

УДК 537.591.15

## РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ШИРОКОУГОЛЬНОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКИ ШАЛ

© 2014 г. А. А. Иванов, С. П. Кнуренко, А. Д. Красильников, И. В. Ксенофонтов, З. Е. Петров, М. И. Правдин, Л. В. Тимофеев, И. Е. Слепцов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера  
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск  
E-mail: ivanov@ikfia.ysn.ru*

По программе модернизации Якутской установки ШАЛ нами разрабатывается широкоугольный черенковский телескоп, работающий на совпадение сигналов с сцинтилляционными детекторами установки. В настоящее время подготовлен прототип телескопа с многоанодным фотоэлектронным умножителем в фокусе сферического зеркала, чтобы проверить работоспособность концепции. Описаны параметры и конструкция прототипа телескопа.

DOI: 10.7868/S0367676514030107

### ВВЕДЕНИЕ

Цель программы модернизации Якутской установки ШАЛ — создание астрофизического инструмента, способного детально измерять параметры галактических космических лучей (КЛ) высоких энергий — их источники, энергетический спектр и массовый состав. Другая цель — изучение переходной области между галактической и внегалактической компонентами КЛ, в которой могут быть выявлены некоторые нерегулярности в спектре и составе [1].

Решающую роль в этой программе должна сыграть сеть из телескопов с широкими углами обзора — дифференциальных детекторов черенковского света, излучаемого широкими атмосферными ливнями (ШАЛ), предназначенных для измерения угловой и временной структуры сигнала, связанной с каскадной кривой в ливнях с энергией выше  $E = 10^{15}$  эВ [2].

### АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ СЕТИ ЧЕРЕНКОВСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ, РАБОТАЮЩИХ НА СОВПАДЕНИЕ СИГНАЛОВ С ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКОЙ ШАЛ

Наш интерес к дифференциальным детекторам черенковского света от ШАЛ обусловлен возможностью определения глубины максимума каскадной кривой,  $X_{max}$ , и/или возраста ливня,  $s$ , посредством измерения формы углового и временного распределения черенковского сигнала. В частности, путем моделирования ШАЛ Фоминым и Христиансенom было показано, что ширина импульса,

измеренная на периферии ливня,  $r > 300$  м, на уровне моря, явным образом связана с  $X_{max}$  [3].

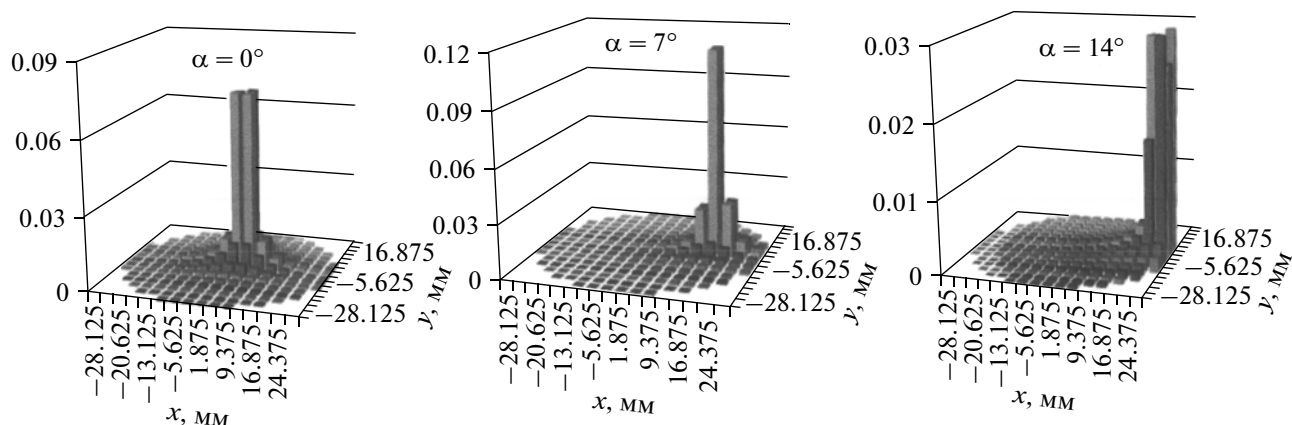
Объединяя  $X_{max}$  и  $s$  с другими характеристиками ШАЛ, полученными с помощью наземных и подземных сцинтилляционных детекторов, например с энергией КЛ и долей мюонов в ливне, можно выявить поведение среднего массового состава КЛ с ростом энергии. База экспериментальных данных для выяснения происхождения колена и лодыжки в спектре КЛ значительно обогатится с добавлением измерений углового и временного распределения черенковского сигнала в диапазоне энергий выше  $10^{15}$  эВ.

Существующие сценарии происхождения КЛ в источниках различаются по ожидаемому составу в районе колена и в переходной области между галактической и внегалактической компонентами, поэтому точное определение средней массы ядер в дополнение к уточненным измерениям спектра в области колена и лодыжки позволит нам отбросить некоторые сценарии [2].

### ТРАССИРОВКА ЛУЧЕЙ В ТЕЛЕСКОПЕ

Прототип черенковского телескопа с широким полем обзора состоит из сферического зеркала и многоанодного ФЭУ в качестве наблюдательной камеры, находящейся в фокусе зеркала. Система сбора данных включает в себя 32 операционных усилителя и 32 амплитудно-цифровых преобразователя (АЦП), подключенных к промышленному ПК.

Для моделирования фокусировки света сферическим зеркалом, покрытым пленкой алюминия, в интервале длин волн 300, 600 нм, мы использовали точечный источник света на бесконечности



**Рис. 1.** Моделирование изображения удаленного точечного источника света на поверхности фотокатода методом Монте-Карло. Интенсивность света дана в относительных единицах для трех значений угла  $\alpha$  между направлением к источнику и оптической осью. Размер пикселя составляет  $3.75 \times 3.75$  мм.

с углом  $\alpha$  между направлением к источнику и оптической осью зеркала. Изображение точечного источника формируется на плоскости фотокатода вблизи фокуса зеркала. Геометрические размеры — диаметр зеркала, радиус кривизны и расстояние до фотокатода,  $F$ , — оптимизированы для заданных размеров ФЭУ, чтобы получить максимально широкий угол обзора, при котором размер размытого изображения точки остается меньше или по

крайней мере сравнимым с размером пикселя координатно-чувствительного ФЭУ.

В качестве камеры наблюдения мы выбрали ФЭУ Hamamatsu R2486, анод которого состоит из  $16 \times 16$  перекрещенных проволочек. С учетом диаметра анода ФЭУ  $D = 60$  мм получается размер пикселя  $\sim 3.75 \times 3.75$  мм. Таким образом, мы определили оптимальные параметры телескопа: диаметр зеркала  $D_m = 260$  мм; радиус кривизны  $R = 225$  мм, расстояние до фотокатода  $F = 110$  мм; угол обзора  $\Delta\alpha = 28^\circ$ .

Численная трассировка лучей в телескопе показала, что сферическая аберрация изображения точечного источника на поверхности фотокатода ФЭУ не сказывается существенно на формировании изображения при таком соотношении размера пикселя и параметров зеркала. 3D-изображение распределения интенсивности света на плоскости фотокатода приведено на рис. 1 для трех типичных углов падения. Здесь мы не учитывали эффект отсекания фонового сигнала на выходе ФЭУ.

### РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ШИРОКОУГОЛЬНОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА

Внешний вид широкоугольного черенковского телескопа показан на рис. 2. Сферическое зеркало установлено в нижней части корпуса и регулируется в вертикальной плоскости тремя болтами. Поддерживающая конструкция ФЭУ (три горизонтальных стержня) используется для точной регулировки положения в фокальной плоскости.

Цепь делителя напряжения и 32 сигнальных кабеля прикреплены к несущей плате. 16 двухканальных операционных усилителей установлены на корпус телескопа. Схема системы сбора данных включает в себя также 32 быстрых 8-разряд-



**Рис. 2.** Прототип широкоугольного черенковского телескопа.

ных АЦП, подключенных к компьютеру по шине USB (не показаны на рисунке).

Такая конструкция телескопа обеспечивает эффективную апертуру  $D_{eff}(0^\circ) = 10.9$  см с учетом затенения зеркала, производимого корпусом ФЭУ и системой его крепежа. Угловая зависимость апертуры телескопа позволяет регистрировать сигнал до угла  $\alpha = 14^\circ$  от оптической оси. Мы рассчитали апертуру, используя отношение интенсивности света на поверхности фотокатода к начальной интенсивности света, попадающего в поле обзора телескопа, с учетом коэффициента отражения алюминия 92.4% в интервале чувствительности ФЭУ  $\lambda \in (300, 600)$  нм.

Качество оптической системы характеризуется размером “пятна”, где пятно — это изображение удаленного точечного источника на плоскости фотокатода. Мы измерили размер пятна на фотокатоде, образованного “точкой” от лазерной указки на расстоянии 3 м от телескопа. Результаты измерений в целом согласуются с результатами нашего моделирования. Соответствующее угловое разрешение телескопа  $\delta\alpha \approx 1.4^\circ$  в пределах поля зрения телескопа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы разработали и собрали экспериментальный прототип широкоугольного черенковского телескопа для совместной работы с сцинтилляционными детекторами Якутской установки ШАЛ. Наша следующая задача состоит в полевых испытаниях телескопа и в сборе экспериментальных данных в течение следующей зимы.

Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН (интеграционный проект “Модернизация Якутской установки ШАЛ”), РФФИ (гранты № 11-02-00158, 11-02-12193, 12-02-10005, 12-02-31550) и Российского министерства образования и науки (контракты 02.740.11.0248, 16.518.11.7075).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanov A.A., Knurenko S.P., Sleptsov I.Ye.* // New J. Phys. 2009. V. 11. P. 065008.
2. *Ivanov A.A., Knurenko S.P., Petrov Z.E., Pravdin M.I., Sleptsov I.Ye.* // ASTRA. 2010. V. 6. P. 53.
3. *Фомин Ю.А., Христиансен Г.Б.* // Ядерная физика. 1971. Т. 14. С. 642.