

523.165(048)

В. С. Березинский. Космические лучи сверхвысоких энергий: астрофизический аспект. Согласно экспериментальным данным^{1,2} при энергии выше $1 \cdot 10^{17}$ эВ в спектре космических лучей наблюдаются две компоненты: одна при энергии до $1 \cdot 10^{19}$ эВ характеризуется крутым энергетическим спектром ($\Phi(>E) \sim E^{-\gamma_1}$ с $\gamma_1 \approx 2,0-2,4$), вторая при энергии выше $1 \cdot 10^{19}$ эВ — значительно более пологая ($\Phi(>E) \sim E^{-\gamma_2}$ с $\gamma_2 \approx 1,3-1,5$). При той же энергии изменяется и характер анизотропии — средняя галактическая широта входящих частиц начинает прогрессивно увеличиваться с энергией, демонстрируя тем самым преимущественный приход частиц из северной галактической полусферы. Это явление свидетельствует о внегалактическом происхождении частиц с энергией выше $1 \cdot 10^{19}$ эВ; пологая компонента, которая ожидается в галактических моделях вследствие квазипрямолинейного распространения частиц, должна характеризоваться преимущественным приходом частиц из галактического диска.

При энергии меньше $1 \cdot 10^{19}$ эВ частицы могут иметь как галактическое³, так и метагалактическое^{4,5} происхождение. Галактическая модель происхождения³ требует существования регулярного магнитного поля в гало нашей Галактики и предполагает взрывы сверхновых (или молодые пульсары) как источники космических лучей. Внегалактическое происхождение при $E < 1 \cdot 10^{19}$ эВ может быть связано с генерацией частиц в квазарах и сейфертовских галактиках⁴ или в скоплениях Дева⁵, расположенном почти в центре Местного сверхскопления галактик. Только детальное экспериментальное изучение анизотропии и химического состава позволит различить галактическую и внегалактическую модели происхождения при $E < 1 \cdot 10^{19}$ эВ.

Характерной особенностью пологой компоненты спектра ($E > 1 \cdot 10^{19}$ эВ) является отсутствие так называемого чернотельного обрезания⁶ — резкого укручения спектра при $E \sim 3 \cdot 10^{19}$ эВ, обусловленного взаимодействием протонов или ядер этих энергий с реликтовыми фотонами. Во всех предлагаемых моделях отсутствие чернотельного обрезания интерпретируют как следствие генерации частиц в достаточно близких источниках. В работе⁷ в качестве источников предполагаются активные ядра галактик в пределах Местного сверхскопления, а в⁵ — генерация частиц в скоплении Дева. Последняя модель встречает ряд трудностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Canningham G., Lloyd-Evans J., Pollock A. M. T. et al.— *Astrophys. J.*, 1980, v. 236, p. L71.
2. Dyakonov M. N., Ivanov A. A., Kershenholz I. M. et al.— In: Proc. of 16th Intern. Cosmic Ray Conference, Kyoto, 1979.— V. 8, p. 168.
3. Berezinsky V. S., Mikhailov A. A., Syrovatskii S. I.— *Ibid.*, v. 2, p. 86.
4. Berezinsky V. S., Grigor'eva S. I.— Proc. of 15th Intern. Cosmic Ray Conference.— Plovdiv, 1977.— V. 2, p. 309.
5. Wdowczyk J., Wolfendale A. W.— *Nature*, 1979, v. 281, p. 356. Giler M., Wdowczyk J., Wolfendale A. W.— *J. Phys. Ser. G*, 1980, v. 6, p. 1561.
6. Greisen K.— *Phys. Rev. Lett.*, 1966, v. 16, p. 748.
7. Зацепин Г. Т., Кузьмин В. А.— Письма ЖЭТФ, 1966, т. 4, с. 114. Berezinsky V. S., Grigor'eva S. I.— Цит. в⁴ сб.— V. 2, p. 81.

523.165(048)

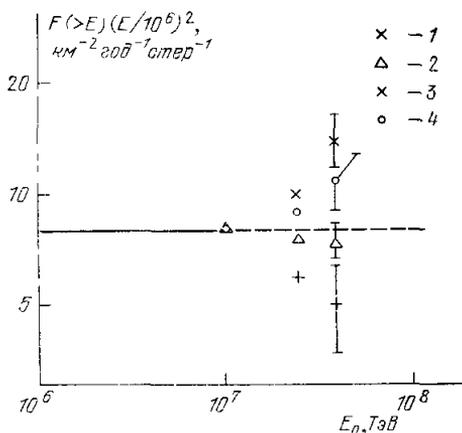
С. И. Никольский. Абсолютный поток и ядерный состав космических лучей высоких энергий. Накопление экспериментальных данных о первичном космическом излучении высокой энергии длится десятилетиями. И все же, сейчас можно говорить о некоем этапе этого процесса, когда следовало бы подвести итоги и, по возможности полно, сопоставить имеющиеся экспериментальные данные с моделями происхождения и распространения космических лучей.

Интервал энергий космических лучей выше 10^3 ТэВ доступен лишь косвенному способу исследования путем изучения широких атмосферных ливней. Методы изучения ливней, основы которых, равно как и представление о широких атмосферных ливнях как ядерно-каскадной лавине, были даны более 30 лет тому назад Д. В. Скобельцыным и Г. Т. Зацепиным, позволяют создавать установки при относительно небольшом числе регистрирующих детекторов с эффективной площадью в десятки км². Важность этого обстоятельства ясна, если вспомнить, что интенсивность первичного космического излучения с энергией выше 10^7 ТэВ составляет менее $1 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1} \text{ стер}^{-1}$.

Основная трудность в использовании широких атмосферных ливней для определения энергетического спектра первичного космического излучения заключена

в неопределенности связи между энергией первичной частицы и числом частиц в образованном ею в атмосфере ливне. Из-за незнания процессов неупругих столкновений и множественной генерации адронов эта неопределенность достигает трехкратной величины. Эта неопределенность устраняется экспериментально после выполненных под руководством А. Е. Чудакова исследований излучения Вавилова—Черенкова, возникающего в атмосфере при прохождении ливня¹. Энергия первичной частицы принимается равной суммарной энергии всех компонент ливня. Энергия, растратившаяся ливнем на ионизацию атмосферы на уровне наблюдения, определяется по интенсивности черенковского свечения из атмосферы. Энергия, проносимая различными компонентами ливня ниже уровня наблюдения, измеряется непосредственно. Определенная таким образом абсолютная интенсивность первичного космического излучения для энергии частиц выше 10^3 ТэВ составляет $(9 \pm 2) \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1} \text{ стер}^{-1}$, и для частиц с энергией выше 10^6 ТэВ — $(7 \pm 2) \cdot 10^{-9} \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ ^{2,3}. С учетом открытого С. Н. Верновым, Г. Б. Христиансенем и др. изменения показателя энергетического спектра в области энергии $\sim 10^3$ ТэВ⁴ и непосредственных измерений интенсивности первичного излучения с энергией выше 1 ТэВ, энергетический спектр первичного космического излучения может быть выражен в упрощенном виде как $F(>E) = (9 \pm 2) \cdot 10^{-3} (E/10^3)^{-\gamma}$, где E — энергия первичных частиц в ТэВ, а $\gamma = 1,65$ для интервала $1 < E < 10^3$ ТэВ и $\gamma = 2,0$ для $10^3 < E < 10^7$ ТэВ.

Исследования ядерного состава первичного космического излучения путем анализа относительных флуктуаций двух различных компонент широких атмосферных ливней на заданном уровне наблюдения были начаты около 20 лет тому назад. В настоящее время существенно возросла точность измерений, появилась возможность полного математического моделирования эксперимента. В частности, И. Н. Стаменов,



Энергетический спектр первичного космического излучения в области энергий выше 10^7 ТэВ с различных галактических направлений.

1 — со стороны Местного скопления ($>30^\circ\text{N}$), 2 — из галактического диска ($\pm 30^\circ$), 3 — из половины галактического диска со стороны центра Галактики, 4 — из внешней половины галактического диска.

развивший эту методику в применении к анализу флуктуаций относительно числа мюонов в ливнях с заданным числом электронов и наоборот, показал, что результат анализа состава первичного космического излучения в пределах получаемых ошибок не зависит от предположений о модели процессов множественной генерации адронов⁵. Единственное ограничение при выборе модели адронных столкновений сводится к требованию согласия между расчетной и наблюдаемой зависимостью среднего числа мюонов в ливне от усредненного числа электронов, хотя бы в пределах тройной ошибки эксперимента. Сравнение известного из непосредственных исследований вблизи границы атмосферы состава первичного космического излучения с ядерным составом в области энергий $(2-8) \cdot 10^3$ ТэВ дает основание говорить о том, что изменение показателя энергетического спектра в области энергий вблизи 10^3 ТэВ не соответствует единому значению магнитной жесткости для первичных частиц с различными зарядом и массой. По-видимому, наименьшая энергия в точке изменения показателя спектра у α -частиц, хотя точность определения доли α -частиц в первичном космическом излучении значительно хуже, чем для протонов или ядер группы железа (12 ± 7 , 40 ± 5 и $18 \pm 5\%$ соответственно).

Впервые на значительную анизотропию космического излучения с энергией выше 10^7 ТэВ было обращено внимание Д. Д. Красильниковым на Европейском симпозиуме по космическим лучам в г. Лодзи (1974 г.)⁶. Одной из особенностей этой анизотропии является ее совпадение по энергетическому интервалу с изменением энергетического спектра в сторону большей жесткости. На вопрос, откуда же идет дополнительный поток частиц с энергией выше $3 \cdot 10^7$ ТэВ, отвечает рисунок. Энергетический спектр по различным галактическим направлениям показывает избыток

потока по сравнению с ожидаемым при неизменном виде спектра $F(>E) \sim E^{-\alpha}$ для направлений извне Галактики, в частности, со стороны Местного скопления.

В заключение следует отметить, что данные об энергетическом спектре и ядерном составе первичных частиц, полученные без априорных предположений о процессах множественного рождения адронов при неупругих столкновениях нуклонов с ядрами весьма важны для исследования этих процессов в космических лучах при сверхускорительных энергиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чудakov А. Е. и др.— В кн. Труды Международной конференции по космическим лучам, М.: Изд-во АН СССР, 1960.— Т. 2, с. 47.
2. Никольский С. И. Космические лучи и проблемы космофизики.— Новосибирск. СО АН СССР, 1964 — С. 87.
3. Дьяконов М. Н. и др.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1974, т. 38, с. 993.
4. Христиансен Г. Б.— Ibid., 1962, т. 29, с. 1872.
5. Никольский С. И. и др.— Ibid., 1980, т. 44, с. 525.
6. Красильников Д. Д. и др.— Ibid., 1975, т. 39, с. 1245.