

Г. Б. Христиансен. Перспективы исследования космических лучей сверхвысоких энергий (10^{15} — 10^{21} эВ). Общеизвестно, что космические лучи дают нам новую информацию, важную для физики космического пространства и астрофизики. Известно также, что космические лучи, открытые 75 лет назад, сыграли в 30—40-х и 50-х годах нашего века определяющую роль в становлении и развитии физики высоких энергий.

Космические лучи имеют в своем составе протоны, ядра, мюоны, нейтрино и другие частицы с энергиями, значительно превышающими энергии этих частиц, полученных на ускорителях в настоящее время.

В таблице приводятся данные об энергии протонов, ядер (со средним A) и мюонов, достигнутой или достижимой в ближайшем будущем в экспериментах на ускорителях и в космических лучах.

| Тип частиц | На ускорителях | | Тип частиц | В космических лучах | |
|---------------------------------|---|--|-----------------------|---|---|
| | Настоящее время | 90-е годы XX века | | Настоящее время | 90-е годы XX века |
| p | $1,38 \cdot 10^6$ ГэВ $s^{1/2} = 800$ ГэВ (США) | $1,8 \cdot 10^7$ ГэВ $s^{1/2} = 3 \cdot 10^3$ ГэВ (СССР) $8 \cdot 10^8$ ГэВ, $s = 2 \cdot 10^4$ ГэВ (США) | p и ядра | 10^{10} ГэВ и установка ШАЛ (Якутск) и установка ШАЛ АКЕНО (Япония) | $10^6 - 10^8$ ГэВ, АНИ (СССР), $10^{11} - 10^{12}$ ГэВ, ШАЛ-1000 (СССР) |
| μ | 280 ГэВ (Швейцария, ЦЕРН) | $< 2 \cdot 10^4$ ГэВ | μ | $2 \cdot 10^4$ ГэВ (МЮТРОН, Япония, РЭК, СССР) | $10^5 - 10^6$ ГэВ (ДЮМАНД), установка «Байкал» (СССР) |
| Ядра со средними $A \approx 30$ | 6000 ГэВ/частицу (Швейцария, ЦЕРН) | | Ядра с $A \approx 30$ | 10^5 ГэВ/частицу (Японо-американская эмульсионная группа) | |

Из таблицы видно, что максимальные достигнутые или достижимые в ближайшем будущем энергии протонов и ядер космических лучей на несколько порядков больше соответствующих энергий на ускорителях. Установки, использующие космические лучи таких огромных энергий существуют (Якутская установка с эффективной площадью регистрации 20 км^2) или будут созданы в ближайшее десятилетие (установка ШАЛ-1000 с эффективной площадью 10^3 км^2).

Кроме того, из таблицы видно, что в космических лучах с помощью эмульсионных камер изучаются акты взаимодействия различных первичных ядер с различными ядрами эмульсионных камер (от AgBr до Pb), причем энергия космических ядер значительно больше энергии ядер, полученных на ускорителях.

Использование на ускорителях метода встречных пучков приводит к тому, что рождаемые во взаимодействиях встречных пучков, например, протонов, вторичные частицы будут иметь энергию $E_{\max} < s^{1/2}$, что, учитывая достижимые в XX веке значения $s^{1/2}$ на несколько порядков ниже E_{\max} в космических лучах. В таблице это видно на примере мюонов.

Исследование мюонов и нейтрино с энергией $10^4 - 10^{15}$ эВ — основная задача проекта ДЮМАНД, реализуемого в нашей стране в виде глубоководной установки на озере Байкал.

Хотя при исследовании взаимодействий в космических лучах существует много конкретных трудностей (идентификация взаимодействующих частиц, малая интенсивность частиц сверхвысокой энергии и другие), тем не менее исторический опыт последнего десятилетия (70-е — 80-е годы) показывает, что космические лучи следует рассматривать как один из актуальных разделов физики высоких энергий и в настоящее время. В подтверждение этих слов можно привести хотя бы такие факты как: 1) полученное с помощью ШАЛ космических лучей доказательство несправедливости гипотезы Фейнмана о скейлинговом характере «мягких» взаимодействий при сверхвысоких

энергиях $10^{14} - 10^{15}$ эВ²; 2) наблюдения первых проявлений образования, по-видимому, кварк-глюонной плазмы при взаимодействии ядро — ядро с энергией падающего ядра более 10^{14} эВ (большие средние поперечные импульсы вторичных частиц, крайне нерегулярный характер их распределений по быстроте³).

В то же время последнее десятилетие показало необходимость самой тесной связи исследований в космических лучах и на ускорителях. Прецизионные и во многих отношениях исчерпывающие исследования на ускорителях оказались совершенно необходимыми для правильного анализа экспериментальных данных космических лучей. В особенности эта тесная связь между данными ускорителей (при энергии 10^{12} эВ) и данными космических лучей (при энергии $10^{14} - 10^{15}$ эВ) проявилась при отрицании гипотезы Фейнмана. Необходимость использования или конкретных моделей мягких взаимодействий, или общих принципов базирующихся на ускорительных данных, становится очевидной как при анализе адронных взаимодействий космических лучей сверхвысоких энергий, так и при получении информации в области астрофизики космических лучей (например, о химическом составе первичного космического излучения сверхвысокой энергии). Так, установка АНИ (г. Арагац АрмССР (см. таблицу), нацеленная на прецизионные измерения электронной, адронной и мюонной компонент высокой энергии в составе ШАЛ с первичной энергией $10^{15} - 10^{17}$ эВ, безусловно, должна использовать ускорительные данные при энергии порядка 10^{15} эВ и конкретные модели мягких взаимодействий для решения вопроса о возможности экстраполяции наших представлений на два порядка по энергии.

Одним из важнейших и в то же время болезненным вопросом астрофизики космических лучей является вопрос о химическом составе космических лучей сверхвысоких энергий. Количественное решение этого вопроса в силу необходимости использования косвенных методов определения химического состава станет возможным только после однозначного выбора модели мягких адронных взаимодействий (при энергии $10^{15} - 10^{17}$ эВ, например, на установке АНИ и при более высоких энергиях на установке ШАЛ-1000).

Практически независимыми от модельных представлений, диктуемых ускорительными данными, являются энергетический спектр и анизотропия космических лучей сверхвысоких энергий. Методы исследования этих характеристик таковы («квазикалориметрический» метод⁴), что предполагают получение прямых экспериментальных данных.

Приведенные на рис. 1 данные об энергетическом спектре космических лучей сверхвысокой энергии свидетельствуют о том, что, хотя существование «излома» при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ заведомо установлено и общий ход спектра при энергии до 10^{19} эВ измерен, детали в поведении спектра (нерегулярности) и его абсолютный поток нуждаются в уточнении. При энергии более 10^{19} эВ данные различных работ отличаются как по абсолютной величине, так и по форме.

Другая характеристика первичного космического излучения сверхвысокой энергии, которая может быть получена независимо от модельных представлений, — это анизотропия. Для ее определения необходимо измерение направления оси ШАЛ и его первичной энергии, а также солнечного времени. Количественные измерения амплитуды анизотропии и ее фазы должны сыграть определяющую роль в решении вопроса о распределении в пространстве источников космических лучей (галактическое или метagalактическое происхождение и др.). Количественные наблюдения анизотропных потоков от определенных астрофизических объектов (например, бинарных звездных систем) должны дать прямое решение вопроса об отдельных источниках космических лучей сверхвысоких энергий.

Некоторые количественные измерения анизотропии в настоящее время проведены, по-видимому, только при энергиях $2 \cdot 10^{13}$ и $2 \cdot 10^{17}$ эВ^{5,6}. Наблюдения космических лучей сверхвысоких энергий от определенных источни-

ков (бинарной системы с пульсаром — Лебедь X-3, бинарной системы с «черной» дырой — Лебедь X-1 (рис. 2) ⁷ и др.) только начинаются, и полученные данные о нестационарности этих источников делают необходимым их непрерывное наблюдение.

Таким образом, перед астрофизикой космических лучей сверхвысоких энергий стоит целый ряд конкретных задач, решение которых требует прин-

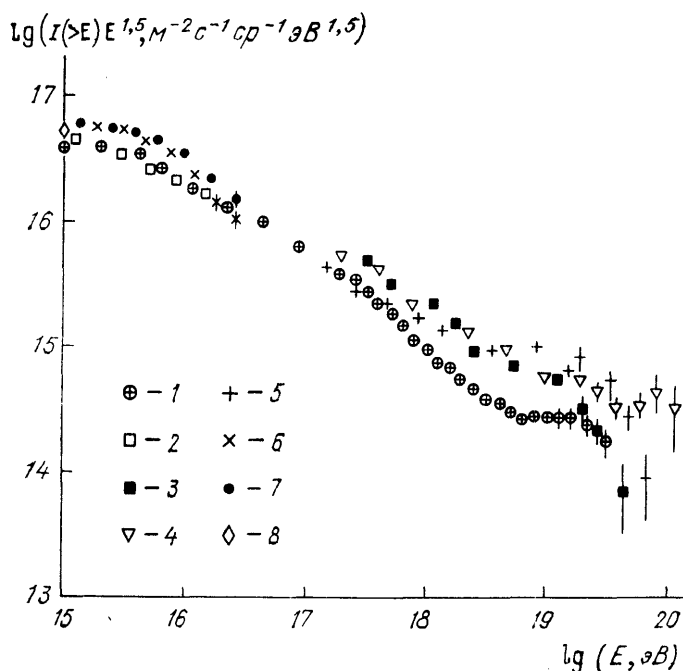


Рис. 1. Энергетический спектр космических лучей сверхвысоких энергий.
1—Акено, 2—Тянь-Шань, 3—Якутск, 4—Хавера-Парк, 5—Флайс-Ай, 6—СамГУ, 7—МГУ, 8—«Протон»

ципального улучшения точности определения параметров индивидуального ШАЛ и принципиального увеличения скорости набора необходимой статистики. Упомянутая выше установка ШАЛ-1000 ¹, отличающаяся от ныне

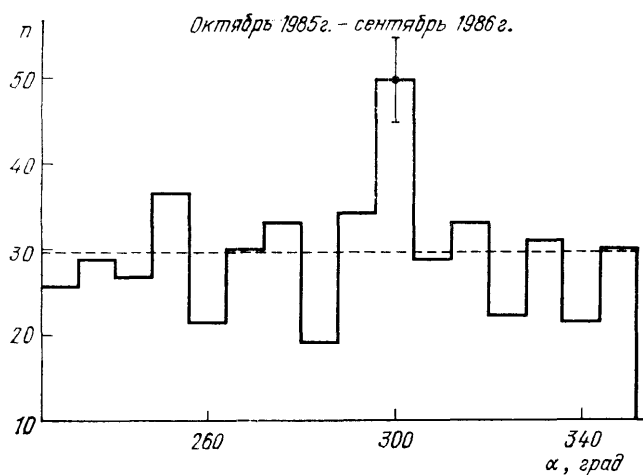


Рис. 2. Космические лучи сверхвысоких энергий от Лебедя X-1.
Возраст ливней $\geq 1,3$; избыток - 21 ливень при фоне 29 (3,8 σ)

действующих установок ШАЛ не только огромной площадью (1000 км²), но и принципиально большей (в 30—50 раз) плотностью детекторов ливневых частиц в расчете на единицу площади установки, как раз предназначена для

решения таких назревших задач. Она позволит провести: 1) прецизионное измерение первичного энергетического спектра в интервале энергий $10^{16} - 10^{21}$ эВ; 2) количественные измерения анизотропии космических лучей с энергией $10^{15} - 10^{20}$ эВ; 3) количественное исследование ядерного состава первичного космического излучения с энергией $10^{15} - 10^{19}$ эВ. Она позволит также осуществить постоянное слежение за целым рядом источников космических лучей сверхвысоких энергий, наблюдаемых в северном полушарии (Лебедь X-3, Лебедь X-1, Геркулес X-1 и др.), а также проверить на основании данных о структуре ШАЛ возможность экстраполяции современных моделей мягких адронных взаимодействий на область предельно высоких энергий $10^{18} - 10^{20}$ эВ.

В заключение отметим, что перспективы исследования мюонов сверхвысоких энергий в космических лучах изложены в ⁸ и что в настоящее время, по-видимому, отсутствуют проекты прямого использования ядер космических лучей более высоких энергий, чем $10^{14} - 10^{15}$ эВ для дальнейшего исследования взаимодействия ядро — ядро.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Христиансен Г. Б. // УФН, 1987. Т. 152. С. 341.
2. Калмыков Н. Н., Христиансен Г. Б. // Письма ЖЭТФ. 1976. Т. 23. С. 595.
3. Wosiek B. // 19th JCRC, La Jolla. 1985. V. 9. P. 509.
4. Чудаков А. Е., Нестерова И. М., Зацепин В. И., Тукиш Е. И. // Труды международной конференции по космическим лучам. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — Т. 2. С. 46.
5. Алексеенко В. В. и др. // 17th. JCRC, Paris. 1981. V. 2, P. 146.
6. Соу R. et al. // 17th. JCRC, Paris. 1981. V. 9. P. 183.
7. Куликов Г. В., Погорелый В. Г., Силаев А. А., Соловьева В. И., Сулаков В. П., Трубицын А. В., Христиансен Г. Б. // Препринт НИИЯФ МГУ, № 87-009. — Москва, 1987. — С. 3.
8. Домогацкий Г. В. // Proc. 82 — Balatonfüret, Hungary, 1982. — V. 1. P. 296.