

УДК 537.591.15

ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА И НАПРАВЛЕНИЙ ПРИХОДА ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ 0.2 – 2 ЕЭВ

Н. М. Нестерова

Энергетический спектр первичного космического излучения в диапазоне от 20 ТэВ до 2 ЕэВ был получен на основании экспериментальных данных Тянь-Шаньской установки о спектре широких атмосферных ливней по числу электронов и модельных расчетов. Приводятся результаты и обсуждаются особенности полученного спектра и направлений прихода ливней при сверхвысоких энергиях (> 0.2 ЕэВ).

1. **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ПКИ.** Энергетический спектр первичного космического излучения (ПКИ) в очень широком диапазоне (пять порядков) $E_0 = 2 \cdot 10^{13} - 2 \cdot 10^{18}$ эВ был получен [1] на основании экспериментальных данных о спектре по числу электронов N_e в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) на уровне Тянь-Шаня (690 г/см²) (на рис. 1 белые и черные точки). Переход от N_e к первичной энергии $E_0 > 1$ ПэВ осуществлялся по результатам розыгрыша искусственных ШАЛ по модели MQ1 [2] в предположении первичного спектра и "нормального" ядерного состава [3] при их экстраполяции в область сверхвысоких энергий (до 2 ЕэВ). Надо отметить, что соотношение между N_e и E_0 для уровня гор слабее зависит от ядерного состава ПКИ, чем для высот около уровня моря. При $E_0 < 0.5$ ЕэВ наш спектр совпадает в пределах точности измерений со спектрами, полученными по данным о ШАЛ на других установках. Однако при $E_0 > 0.5 - 1.0$ ЕэВ он становится положе, чем по нашим расчетам по стандартной модели и результатам гигантских установок, расположенных вблизи уровня моря: Akeno [4], Fly's Eye [5], Naverah Park [6], Якутск [7, 8] (рис. 1). Измерения на этих установках также показали, что спектр по E_0 становился более пологим, но при энергиях 5 – 10 ЕэВ.

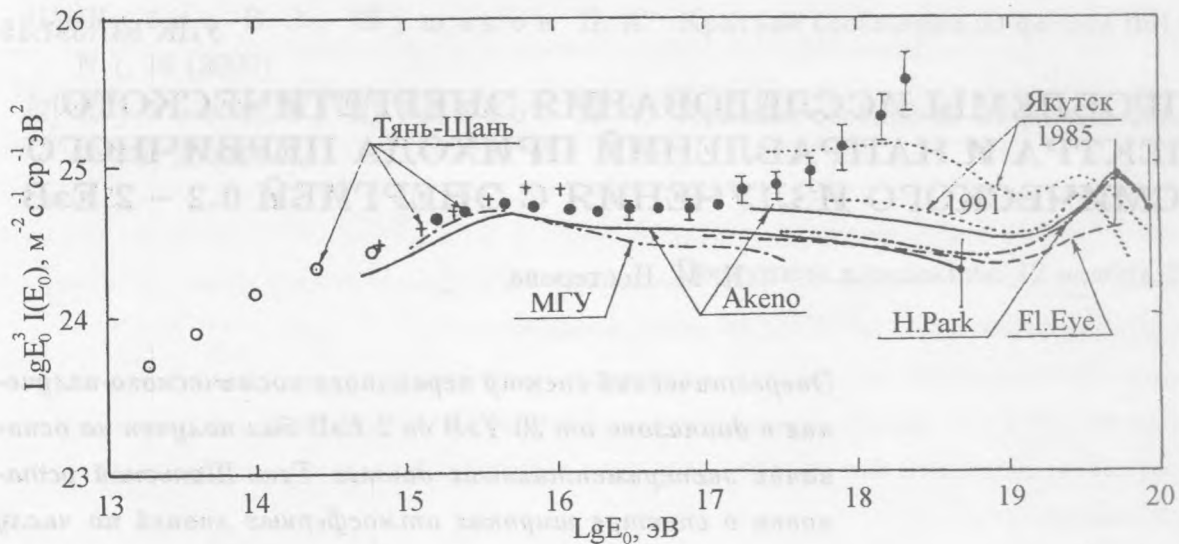


Рис. 1. Энергетический спектр ПКИ по данным разных установок.

Отличие между нашими экспериментом и расчетами, в которых заложена экстраполяция данных ускорителей в область энергий ШАЛ, может вызываться изменением характера взаимодействия адронов с ядрами атомов воздуха или изменением природы ПКИ при сверхвысоких энергиях. Об этом свидетельствуют некоторые экспериментальные результаты Якутской установки [9]. Возможно, что новые процессы начинаются уже при энергиях в несколько ПэВ , на что указывает ряд Тянь-Шаньских данных. Одно из объяснений вида спектра ШАЛ по N_e , полученного на Тянь-Шане, и переход к спектру по E_0 даны в работе [10]. В этом случае восстановление спектра по E_0 на основании данных ШАЛ по стандартным моделям становится неправомерным.

Особенностью ШАЛ в области $N_e > 3 \cdot 10^8$ ($E_0 > 0.5 \text{ ЭВ}$) является то, что большинство из них имеют узкое пространственное распределение электронно-фотонной компоненты. Это так называемые "молодые" ливни, имеющие малый параметр "возраста" S . Постепенное "омоложение" ШАЛ начинается по нашим данным с энергий E_0 в несколько ПэВ . Такие ливни могут быть не зарегистрированы гигантскими установками из-за очень больших расстояний между детекторами, распределенными по большим площадям. Это вызывается необходимостью обеспечения достаточной статистики при регистрации крайне редких случаев прихода гигантских ШАЛ (до нескольких сотен ЭВ). По данным этих установок для перехода к E_0 используются значения параме-

тров ШАЛ на сотнях метров, например, $Q(600)$ – плотность частиц на 600 м от оси, где регистрируется очень незначительная доля частиц, подверженная значительным флуктуациям и существенно зависящая от S . Величина $Q(600)$ для ШАЛ с малыми S может быть до сотни раз меньше, чем для средних S .

Компактное расположение детекторов Тянь-Шаньской установки позволяло регистрировать частицы ШАЛ на расстояниях до 120 м от оси, где сосредоточена основная доля от полного числа частиц N_e , что обеспечивало существенно более определенный переход к E_0 . Основным недостатком нашей установки являются ее малые размеры и, следовательно, пока недостаточная статистика ШАЛ с энергией свыше $0.5 E_0$.

Таким образом, нужны новые экспериментальные данные, которые позволили бы ответить на вопрос о том, чем вызвано различие экспериментов по ШАЛ при сверхвысоких энергиях: методическими или физическими причинами, по-разному проявляющимися на разных уровнях наблюдения.

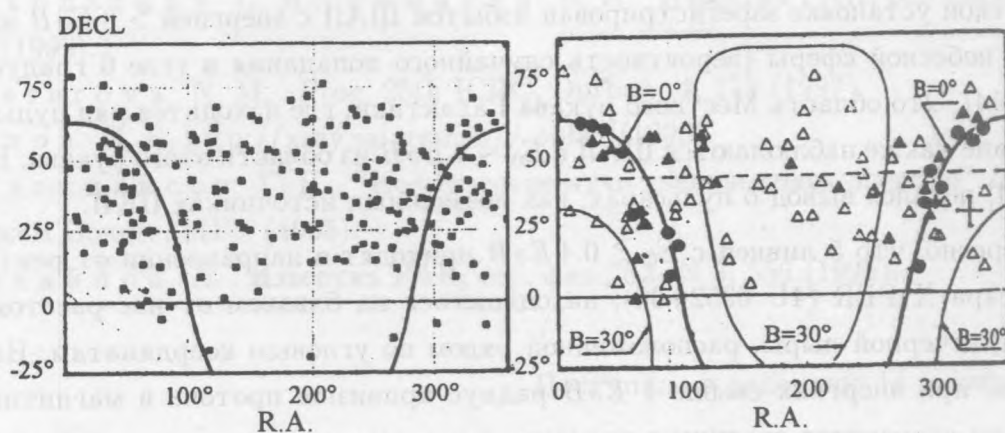


Рис. 2. Направления прихода ШАЛ с $N_e > 10^8$ на уровне Тянь-Шаня (квадраты), галактический диск – (кривая $b = 0^\circ$ галактич. координат) в экваториальных координатах.

Рис. 3. Направления прихода ШАЛ с $N_e = (2.0 - 4.5) \cdot 10^8$ (светлые треугольники), $N_e = (4.5 - 10) \cdot 10^8$ (темные треугольники) на уровне Тянь-Шаня, рентгеновские пульсары (темные кружки), черные дыры (кресты) при $Decl. > 0^\circ$; галактический диск – (толстая и тонкие кривые $b = 0^\circ$ и $b = 30^\circ$ галактич. координат) в экваториальных координатах.

2. НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА ШАЛ С ЭНЕРГИЕЙ СВЫШЕ $0.2 E_0$. Распределение углов прихода ШАЛ было представлено в предыдущей работе [11], для области

энергий $E_0 > 1 \text{ ЭВ}$, где по нашим данным наблюдался "избыток" ШАЛ. Значительная доля этих ливней имела направления, близкие к диску Галактики. В этой работе даны результаты другой серии измерений на Тянь-Шаньской установке ($Decl. = 43^\circ$, $RA = 77^\circ$) для ШАЛ с энергиями $E_0 = 0.2 - 1.0 \text{ ЭВ}$. Углы прихода ШАЛ получены в экваториальных координатах для трех интервалов по N_e : 1) $(1 - 2) \cdot 10^8$, 2) $(2 - 4.5) \cdot 10^8$, 3) $(4.5 - 10) \cdot 10^8$. Распределение направлений для ШАЛ с $N_e > 10^8$ дано на рис. 2, а для второго и третьего интервалов по N_e – на рис. 3. Там же представлены расположения рентгеновских пульсаров [12] и черных дыр [13] при $Decl. > 0^\circ$. Как показывают эти данные, распределение углов прихода ШАЛ в интервале низких энергий ($E_0 < 0.5 \text{ ЭВ}$) близко к изотропному, но по мере увеличения $N_e(E_0)$ увеличивается анизотропия в направлении галактического диска. Однако для точных количественных оценок нужна большая статистика при сверхвысоких энергиях.

Не наблюдается, как раньше [11] для $E_0 > 1 \text{ ЭВ}$, сосредоточения ШАЛ в области $Decl. = 50 - 60^\circ$, $RA = 330 - 340^\circ$, где находятся три рентгеновских пульсара. Однако на Якутской установке зарегистрирован избыток ШАЛ с энергией $> 8 \text{ ЭВ}$ из близкой области небесной сферы (вероятность случайного попадания в угле 6 градусов равна 0.0002) [14]. Это область Местного рукава Галактики, где находится ряд пульсаров. На Тянь-Шане также наблюдаются ШАЛ с $E_0 \sim 1 \text{ ЭВ}$ из области этого рукава. В работах [11] и [14] делался вывод о пульсарах, как возможных источниках ПКИ.

Интересно, что 5 ливней с $E_0 \gtrsim 0.4 \text{ ЭВ}$ приходят в направлении от рентгеновского пульсара X PER (4U 0352+30), находящегося на близком от нас расстоянии (350 парсек), и черной дыры, расположенной рядом по угловым координатам. Надо отметить, что при энергиях свыше 1 ЭВ радиус кривизны протона в магнитных полях Галактики становится сравним с ее размерами и возможно непосредственное наблюдение частиц в направлении источника.

На гигантских установках, находящихся вблизи уровня моря, анизотропия прихода ШАЛ начинает проявляться только при энергиях свыше 5 – 10 ЭВ, при которых на них наблюдался "избыток" интенсивности ШАЛ. Возможно, что лучшее согласие между собой новых данных об энергетическом спектре при $E_0 > 1 \text{ ЭВ}$ приведет к большему согласию относительно области энергий E_0 , где начинает проявляться анизотропия ПКИ.

Для увеличения статистической и методической точности наших экспериментальных данных при E_0 свыше 0.5 ЭВ на Тянь-Шаньской установке вводятся в эксплуатацию дополнительные группы детекторов на больших расстояниях от центра [1].

Работа поддерживается грантами РФФИ 98-02-16942 и 97-02-17867.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nesterova N. M. et al. Proc. 24th ICRC, Roma, **2**, 748 (1995).
- [2] Dunaevsky A. M. et al. ICR on UHE CRI. AIP Conf. Proc., **276**, 136 (1992).
- [3] Nikolsky S. I. Proc. symp., Tokyo, 507 (1984).
- [4] Nagano M. et al. Proc. 22nd ICRC, Dublin, **2**, 89 (1991).
- [5] Cassiday G. L. et al. Proc. 21st ICRC, Adelaide, **3**, 163 (1990).
- [6] Lawrence M. A. et al. Proc. 21st ICRC, Adelaide, **3**, 159 (1990).
- [7] Дуаконов М. Н. et al. Proc. 22nd ICRC, Dublin, **2**, 3 (1997).
- [8] Красильников Д. Д. и др. Изв. АН СССР, сер. физ. **49**, 1321 (1985).
- [9] Глушков А. В. и др. Известия РАН, сер. физ. **57**, N 4, 91 (1993).
- [10] Никольский С. И., Ромахин В. И. Известия РАН, сер. физ. **63**, N 3, 473 (1999).
- [11] Nesterova N. M. Proc. 25th ICRC, Durban, **4**, 173 (1997).
- [12] Попов С. Б. [http://gray.sai.msu.su//polar/\(1996\)](http://gray.sai.msu.su//polar/(1996)).
- [13] Христиансен Г. Б. "Космические лучи сверхвысоких энергий" Доклад на Ученом Совете, МГУ (1995).
- [14] Михайлов А. Известия РАН, сер. физ., **63**, N 3, 556 (1999).

Поступила в редакцию 14 декабря 1999 г.