

УДК 524.1-352

## ПРОЕКТ СФЕРА: РАЗВИТИЕ МЕТОДА ОТРАЖЕННОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА

© 2024 г. Е. А. Бонвеч<sup>1, \*</sup>, Д. В. Чернов<sup>1</sup>, В. С. Латыпова<sup>2</sup>, К. Ж. Азра<sup>2</sup>, В. И. Галкин<sup>1, 2</sup>,  
В. А. Иванов<sup>2</sup>, Д. А. Подгрудков<sup>1, 2</sup>, Т. М. Роганова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова”, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова”, Физический факультет, Москва, Россия

\*E-mail: bonvech@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.05.2023

После доработки 15.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

На основании опыта успешной реализации аэростатного эксперимента СФЕРА-2 планируется дальнейшее развитие метода изучения первичных космических лучей путем регистрации отраженного черенковского света широких атмосферных ливней. Показана возможность одновременной регистрации прямого и отраженного черенковского света широких атмосферных ливней. Обсуждается перспектива создания новой установки СФЕРА-3, приводятся первые результаты моделирования.

DOI: 10.31857/S0367676524030256, EDN: QKLIEN

### ВВЕДЕНИЕ

Более 50 лет назад было обнаружено изменение наклона энергетического спектра первичных космических лучей (ПКЛ) около 3 ПэВ, и до сих пор обнаруживаются все новые особенности в структуре спектра космических лучей сверхвысоких энергий (более 1 ПэВ). Причину возникновения этих неоднородностей связывают с изменением состава ПКЛ, который, в свою очередь, способен дать важную информацию о механизмах ускорения и устройстве источников космических лучей. Вопрос о составе первичных космических лучей сверхвысоких энергий в настоящее время далек от окончательного решения [1–4]. Экспериментальной группе KASCADE-Grande удалось выделить спектры двух групп ядер [5], более детальной классификации мешает неопределенность модели сильного взаимодействия. Результаты различных экспериментов по среднему логарифму массового числа в области энергий  $\sim 10$  ПэВ отличаются в несколько раз [4–8].

В области сверхвысоких энергий космические лучи изучаются большими наземными установками непрямыми методами по компонентам широких атмосферных ливней (ШАЛ), включая излучение Вавилова—Черенкова или черенковское излучение. Черенковские части установок TAIGA [9],

LHAASO [10], NICHE [11] строят процедуру оценки среднего логарифма массового числа по вычисляемому параметру — глубине максимума развития ливня  $X_{\max}$ , который, в свою очередь, рассчитывается из непосредственно наблюдаемых характеристик ливня по зависимостям, полученным на основе моделирования. Таким образом,  $X_{\max}$  выступает в качестве промежуточного параметра между измеренными величинами и массой первичной частицы, что не может не сказаться на погрешности ее оценки. К тому же оценка массы таким способом зависит от используемой в расчетах модели ядерного взаимодействия.

В проекте СФЕРА космические лучи с энергиями в диапазоне 1–1000 ПэВ изучаются методом регистрации отраженного от снега черенковского света ШАЛ. Метод проекта СФЕРА основан на идее А. Е. Чудакова регистрировать черенковский свет ШАЛ, отраженный от поверхности земли, фотоприемниками, поднятыми над поверхностью с помощью летательных аппаратов [12]. Подробно история развития метода описана в [13]. Первой успешной реализацией метода был эксперимент СФЕРА-1, позволивший проверить жизнеспособность метода и измерить первичный спектр космических лучей [14]. Дальнейшим развитием метода стал эксперимент СФЕРА-2 [15], основные физические результаты которого приведены

в работе [13]. В настоящей работе впервые формулируется идея одновременной регистрации прямого и отраженного черенковского света одного и того же ШАЛ и показывается принципиальная возможность провести такое измерение. В развитие метода планируется создание новой установки СФЕРА-3.

В отличие от разреженных наземных установок, где расстояние между черенковскими детекторами редко бывает менее 100 м, площадь наблюдения установки типа СФЕРА непрерывна, регистрируется полный поток черенковского света ШАЛ. Это уменьшает систематические ошибки определения энергии первичной частицы.

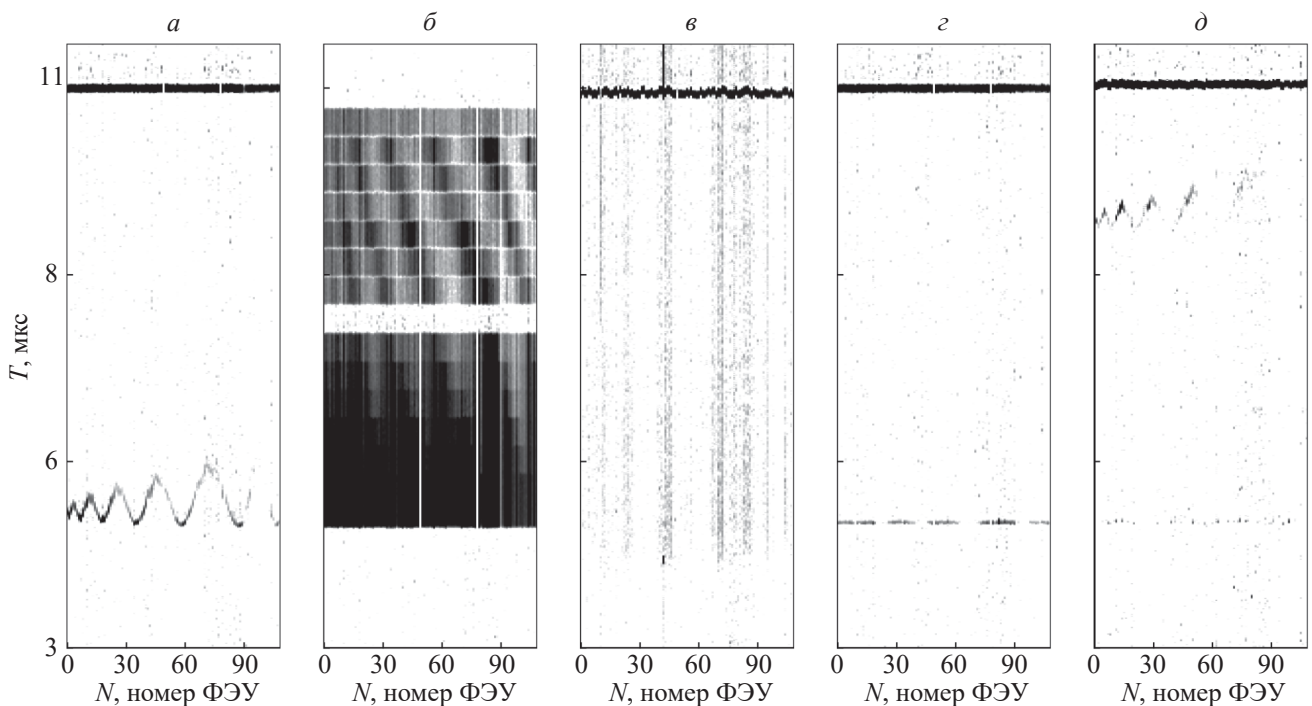
С другой стороны, в проекте СФЕРА измеряются пространственное распределение черенковского света ШАЛ и, в частности, интенсивность света в приосевой области — чувствительной характеристики развития ливня к типу первичной частицы. В проекте используется способ построения критерия разделения первичных масс [16, 17], основанный на форме непосредственно измеряемых распределений, поэтому критерии слабо зависят от модели ядерного взаимодействия, что уменьшает систематические погрешности эксперимента также и в задаче определения массового состава ПКЛ. Для эффективного использования этого критерия необходима аппроксимация функции пространственного распределения черенковского света ШАЛ, с высокой точностью

описывающая распределение света в области около оси ливня. Такая функция описывается в данной статье.

### КЛАССИФИКАЦИЯ СОБЫТИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ СФЕРА-2

Измерения с установкой СФЕРА-2 [15] проводились над заснеженной поверхностью озера Байкал в 2008—2013 гг. [18]. Установка поднималась на привязном аэростате на высоту 300—900 м над поверхностью озера. Черенковский свет ШАЛ, дойдя до поверхности Земли, диффузно отражается от снежной поверхности, как от белого экрана. Установка СФЕРА-2, поднятая на привязном аэростате, регистрировала часть света, отраженную в ее направлении, мозаикой из 109 фотоумножителей ФЭУ-84-3. За 2011—2013 гг. было зарегистрировано 32 000 триггерных событий.

Полное время сохраняемой осциллограммы амплитудного профиля сигнала для одного события составляет 12 мкс с дискретностью 12.5 нс, в том числе 5 мкс до триггера. Через 6 мкс после триггера подается калибровочный светодиодный синхроимпульс, который также попадает в окно оцифровки события. На рис. 1а приведено типичное представление временной развертки зарегистрированного установкой СФЕРА-2 отраженного черенковского света ШАЛ. Она представляет собой характерную “змейку” импульсов средней длины,



**Рис. 1.** Примеры событий различных типов, зарегистрированные в эксперименте СФЕРА-2: *а* — отраженный черенковский свет ШАЛ; *б* — калибровочное событие; *в* — “длительное” шумовое событие; *г* — “короткое” шумовое событие; *д* — событие с прямым и отраженным черенковским светом.

не превышающей 300 нс в каждом измерительном канале. Подробное описание способа построения такого представления событий изложено в [13].

Начиная с 2012 г. каждое триггерное событие сопровождается калибровочным [19]. Через 12 мкс после срабатывания триггера происходит засветка мозаики фотоумножителей светодиодами, формируется калибровочный кадр. На рис. 1б представлено типичное калибровочное событие, сопровождающее триггерное.

Помимо этих двух типов полезных событий регистрируются также шумовые, разделяющиеся на “короткие” и “длительные”. В “длительных” событиях, пример которых приведен на рис. 1в, сигналы в измерительных каналах длятся более 7 мкс и заканчиваются за пределами окна оцифровки события. Интерпретацией таких событий могут быть какие-либо электрические явления, например, разряды статического напряжения на фотокатодах ФЭУ.

“Короткое” событие (рис. 1г) представляет собой строго одновременные короткие, длительностью не более 60–90 нс, импульсы в нескольких ФЭУ в области триггера. Временная структура импульсов — синхронное появление коротких импульсов в нескольких каналах, вместе с их пространственным распределением — появлением сигналов в соседних каналах мозаики в виде связной полосы, указывает на их неслучайный характер. Случайная наводка на электронике будет ассоциироваться по электронным платам, но не будет проявляться на разных платах, как это происходит в установке. Наводка на подводящих кабелях будет случайной, так как укладка кабелей шла в случайном порядке. Попадание в стекла фотокатодов частиц от близкого прошедшего ШАЛ будет относительно равномерно рассеивать сигналы по мозаике. Наблюдаемое же в “коротких” событиях распределение света полосою скорее характерно для засвечивания мозаики коротким импульсом света через зазоры в зеркале. Зеркало установки не сплошное, оно составлено из нескольких сегментов (см. [15]). Так как зазоры прямые, то засветка должна ложиться полосами, что и наблюдается. С учетом влияния усиления ФЭУ и электроники физический импульс света для зарегистрированных “коротких” событий не должен превышать 10–15 нс. Столь короткий импульс света возможен только для прямого черенковского света ШАЛ, попадающего на ФЭУ через щели в зеркале.

### ОДНОВРЕМЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРЯМОГО И ОТРАЖЕННОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА ШАЛ

Среди событий, классифицированных как “короткий шумовой” найдено событие, представленное на рис. 1д. Оно было зарегистрировано установкой, находящейся на высоте 603 м над снежной поверхностью. В области триггера присутствуют короткие,

длительностью 50–80 нс, импульсы в нескольких ФЭУ, характерные для “коротких” событий. Отраженный черенковский свет зарегистрирован на 4 мкс позже триггера. За 4 мкс свет проходит расстояние 1200 м. Зенитный угол наклона оси данного события 17°. Это позволяет утверждать, что в одном событии зарегистрирован прямой черенковский свет ливня, идущего вниз к земле, а потом, через 4 мкс, отраженный от снега черенковский свет. Длительность импульса 50–80 нс согласуется с проведенным нами моделированием прямого черенковского света ШАЛ от протона с энергией 10 ПэВ на высоте 603 м над поверхностью озера Байкал.

Данное “двойное” событие было зарегистрировано случайно. В конструкции зеркала установки СФЕРА-2 имелись технологические зазоры, через которые прямой черенковский свет ШАЛ смог попасть на мозаику. При проектировании новой установки СФЕРА-3 будет рассмотрена возможность регистрации прямого и отраженного черенковского света одного события.

### ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ДВОЙНОЙ РЕГИСТРАЦИИ СВЕТА

Для регистрации прямого и отраженного света одного ШАЛ ливень должен иметь зенитный угол, не превышающий угол обзора детектора. Иначе ось ливня, проходящего в непосредственной близости от установки, будет находиться за пределами поля зрения детектора на отражающей снежной поверхности. Рассмотрим установку с половинным углом обзора 22°, расположенную на некоторой высоте над снежной поверхностью и регистрирующую прямой черенковский свет ШАЛ на расстоянии до 150 м от оси ливня. Будем считать в первом приближении, что он распределен анизотропно и его плотность постоянна на этих расстояниях от оси. На уровне снежной поверхности в пределах поля зрения установки рассмотрим равномерное распределение осей ШАЛ с зенитными углами в диапазоне от 0 до максимального угла, при котором возможна двойная регистрация ливня, и азимутальными углами, равномерно распределенными в пределах от 0 до 2π. Событие считается зарегистрированным если его ось прошла не далее 150 м от детектора в воздухе. При приведенных условиях получены следующие оценки возможности двойного детектирования: 39% — для высоты установки 500 м; 12% — для высоты 1000 м; 6% — для высоты 1500 м.

Для получения более точных оценок необходимо учесть пространственно-угловое распределение фотонов прямого черенковского света, форму и площадь входного отверстия для прямого черенковского света, пороговые значения для триггерного условия регистрации, а также угловое распределение ШАЛ у земной поверхности. Такие расчеты ведутся.

Регистрация черенковского света одного ШАЛ двумя разными способами позволит лучше оценивать параметры первичной частицы, в частности, ее массу. Это утверждение основано на предыдущих работах авторов [16, 20] в рамках проекта “Памир-XXI”, предусматривающего использование углового распределения прямого черенковского света ШАЛ для разделения событий по массе первичных ядер. Было показано, что при рациональном использовании формы углового распределения можно успешно разделить весь спектр масс на три группы. При этом ливни от протонов принимаются за ливни от ядер азота (и наоборот) не более чем в 10% случаев. Аналогичные результаты получены для пары азот-железо. Естественно, само по себе деление всего потока событий на группы не является конечной целью, но критерии, способные осуществить такую классификацию, содержат настроенные критериальные параметры, служащие по существу мерами первичной массы. Поэтому идея использования одновременных измерений отраженного от снега и прямого черенковского света одного ШАЛ дает надежду существенно повысить чувствительность телескопа к первичной массе. О результирующем разрешении по массе пока говорить рано, но потенциал у этого подхода, безусловно, есть.

### АППРОКСИМАЦИЯ ФПР

В задачи экспериментов проекта СФЕРА входит оценка массы первичной частицы. Критериальный параметр, используемый в критерии для оценки массы [21, 22], определяется как отношение интегралов полного числа черенковских фотонов, измеряемых на основе формы пространственного распределения черенковского света ШАЛ, в кольцах с различными радиусами. Сам критерий выглядит как пограничное значение параметра, разделяющее две классовые области. При использовании такого критерия для достижения минимальных ошибок классификации

необходимо сохранить важную информацию о массе первичной частицы, содержащуюся в форме поперечного распределения света вблизи оси ливня, поэтому используемая функция должна хорошо аппроксимировать характеристики ШАЛ в области от 0 до 300 м.

Для целей моделирования установки типа СФЕРА распределение  $I(R)$  черенковского света ШАЛ на поверхности земли аппроксимируется с помощью функции вида

$$F = \frac{p_0}{(1 + p_1 R + p_2 R^2 + p_3 R^3)} w_1 + \frac{p_4}{(1 + p_5 R + p_6 R^2)} w_2. \quad (1)$$

Здесь

$$w_1 = \frac{1}{(1 + \exp((R - R_{ch}) / s))};$$

$$w_2 = \frac{1}{(1 + \exp(-(R - R_{ch}) / s))}, \quad (2)$$

где  $R$  — расстояние от оси ливня;  $p_1$ – $p_6$ ,  $R_{ch}$  — подбираемые параметры.

Функция аппроксимации  $F$  пространственного распределения черенковского света ШАЛ (рис. 2а) отклоняется от модели  $I(R)$  менее чем на 5% в области 0–500 м от оси ливня (рис. 2б). В подавляющем большинстве случаев на расстояниях от 0 до 400 м относительная погрешность аппроксимации не превышает 2%. Такая точность функции аппроксимации пространственного распределения черенковского света ШАЛ подходит для использования критерия первичной массы. Подробности моделирования, проведенного для поиска данной аппроксимации, изложены в [23]. Аппроксимация (1) изначально предназначалась для обработки событий эксперимента СФЕРА-2, но она может быть применена для любого эксперимента,

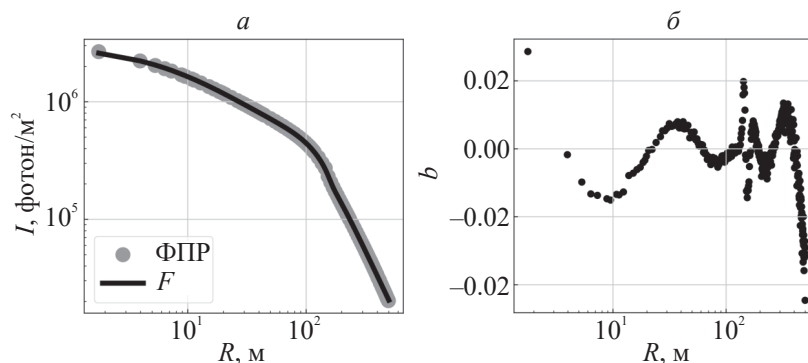


Рис. 2. Функция пространственного распределения черенковского света ШАЛ для индивидуального события ШАЛ (а). Серым отмечены точки моделирования  $I(R)$ , кривой обозначена аппроксимирующая функция  $F$  по формуле (1). Относительное отклонение аппроксимирующей кривой  $F$  от смоделированных точек (б).

который использует функцию пространственного распределения черенковского света ШАЛ на уровне поверхности Земли.

### РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ СФЕРА-3

Для дальнейшего развития методов изучения первичных космических лучей проводится разработка новой установки СФЕРА-3 и идет поиск новых методик для определения типа первичной частицы. Основная цель новой установки заключается в изучении массового состава первичных космических лучей. Для этого необходимо увеличить пространственное разрешение и чувствительность детектора, а также время экспозиции по сравнению установкой СФЕРА-2. Высокое пространственное разрешение будет достигнуто за счет применения большого числа компактных и легких кремниевых фотоумножителей (SiPM). Большую чувствительность обеспечит широкоугольная оптическая система Шмидта с зеркалом большого диаметра и корректирующей линзой на входном окне диафрагмы. Увеличение времени экспозиции возможно при использовании в качестве носителя для детектора беспилотного летательного аппарата с гибридной силовой установкой. Для подъема установки на высоту до 2 км планируется использовать воздушный грузовик вертикального взлета с гибридным двигателем с возможностью работать как от аккумуляторов, так и от бензинового генератора.

В настоящее время рассматривается вариант конструкции установки с чувствительной площадью входного окна диафрагмы более  $1 \text{ м}^2$ , диаметром зеркала — до 2200 мм, углом обзора — до  $22^\circ$ , количеством SiPM в детекторе — до 3000 (рис. 3). Для регистрации прямого черенковского света предполагается предусмотреть объектив в верхней части зеркала. Измерительная аппаратура будет расположена в конусе тени мозаики. Установка без аккумуляторов будет весить до 100 кг.

Возможность применения кремниевых фотоумножителей была рассмотрена в [24]. Прототип мозаики кремниевых фотоумножителей установки СФЕРА-3 применяется в установке SIT в составе астрономического комплекса TAIGA [25]. Для установки СФЕРА-3 рассматриваются варианты конструкции мозаики кремниевых фотоумножителей с сегментами, состоящими из 7 или 19 элементов. Для модели с сегментом из семи элементов на мозаике детектора умещается 379 таких сегментов, всего — 2653 кремниевых фотоумножителей, такой вариант представлен на рис. 3. Для данной модели мозаики и сферического зеркала с радиусом кривизны 140 см проведено моделирование образов черенковского света на основе данных о траектории и месте отражения фотонов от снежной поверхности, полученных с помощью пакета CORSIKA, по алгоритмам, аналогичным описанным в [26]. На рис. 4 приведены примеры полученных распределений черенковских фотонов на мозаике детектора от ШАЛ с первичной частицей — протоном при энергиях 5, 10 и 30 ПэВ.

В сравнении с установкой СФЕРА-2 для нового детектора ожидается понижение порога регистрации событий в 3–5 раз до 2–3 ПэВ, что увеличит банк событий до 10 раз за равное время экспозиции. Кроме того, ожидается кратное увеличение времени экспозиции за счет применения беспилотного летательного аппарата. Все это позволит уменьшить статистические ошибки измеренного спектра ПКЛ всех ядер и получить статистически значимый результат при анализе долей групп ядер ПКЛ.

Для повышения чувствительности установки к типу первичной частицы исследуется возможность получения дополнительных данных об интенсивности прямого черенковского света, а также возможность выделения доли ультрафиолетовой составляющей отраженного черенковского света ШАЛ в приосевой области, которая чувствительна

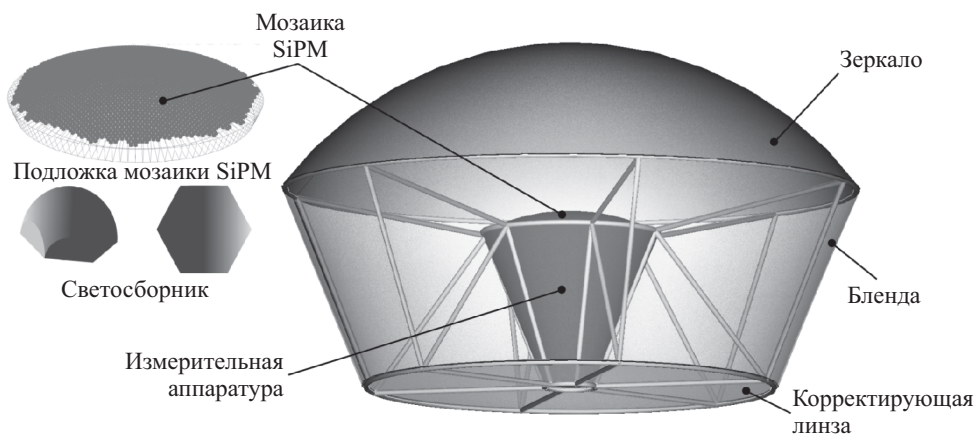


Рис. 3. Предварительная версия конструкции детектора СФЕРА-3.

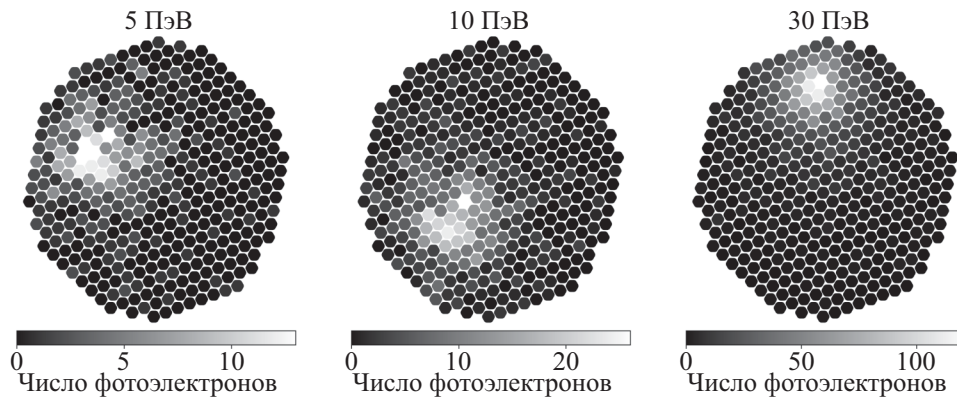


Рис. 4. Рассчитанные распределения черенковских фотонов на мозаике детектора СФЕРА-3 от первичного протона с энергиями 5, 10 и 30 ПэВ.

к изменениям каскада ШАЛ от различных типов ядер ПКЛ. Более подробно это обсуждается в работе [27].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте СФЕРА-2 продемонстрирована возможность одновременного детектирования прямого и отраженного черенковского света одного и того же ШАЛ установкой, поднятой над поверхностью Земли. В новом детекторе проекта СФЕРА будет предусмотрена опция регистрации прямого черенковского света ШАЛ.

Найдена аппроксимирующая функция, позволяющая описывать функцию пространственного распределения черенковского света индивидуальных широких атмосферных ливней с точностью не хуже 5% в диапазоне расстояний 0–500 м от оси ливня. Аппроксимация работает в большом диапазоне значений первичных параметров и может быть применена для любого эксперимента, который использует функцию пространственного распределения на уровне поверхности Земли.

Определены общие принципы устройства оптической системы и механической конструкции установки СФЕРА-3, предварительные параметры и размеры элементов детектора. Получены предварительные результаты моделирования образов черенковского света на фотоприемнике установки от ШАЛ первичных протонов с энергиями 5, 10, 30 ПэВ. Работы по поиску оптимальных параметров детектора и методик увеличения чувствительности к типу первичной частицы продолжаются.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schröder F.G., AbuZayyad T., Anchordoqui L. et al. // arXiv: 1903.07713. 2019.
2. Schröder F.G. // PoS ICRC 2019 (Madison, 2019). Art. No. 030.
3. Pierre Auger Collaboration // Phys. Lett. B. 2016. V. 762. P. 288.
4. Глушков А.В., Сабуров А.В. // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 98. № 10. С. 655; Glushkov A.V., Sabourov A.V. // JETP Lett. 2013. V. 98. No. 10. P. 655.
5. Apel W.D., Arteaga-Velázquez J.C., Bekk K. et al. // Astropart. Phys. 2013. V. 47. P. 54.
6. Antoni T., Apel W.D., Bada A.F. et al. // Astropart. Phys. 2005. V. 24. No. 1-2. P. 1.
7. Aartsen M.G., Abbasi R., Abdou Y. et al. // Phys. Rev. D. 2013. V. 88. Art. No. 042004.
8. The IceCube Collaboration // PoS ICRC 2019 (Madison, 2019). Art. No. 014.
9. Kuzmichev L., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // EPJ Web Conf. 2019. V. 207. Art. No. 03003.
10. Di Sciacio G. for the LHAASO Collaboration // PoS ICRC2019 (Madison, 2019). Art. No. 793.
11. Omura Y., Tsuda R., Tsunesada Y. et al. // PoS ICRC2021 (Madison, 2019). Art. No. 329.
12. Чудаков А.Е. // Матер. Всесоюзн. симпози. (Якутск, 1972). С. 69.
13. Чернов Д.В., Антонов Р.А., Аулова Т.В. и др. // ЭЧАЯ. 2015. Т. 46. № 1. С. 115; Chernov D.V., Antonov R.A., Aulova T.V. et al. // Phys. Part. Nucl. 2015. V. 46. No. 1. P. 60.
14. Антонов Р.А., Петрова Е.А., Сысоева Т.И., Федоров А.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 1999. Т. 63. № 3. С. 520.
15. Antonov R.A., Bonvech E.A., Chernov D.V. et al. // Astropart. Phys. 2020. V. 122. Art. No. 102460.
16. Галкин В.И., Борисов А.С., Бахромзод Р. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. астрон. 2018. № 2. С. 56; Galkin V.I., Borisov A.S., Bakhromzod R. et al. // Mosc. Univ. Phys. Bull. 2018. V. 73. No. 2. P. 179.
17. Chernov D., Bonvech E., Finger M. Jr. et al. // JINST. 2020. V. 15. No. 09. Art. No. C09061.
18. Bonvech E.A., Chernov D.V., Finger M. et al. // Universe. 2022. V. 8. P. 46.

19. Antonov R.A., Bonvech E.A., Chernov D.V. et al. // *Astropart. Phys.* 2016. V. 77. P. 55.
20. Bakhromzod R., Galkin V.I. // *NIMA*. 2021. V. 1018. Art. No. 165842.
21. Галкин В.И., Джатдоев Т.А. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 75. № 3. С. 338; *Galkin V. I., Dzhatdov T. A.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2011. V. 75. No. 3. P. 309.
22. Чернов Д.В., Антонов Р.А., Аулова Т.В. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79. № 4. С. 499; *Chernov D.V., Antonov R.A., Aulova T.V. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2015. V. 79. No. 3. P. 359.
23. Латыпова В.С., Галкин В.И. // *Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та.* 2022. № 4. С. 2241603.
24. Чернов Д.В., Антонов Р.А., Бонвеч Е.А., и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2017. Т. 81. № 4. С. 499; *Chernov D.V., Antonov R.A., Bonvech E.A. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2017. V. 81. No. 4. P. 464.
25. Подгрудков Д.А., Бонвеч Е.А., Вайман И.А. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 4. С. 541; *Podgrudkov D.A., Bonvech E.A., Vaiman I.V. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021. V. 85. No. 4. P. 408.
26. Бонвеч Е.А., Галкин В.И., Джатдоев Т.А. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83. № 8. С. 1096; *Bonvech E.A., Galkin V.I., Dzhatdov T.A. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83. No. 8. P. 995.
27. Чернов Д.В., Азра К.Ж., Бонвеч Е.А. и др. // *Ядерн. физика.* 2022. Т. 85. № 6. С. 435.

### Sphere project: development of the reflected Cherenkov light technique

E. A. Bonvech<sup>1,\*</sup>, D. V. Chernov<sup>1</sup>, V. S. Latypova<sup>2</sup>, C. J. Azra<sup>2</sup>, V. I. Galkin<sup>1,2</sup>, V. A. Ivanov<sup>2</sup>,  
D. A. Podgrudkov<sup>1,2</sup>, T. M. Roganova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia*

\*e-mail: bonvech@yandex.ru

Based on the experience of successful implementation of the SPHERE-2 experiment, further development of the method for studying PCR by recording the reflected EAS Cherenkov light is planned. In this work, we show the possibility of simultaneous detection of direct and reflected EAS Cherenkov light. The prospect of creating a new SPHERE-3 detector is discussed, and the first simulation results are presented.