

Аннотация

Рассмотрены два варианта детектора углового распределения прямого черенковского света для проектируемой установки СФЕРА-3 и их способность оценивать направление прихода ШАЛ. В первом случае используется отверстие в зеркале нижнего телескопа и чувствительная мозаика нижнего телескопа отраженного света, во втором – отдельный компактный детектор. Исследованы перспективы использования нейросетевых методов для уточнения направления прихода ШАЛ.

Введение

Знание направления прихода ШАЛ с точностью 2-3° дуги позволяет точнее определить массовый состав первичных частиц ШАЛ. При развитии каскада ШАЛ черенковский свет излучается в узком конусе, тем не менее, между направлением ШАЛ и углом прихода света есть разница. В данном исследовании для отверстия восстанавливалось направление прихода света, для компактного детектора – направление прихода искусственных событий ШАЛ.

Методология

Отверстие в зеркале

Смоделирована база данных из 4000 искусственных угловых распределений фотонов фиксированной яркости, с зенитными углами $[6^\circ, 17^\circ]$ и азимутальными $[0^\circ, 360^\circ]$. Для таких исходных данных моделировалось прохождение света через оптическую схему телескопа (рис. 1) и работа электроники. Моделирование проводилось без учета естественного фона, однако на уровне зеркала учитывалось переотражение фотонов. Восстановление направления прихода света проводилось в два этапа:

1. определение взвешенного на яркость центра изображения, восстановление направления методом линейной регрессии (рис. 2a);
2. уточнение результатов п.1 нейронной сетью (рис. 2b).



Рис. 2a Вычисление центра изображения

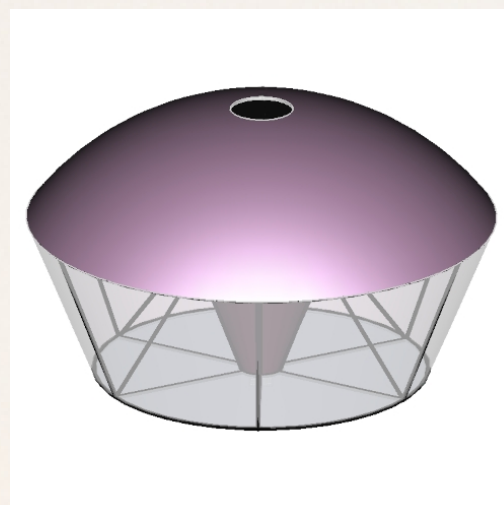


Рис. 1 Схема детектора с отверстием сверху

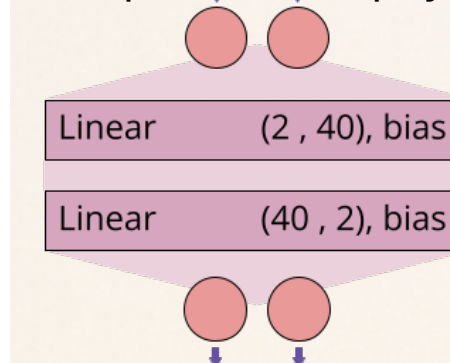


Рис. 2b Архитектура нейронной сети

Полная процедура для всех изображений включала в себя фильтрацию шумовых фотонов, определение центра пятна, вычисление координат центра пятна относительно центра изображения в полярных координатах, оценку параметров линейной модели методом наименьших квадратов по подмножеству данных, расчет предсказаний линейной модели по набору данных, обучение двухслойной полносвязной нейронной сети минимизировать среднюю абсолютную ошибку с истинными значениями.

Компактный телескоп

Угловые распределения света получены с помощью кода CORSIKA [1]. Распределение задается на сетке 200×200 с ячейкой $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Расположение детектора относительно оси ливня определяется углом азимута ψ и расстоянием R .

В качестве ключевой точки можно использовать а) максимум или б) центр тяжести распределения. В случае а) находится ячейка с наибольшим количеством фотонов и координаты её центра. В б) координаты находятся по определению центра тяжести. Координаты оси ливня на сетке $x = \sin\theta \cos\psi = 0.166$ и $y = \sin\theta \sin\psi = 0.198$ (где $\psi = 50^\circ$, зенитный угол $\theta = 15^\circ$), вычитаем их из координат выбранной точки. Ошибка определения направления находится из скалярного произведения реального и найденного направлений, а в случае малых углов — как расстояние между точками на сетке.

Точки а) и б) смещены в одном направлении от реального положения оси ливня (рис. 5). Направление этого смещения приблизительно совпадает с ориентацией пятна света (рис. 6), поэтому можно уменьшить ошибки, прибавляя к точкам а) и б) некоторый сдвиг, вычисляемый как разность координат реального направления и средних координат точек а) и б).

Оценка направления по образам производится аналогично оценке по угловому распределению. Взаимное расположение истинного и рассчитанного направлений ливня показано на рис. 3. Синим цветом обозначены углы ϕ_0 и ϕ_1 , красным – δ_0 и δ_1 , зеленым – ошибка определения направления Ω . Ошибка определения направления находится из скалярного произведения векторов OA и OB и вычисляется следующим образом:

$$\cos\Omega = \sin\delta_0 \cdot \sin\delta_1 \cdot \cos(\phi_0 - \phi_1) + \cos\delta_0 \cdot \cos\delta_1,$$

$$\delta_i = \arcsin\left(\frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + f^2}}\right), \quad \phi_i = \arccos\left(\frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}\right), \quad f = 11.284 \text{ см}$$

– фокусное расстояние линзы.

Ошибки оценки без сдвига отображены на рис. 4а, со сдвигом на рис. 4б

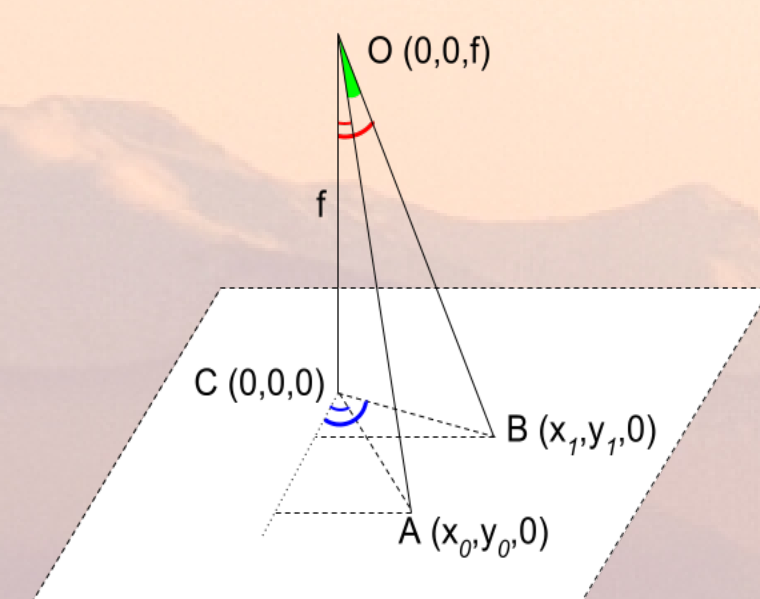


Рис. 3 Расположение истинного и рассчитанного направлений ливня

Результаты

Ошибки определения направления по угловому распределению

R	до сдвига		после сдвига	
	по максимуму	по центру тяжести	по максимуму	по центру тяжести
100 м	1.28	2.28	0.10	0.22
140 м	1.46	2.78	0.20	0.32

Ошибки определения направления по образам

R	до сдвига		после сдвига	
	по максимуму	по центру тяжести	по максимуму	по центру тяжести
100 м	1.2	1.7	0.12	0.16
140 м	1.4	2.0	0.14	0.19

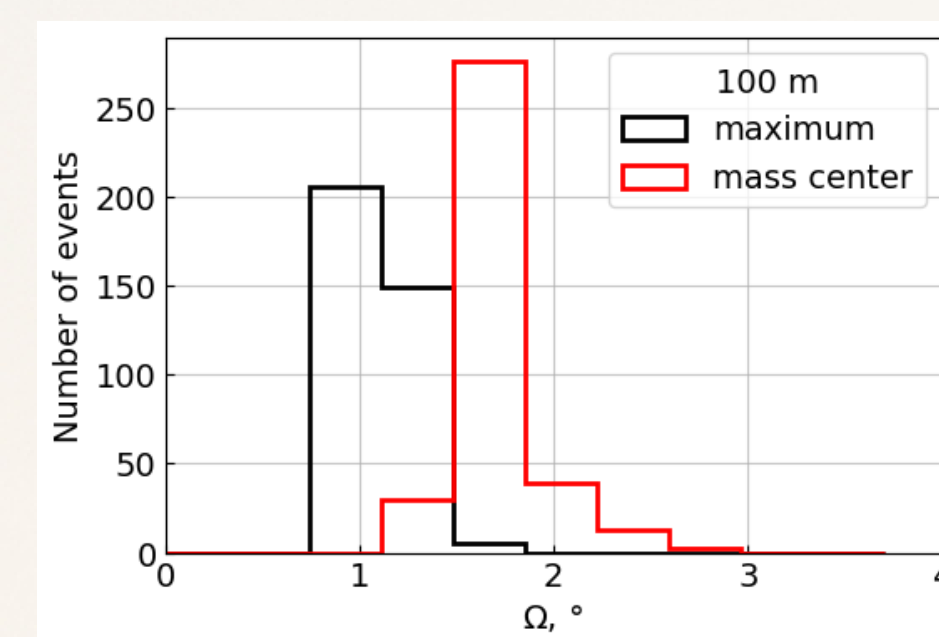


Рис. 4а Ошибки оценки направления до сдвига

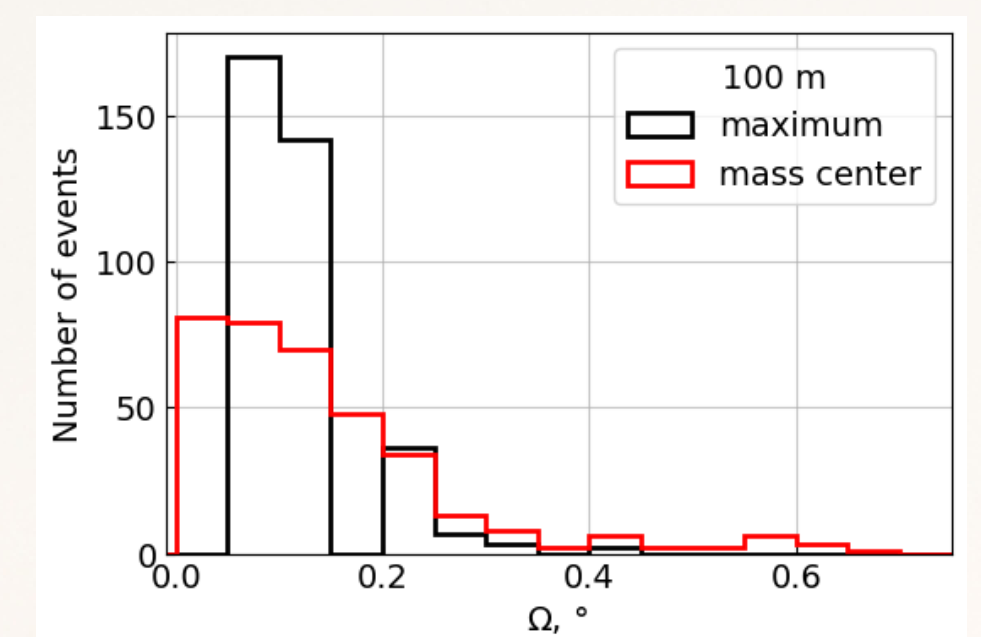


Рис. 4б Ошибки оценки направления после сдвига

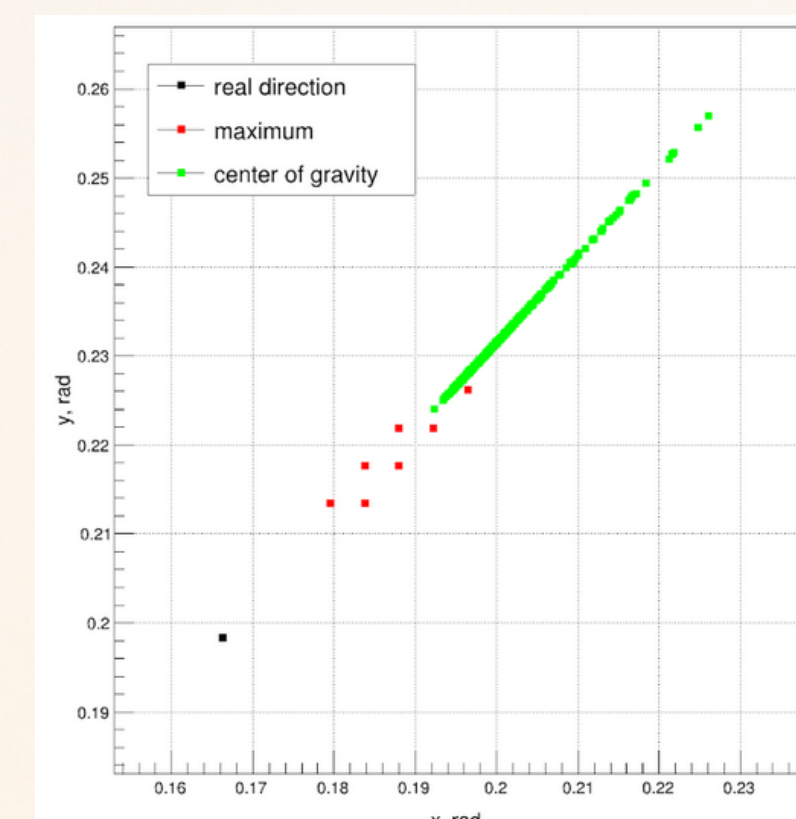


Рис. 5 Опорные точки

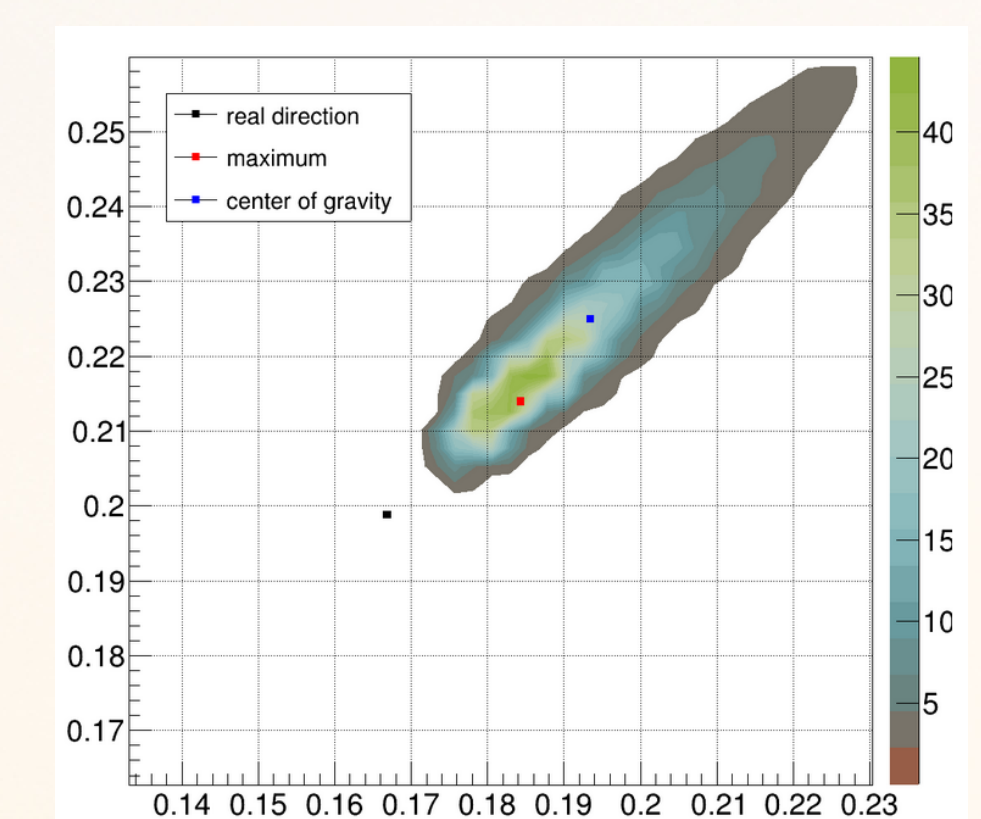


Рис. 6 Ориентация пятна

Ошибки определения направления для отверстия в зеркале

Точность восстановления направления прихода света с помощью линейной регрессии составила $0.6^\circ \pm 0.3^\circ$ (при коэффициенте детерминации $R^2 = 0.97$). Использование полносвязной нейронной сети позволило улучшить точность восстановления направления до $0.42^\circ \pm 0.25^\circ$. Распределение ошибок методов представлено на рис. 7.

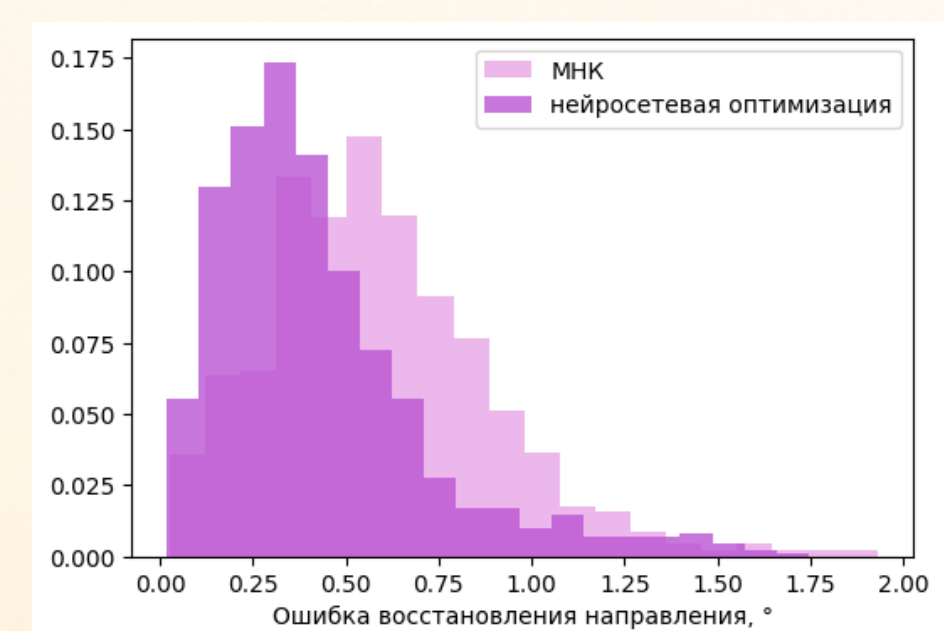


Рис. 7 Ошибки восстановления направления для отверстия в зеркале

Заключение

Было показано, что оба метода регистрации прямого света ШАЛ обладают необходимым угловым разрешением лучше градуса дуги. Отверстие в зеркале не может быть использовано для оценок первичной энергии или массы, но даже небольшой по площади специализированный детектор прямого света наряду с направлением прихода ливня может оценивать первичную массу [2].

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 23-72-00006. rscf.ru/project/23-72-00006/

Источники

- [1] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, et al.// FZKA-6019 (1998).
- [2] Н. Овчаренко, О. Черкесова, В. Галкин и др. Возможности оценки массы первичного ядра по угловому распределению прямого черенковского света ШАЛ компактным телескопом // эта конференция, постер #30