

дальнего или ближнего?

Космические лучи ультравысокой энергии

Б.А.Хренов, М.И.Панасюк

Феноменология космических лучей — тема, знакомая читателям журнала «Природа» [1]. Здесь мы уделим основное внимание космическим лучам ультравысокой энергии — современному состоянию их изучения и планам на будущее. Напомним только, что Вселенная заполнена как электромагнитным излучением, так и быстрыми частицами (их принято называть космическими лучами из-за дуальной природы частиц и волн), спектр которых представлен на рис.1. Большую часть энергии космических излучений несут реликтовые фотоны — излучение, сохранившееся после Большого взрыва, с длиной волны 0.5 см (максимум спектра на рис.1). Первоначально материя находилась в самом «элементарном» состоянии, и лишь при последующем остывании она перешла в более «сложные» формы, когда силы взаимодействия разделились на виды, известные нам из экспериментов по взаимодействию частиц. Исследования баланса скоростей и температуры отдельных частей Вселенной, проведенные в последние годы, показали, что основная материя и ее энергия все еще скрыты от наших наблюдений (темная материя, темная энергия). Это не мешает нам искать экспериментальные указания о природе



Борис Аркадьевич Хренов, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела частиц сверхвысоких энергий НИИЯФ МГУ. Работает в области физики космических лучей. Научный руководитель космического эксперимента ТУС. Заслуженный научный сотрудник МГУ.



Михаил Игоревич Панасюк, доктор физико-математических наук, профессор, директор НИИЯФ МГУ, заведующий кафедрой космических лучей и физики космоса физического факультета МГУ. Область научных интересов — физика космических лучей и магнитосферы Земли.

Большого взрыва по доступным астрофизическим данным (макромир) и по данным об элементарных частицах (микромир).

От оценок к измерениям

Как следует из рис.1, космические лучи могут иметь длину волны менее размера нуклона (10^{-13} см, энергия протонов более 10^{10} эВ). Первое указание на

присутствие частиц столь высокой энергии в космических лучах получил в 1927 г. Д.В.Скобельцын*, наблюдая ливни вторичных частиц в камере Вильсона. По характеристикам взаимодействия частиц высокой энергии с ядрами вещества стало возможно изучение микромира нуклона. С помощью кос-

* Именно он создал в СССР школу изучения космических лучей, достижения которой в значительной степени принадлежат НИИЯФ МГУ.

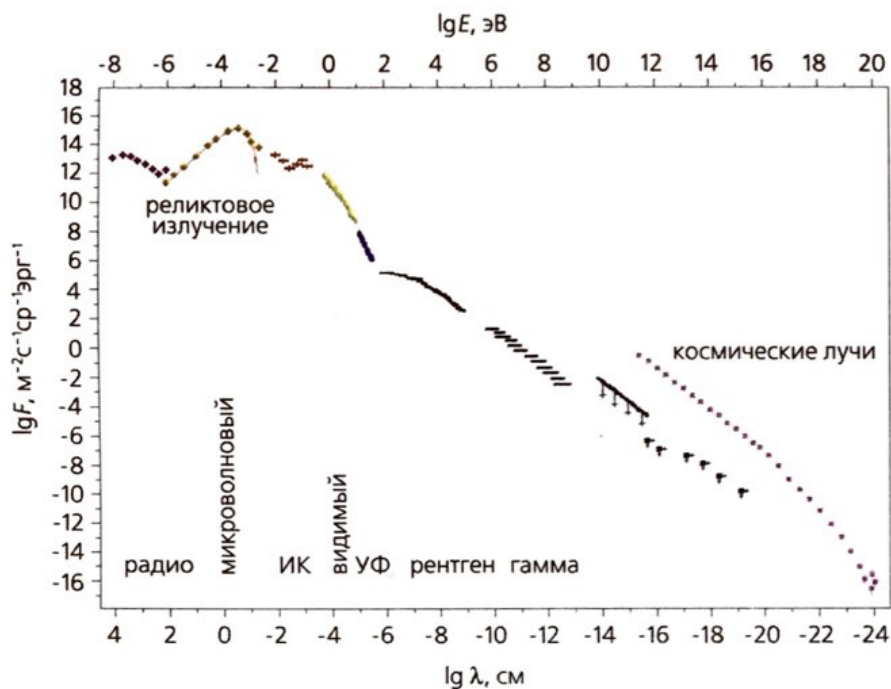


Рис. 1. Спектр электромагнитного космического излучения и космических лучей. F — поток квантов или частиц, E — энергия кванта или частицы, λ — длина волны.

мических лучей удалось открыть нестабильные «элементарные» частицы мюоны и пионы, которые оказались лишь первыми в ряду частиц из микромира нуклона. В дальнейшем эксперименты с частицами, ускоренными в лаборатории, дали гораздо более подробные сведения: были открыты кварки и глюоны — «кирпичики», из которых составлены элементарные частицы.

Однако и на лучших современных ускорителях все еще недостижимы энергии, наблюдаемые у самых высокоэнергетичных частиц космических лучей. К сожалению, использовать космические частицы для дальнейшего изучения «наномира» элементарных частиц не так-то просто. Во-первых, поток космических лучей столь высокой энергии исключительно мал (регистрируется в среднем 1 частица с энергией выше 10^{19} эВ на площади детектора 1 км^2 за год работы), во-вторых, детектор подобных размеров не позволяет фиксировать те парамет-

ры взаимодействия, по которым можно судить о структуре частиц. И все-таки частицы космических лучей ультравысоких энергий дают фундаментальные сведения о наномире частиц даже одним своим появлением: изучая их энергетический спектр, направление, откуда они приходят, и, по возможности, состав первичных частиц (сколько среди них ядер, нуклонов, γ -квантов, нейтрино), мы можем получить информацию о состоянии Вселенной на стадии самых высоких температур, когда вещество было более «элементарным», чем сегодня. Полная энергия потока таких частиц очень мала (на много порядков меньше, чем энергия реликтовых фотонов), но в то же время Природа дает нам шанс по следу столь редких, но приобретших колоссальную «индивидуальную» энергию частиц изучать специальные, возможно самые энергичные космические объекты.

Воспользоваться этим шансом стало реальным после

1938 г., когда П.Оже и Р.Маз с помощью детекторов, раздвинутых на расстояние до 100 м, зарегистрировали ливни частиц уже не в лаборатории, а непосредственно в атмосфере. Оценка энергии первичной частицы, которая могла бы создать такие ливни за счет каскада взаимодействий с ядрами атомов, дала величину $\sim 10^{15}$ эВ. Сигнал от подобной первичной частицы появляется в пятне с диаметром в сотни и более метров, благодаря чему удается регистрировать космические лучи высокой энергии по ливням из вторичных частиц в атмосфере (их в дальнейшем стали называть широкими атмосферными ливнями — ШАЛ) на больших площадях. Измерения в СССР (1949) частоты сигналов от детекторов, раздвинутых до 1 км, дали первые оценки интенсивности космических лучей с энергией выше 10^{18} эВ. Развитие метода ШАЛ позволило провести измерения энергетического спектра космических лучей в широком диапазоне энергий от 10^{14} до 10^{19} эВ. На рис.2 данный спектр представлен так, как он был суммирован М.Нагано и А.Ватсоном в 2001 г. [2]; его главная особенность — изменение при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ степенного закона, который хорошо аппроксимирует данные на отдельных участках спектра. Этот излом спектра был открыт Г.Б.Христиансенем и Г.В.Куликовым еще в 1958 г. [3], но потребовались годы, чтобы доказать [4] достоверность результата. Необходимые доказательства были получены на установке НИИЯФ МГУ для изучения ШАЛ, расположенной на территории университета (с сцинтилляционными датчиками и газоразрядными трубками в качестве детекторов частиц ШАЛ; доступная для регистрации энергия первичных частиц лежала в интервале $10^{15} - 3 \cdot 10^{17}$ эВ). Дело в том, что для измерений методом ШАЛ необходимо откалибровать меру энергии первичной частицы. На установке, где детекторы

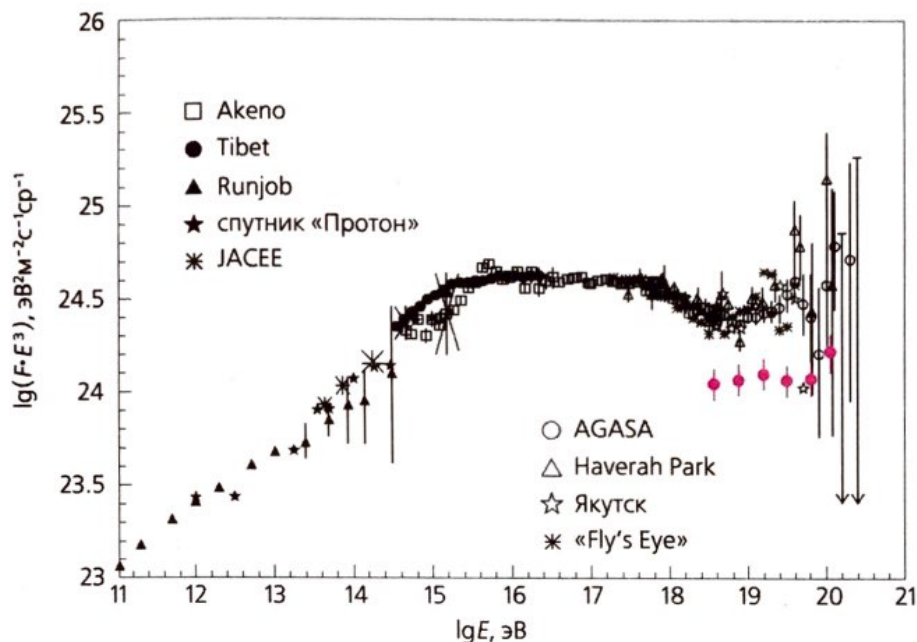


Рис.2. Энергетический спектр космических лучей по данным разных установок. Результаты в области энергий $E > 10^{15}$ эВ получены методом изучения ШАЛ (обзор [2]). Данные «Обсерватории Пьер Оже» 2005 г. (цветные кружки) заставляют усомниться в достоверности калибровки предыдущих измерений по энергии первичной частицы.

частиц расположены на площади 0.5 км^2 с шагом на местности* $50\text{--}200 \text{ м}$, такой мерой было число заряженных частиц в ливне (в основном электронов), и связь между первичной энергией и числом частиц ШАЛ устанавливалась расчетным путем — моделировался процесс развития ШАЛ. Искомая связь, естественно, зависит от принятой модели взаимодействия нуклонов и ядер, порождающего вторичные адроны (частицы, способные к сильным взаимодействиям), и на первых порах она содержала неопределенность, так как не было экспериментальных данных об адронных взаимодействиях при энергиях ШАЛ. В 70–80-е годы такие данные появились, и модель взаимодействия адронов была проверена в ускорительных экспериментах (модель кварк-глюонных струн). Развитие ШАЛ на основе этой модели было детально рас-

* Расстояние между детекторами выбирается немного меньше радиуса ливня, чтобы был зарегистрирован основной поток частиц.

считано в работах Н.Н.Калмыкова. Кроме того, интенсивность частиц космических лучей при энергии $10^{14}\text{--}10^{15}$ эВ была измерена непосредственно вне атмосферы с помощью ионизационного калориметра, созданного в НИИЯФ под руководством Н.Л.Григорова и запущенного на орбиту спутника Земли ракетой «Протон» в 1966 г. Данные прибора подтвердили оценки энергии, полученные в современных расчетах ШАЛ, и теперь можно уверенно утверждать, что излом спектра при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ зарегистрирован с высокой точностью.

На вершине энергий

Для измерения спектра ШАЛ со значительно большими энергиями, которые встречаются, как было сказано выше, исключительно редко, необходимо строить установки с рабочей площадью в десятки и сотни квадратных километров. Строительство установок с большим

числом детекторов на расстоянии порядка 100 м друг от друга встречает значительные технические и финансовые трудности. Реально увеличение рабочей площади достигается двумя способами: или детекторы раздвигаются (тогда можно сократить число детекторов на площади установки), или переходят к другому принципу регистрации — измерению не потока частиц, а флуоресценции в атмосфере, вызываемой основным потоком электронов ШАЛ. Во втором случае можно одним детектором «видеть» ливни с расстояний до десятков километров.

Первый вариант реализован на установках в Якутске площадью 17 км^2 и AGASA в Японии (рис.3) площадью около 100 км^2 . С помощью сети детекторов, расстояние между которыми 1 км , в каждом ливне регистрируется плотность потока частиц в нескольких детекторах (рис.4) и по уровню сигнала на заданном расстоянии от оси ливня (600 м в обоих рассматриваемых установках) делается оценка энергии первичной частицы. Величина 600 м выбрана не случайно: в ряде расчетов показано, что плотность потока частиц ρ_{600} на этом расстоянии примерно пропорциональна энергии первичной частицы. Для установления связи между абсолютным значением этой энергии и измеряемым параметром ρ_{600} по-прежнему моделируется процесс развития ШАЛ, причем учитывается не только продольное развитие ливня (достаточное при сравнении результатов расчета и измерения числа частиц), но и поперечное рассеяние частиц ливня, в процессе которого частицы «выбрасываются» на расстояния порядка километра. Необходимость учета еще одного фактора — поперечного рассеяния частиц — приводит к тому, что новая мера энергии (плотность потока частиц на заданном расстоянии) становится менее достоверной. Сравнение первичной энергии,

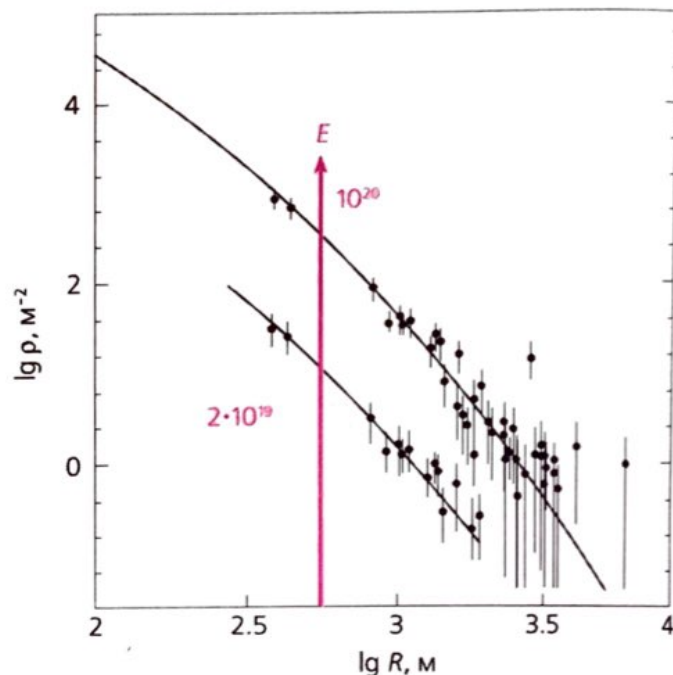
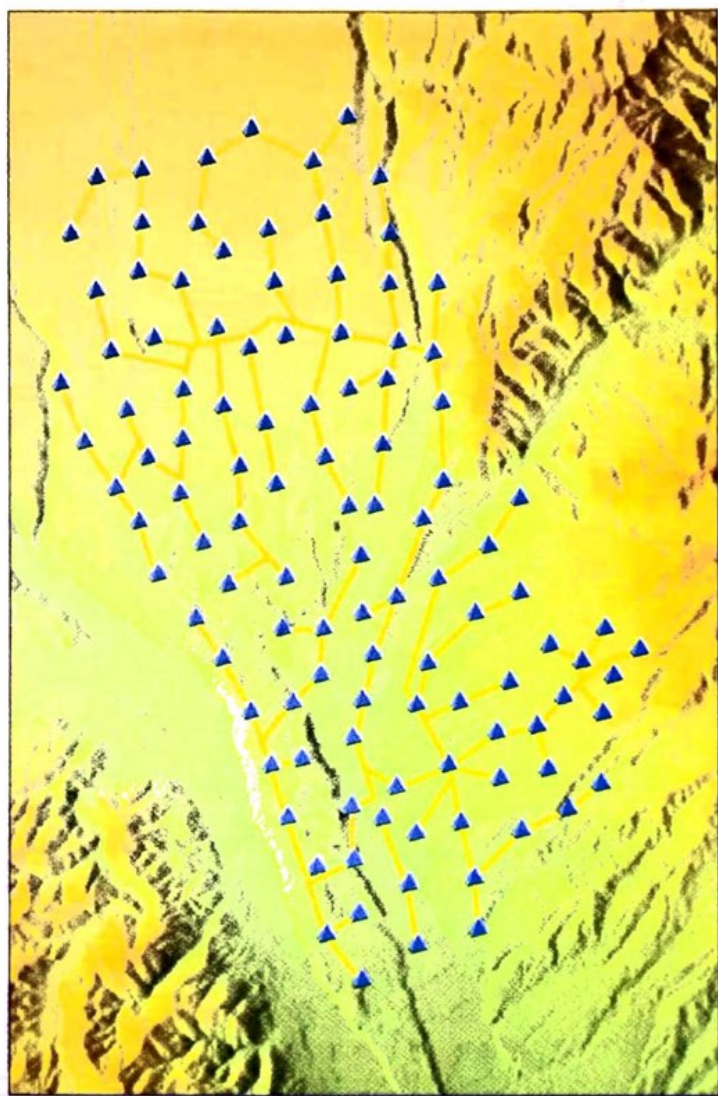


Рис.4. Иллюстрация метода измерения первичной энергии. Экспериментально измеряется уровень плотности потока частиц на расстоянии 600 м от оси ШАЛ, который пропорционален первичной энергии.

Рис.3. Карта расположения детекторов установки AGASA на площади 100 км². Треугольниками показаны детекторы, обслуживаемые центрами регистрации; линии – оптические кабели, связывающие центры регистрации с детекторами.

измеренной на установках с разной дистанцией между детекторами — типа НИИЯФ МГУ и типа AGASA, — часто демонстрирует расхождение в абсолютных значениях энергии. Согласие между различными результатами, представленными на рис.2, было достигнуто путем поправок в измерение энергии, введенных авторами обзора [2].

Второй способ регистрации космических лучей ультравысоких энергий — измерение флуоресценции атмосферы — позволяет определить энергию частицы калориметрическим методом. На рис.5 в качестве примера показан уникальный ливень с энергией $3 \cdot 10^{20}$ эВ, зафиксированный американской установкой «Fly's Eye» (штат Юта). В реальных условиях работы флуоресцентного детектора, наблюдающего самые энергичные ливни на расстояниях 20–30 км от детектора, необходимо учиты-

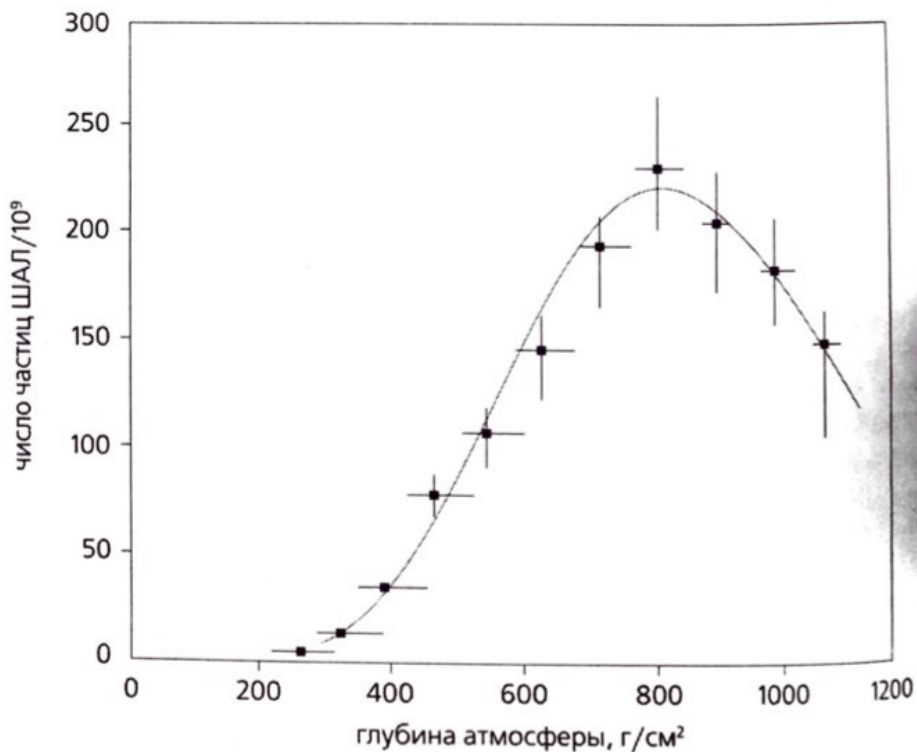


Рис.5. Пример регистрации ШАЛ рекордно высокой энергии $3 \cdot 10^{20}$ эВ детектором «Fly's Eye». Точки — показания ячеек детектора, которые соответствуют числу частиц ШАЛ (ось ординат) на различной глубине в атмосфере (ось абсцисс).

вать поправки, связанные с поглощением сигнала в атмосфере. На таких расстояниях (в горизонтальном направлении наблюдения) до детектора доходит лишь 10–20% сигнала, и надо точно знать коэффициент поглощения света флуоресценции в момент регистрации ШАЛ. Еще одна проблема — найти расстояние до оси ШАЛ. Достаточно точно это можно сделать лишь с помощью стереопары детекторов. К сожалению, площадь измерения ШАЛ парой детекторов значительно меньше, чем у одного детектора (поскольку их поля зрения должны перекрываться), а создание большого числа пар детекторов оказывается слишком дорогим.

В 2003 г. были подведены итоги измерений с помощью двух самых больших по геометрическому фактору установок: AGASA и флуоресцентного детектора HiRes (модернизированного детектора «Fly's Eye»), рис.6. Видно, что результаты принципиально расходятся: данные AGASA свидетельствуют о существовании частиц выше энергии $5 \cdot 10^{19}$ эВ (предел Грейзена—Зацепина—Кузьмина, о котором речь пойдет далее), а данные HiRes указывают на обрыв спектра при этом энергетическом пределе. Данные AGASA были накоплены в течение 11 лет, и по мере регистрации все большего числа ливней с энергией выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ разгоралась дискуссия о возможной интерпретации «запредельных» событий.

Результаты AGASA и HiRes расходятся по абсолютной интенсивности событий и при меньших энергиях (10^{18} – 10^{19} эВ). Данные Якутской установки в этом диапазоне энергий близки по интенсивности к данным AGASA и еще больше отличаются от данных HiRes. Естественно искать причину разницы в интенсивности частиц в различии калибровки событий по энергии.

Более точно откалибровать энергетическую шкалу в обла-

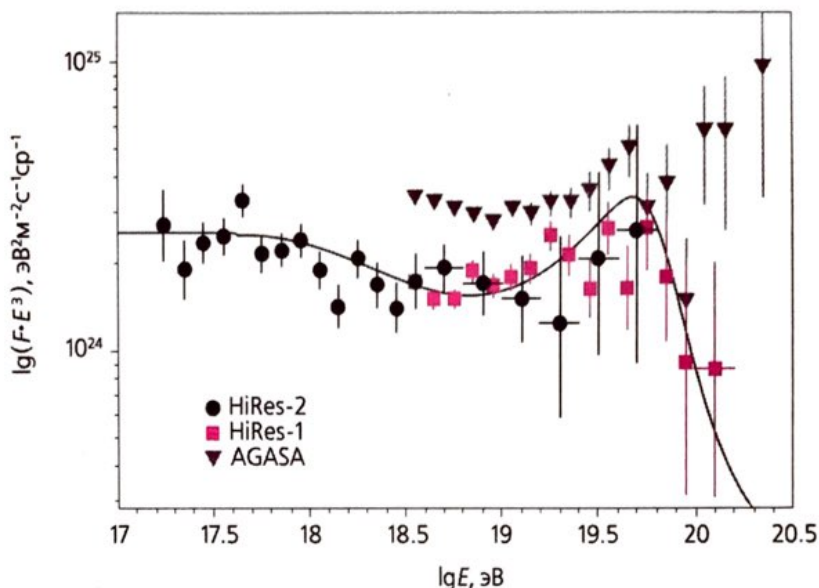


Рис.6. Драматическая разница в данных флуоресцентного детектора HiRes и установки AGASA, 2003 г. Сплошная кривая — ожидаемый спектр с обрывом при энергетическом пределе ГЗК.

сти $>10^{19}$ эВ позволяет новая установка для изучения космических лучей ультравысоких энергий, создаваемая в Аргентине международной коллаборацией «Обсерватория Пьер Оже» [5]. Она будет содержать 1600 детекторов частиц ШАЛ на площади около 3000 км², пространство над сетью детекторов будет просматриваться четырьмя флуоресцентными детекторами с обзором по азимуту около 180° и по высоте над горизонтом до 30°. Сочетание методов обоих типов на одной площади регистрации даст возможность не только провести относительную калибровку двух методов, но и повысить достоверность данных флуоресцентных детекторов, так как сеть детекторов частиц, фиксируя положение оси ливня, дает точное расстояние до оси ливня даже для одного детектора флуоресценции.

Первые предварительные результаты измерения энергетического спектра космических лучей, проведенные лишь на части строящейся установки «Обсерватория Пьер Оже» (2005 г.), показаны на рис.2 и 7. Эти данные, использующие новую, более точную калибровку

первичной энергии, значительно ниже по интенсивности, чем данные установок AGASA и Якутской, и ставят вопрос о достоверности калибровки в предыдущих измерениях. При меньших энергиях абсолютные значения энергии можно определять методом «атмосферного калориметра» — путем регистрации черенковского света ШАЛ. Оптимальным образом этот метод реализован на установке «Тунка» (НИИЯФ МГУ в кооперации с Иркутским государственным университетом), которая состоит из сети детекторов черенковского света, расположенной на большой площади, и способна измерять спектр космических лучей в диапазоне энергий 10^{15} – 10^{17} эВ, рис. 7. В области излома спектра при энергиях $3 \cdot 10^{15}$ эВ результаты установки «Тунка» согласуются по абсолютной интенсивности с данными ионизационного калориметра (спутник «Протон») и установки ШАЛ НИИЯФ МГУ. Из сравнения всех результатов, представленных на рис.7, видно, что помимо упомянутого излома происходит еще один — при энергиях $\sim 10^{18}$ эВ. И теперь пора обратиться к самому инт-

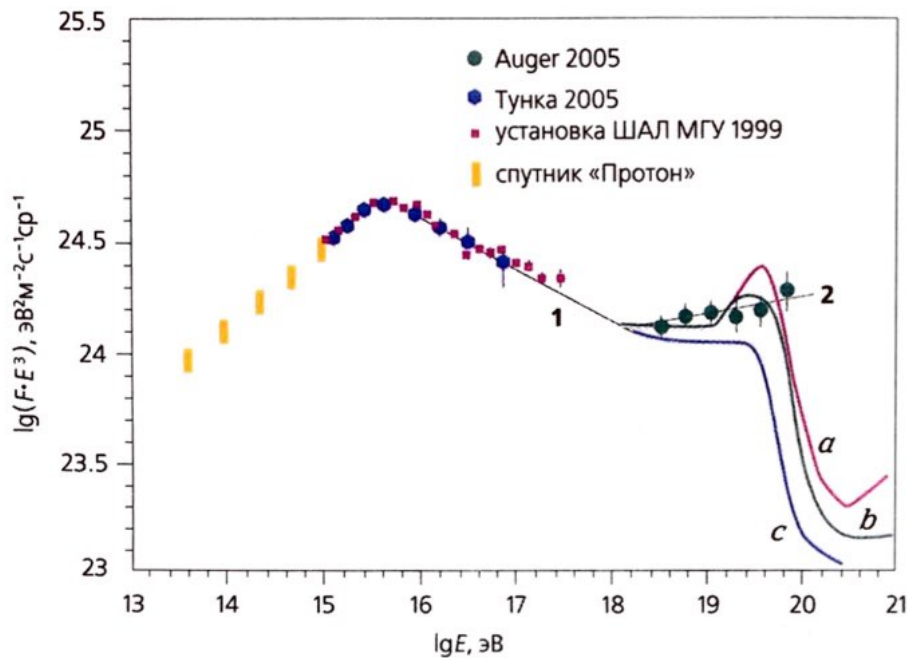


Рис.7. Энергетический спектр космических лучей по данным установок, использующих калориметрический метод измерения энергии. Виден первый излом спектра при $3 \cdot 10^{15}$ эВ и получено явное указание на второй излом (до энергии 10^{18} эВ показатель дифференциального спектра 3.2 (линия 1), при энергиях $>10^{18}$ эВ — показатель 2.8 (линия 2). При энергии $5 \cdot 10^{19}$ эВ (предел ГЗК) ожидается обрыв спектра. Чувствительность спектра как к виду спектра в источнике, так и к распределению источников во Вселенной иллюстрируется кривыми *a*, *b*, *c* [9]: *a* и *b* — источники равномерно распределены по Вселенной, но спектр источников $E^{-2.35}$ (*a*) и $\sim E^{-2.75}$ (*b*); *c* — источники распределены подобно формирующимся звездам, и спектр источников $\sim E^{-2.75}$.

ригующему вопросу: откуда к нам приходят самые высокоэнергетичные частицы?

Обращаясь к источникам

В интерпретации авторов открытия первого излома спектра второй излом ожидается и может свидетельствовать о регистрации частиц, приходящих от источников в нашей Галактике. При энергии протонов $\sim 10^{18}$ эВ диффузия протонов в галактическом пространстве практически отсутствует, поэтому следует ожидать анизотропии в направлении прихода частиц с такой энергией — они должны прилетать преимущественно по направлению от галактической

плоскости (или от ее центра). Однако экспериментально анизотропия частиц с энергией более 10^{18} эВ пока не установлена. Хотя некоторые указания на преимущественный приход частиц из галактического центра есть (данные AGASA), они не подтверждаются последними измерениями на установках HiRes и «Обсерватория Пьер Оже». Поэтому сейчас частицам космических лучей ультравысокой энергии (за вторым изломом спектра) приписывают межгалактическое происхождение.

Но если эти частицы генерируются далеко от Галактики и, в первом приближении, равномерно в пространстве Вселенной, особого внимания заслуживают условия, при которых такие «космологические» части-

цы смогут пройти межгалактическое пространство, заполненное излучением (рис.1). Море фотонов Большого взрыва оказывается «непроходимым» для протонов и ядер с энергией выше энергетического порога взаимодействия фотон—протон, фотон—ядро. Первые оценки эффекта взаимодействия ультраэнергетичных частиц с реликтовыми фотонами были сделаны в работах К.Грейзена [6] и Г.Т.Зацепина и В.А.Кузьмина [7]. Было показано, что начиная с энергии протонов $5 \cdot 10^{19}$ эВ «космологические» частицы начинают поглощаться на пути от источника к Земле, и спектр космических лучей должен испытывать «обрыв». Предел по энергии для спектра космических лучей, источники которых равномерно распространены во Вселенной, получил название предела ГЗК.

Если источники расположены достаточно близко к земному наблюдателю — на расстоянии не более 50 Мпк, — то предела ГЗК нет. Отсюда очевиден путь экспериментального исследования происхождения ультраэнергетичных частиц: необходимо изучить их энергетический спектр вплоть до энергий, превышающих $5 \cdot 10^{19}$ эВ, и установить, есть ли предел ГЗК, параллельно измеряя направления прихода первичных частиц. В случае регистрации событий за пределом ГЗК их источники следует искать на расстоянии не более 50 Мпк в направлении, откуда прилетела зарегистрированная частица (известно, что магнитные поля в Галактике и на расстояниях менее 50 Мпк от нее отклоняют протоны с энергией выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ не более, чем на 4° ; тяжелые ядра отклоняются сильнее, но сохраняют общее направление на источник).

Данные установки AGASA позволили провести такой анализ. Оказалось, что предел ГЗК не наблюдается, но в то же время нет единого источника «запредельных» частиц. Отслежи-

вание прихода частиц с энергией выше $4 \cdot 10^{19}$ эВ из одной области на небе с размером $5 \times 5^\circ$ выявило одну точку на небе, из которой за 10 лет работы установки пришло три частицы, и шесть точек, из которых пришло по две частицы. Вероятность случайной группировки частиц в таком угловом размере мала, но вместе с тем и не исключена, что не позволяет сделать окончательный вывод о наблюдении источников.

Были также сопоставлены направления прихода ультраэнергетических частиц, зарегистрированных на установке AGASA, с направлениями на известные источники на небе выбранного типа, потенциально способные ускорить частицы до подобных энергий. Таких астрофизических объектов на расстояниях менее 50 Мпк немного — пульсары, ядра активных галактик, радиогалактики, источники гамма-всплесков. На рис.8 приведен пример такого объекта — радиогалактика NGC 315. Все они должны удовлетворять по крайней мере одному условию — магнитное поле в области источника должно быть велико, чтобы достаточно долго удерживать ускоряемую частицу в пределах размеров источника. К сожалению, статистика событий с энергией $>5 \cdot 10^{19}$ эВ неве-

лика, а вероятность отклонения частиц от направления на источник для частиц с энергией $<5 \cdot 10^{19}$ эВ заметна, поэтому сделать вывод о надежном выделении какого-то типа источника пока нельзя. Вместе с тем проведенный анализ позволил отработать метод поиска источников в будущих экспериментах.

Предсказание об обрыве спектра космических лучей было уточнено, когда более детально была рассмотрена эволюция Вселенной [8, 9]. Результаты подобного расчета зависят как от предполагаемого вида спектра в источниках, так и от распределения источников во Вселенной (распределения по красному смещению). Один из последних результатов расчета ожидаемого спектра в районе предела ГЗК показан на рис.7: перед обрывом спектра интенсивность должна повыситься, но излом спектра всегда находится при значении предела ГЗК. Последнее обстоятельство позволяет надеяться, что в будущих экспериментах статистически надежное выделение обрыва спектра (если он существует) будет свидетельствовать о правильно выбранной мере энергии в эксперименте. Детальное исследование спектра в районе предела ГЗК даст информацию об эволюции

Вселенной и о распределении источников по красному смещению.

Отсутствие по данным установки AGASA корреляции направления прихода частиц с потенциальными кандидатами — астрофизическими ускорителями — дало пищу альтернативным объяснениям появления частиц за пределом ГЗК. Так, «запредельные» частицы могут быть продуктом распада сверхмассивных частиц (с массой 10^{24} эВ), которые представляли материю Вселенной в самом начале Большого взрыва (время меньше 10^{-35} с), но могли и сохраниться на современной стадии существования Вселенной (такие модели предложены). Предполагается, что сверхмассивные частицы, распадаясь, производят все известные элементарные частицы, в том числе и нуклоны, но наиболее представленными стабильными частицами оказываются фотоны и нейтрино. Если расстояние до первичной массивной частицы $\gg 50$ Мпк, среди наблюдаемых «запредельных» частиц должны преобладать нейтрино, так как нуклоны и фотоны распада не будут доходить до Земли.

Но, может быть, сверхмассивные частицы встречаются и на расстояниях <50 Мпк. В модели В.А.Рубакова и В.А.Кузьмина, например, они являются темной материей Вселенной и поэтому сосредоточены вблизи всех массивных объектов, в том числе входят в состав Галактики. Тогда эффекты поглощения протонов и других частиц не играют роли. Согласно этой модели, по составу частиц в области энергий $>5 \cdot 10^{19}$ эВ в будущих экспериментах можно изучать сверхмассивные частицы темной материи и решить одну из фундаментальных проблем современной физики.

Итак, исследования ультраэнергетических частиц подвели нас к самым актуальным проблемам физики, но решить их можно, лишь совершенствуя постановку эксперимента.

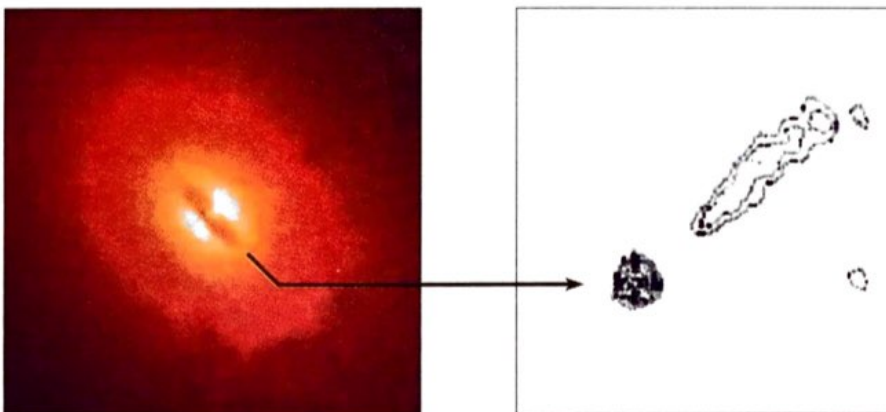


Рис.8. Радиогалактика NGC 315 — потенциальный источник частиц с энергией до 10^{20} эВ, содержащая быструю струю газа (данные радиотелескопа, справа). Слева показана основная часть галактики (фото телескопа «Хаббл»).

Воспоминания о будущем

В ближайшие годы вступит в строй в полном объеме самая большая наземная установка для изучения космических лучей — «Обсерватория Пьер Оже». Как было сказано выше, такая «гибридная» установка позволит физически правильно (по калориметрическим измерениям флуоресцентного детектора) прокалибровать отсчет энергии на детекторах частиц, которые обеспечивают непрерывные измерения (флуоресцентные детекторы эффективно работают только в безлунные ясные ночи). В течение 10 лет работы «Обсерватория Пьер Оже» накопит экспозицию по измерению частиц с энергией $>10^{19}$ эВ в 30 раз больше, чем установка AGASA. Ожидается, что будет решен вопрос о существовании обрыва спектра при пределе ГЗК и проведен поиск источников частиц на небе Южного полушария Земли.

Большой интерес представляет уточнение данных в области второго излома спектра космических лучей. Здесь интересные новые данные ожидаются на создаваемой модернизированной установке «Тунка» («Тунка-133»). На этой установке будет не только измерен спектр космических лучей до энергий 10^{18} эВ, но и получены данные о составе частиц и анизотропии прихода частиц в области второго излома, что позволит уточнить наше представление о происхождении космических лучей ультравысокой энергии ($>10^{18}$ эВ).

Создание наземных установок для изучения космических лучей предельно высоких энергий по масштабу большему, чем «Обсерватория Пьер Оже», нерентабельно, и эксперименты с еще большей рабочей площадью придется проводить с помощью флуоресцентных детекторов на спутниках Земли. Впервые с таким предложением выступил Дж.Линсли, и в даль-

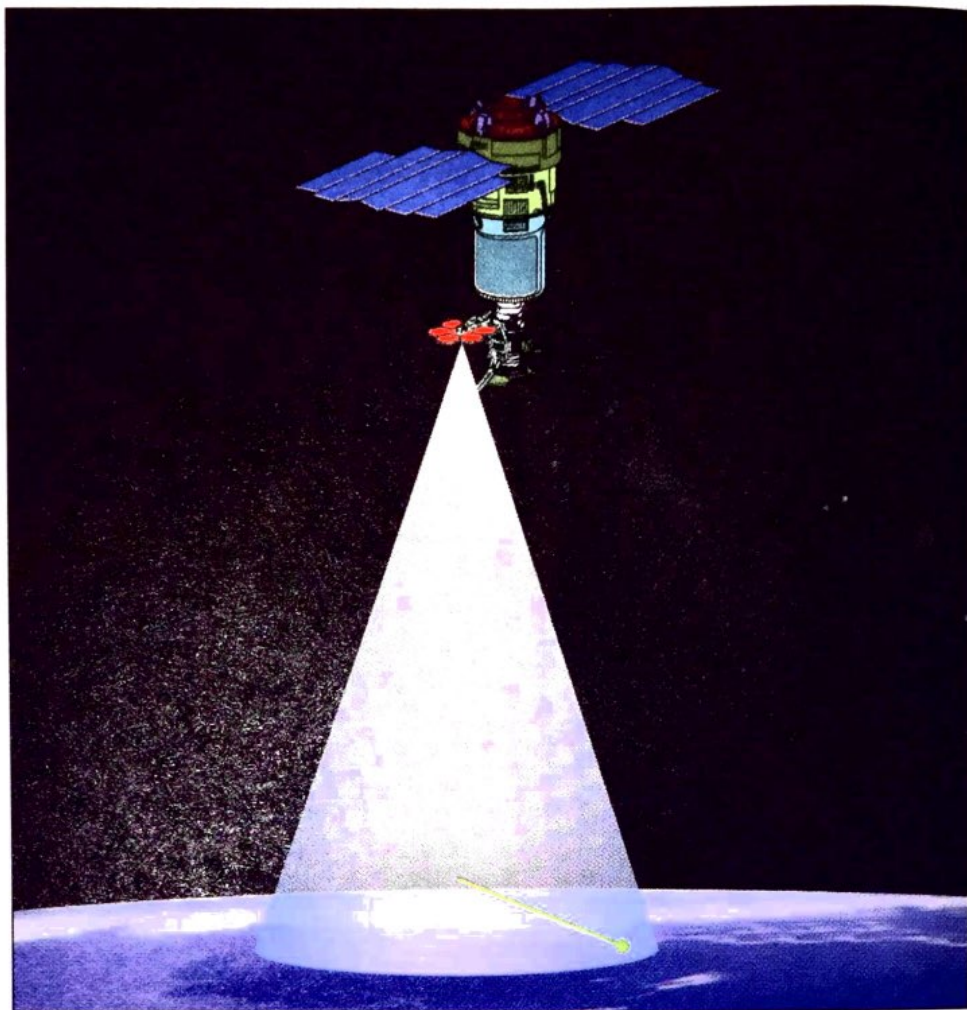


Рис.9. Флуоресцентный детектор на борту спутника «Ресурс-ДК-1» — проект ТУС, подготавливаемый в рамках программы научных исследований федерального космического агентства РФ.

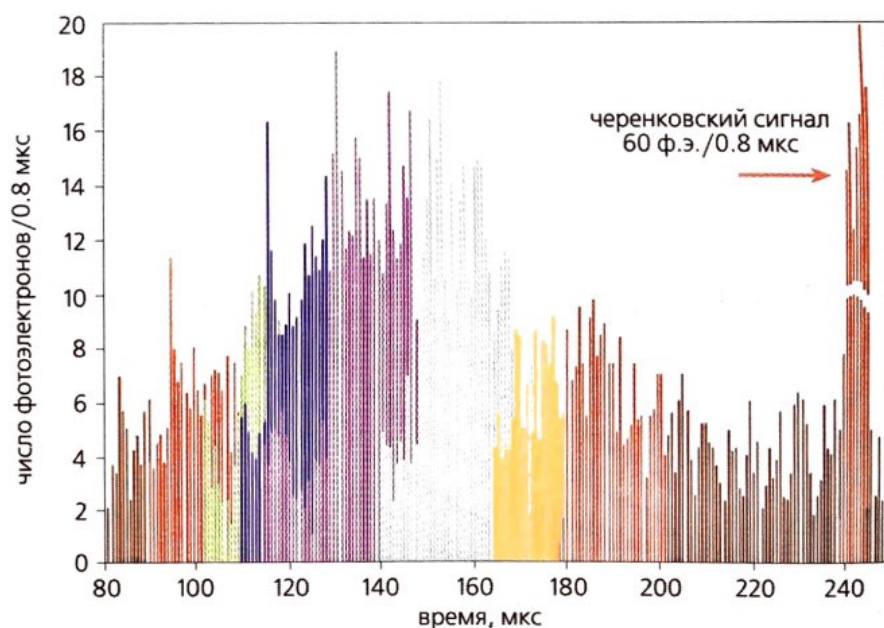


Рис.10. Сигнал флуоресцентного космического детектора. Представлено ожидаемое число фотоэлектронов в ячейках фотоприемника, которое пропорционально числу частиц ШАЛ, развивающегося во времени. В приведенном примере ливень развивается над облаками, в конце приема сигнала появляется рассеянный от облачного слоя черенковский свет.

нейшем оно получило развитие в проектах КЛПВЭ/ТУС Федерального космического агентства РФ [10] и EUSO Европейского космического агентства [11]. Пионерный детектор ТУС (прототип детектора КЛПВЭ) разрабатывается в НИИЯФ МГУ в кооперации с Объединенным институтом ядерных исследований (Дубна) и университетами Мексики и Кореи. Сигнал флуоресценции атмосферы, вызываемый частицами ШАЛ, приходит на зеркало-концентратор детектора и фокусируется на мозаику ячеек фотоприемника, который находится на фокальной поверхности зеркала. В фотоприемнике этот световой сигнал преобразуется в электрический и регистрируется во времени на многоканальном осциллографе. На рис.9 показано размещение детектора ТУС на спутнике «Ресурс», а на рис.10 приведен ожидаемый сигнал от ШАЛ с энергией 10^{20} эВ. Амплитуда сигнала на оси ординат пропорциональна числу частиц ШАЛ в заданный

момент времени. Каждая ячейка приемника в заданный момент времени «видит» ливень на определенной высоте в атмосфере, так что в фотоприемнике фактически регистрируется каскадная кривая ливня и его направление. По числу частиц в максимуме будет определяться энергия первичной частицы. При регистрации ШАЛ с борта спутника детектор с узким полем зрения ориентирован так, что световой сигнал проходит через атмосферу по вертикали, и в этом направлении поглощение света флуоресценции в атмосфере на порядок меньше, чем в наземных опытах в горизонтальном направлении.

Использование зеркала-концентратора большой площади даст возможность начать измерения с малых пороговых энергий. Вместе с тем простая оптика зеркала-концентратора позволяет работать без аберраций лишь в ограниченном поле зрения (15°) и тем самым получать данные на ограниченной площади атмосферы. Другая техно-

логия предполагает создание детекторов с использованием нескольких линз, обеспечивающих достаточное разрешение при широком поле зрения (широкоугольная камера, проект EUSO). Система линз имеет площадь меньше, чем зеркало, и поэтому порог детектора будет выше, чем у детектора КЛПВЭ, но площадь обзора атмосферы будет значительно больше. Оба направления развития «космических» детекторов дополняют друг друга.

* * *

Начатые в конце 40-х годов в СССР простые опыты по регистрации космических лучей ультравысоких энергий переросли в обширную область исследований, в которой одновременно решаются фундаментальные вопросы астрофизики, космологии и физики элементарных частиц. Технологии наблюдений продолжают совершенствоваться, так что мы вправе рассчитывать на новые интересные результаты. ■

Литература

1. Жданов Г.Б., Стожков Ю.И. Физика космических лучей на пороге XXI века // Природа. 2001. №2. С.11—19.
2. Nagano M., Watson A.A. // Rev. Mod. Phys. 2000. V.72. P.689—732.
3. Khristiansen G.B., Kulikov G.V. // Nuov. Cim. Suppl. 1958. V.8. P.742—745.
4. Вернов С.Н., Христиансен Г.Б., Абросимов А.А., Куликов Г.В., Соловьева В.И. и Хренов Б.А. Диплом открытия №85. 1971.
5. Cronin J.W. // Proc. of Workshop on Observing of Ultra High Energy Cosmic Ray from Space and Earth. AIP Conf. Proc. Melville; N.Y., 2001. V.566. P.1—10.
6. Greisen K. // Phys. Rev. Letters. 1966. V.16. P.748—751.
7. Zatsepin G.T., Kuzmin V.A. // JETP Letters. 1966. V.4. P.78—83.
8. Berezinsky V.S., Grigorieva S.I. // Astron. Astrophysics. 1988. V.199. P.1—7.
9. Scully S.T., Stecker F.W. // Astroparticle Physics. 2002. V.16. P.271—278.
10. Khrenov B.A., Panasyuk M.I. et al. // Proc. of Workshop on Observing of Ultra High Energy Cosmic Ray from Space and Earth. AIP Conf. Proc. Melville; N.Y., 2001. V.566. P.57—75.
11. Scarsi L. // Proc. of Workshop on Observing of Ultra High Energy Cosmic Ray from Space and Earth. AIP Conf. Proc. Melville; N.Y., 2001. V.566. P.113—127.