

Т. Колодкин^{1,2},

В. Галкин^{1,2}, Д. Подгрудков^{1,2}, Т. Роганова¹, Д. Чернов^{1,2}, В. Иванов^{1,2}, К. Азра^{1,2}, Е. Бонвеч¹, Е. Энтина¹, Н. Овчаренко^{1,2}, О. Черкесова^{1,3}, М. Зива^{1,4}

1 Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

2 Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

3 Факультет космических исследований, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

4 Факультет вычислительной математики и кибернетики, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ID: 124. E-mail: tka002@mail.ru

Аннотация

Рассмотрен предварительный алгоритм оценки первичной энергии ШАЛ по черенковскому образу в будущем телескопе отраженного света установки СФЕРА-3.

Введение

Проект СФЕРА основан на методе А.Е.Чудакова для определения энергии, направления и массового состава первичной частицы в области энергий выше 10^{15} эВ. В эксперименте СФЕРА-2 [1], помимо отраженного света, был зафиксирован и прямой черенковский свет ШАЛ. На основе этого результата возникла идея детектора СФЕРА-3, в котором планируется одновременная регистрация как отраженного, так и прямого черенковского света. Ожидается повышение точности определения параметров первичных частиц. Планируется, что отражающей поверхностью будет выступать снежная поверхность озера Байкал, а подниматься телескоп будет с помощью БПЛА.

Методология

Оценка энергии происходит по полученной из расчетов зависимости полного количества черенковского света ШАЛ, отраженного от снега и попавшего на мозаику телескопа, от расстояния R от оси ливня на снегу до оси телескопа. Такие зависимости $Q(E_0, R)$ могут быть получены для набора первичных энергий как регрессии, построенные на соответствующих выборках искусственных событий. Оценки энергии делаются по измерениям Q^{exp} и R^{exp} на мозаике телескопа обратной интерполяцией по набору упомянутых зависимостей: $E_0^{\text{est}} = E_0(Q^{\text{exp}}, R^{\text{exp}})$.

Для оценки ошибок метода мы рассмотрели три ядра: протон, азот, железо. Для каждого ядра рассматриваются 5 событий, по 100 клонов для каждого события, где клон события – это то же событие со смещённой точкой падения оси. Таким образом, анализируются по 500 событий каждого ядра с равномерным распределением точек падения оси на снежной поверхности в круге радиуса 500 метров.

Строятся зависимости полного числа фотонов образа от расстояния между осью телескопа и точкой падения оси ливня для протона, железа и азота с энергией 10 ПэВ (рис. 1)

Для расчёта относительных флуктуаций брались квадраты $120 \times 120 \text{ м}^2$ вдоль радиуса $(x, 0)$. Центр первого квадрата лежит в точке $(0, 0)$, второго – $(120, 0)$ и т.д. Идея заключается в том, что при равномерном распределении точек падения оси ливня по кругу лучше покажут флуктуации элементы с одинаковой площадью, чтобы число событий было почти одинаковым. В связи с тем, что квадрат с центром в точке $(480, 0)$ затрагивает лишь часть круга, то его исключают из рассмотрения. Так получена зависимость относительных флуктуаций для трёх ядер (рис. 2).

Для оценки энергии частицы неизвестной массы три полученные зависимости усредняются (рис. 3). Определение энергии будет проводиться путем сопоставления данных ливня со средней кривой. Из-за усреднения по трем ядрам при определении энергии возникнет систематический сдвиг. Если количество света на мозаике при определенном расстоянии от оси телескопа до точки падения оси ливня принадлежит диапазону погрешностей кривой, то можно сказать, что энергия события соответствует энергии этой кривой.

Ошибки в энергии для ядер азота на рис. 4 оказываются малыми просто потому, что усреднение трех кривых дает зависимость, близкую к кривой для азота. Поэтому в условиях неизвестной массы ядра надо

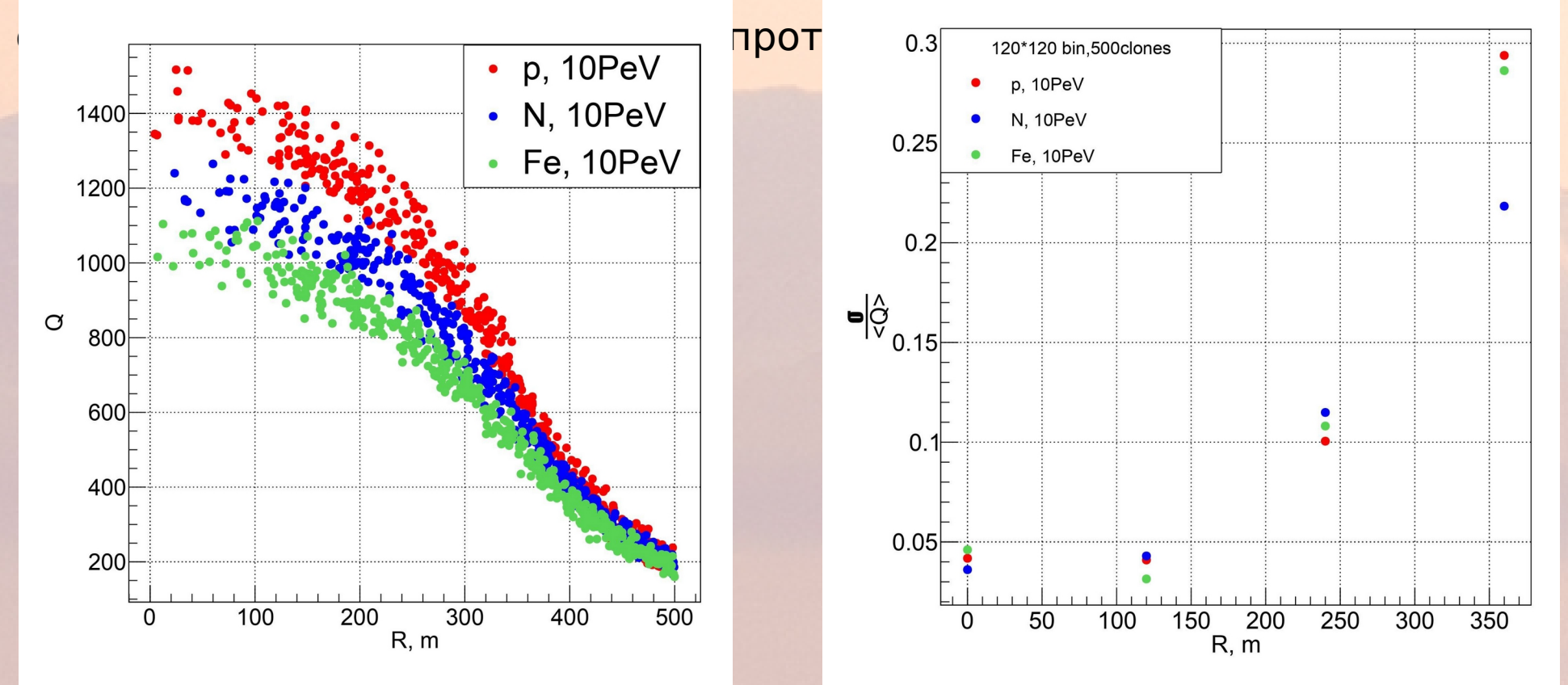


Рис. 1. Зависимость полного числа попавших на мозаику фотонов в событии в зависимости от расстояния между осью телескопа и точкой падения оси ливня для протона, железа и азота с энергией 10 ПэВ.

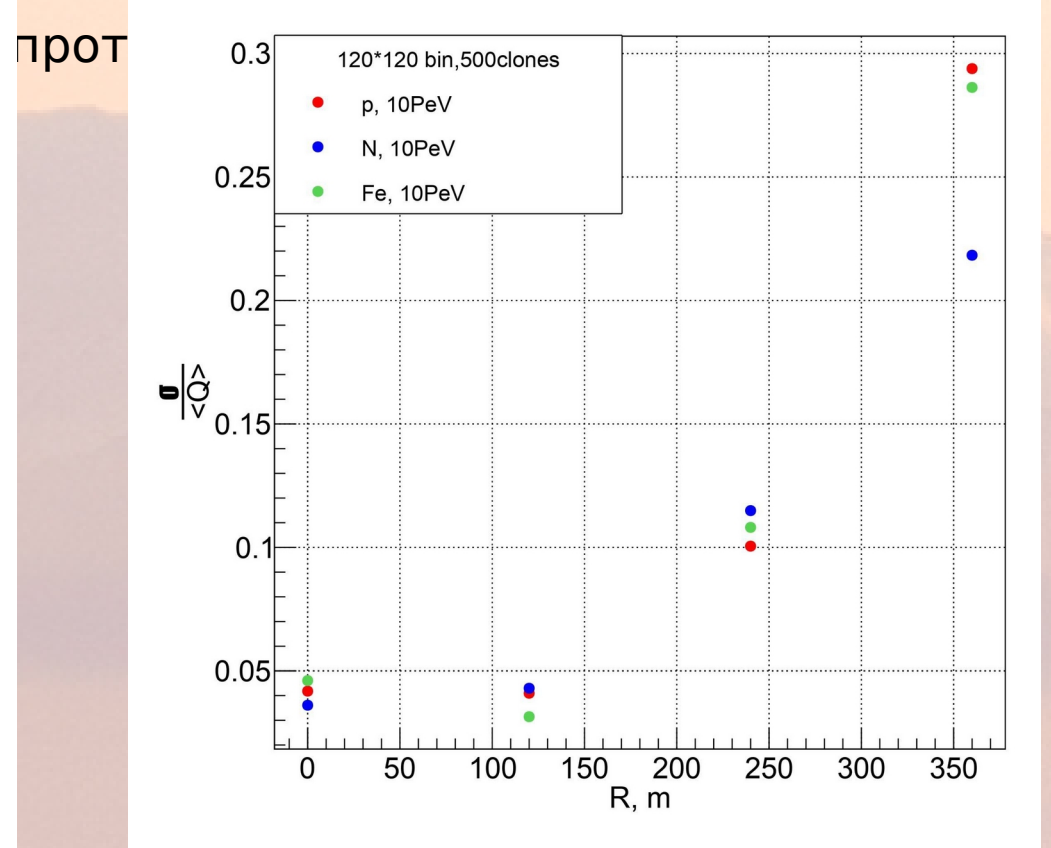


Рис. 2. Зависимость относительных флуктуаций от расстояния между осью телескопа и точкой падения оси ливня для протона, железа и азота с энергией 10 ПэВ.

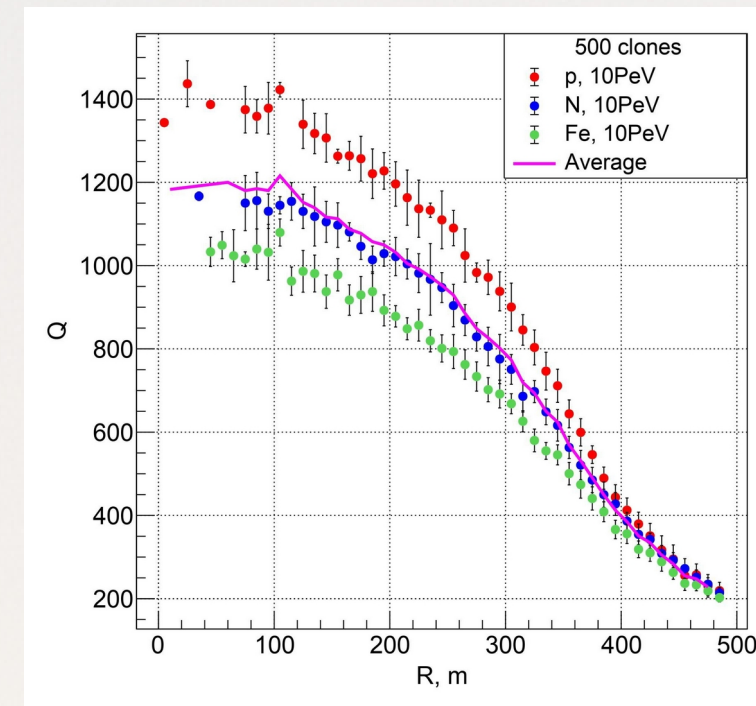


Рис. 3. Усреднённая по трём ядрам зависимость полного числа дошедших до мозаики фотонов в событии в зависимости от расстояния между осью телескопа и осью ливня для протона, железа и азота с энергией 10 ПэВ.

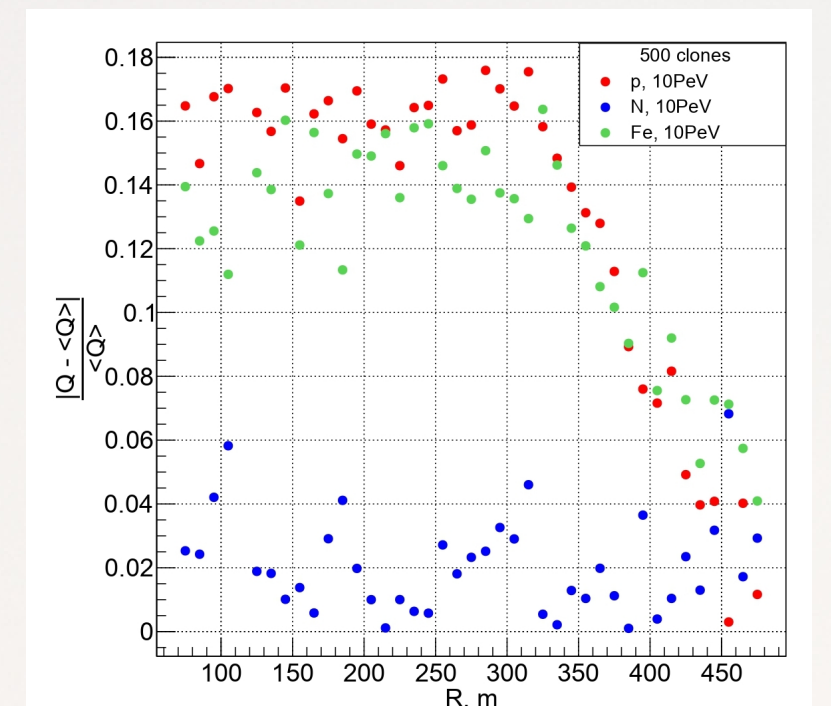


Рис. 4. Зависимость результирующих ошибок оценки энергии от расстояния между осью телескопа и точкой падения оси ливня для протона, железа и азота с энергией 10 ПэВ в отсутствие оценки массы ядра.

В дальнейшем масса первичной частицы будет оцениваться для каждого события. Это уменьшит ошибку энергии, даже если масса будет определяться не точно.

В наземных установках интересующей информацией является количество света, попавшее в детектор определённой площади, находящийся на определенном расстоянии от центра установки – плотность света на расстоянии R . По искусственным событиям с первичным ядром железа были построены зависимости плотности света от энергии на расстояниях 150, 200 и 250 м (рис. 5).

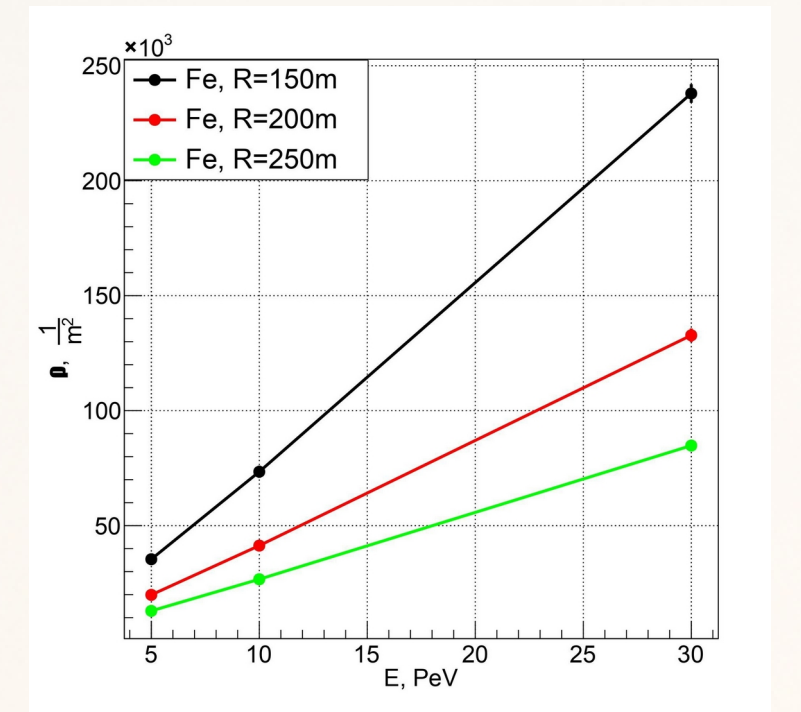


Рис. 5. Плотность света

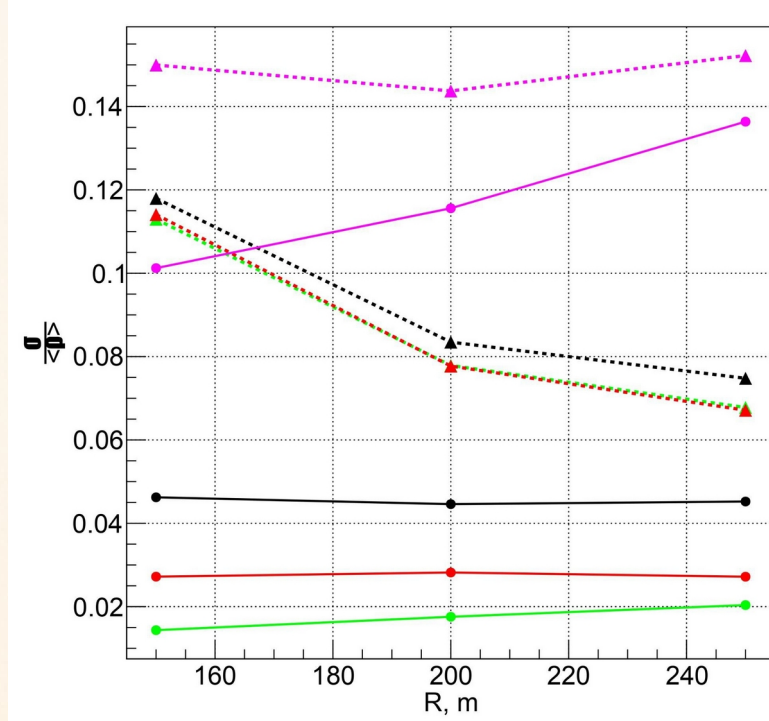


Рис. 6. Относительные флуктуации плотности света

На рис. 6 представлены зависимости относительных флуктуаций плотности света от расстояния для ядер железа с энергиями 5 (\blacktriangle), 10 (\blacktriangle) и 30 ПэВ (\blacktriangle) и протона 10 ПэВ (\blacktriangle) в случае с(\blacktriangle) и без(\bullet) смещения оси ливня относительно центра на 10 м. Чтобы показать, что относительные флуктуации не всегда малы, а зависят от типа первичной частицы, приведена кривая относительных флуктуаций и для протона с энергией 10 ПэВ.

Результаты

Получены зависимости полного количества света на мозаике от расстояния от оси телескопа до точки падения оси ливня для трёх ядер с энергией 10ПэВ. Для каждого ядра были получены зависимости относительных флуктуаций и ошибки в энергии от расстояния между осью телескопа и точкой падения оси ливня, что дает точность оценки энергии телескопом отраженного света СФЕРА-3.

Заключение

Представленный алгоритм позволяет путем сопоставления оценить энергию первичной частицы. В дальнейшем метод будет усиливаться аппроксимацией образа, что увеличит точность определения энергии. Максимально точные оценки энергии будет обеспечивать полный алгоритм, оценивающий все первичные параметры ливня.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [2].

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

Источники

- [1] R.A. Antonov, E.A. Bonvech, D.V. Chernov et al. // Astropart. Phys. V. 121, 2020, 102460. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2020.102460
[2] V.I. Voevodin, A. Antonov, D. Nikitenko et al. // Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community.