

потока по сравнению с ожидаемым при неизменном виде спектра $F(>E) \sim E^{-\lambda}$ 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. Чудачков 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.

523 165(048)

Г. Б. Христиансен. Энергетический спектр космических лучей сверхвысоких энергий. Развитие метода индивидуального изучения широких атмосферных ливней на уровне моря позволило получить новые данные о первичном энергетическом спектре космических лучей в области сверхвысоких энергий (10^{14} — 10^{20} эВ).

На установке широких атмосферных ливней Московского государственного университета при этом использовался метод одновременной регистрации электронной и мюонной компонент ШАЛ. На установке института космофизических исследований и аэронавтики Сибирского отделения АН СССР вблизи г. Якутска использовался метод одновременной регистрации черенковского излучения и электронной компоненты ШАЛ. Установка ШАЛ МГУ нацелена на исследование космических лучей с энергией 10^{15} — $3 \cdot 10^{17}$ эВ, а установка в Якутске на диапазон энергий $3 \cdot 10^{17}$ — 10^{20} эВ. На установке МГУ был измерен спектр ШАЛ по числу электронов N_e и спектр по числу мюонов N_μ . Если представить спектр по N_e (N_μ) в виде степенного закона $N_e^{-(\kappa_e+1)} dN_e$ (или $N_\mu^{-(\kappa_\mu+1)} dN_\mu$), то показатель $\kappa_e = \gamma/s$, а $\kappa_\mu = \gamma \cdot \alpha$, где γ — показатель энергетического спектра первичных космических лучей, а величины s и α соответственно больше 1 и меньше 1. Результаты измерений спектров ШАЛ по числу электронов и мюонов на установке МГУ¹ показывают, что эти спектры не могут быть представлены чисто степенными законами. Существует резкое изменение показателей спектров: при изменении N_e или N_μ в несколько раз показатели спектров κ_e и κ_μ существенно возрастают. Одновременное возрастание κ_e и κ_μ можно интерпретировать в рамках общих представлений о ядерно-каскадном процессе в атмосфере только как результат соответствующего резкого возрастания показателя γ первичного энергетического спектра. Однако в свете современных представлений об адронных взаимодействиях при сверхвысоких энергиях (более 100 ТэВ) не исключена возможность генерации новых частиц с большими значениями фейнмановского параметра x . Эти частицы в конечном счете распадаются на обычные адроны и лептоны и возможно, что значительная часть энергии E_0 первичной частицы передается таким образом лептонам. Эта часть энергии может возрастать с E_0 , что приведет к уменьшению той части энергии E_0 , которая выделяется в атмосфере и создает собственно широкий атмосферный ливень. В этом случае «излом» в спектрах по N_e и N_μ свидетельствовал бы только об изломе в спектре «энерговыведенный» первичного космического излучения в атмосфере Земли. Для проверки этого крайнего предположения на установке ШАЛ МГУ с помощью прецизионного подземного магнитного спектрометра были проведены измерения энергетического спектра мюонов в ШАЛ² и показано, что доля от первичной энергии E_0 , уносимая всеми мюонами ШАЛ, не превосходит 15% и не возрастает, а скорее убывает при переходе от $N_e = 10^5$ к $N_e = 10^6$, то есть в той области, где меняется κ_e . Таким образом, «излом» в спектрах ШАЛ по N_e и N_μ должны быть связаны с «изломом» в энергетическом спектре первичного космического излучения.

На Якутской установке для исследования ШАЛ была проведена энергетическая градуировка регистрируемых ШАЛ с помощью потока черенковского излучения, сопровождающего ливень³. Поток черенковского излучения ШАЛ может быть связан с помощью формулы Тамма—Франка с энергией, выделенной ШАЛ в атмосфере до уровня наблюдения. Для уровня моря эта энергия тем ближе к энергии первичной частицы E_0 , чем меньше E_0 , но даже для E_0 , регистрируемых на Якутской установке, поправки, связанные с учетом энергии, выделяемой ШАЛ ниже уровня наблюдения,

достаточно малы ($\sim 30\%$). Коэффициент пересчета от числа электронов ШАЛ (или точнее от плотности электронов на характерном для данной установки расстоянии от оси ШАЛ) к энергии первичной частицы E_0 был определен в интервале $E_0 = 10^{17} - 10^{19}$ эВ. На рис. 1 приведены экспериментальные данные об энергетическом спектре первичных космических лучей в интервале $E_0 \approx 10^{15} - 10^{20}$ эВ, полученные путем экстраполяции коэффициентов пересчета от числа электронов ШАЛ к E_0 , найденных на Якутской установке. Следует отметить, что при $E_0 \sim 10^{15} - 10^{16}$ эВ правильность экстраполяции подтверждается прямыми экспериментальными данными о черенковском излучении ШАЛ, полученными другими авторами на уровне моря (см. ¹⁶). Как видно из рис. 1, наряду с реакцией изменением показателя γ от 1,6 до 2,3 в области $E_0 = (2-4) \cdot 10^{15}$ эВ, в области $E_0 = 10^{17} - 10^{18}$ эВ можно ожидать другой нерегулярности: уменьшения показателя γ до 1,8—2,0 (согласно данным установок МГУ и Якутска). Однако «излом» в спектре в области $E_0 = (2-4) \cdot 10^{15}$ эВ следует считать установленным фактом: результаты установки МГУ подтверждены более, чем в десяти лабораториях мира. Нерегулярность же в области $E_0 = 10^{17} - 10^{18}$ эВ, по-видимому, требует дополнительных исследований. На рис. 1 приведены также данные об интенсивности первичного космического излучения, полученные на установке Хавера Парк

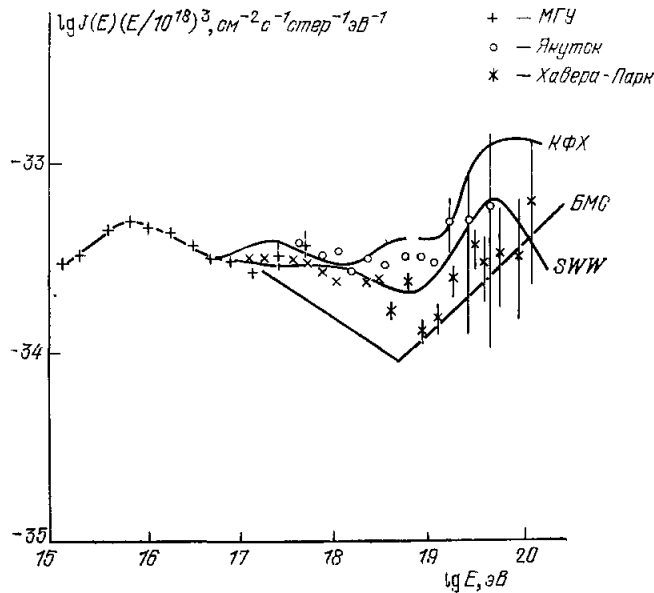


Рис. 1.

(Англия). При этом коэффициент пересчета от плотности заряженных частиц $\rho_{\text{ШАЛ}}$ на расстоянии 600 м от оси ШАЛ к первичной энергии E_0 был найден из сравнения $\rho_{\text{ШАЛ}}$ и E_0 , наблюдаемых с равной интенсивностью соответственно на установках Хавера-Парк и в Якутске. На рис. 2 приведен интегральный энергетический спектр космических лучей сверхвысоких энергий (включая данные Хавера Парк) и сравнение его с расчетами в рамках универсальной метагалактической модели происхождения космических лучей ⁴, учитывающими эффект взаимодействия с реликтовым излучением Зацепина и Грейзена. Как видно из рис. 2, благодаря энергетической калибровке ШАЛ, проведенной в Якутске и используемой для данных Хавера-Парк, можно с большой достоверностью отвергнуть универсальную Метагалактическую модель (во всяком случае при $E_0 > 10^{19}$ эВ).

Галактическое происхождение космических лучей с энергией менее 10^{17} эВ и их квазистационарная генерация за счет (в основном) сверхновых вряд ли вызывает сомнения. Сплошная кривая БМК на рис. 1 — расчет ⁵ в предположении диффузионной модели, учитывающей нерегулярное и регулярное магнитное поле спирального рукава Ориона и зависимость коэффициента диффузии от E_0 . Необходимое для объяснения экспериментальных данных распределение магнитных неоднородностей по размерам и величине поля хорошо согласуется с астрофизическими наблюдениями на расстояниях до 500 парсек от Солнца. Различие в моделях наступает при $E_0 > 10^{17}$ эВ. Кривые БМК ⁶ и КФХ ⁷ соответствуют моделям Галактического происхождения космических

лучей с $E_0 > 10^{17}$ эВ. В модели БМС⁶ квазистационарная генерация рассматривается во всем интервале $E_0 = 10^{16} - 10^{19}$ эВ, причем при $E_0 > 10^{18}$ эВ диффузия фактически уже отсутствует. В модели КФХ⁷ рассматривается нестационарная генерация космических лучей с $E_0 > 10^{17}$ эВ за счет взрыва ядра Галактики, при этом при разных E_0 вклад в интенсивность вносят диффузионные волны, соответствующие частицам с разными зарядами Z .

Пробным камнем для Галактических моделей при $E_0 > 10^{17}$ эВ являлось бы, конечно, изучение химического состава первичного космического излучения, например, методом, изложенным в работе⁸, с использованием больших площадей детекторов мюонов на установке типа ДЮМАНД.

В настоящее время нельзя, строго говоря, исключить и Метагалактическое происхождение космических лучей с энергией $10^{17} - 10^{20}$ эВ в духе универсальной метагалактической модели, однако, со слабой зависимостью интенсивности источников

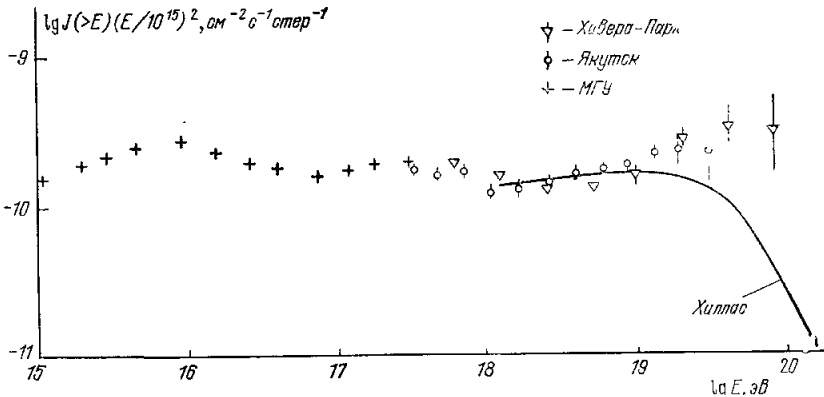


Рис. 2.

космических лучей от эпохи в модели расширяющейся Метагалактики (см. кривую SWW⁹). При этом источником космических лучей с энергией $10^{18} - 10^{20}$ эВ в модели SWW являются галактики Местной группы.

Для выбора между моделями Галактического и Метагалактического происхождения космических лучей с $E_0 = 10^{17} - 10^{20}$ эВ необходимы тщательные измерения анизотропии потока космических лучей в этом интервале энергий.

ЛИТЕРАТУРА

1. а) Вернов С. Н., Христиансен Г. Б.— In: Proc. of 10th ICRC, Calgary.— 1967.— V. 1, p.
- б) Фомин Ю. А., Христиансен Г. Б.— В кн. Материалы VII Европейского симпозиума по космическим лучам, Ленинград, 1980.— С. 77.
2. Хренов Б. А., Христиансен Г. Б., Шулипов Г. В. и др.— In Proc. of 16th ICRC. 1979.— V. 8, p. 351.
3. Глушков А. В., Григорьев Н. М., Ефимов Н. Н. и др. Доклад на VI Европейском симпозиуме по космическим лучам: Препринт.— Якутск, 1978.
4. Hillas A. M.— In: Proc. of 14th ICRC, 1975, v. 2, p. 717.
5. Bell M. C., Kota J., Wolfendale A. W.— J. Phys. Ser. A, 1974, v. 7, p. 420.
6. Березинский В. С., Михайлов А. А., Сыроватский С. И.— Цит. в² сб.
7. Куликов Г. В., Фомин Ю. А., Христиансен Г. Б.— Письма ЖЭТФ, 1969, т. 10, с. 347.
8. Атрашкевич В. Б., Калмыков Н. Н., Христиансен Г. Б.— Письма ЖЭТФ, 1981, т. 33, с. 236.
9. а) Strong A. et al.— J. Phys. Ser. A, 1974, v. 7, p. 1389.
- б) Wdowczyk J., Wolfendale A. W.— Цит. в² сб.— V. 2, p. 154.