

УДК 537.591.15

РАЗРАБОТКА ЧЕРЕНКОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКИ ШАЛ

А.А. Иванов, Л.В. Тимофеев

DEVELOPMENT OF CHERENKOV TELESCOPE FOR YAKUTSK EAS ARRAY

A.A. Ivanov, L.V. Timofeev

В докладе рассматривается метод детектирования черенковского света, излучаемого широкими атмосферными ливнями (ШАЛ) космических лучей (КЛ), изложены цели и задачи проекта разработки новых черенковских телескопов, работающих в составе Якутской установки ШАЛ, в сравнении с существующими проектами. В основе проекта лежит идея применения черенковских телескопов, используемых в гамма-астрономии, адаптированных к области энергий выше 10^{15} эВ, работающих совместно с наземной установкой ШАЛ. Моделирование углового и временного распределения черенковского сигнала от ливня представлено здесь для того, чтобы дать представление о возможности идентификации частиц КЛ, инициирующих ШАЛ. В результате выполнения проекта будет создан качественно новый прибор для изучения ШАЛ – дифференциальный детектор черенковского света с круговым обзором, расширяющий возможности по изучению массового состава КЛ с помощью Якутской установки ШАЛ. Телескоп находится на стадии создания прототипа и отработки методики измерений с учетом всех особенностей проекта.

In this presentation an atmosphere Cherenkov light detection technique is considered and existent projects and the planned ones are compared. The fundamental idea is to use reduced in size Cherenkov telescopes that are used in gamma astronomy at energy range above 10^{15} eV, which operates simultaneously with ground Extensive Air Shower (EAS) array. Simulations of angular and time distribution of Cherenkov light EAS signal are presented here to introduce possibilities of identification of initiating primary particles.

As a result of the given work we are planning to create a novel device for EAS investigation – a differential Cherenkov light detector with the round field of view increasing abilities of Yakutsk EAS array to research nuclear composition of cosmic rays.

The telescope is being constructed according to all characteristics of the project.

В настоящее время Якутская установка является единственной в России и одной из немногих установок ШАЛ в мире, которой доступен весь интервал энергий 10^{15} – 10^{20} эВ. В этом интервале присутствует как галактический, так и внегалактический компонент космического излучения. Кроме того, установка обладает тем преимуществом перед другими гигантскими установками ШАЛ, что здесь одновременно измеряются три компонента ливней: электронно-фотонная, мюонная и черенковское излучение релятивистских электронов в атмосфере.

Целью проекта является создание дифференциального детектора черенковского света с круговым обзором, позволяющего измерять параметры развития каскада в атмосфере. Результаты исследования галактического компонента КЛ на Якутской установке ШАЛ, дополненные измерениями нового детектора атмосферного черенковского излучения, позволят получить решающие экспериментальные данные для установления источников таких частиц, их массового состава и распределения направлений прихода.

Исходя из того, что конечной целью данного проекта является расширение возможностей по изучению массового состава КЛ с помощью Якутского комплекса ШАЛ, главным достоинством комбинации наземной установки ШАЛ и телескопов черенковского света будет многокомпонентное измерение ШАЛ, независимые от модели расчеты энергии космических лучей наземной установкой с превосходным угловым и временным разрешением черенковского телескопа.

Первое обнаружение черенковского света от космических атмосферных ливней в атмосфере было сделано более половины столетия назад. С тех пор метод обнаружения не претерпел коренных изменений: с помощью зеркал черенковские фотоны отражаются на датчик – трубку фотоумножителя, далее электроника осуществляет выборку коротких

(несколько наносекунд) черенковских вспышек, отсекая фоновое свечение ночного неба. Первое успешное применение этой методики в гамма-астрономии была осуществлено в обсерватории Whipple, где использовались фокусирующее устройство диаметром 10 м и установка, состоящая из блока фотоумножителей, чтобы зарегистрировать изображения углового распределения черенковского света, произведенного атмосферными ливнями (рис. 1).

Форма и ориентация изображений использовались для успешного отделения событий, инициированных гамма-лучами, от большого числа прочих событий, инициированных фоновым космическим излучением (рис. 2). С помощью этой методики на телескопе Whipple впервые был обнаружен астрофизический гамма-источник (Крабовидная туманность). В настоящее время данная методика применяется только в гамма-астрономии, т. е. это уникальный эксперимент, не имеющий прямых аналогов.

Новейшие разработки фотоумножителей дают возможность многократного уменьшения размеров



Рис. 1. Телескоп «VERITAS».

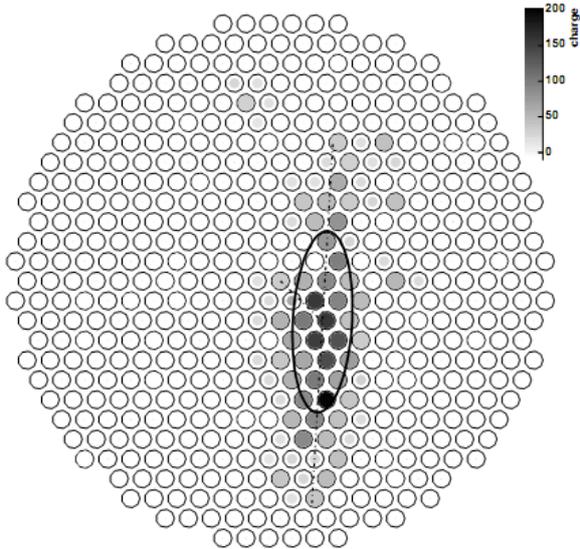


Рис. 2. Изображение события на мозаике ФЭУ.

черенковского телескопа при том же самом угловом разрешении. Однако уменьшение площади зеркала отразится на числе регистрируемых событий, чтобы компенсировать это, мы спустимся в область более низких энергий $E \sim 10^{15}$ эВ.

Для прототипа черенковского телескопа был выбран фотоумножитель Hamamatsu R2486, имеющий координатно-чувствительный анод, состоящий из 16×16 перекрещенных проводов, используемый в качестве наблюдающей камеры и помещенный на фокусном расстоянии перед сферическим зеркалом.

Так как радиус фотокатода R2486 равен 3 см, диаметр зеркала был выбран равным 26 см с радиусом кривизны 22.5 см. Параметры зеркала выбирались из соображений обеспечения настолько широкого угла обзора, насколько возможно, но так, чтобы возможные искажения не превышали размера пикселей $d = 3.8$ мм. В итоге ширина поля зрения составила $-14 \leq \alpha \leq 14^\circ$. Конструкция такого телескопа приведена на рис. 3.

Результаты моделирования углового распределения света от удаленного точечного источника для такого телескопа представлены на рис. 4. Эффективная просматриваемая площадь такого телескопа при учете геометрических особенностей конструкции и затенения зеркала составит ~ 200 см². Эта площадь сравнима с площадью фотоумножителя FEU-49 (176 см²), для которого число событий, засеченных в час, составляет 62 при $E > 1.2 \times 10^{15}$ эВ и 4 события при $E > 6 \times 10^{16}$ эВ. Тогда ожидаемое число событий в год составит ~ 31000 при $E > 1.2 \times 10^{15}$ эВ и ~ 2000 при $E > 6 \times 10^{16}$ эВ.

Хорошо известно, что угловая и временная структура черенковского света от ШАЛ может быть использована для вывода параметров продольного развития ливня. Для проверки возможностей различения черенковским телескопом по угловым и временным профилям сигналов от ливней, инициированных первичными частицами и фотонами с энергиями выше $E = 10^{15}$ эВ, было проведено моделирование процесса, основанное на экспериментальных данных, полученных в Якутске в 1973–1979 гг. Энергетический

спектр электронов принят за 1, пространственным распределением можно пренебречь, угловое распределение электронов и черенковских фотонов считалось гауссовым. Время полета до детектора

$$t = \frac{n}{c\sqrt{h^2 + R^2}} - \frac{h}{c}.$$

За кривую каскада мы приняли приближение гамма-распределения по результатам HiRes. В энергетическом диапазоне 10^{15} , 10^{17} эВ, не доступном HiRes, мы использовали результаты симуляционной модели peXus2 для ливней, инициированных протоном или ядром железа. Для гамма-событий была использована формула Грейзена.

На рис. 5. изображено угловое распределение черенковского света от ШАЛ, из которого следует, что углового разрешения порядка 1° достаточно для того, чтобы различить первичную частицу на энергиях $E = 10^{15}$ эВ (по крайней мере, отличить гамма-события от ядерных) основываясь только на угловом распределении. На рис. 6 изображены результаты моделирования временной характеристики черенковского света от ШАЛ. Можно сделать вывод, что временного разрешения меньше 10 нс достаточно, чтобы различить первичные частицы на энергиях $E = 10^{15}$ эВ. Более достоверных результатов можно добиться, используя оба метода в одном эксперименте.

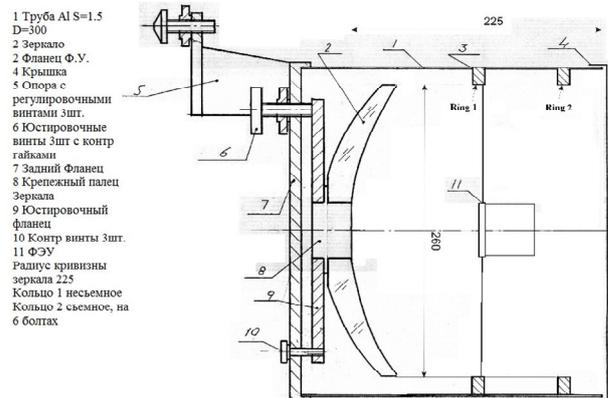


Рис. 3. Конструкция телескопа.

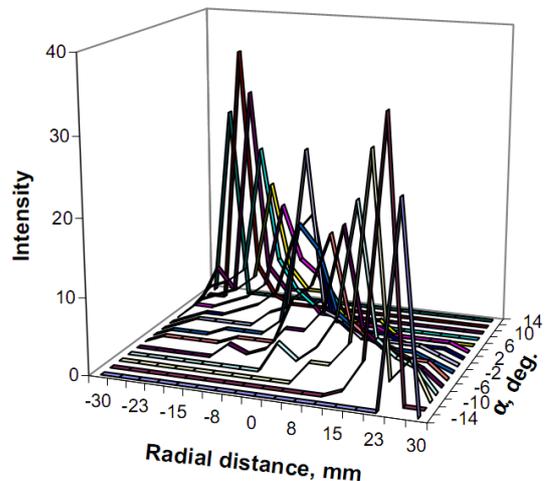


Рис. 4. Угловое распределение света от удаленного точечного источника при угле наклона α к координатно-чувствительному фотоумножителю в фокусе сферического зеркала.

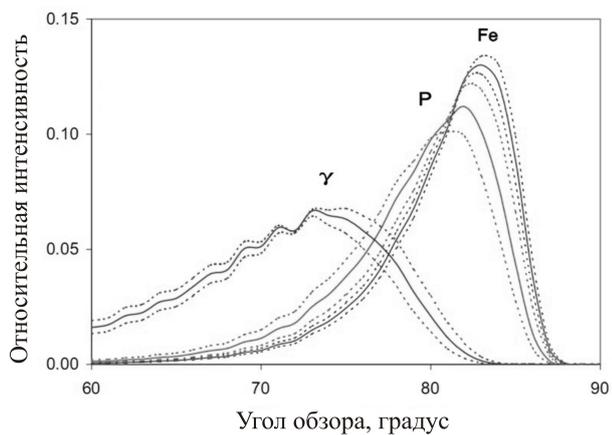


Рис. 5. Угловое распределение черенковского света ШАЛ на расстоянии $R=800$ м от оси ливня при $E=10^{15}$ эВ.

В результате выполнения работы планируется создание качественно нового прибора для изучения ШАЛ – дифференциального детектора черенковского света с круговым обзором, позволяющего измерять параметры развития каскада в атмосфере. Результаты исследования галактического компонента КЛ на Якутской установке ШАЛ, дополненные измерениями нового детектора атмосферного черенковского излучения, позволят получить решающие экспериментальные данные для установления источников таких частиц, их массового состава и распределения направлений прихода.

Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск

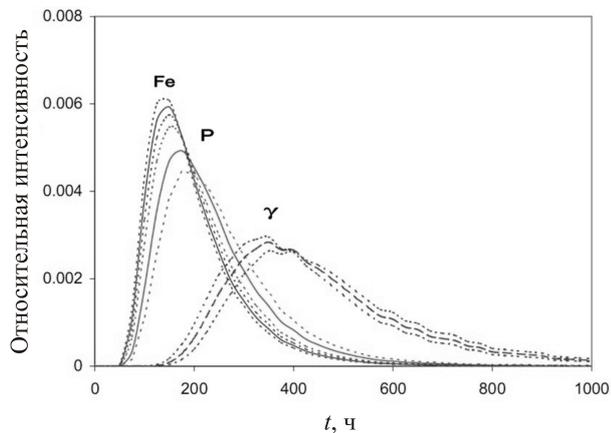


Рис. 6. Временная структура черенковского сигнала от вертикального ШАЛ; $E=10^{15}$ эВ, $R=800$ м.