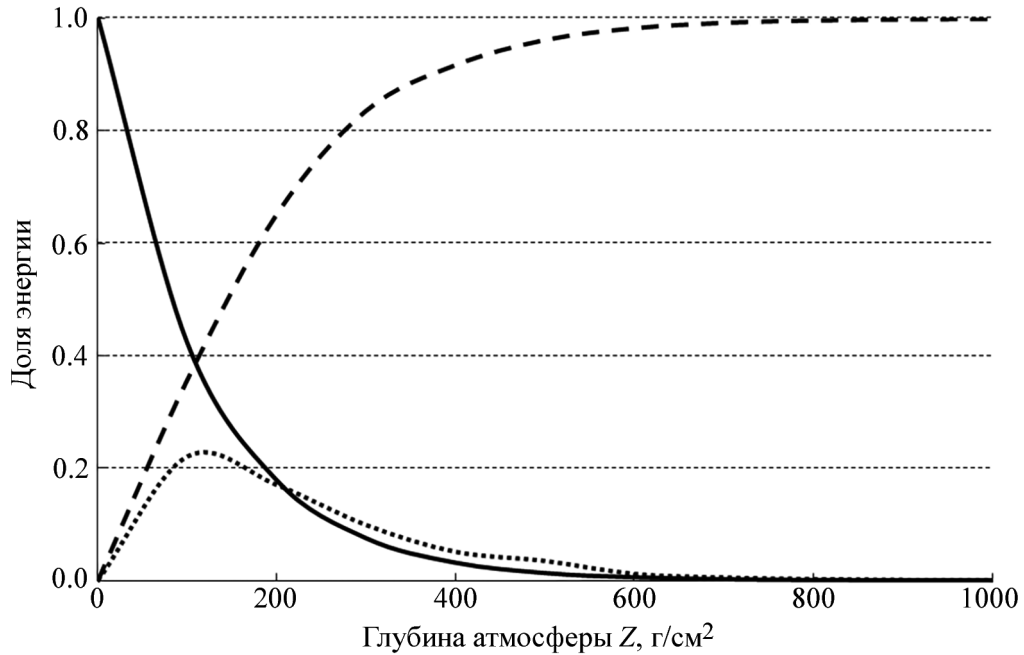


Рис. 1: Продольное развитие энергии различных компонент ядерно-электромагнитного каскада в атмосфере. Сплошная линия — нуклоны, пунктирная линия — пионы, штриховая линия — электромагнитный каскад. Энергия компонент нормирована на полную энергию каскада.

При расчёте использовались следующие параметры: $\lambda_n = 70$ г/см², $\lambda_{\pi} = 95$ г/см², $K = 0.6$ и $K_{\gamma} = 0.33$. Видно, что в рамках принятого приближения, в котором не происходит поглощения, а только передача энергии от нуклонов к пионам и от пионов в электромагнитную компоненту, вся энергия каскада оказывается сосредоточенной в электромагнитной компоненте.

В эксперименте Московского университета, где был открыт излом, и в большинстве последующих экспериментов измерялась не энергия E , а число заряженных частиц

N . В это число вносят вклад парциальные каскады, зародившиеся на разных стадиях развития широкого атмосферного ливня. Если парциальный каскад сформировался на глубинах от Z до $Z + dZ$ и имеет энергию $W = dE/dZ \cdot dZ$, то его вклад dN в полное число частиц на уровне наблюдения Z_0 определяется соотношениями:

$$dN = 0.31/\sqrt{\ln(W/b)} \cdot \exp(t - (1 - 1.5 \ln S)), \quad (3)$$

$$S = 3t/(t + 2 \ln(W/b)), \quad (4)$$

$$t = (Z_0 - Z)/r. \quad (5)$$

Здесь b – критическая энергия для электронов и r – радиационная единица длины. В расчётах принимались величины $b = 0.081$ ГэВ и $r = 37.1$ г/см². Так как почти для всей атмосферы при $Z > 100$ г/см² доминирует электромагнитная компонента (см. рис. 1), то для числа частиц dN была использована аппроксимация (3), справедливая

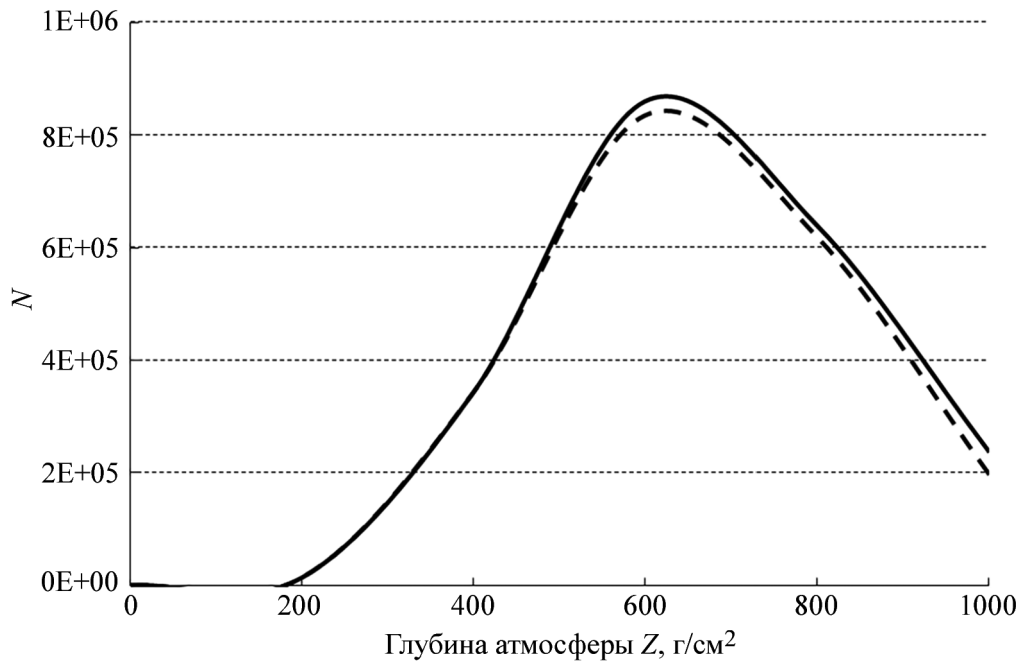


Рис. 2: Продольное развитие полного числа частиц в ШАЛ с энергией 1 ПэВ. Сплошная линия – ШАЛ, где адронная компонента достигает уровня наблюдения, штриховая линия – ШАЛ, в котором адронная компонента ограничивается поглощением до уровня 500 г/см².

для электромагнитных каскадов. Полное число частиц N в ливне определяется интегрированием по глубине атмосферы вплоть до уровня наблюдения Z :

$$N = \int_0^Z dN. \quad (6)$$

Продольное развитие широкого атмосферного ливня с энергией 1 ПэВ показано на рис. 2.

Если адронная компонента полностью поглотилась до глубин 500 г/см^2 , то на больших глубинах вплоть до уровня моря отсутствует адронная подпитка каскада и ливень становится чисто электромагнитным. Число частиц на уровне наблюдения становится меньше. Так например, на уровне наблюдения 600 г/см^2 число частиц уменьшается на 0.01%, на уровне моря – на 16.6%.

Результаты. Если спектральный индекс $\gamma = d(\log I)/d(\log E)$ первичных космических лучей равен 2.7, то уменьшение полного числа частиц на 16.6% должно привести к увеличению спектрального индекса до 2.74. Такое укрупнение спектра является совершенно недостаточным, чтобы описать экспериментальные данные, где спектральный индекс γ увеличивается с 2.7 до 3.1, а резкость излома, т. е. отношение изменения γ к ширине интервала $\log E$, на котором это изменение происходит, превышает 1.0 даже в наблюдениях на уровне моря [4]. Малая величина ожидавшегося изменения (0.04) связана с быстрым поглощением адронной компоненты ШАЛ в атмосфере. Расчёт проводился для первичного протона с энергией 1 ПэВ и к моменту, когда прекратилась подпитка электромагнитной компоненты от адронов, у последних осталось менее 4% первичной энергии. Даже если бы весь этот остаток энергии был потерян из-за поглощения и ядерных расщеплений, это не могло бы привести к заметному укрупнению спектра полного числа частиц ШАЛ. Так как энергия адронной компоненты, при которой прекращается её развитие, уменьшается и происходит её полное поглощение, то место излома в спектре частиц ШАЛ оказывается чувствительным к первичной энергии налетающего протона или ядра. Однако диапазон глубин атмосферы, в котором наблюдается эта чувствительность, довольно узок. Так, например, при уменьшении первичной энергии протона с 1 ПэВ до 0.1 ПэВ место излома смещается с 500 г/см^2 к 110 г/см^2 . При увеличении первичной энергии до 10 ПэВ плавное развитие адронного каскада продолжается вплоть до уровня моря 1000 г/см^2 , полное поглощение адронов происходит на больших глубинах, и излома спектра ШАЛ не наблюдается.

Для ШАЛ, инициированных первичными ядрами, с энергией E_0 и массой A будет справедлив принцип суперпозиции, и каскад будет таким же, как сумма A каскадов от

протона с энергией E_0/A . Таким же, как у протона с энергией E_0 , будет место излома спектра ШАЛ для ядра с энергией AE_0 .

Заключение. Таким образом показано, что полное поглощение адронной компоненты широких атмосферных ливней и переход к чисто электромагнитному каскаду не могут приводить к наблюдаемому резкому излому в энергетическом спектре космических лучей. Этот факт, а также отсутствие других доказанных ядерно-физических моделей позволяет утверждать, что излом имеет астрофизическое происхождение.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Г. В. Куликов, Г. Б. Христиансен, *ЖЭТФ* **3**(9), 635 (1958).
- [2] Yu. V. Stenkin, EAS longitudinal development and the knee, <http://arxiv:0707.2231v>.
- [3] V. S. Murzin and L. I. Sarycheva, *Cosmic rays and their interaction* (Atomizdat, Moscow, 1964) [in Russian].
- [4] A. D. Erlykin and A. W. Wolfendale, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **27**, 1005 (2001). DOI: 10-1088/954-3899/27/5/305.

Поступила в редакцию 25 июня 2020 г.

После доработки 9 декабря 2020 г.

Принята к публикации 10 декабря 2020 г.