



**Рубцов Григорий Игоревич**

*Кандидат физико-математических наук,  
младший научный сотрудник Института ядерных  
исследований Российской академии наук.*

# Якутская комплексная установка для регистрации широких атмосферных ливней

В селе Октёмцы в 55 километрах от Якутска расположена уникальная установка, регистрирующая широкие атмосферные ливни (ШАЛ), вызванные космическими частицами сверхвысоких энергий. Сочетание нескольких методов регистрации ШАЛ позволяет получить важные физические результаты.

## Космические лучи сверхвысоких энергий

О существовании космических объектов нам известно благодаря частицам и излучению, попадающим в атмосферу Земли, так что звёздное небо, испускающее излучение видимого (оптического) диапазона, позволило его изучить ещё в древнем мире. Отметим, что если бы космические частицы и излучение были бы недоступны для измерения, мы смогли бы узнать о существовании Солнца и планет благодаря гравитационному взаимодействию, наблюдая приливы и отливы. Современные приборы чувствительны в широком диапазоне: от радиоизлучения до частиц сверхвысоких энергий. Каждый наблюдаемый диапазон энергий представляет сегодня значительный научный интерес. Якутская установка регистрирует наиболее энергичные из на-

блюдаемых в природе частиц — в диапазоне энергий от  $10^{17}$  эВ до  $10^{20}$  эВ.

Электрон-вольт (эВ) — энергия, которую приобретает электрон, ускоренный разностью потенциалов 1 В:  $1 \text{ эВ} \approx 1,602 \cdot 10^{-19}$  Дж.

С чем можно сравнить частицу, обладающую сверхвысокой энергией? Приведём несколько примеров:

1) видимый свет — фотоны с энергией 2–3 эВ;

2) рентгеновское излучение — фотоны с энергией порядка килоэлектронвольт ( $1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ}$ );

3) энергия распада радиоактивного ядра — порядка мегаэлектронвольт ( $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$ );

4) энергия покоя протона порядка 1 ГэВ ( $1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$ );

5) энергия покоя топ-кварка, наиболее тяжёлой из известных элементарных частиц, приближённо равна 175 ГэВ;

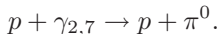
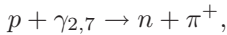
6) энергия сталкивающихся частиц на Большом адронном коллайдере составляет около 14 ТэВ (1 ТэВ =  $10^{12}$  эВ).

Энергии регистрируемых частиц ( $10^{17}$ – $10^{20}$  эВ, то есть  $10^5$ – $10^8$  ТэВ) мо-

гут на много порядков превышать энергии всех известных на Земле микроскопических объектов. Энергия одной такой частицы относится уже к «макроскопическим» энергиям. Помня, что в 1 г воды содержится  $3,3 \cdot 10^{22}$  молекул воды, несложно убедиться, что  $10^{20}$  эВ  $\approx$  4 кал, то есть энергии одной частицы достаточно, чтобы нагреть 1 г воды на 4 °С.

## Предельная энергия космических лучей

Читатель, вероятно, спросит: «Существуют ли частицы столь чудовищных энергий?» и «Какова максимальная энергия космических частиц?». Ответ на второй вопрос даёт ГЗК-эффект, названный по первым буквам фамилий предсказавших его учёных (Грейзен К., Зацепин Г.Т. и Кузьмин В.А.), — явление обрезания (ограничения) энергетического спектра космических лучей сверхвысоких энергий. Предсказание этого эффекта основывалось на том, что протоны  $p$  сверхвысоких энергий, пролетая через Вселенную, должны рождать  $\pi$ -мезоны, взаимодействуя с фотонами  $\gamma_{2,7}$  реликтового микроволнового излучения (теплового излучения с температурой 2,7 К, заполняющего Вселенную):



Эти реакции имеют порог, то есть проходят только при энергиях протона выше  $10^{19,6}$  эВ. Длина свободного (до взаимодействия) пробега протона  $\sim$  6 Мпк. Мегапарсек — единица измерения расстояния, равная миллиону парсеков. Парсек (пк) — рассто-

яние, с которого средний радиус земной орбиты, перпендикулярный лучу зрения, виден под углом одна угловая секунда; 1 пк  $\approx$  3,3 световых года, 1 пк  $\approx$   $3,1 \cdot 10^{13}$  км. При каждом же взаимодействии протон теряет в среднем 20% своей энергии, что делает Вселенную практически непрозрачной для частиц с энергиями выше пороговой.

Несмотря на то, что область энергий, относительно которой сделано предсказание, уже много лет подвергается экспериментальному исследованию, однозначного ответа на вопрос о том, возникает ли обрезание спектра энергий при сверхвысоких их значениях, получено не было.

Вместе с тем существование космических лучей с энергиями, превышающими  $10^{20}$  эВ (ответ на первый вопрос), — факт, установленный в нескольких независимых экспериментах, в том числе и на якутской установке. Регистрация на Земле небольшого числа частиц с энергиями выше  $10^{20}$  эВ не противоречит сделанному предсказанию: согласно ему частицы таких энергий могут прийти к нам только от относительно близких источников.

## Широкие атмосферные ливни

Поток частиц с энергиями выше  $10^{20}$  эВ составляет порядка одной частицы на  $100 \text{ км}^2$  в год. Плотность потока убывает по степенному закону с ростом энергии. Частица сверхвысокой энергии, попадая в атмосферу, взаимодействует с ядром атома азота или кислорода, рождая некоторое количество вторичных частиц с меньшими энергиями. Вторичные частицы в свою очередь взаимодействуют с ядрами азота и кислорода, образуя ещё большее количество ещё менее энергичных частиц. Описанный каскадный процесс называют широким атмосферным лив-

нем (ШАЛ). Типичный ШАЛ, вызванный протоном с энергией  $10^{19}$  эВ, содержит на уровне земли около 10 миллиардов частиц (в основном электроны, фотоны и мюоны) со средней энергией около 1 ГэВ, покрывающих площадь около  $10 \text{ км}^2$ . Именно тот факт, что ШАЛ охватывает значительную площадь, позволяет регистрировать редкие события. Для этого достаточно поставить некоторое количество детекторов на расстоянии друг от друга. Широкий атмосферный ливень приводит к одновременному срабатыванию нескольких детекторов.

### Якутская установка

Якутская комплексная установка для регистрации ШАЛ создана в 1973 году и работает по настоящее время (рис. 1). Сегодня она содержит 59 станций наблюдения (рис. 2), в каждой из которых установлен сцинтилляционный детектор и в большинстве из них оптический приёмник излучения Вавилова–Черенкова (рис. 3), и 6 подземных мюонных детекторов. Сцинтилляция — кратковременная световая вспышка, возникающая в некоторых веществах (сцинтилляторах) под действием ионизирующего излучения. В якутской установке используются пластиковые сцинтилляторы. Излучение Вавилова–Черенкова — свечение, вызываемое в среде заряженной частицей, которая движется со скоростью, превышающей фазовую скорость света в этой среде. Общая площадь установки  $10 \text{ км}^2$ . Станции наблюдения размещены в узлах треугольной решётки со стороной 500 м (в центре установки детекторы размещены более плотно на расстоянии 250 м).

Сцинтилляционный детектор регистрирует суммарный отклик сцинтиллятора от всех попадающих на него частиц (электронов, фотонов и мюонов). Мюонный детектор (рис. 4) представляет собой сцинтилляционный детектор, размещённый на глубине 2–3 м; туда практически не проникают электроны и фотоны. Черенковский детектор регистрирует свет, рождаемый энергичными частицами ливня. Поскольку солнечный и лунный свет намного интенсивнее черенковского, этот детектор чувствителен только в безоблачные, безлунные ночи.

Если три детектора в вершинах одного треугольника сработали одновременно, то информация от всех них поступает в центр управления установкой. Событие отображается на дисплее и регистрируется в базе данных. Это происходит раз в 3–4 минуты (в основном при энергиях порядка  $10^{17}$  эВ (частицы меньших энергий не инициируют ливень достаточного размера для надёжной регистрации на якутской установке). События с энергиями вы-

ше  $10^{20}$  эВ регистрируются в среднем раз в 10 лет. В базе данных также хранится информация о метеорологических условиях и журнал неисправностей отдельных детекторов. Центр управления установкой может работать авто-

номно, но для оперативного устранения любых неисправностей на её территории находится группа инженеров. Кроме того, оперативный дежурный следит за работой установки, в том числе и в ночное время.

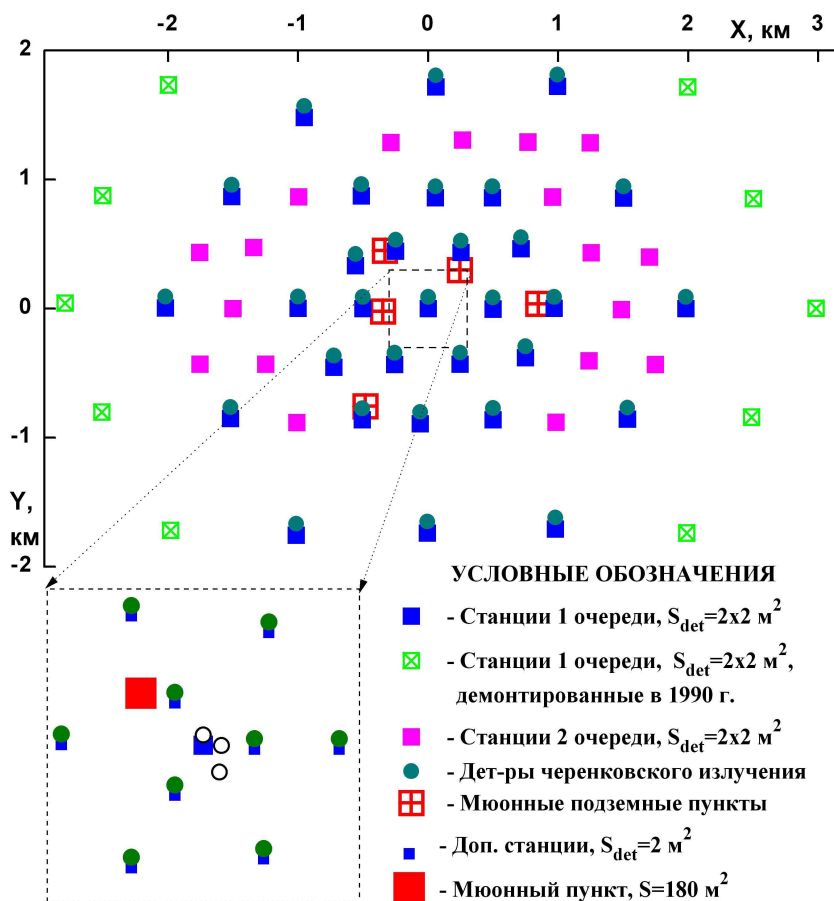


Рис. 1. Расположение детекторов якутской установки. В настоящее время действуют 59 наземных станций и 6 подземных детекторов мюонов, включая большой мюонный детектор площадью  $180 \text{ м}^2$ .

Сегодня в мире работают несколько установок, регистрирующих космические лучи сверхвысоких энергий. Уникальность якутской установки в том, что она позволяет независимо измерять плотности потоков электронов, мюонов и черенковских фотонов в ШАЛ,

что даёт возможность сравнить различные экспериментальные методы и проверить многие теоретические модели.

Кроме того, имеется мощный лазер — лидар (рис. 5) — для изучения состояния и параметров земной атмосферы.

В настоящее время при поддержке Российской академии наук и министерства образования и науки проводится модернизация установки. Планируется улучшить точность существующих де-

текторов и внедрить новые их типы, в частности, сцинтилляционные и мюонные детекторы, регистрирующие не только суммарный сигнал, но и временную развёртку сигнала с шагом порядка 10 нс.



Рис. 2. Станция наземного наблюдения с установленным на ней детектором черенковского излучения

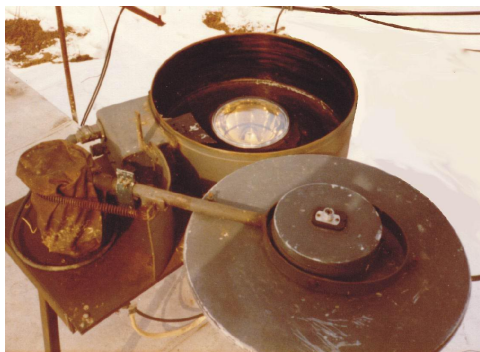


Рис. 3. Один из детекторов черенковского излучения



Рис. 4. Подземный мюонный детектор площадью 20 м<sup>2</sup>



Рис. 5. Сеанс работы лидара

## Заключение

Итак, в окрестности Якутска действует уникальная физическая установка, имеющая мировое значение. Она сочетает в себе возможности нескольких экспериментальных техник, а её инструментальная база непрерывно совершенствуется. За 35 лет работы зарегистрировано несколько событий

с первичной энергией частицы выше  $10^{20}$  эВ, измерен спектр космических лучей сверхвысоких энергий и сделаны выводы о химическом составе первичных частиц. Автор благодарен коллективу якутской установки за гостеприимный приём и за предоставленные иллюстрации к статье.