

Г. Б. Христиансен. Установка для исследования космических лучей предельно высоких энергий. Энергетический спектр галактических (и возможно метagalactic) космических лучей охватывает колоссальный энергетический диапазон от нескольких десятков МэВ до, по крайней мере, 10^{20} эВ. Особенно интенсивно проводились в последнее время исследования космических лучей так называемыми «прямыми» методами, т. е. путем регистрации и изучения самого первичного космического излучения (что практически возможно вплоть до энергий 10^{14} — 10^{15} эВ). Эти исследования привели к следующей картине генерации и распространения галактических космических лучей с энергиями до 10^{13} — 10^{14} эВ: а) космические лучи диффундируют в хаотических магнитных полях Галактики так, что их транспортный пробег зависит от энергии $\lambda(E_0) \sim E_0^\alpha$; $\alpha = 0,3 - 0,6$ ¹; б) генерация космических лучей происходит при ускорении ударными волнами в оболочках Сверхновых²; в) энергетический спектр генерируемых космических лучей весьма жесткий, $F(E_0) dE_0 \sim E_0^{-(2+\epsilon)} dE_0$ ($\epsilon = 0,1 - 0,3$), и соответствует значению фактора компрессии $\rho_2/\rho_1 = \sigma \approx 4$ (так как согласно теории ускорения $3/(\sigma - 1) = 1 + \epsilon$). Максимальная энергия генерируемых протонов $E_0 \approx 10^{13}$ — 10^{14} эВ.

В то же время экспериментальные данные, полученные уже не прямыми, а косвенными методами регистрации первичных космических лучей, сви-

детельствуют о существовании первичных частиц с энергиями на много порядков большими, чем 10^{15} эВ. Энергетический спектр космических лучей, изученный этими методами, т. е. путем регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), показывает: а) существование «излома» при энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ (при этом показатель первичного энергетического спектра увеличивается на 0,5–0,7); б) падение интенсивности космических лучей с их энергией по закону $E(>E_0) \sim E_0^{-2}$ в области 10^{17} эВ $< E_0 < 10^{19}$ эВ; в) существование в первичном излучении частиц с энергией как минимум несколько джоулей. Эта совокупность фактов до сих пор не находит убедительного количественного объяснения, хотя и существует целый ряд полуквантитативных моделей. По-видимому, точности экспериментальных данных в области $E_0 > 10^{15}$ эВ все еще недостаточно для создания количественной

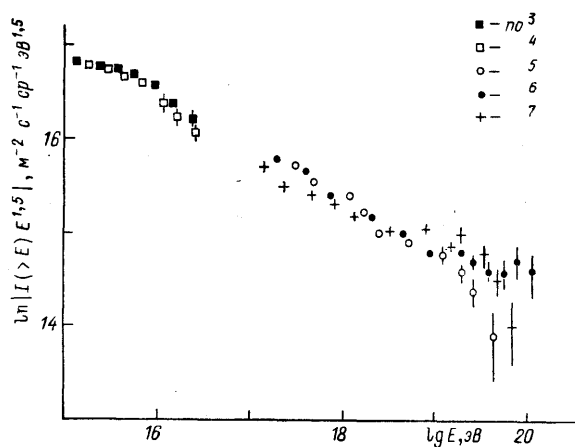


Рис. 1. Для $E > 10^{15}$ эВ интенсивность $60 \text{ м}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ год}^{-1}$ для $E > 10^{18}$ эВ: $60 \text{ км}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ год}^{-1}$, для $E > 10^{19}$: $\sim 0,6 \text{ км}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ год}^{-1}$

картины генерации и распространения космических лучей при этих энергиях.

На рис. 1 представлены современные данные ³⁻⁷ об энергетическом спектре первичных космических лучей в области энергий $E_0 = 10^{15} - 10^{20}$ эВ. Существование «излома» безусловно установлено, общий ход спектра до энергий $\sim 10^{19}$ эВ также можно считать примерно известным. Однако наблюдаемый разброс экспериментальных данных, в особенности при $E_0 > 10^{19}$ эВ, весьма велик и не позволяет решить известный вопрос об эффекте «обрезания» спектра за счет

взаимодействия метагалактических космических лучей с реликтовым излучением (Г. Т. Зацепин и В. А. Кузьмин ⁸). Конечно, и при меньших энергиях ($10^{17} - 10^{19}$ эВ) вряд ли можно говорить о деталях (например, нерегулярностях) в поведении спектра.

Более неопределенными являются данные по анизотропии космических лучей с энергией более 10^{15} эВ и в особенности данные о ядерном составе при этих энергиях. В последнем случае различные авторы получают даже прямо противоположные выводы об относительной роли протонов и ядер с большими A в первичном космическом излучении.

После открытия Д. В. Скобельцыным и Г. Т. Зацепиным ядерно-каскадного процесса в ШАЛ, создаваемых космическими лучами сверхвысокой энергии ($> 10^{15}$ эВ), широкое распространение получил предложенный Г. Т. Зацепиным метод изучения поперечного развития индивидуальных ШАЛ ⁹. С помощью этого метода были получены упоминавшиеся выше результаты, а также исследован целый ряд явлений, сопровождающих ШАЛ, как, например, радиоизлучение, оптическое излучение (черенковское и ионизационное) и др. Поток оптического излучения при этом оказался хорошей мерой энергии первичной частицы, создающей ШАЛ (А. Е. Чудаков ¹⁰).

Если сравнить характер пространственного распределения электронов, мюонов, оптических фотонов и радиоизлучения ШАЛ, то можно видеть, что пространственное распределение оптических фотонов и пространственное распределение электронов шире пространственного распределения когерентного радиоизлучения. Учитывая ограниченность времени для оптических наблюдений (5–10%) и малую долю мюонов ШАЛ по отношению к электронам ($< 10\%$), следует отдать предпочтение электронам ШАЛ как компонен-

те, которая удобна для регистрации в любую погоду и требует меньшей чувствительной площади детекторов.

Таким образом, проектируя новую установку, целесообразно ориентироваться на регистрацию первичного космического излучения с энергией 10^{15} — 10^{20} эВ с помощью, в первую очередь, электронной компоненты (или, точнее, заряженных частиц) ШАЛ, используя также и его оптическое излучение.

Исследования последних лет показали, что ливневые частицы приходят на плоскость наблюдения не одновременно, а с дисперсией, которая возрастает по мере удаления от оси ШАЛ¹¹. Кроме того, показано, что ливневой фронт не является плоским. Учет этих обстоятельств играет существенную роль для уточнения ориентации и других параметров ШАЛ. Точность определения основных параметров ШАЛ (положение оси, ее зенитные и азимутальные углы, число частиц) сильно зависит от числа детекторов заряженных частиц, используемых в экспериментальной установке.

Основной методический принцип, положенный в основу создания новой установки вблизи уровня моря, — это принципиальное (в 30—50 раз) увеличение, по сравнению с другими установками, плотности расположения детекторов заряженных частиц, находящихся на территории для регистрации ШАЛ. При этом, так же как и в случае установок предыдущего поколения, площадь территории растет (а плотность детекторов падает) по мере роста энергии регистрируемых ШАЛ. Этот принцип иллюстрируется рис. 2, на котором представлен план размещения детекторов заряженных частиц. Вблизи центра установки на территории *A* размером 1×1 км² располагается около $2,5 \cdot 10^3$ детекторов (пластических сцинтилляторов площадью 1 м² каждый). Расстояние между детекторами 20 м. Эта система служит для регистрации и измерения ШАЛ с энергией 10^{15} — 10^{17} эВ. Территория *A* входит как часть в территорию *B*, равную 5×5 км², на которой расположено около $5 \cdot 10^3$ детекторов. Эта система служит для исследования ШАЛ с энергией 10^{17} — 10^{19} эВ. Наконец, территория *C* с площадью 10^3 км² покрыта около $3,6 \cdot 10^3$ детекторами и предназначена для регистрации ШАЛ с энергией 10^{18} — 10^{20} эВ. Значительное увеличение плотности детекторов в данной установке, по сравнению с установками предыдущего поколения, приводит не только к улучшению точности определения параметров ШАЛ, но и к значительному (в десятки раз) увеличению статистики регистрации ШАЛ различных энергий (от 10^{15} до 10^{18} эВ) с высокой эффективностью. Это крайне важно для точного исследования анизотропии космических лучей сверхвысоких энергий. В центре всей установки предполагается разместить также: а) детектор мюонов с энергией более 1—2 ГэВ общей площадью 10^3 м²; б) детекторы оптического излучения ШАЛ для регистрации потока оптического излучения как интегрального, так и дифференциального по времени. Последний, как показано¹², даст сведения о продольном развитии индивидуальных ШАЛ (в частности, о положении максимума электронной лавины). По-

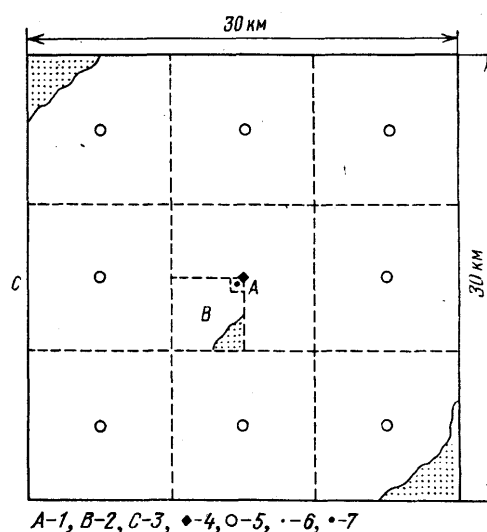


Рис. 2. 1 — территория площадью 1 км², 2 — территория площадью 25 км², 3 — вся территория (10³ км²), 4 — центральный пункт регистрации, 5 — опорные пункты регистрации, 6 — пункты регистрации площадью 1 м², 7 — мюонный детектор

казания мюонного детектора чувствительны к атомному номеру A первичной частицы, дающей ШАЛ. Сочетание данных о мюонном детекторе большой площади и данных об электронной компоненте и черенковском излучении ШАЛ позволит поставить вопрос о ядерном составе космических лучей при энергиях 10^{15} — 10^{18} эВ на количественную основу (см. ¹³). Многое здесь зависит и от степени развития наших знаний об адрон-ядерном и ядро-ядерном взаимодействиях при сверхвысоких энергиях. Исследования на ускорителях за годы создания предлагаемой установки позволят, по-видимому, разобратся в этом вопросе. Большую роль здесь сыграет также относительная градуировка «прямых» и «косвенных» методов.

Таким образом, планируемая установка позволит с использованием «косвенных» методов регистрации космических лучей с энергией 10^{15} — 10^{20} эВ получить: 1) энергетический спектр и абсолютный поток космических лучей в указанном интервале энергий (причем будут выявлены новые нерегулярности в спектре, если они существуют и будет решен вопрос об эффекте «реликтового обрезания» спектра; 2) анизотропию космических лучей с энергией 10^{15} — 10^{20} эВ с использованием статистики, в десятки и сотни раз превосходящей ранее имевшуюся в распоряжении экспериментаторов; 3) на более высоком количественном уровне новые данные о ядерном составе первичного излучения с энергией 10^{15} — 10^{18} эВ; 4) доказательство существования источников гамма-излучения сверхвысоких энергий, если их поток действительно соответствует предварительным данным Кильской группы; 5) экспериментальные данные о продольном и поперечном развитии ШАЛ для проверки применимости различных моделей адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях вплоть до 10^{20} эВ.

Отметим, что предлагаемую установку можно было бы также использовать для решения ряда задач, связанных с исследованием гелиосферы и магнитосферы Земли методом изучения вариации интенсивности космических лучей. Эта возможность возникает в связи с большой суммарной площадью детекторов планируемой установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Engelmann J. J., Goret P. et al. // *Astron. and Astrophys.* 1985. V. 148. P. 12.
2. Крымский Г. Ф., Кузьмин А. И. и др. // *Proc. of Intern. Cosmic Ray Conference.* — 1979. — V. 2. P. 39. 44.
3. Фомин Ю. А., Христиансен Г. Б., // *Труды 7-го Европейского симпозиума по космическим лучам.* — Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1980. — С. 77.
4. Алимов Т. А. Автореферат кандидатской диссертации. — Ленинград, 1985.
5. Правдин М. И. Автореферат кандидатской диссертации. — Москва, 1985.
6. Bower A. J. et al. // *Proc. of Intern. Cosmic Ray Conference — Bangalore*, 1983. — V. 9. P. 207.
7. Baltrusaitis R. M., Cady R., Cassidy G. L. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1985. V. 54. P. 1875.
8. Зацепин Г. Т., Кузьмин В. А. // *Письма ЖЭТФ.* 1966. Т. 4. С. 114.
9. Зацепин Г. Т. Автореферат докторской диссертации. — М.: ФИАН СССР, 1954.
10. Чудаков А. Е. и др. // *Труды Международной конференции по космическим лучам.* — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — Т. 2. С. 47.
11. Атрашкевич В. Б. и др. // *Proc. of Intern. Cosmic Ray Conference.* — La Jolla, 1985. — V. 7. P. 363.
12. Фомин Ю. А., Христиансен Г. Б. // *ЯФ.* 1971. Т. 14. С. 654.
13. Атрашкевич В. Б., Калмыков Н. Н., Христиансен Г. Б. // *Письма ЖЭТФ.* 1981. Т. 33. С. 236.