



ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ МАССЫ ПЕРВИЧНОГО ЯДРА ПО УГЛОВОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ПРЯМОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА ШАЛ КОМПАКТНЫМ ТЕЛЕСКОПОМ



Н. Овчаренко^{1,2},

О. Черкесова^{1,3}, В. Галкин^{1,2}, К. Азра^{1,2}, Е. Бонвеч¹, Д. Подгрудков^{1,2}, Т. Роганова¹, Д. Чернов^{1,2}, В. Иванов^{1,2}, Т. Колодкин^{1,2}, Е. Энтина¹, 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

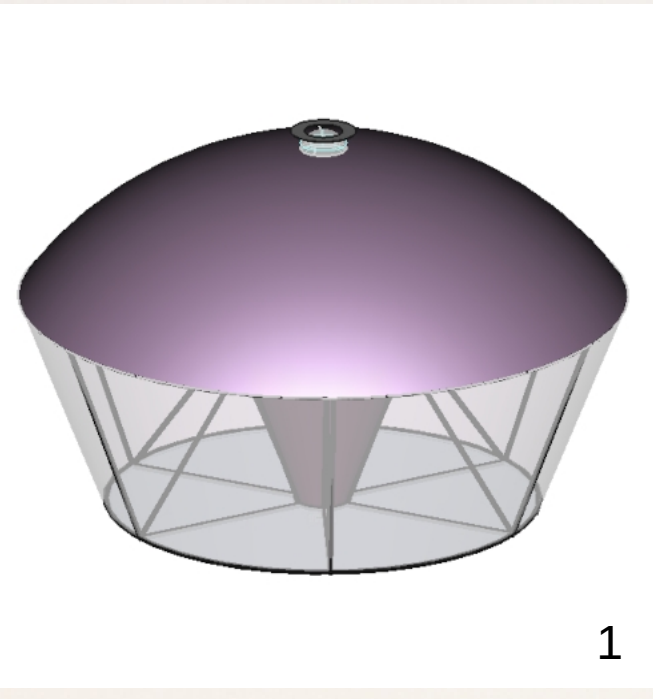
ID: 030. E-mail: ovcharenko.no19@physics.msu.ru

Аннотация

Исследуется возможность определения массы первичного ядра по угловому распределению черенковского света ШАЛ на высоте около 500 м над уровнем моря. Рассмотрен также простейший вариант детектора углового распределения прямого света для проектируемой установки СФЕРА-3. В качестве характеристики, чувствительной к первичной массе, в обоих случаях используется длина углового распределения или его образа. Чувствительности к массе сравниваются с чувствительностью нижнего телескопа, регистрирующего отраженный от снега свет.

Введение

Установкой СФЕРА-2 [1] был зарегистрирован прямой свет, прошедший через щель между сегментами зеркала, что было установлено по характерным задержкам регистрации. При проектировании нового детектора было принято решение исследовать информативность прямого света. В установке СФЕРА-3 будут присутствовать детекторы как прямого, так и отражённого света, что позволит улучшить разделение первичных частиц по массам и направлениям. [Подробнее о СФЕРА \[2\]](#)



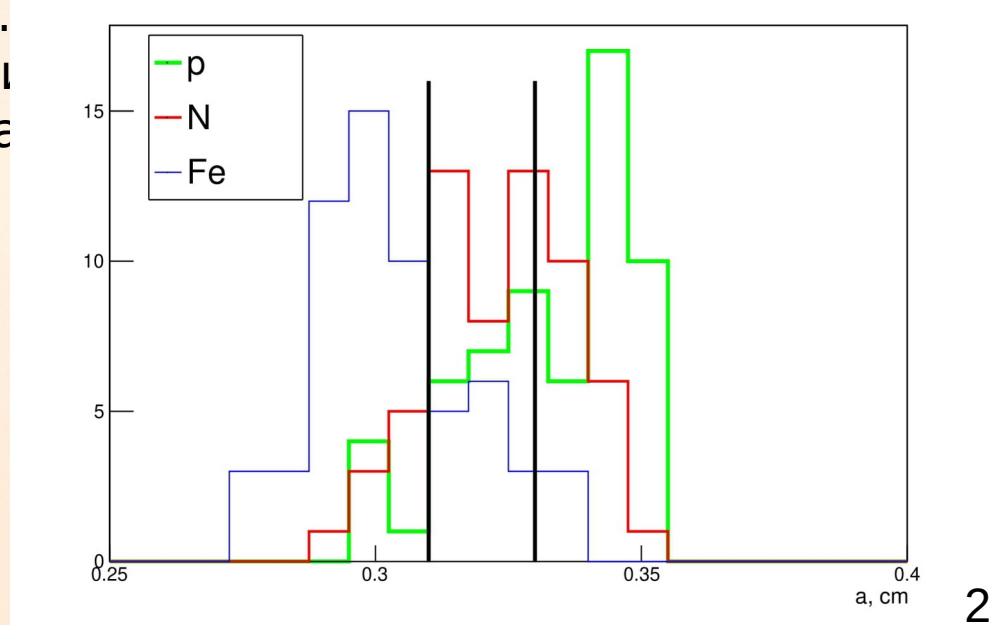
1

Методология

Угловые распределения света получены с помощью кода CORSIKA [3]. Распределение задаётся на равномерной сетке 200×200 с ячейкой $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (superfine). В качестве параметра была выбрана длина большой оси распределения. Пятно в поле зрения детектора вытянуто и повернуто относительно осей детектора, и перед анализом необходимо найти этот угол поворота. Далее анализ проводился а) посредством расчёта первых и вторых моментов распределения, б) с помощью аппроксимации какой-либо двумерной модельной плотностью.

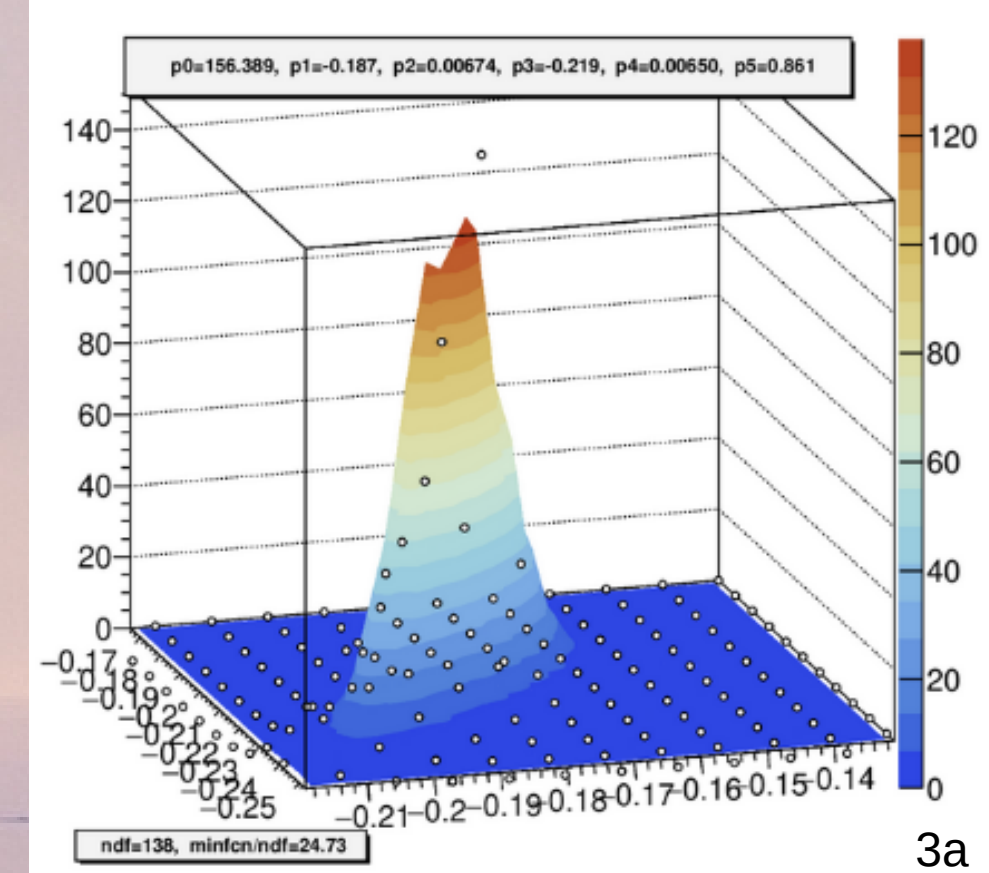
Для а) мы вводим порог — минимальное количество фотонов в ячейке для её рассмотрения при вычислении моментов. Мы используем несколько значений абсолютного (конкретное число фотонов) и относительно-го (доля от максимума данного распределения) порогов. После поворота вычисляем моменты распределения. Для аппроксимации было использовано двумерное распределение Гаусса, в этом случае длина большой оси находится как корень из дисперсии.

Анализ образов производится аналогично анализу угловых распределений. Чувствительный к массе параметр — длина большой оси образа. Распределение длин большой оси в зависимости от массы первичной частицы, разделённое по порогам, представлено на рисунке 2. Видно, что при увеличении порога разделение становится более чётким. Однако, как и в случае с угловым распределением, при использовании более грубой сетки, ошибки классификации заметно растут. В частности, ухудшается разделение тяжёлых ядер, то есть сетка fine ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) не даёт описания всех деталей образа. Необходимо использовать именно сетку superfine при моделировании углового распределения прямого света. Для детектора прямого света получается разделение не хуже, чем для детектора отражённого света. Независимость детекторов позволит улучшить разделение. Аппроксимация при помощи двумерного распределения Гаусса (рис. 3) не полностью описывает образ, поэтому мы аппроксимировали образ распределением, сформированным из нормального и бета-

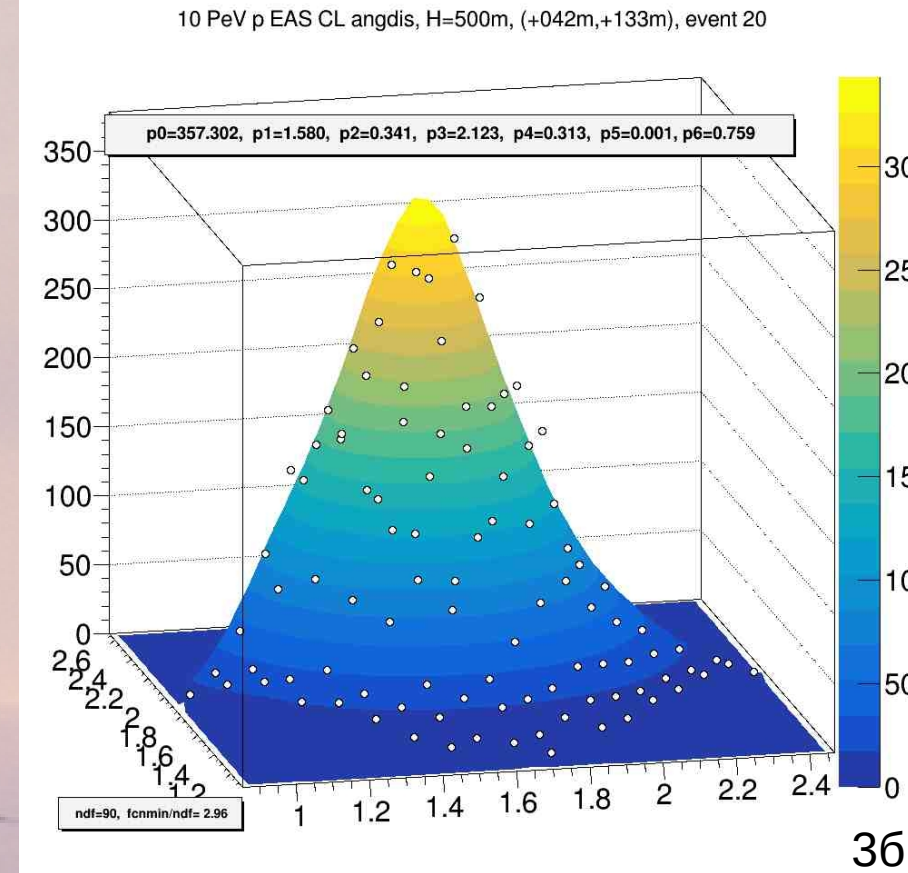


2

Если при моделировании сохранять угловое распределение света на более грубой сетке, ошибки классификации заметно растут. В частности, ухудшается разделение тяжёлых ядер, то есть сетка fine ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) не даёт описания всех деталей образа. Необходимо использовать именно сетку superfine при моделировании углового распределения прямого света. Для детектора прямого света получается разделение не хуже, чем для детектора отражённого света. Независимость детекторов позволит улучшить разделение. Аппроксимация при помощи двумерного распределения Гаусса (рис. 3) не полностью описывает образ, поэтому мы аппроксимировали образ распределением, сформированным из нормального и бета-



3a



3b

Результаты

Характерные ошибки разделения по массам по характеристикам угловых распределений в точке

метод		p-N		N-Fe	
		ошибка p	ошибка N	ошибка N	ошибка Fe
абсолютный порог	3 фотона	0.23	0.24	0.19	0.26
	5 фотонов	0.22	0.28	0.24	0.23
относительный порог	1%	0.34	0.34	0.39	0.38
	3%	0.37	0.36	0.27	0.33
аппроксимация		0.62	0.12	0.23	0.27

Характерные ошибки разделения по массам по характеристикам образа в точке

метод		p-N		N-Fe	
		ошибка p	ошибка N	ошибка N	ошибка Fe
абсолютный порог	3 фотона	0.38	0.38	0.25	0.26
	5 фотонов	0.32	0.32	0.24	0.24
относительный порог	1%	0.52	0.52	0.48	0.48
	3%	0.48	0.48	0.43	0.43

Сравнение ошибок разделения первичных частиц по массе в зависимости от величины порога на разных сетках

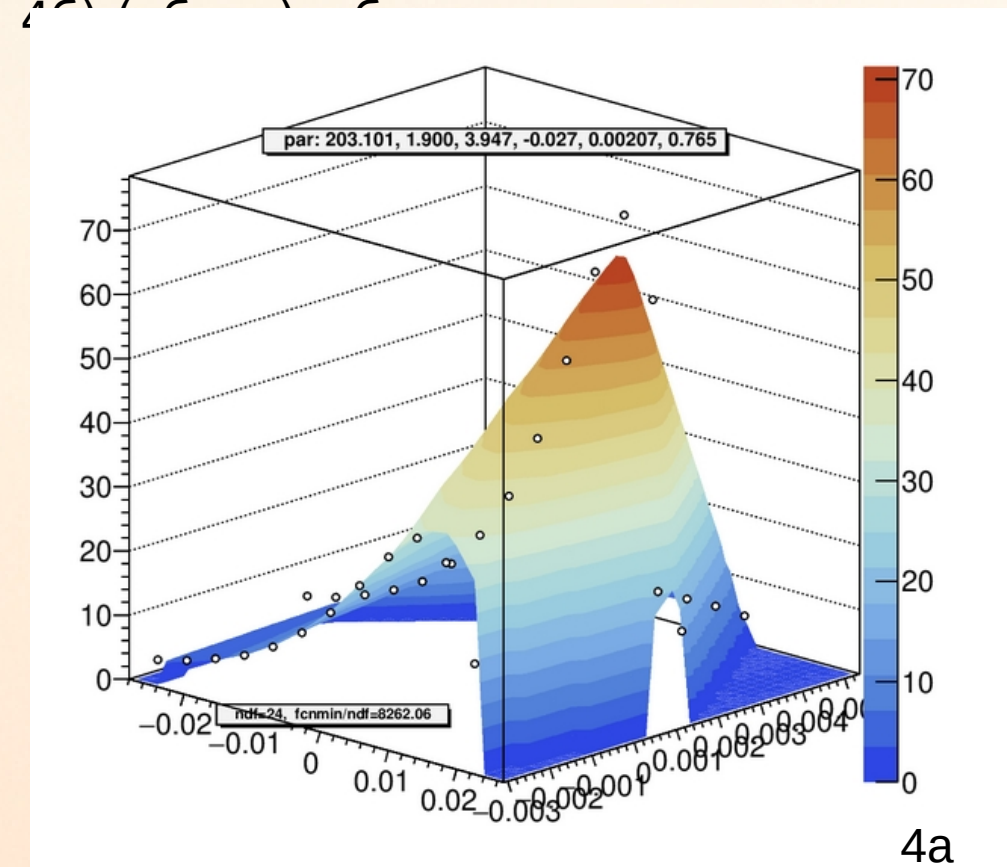
порог, фотоны	fine, ячейка 0.5°				superfine, ячейка 0.25°			
	Ошибки p-N		Ошибки N-Fe		Ошибки p-N		Ошибки N-Fe	
	p	N	N	Fe	p	N	N	Fe
5	0.29	0.29	0.38	0.38	0.32	0.32	0.24	0.24
7	0.27	0.28	0.38	0.38	0.33	0.32	0.25	0.24
8	0.32	0.32	0.39	0.39	0.31	0.32	0.26	0.25

Заключение

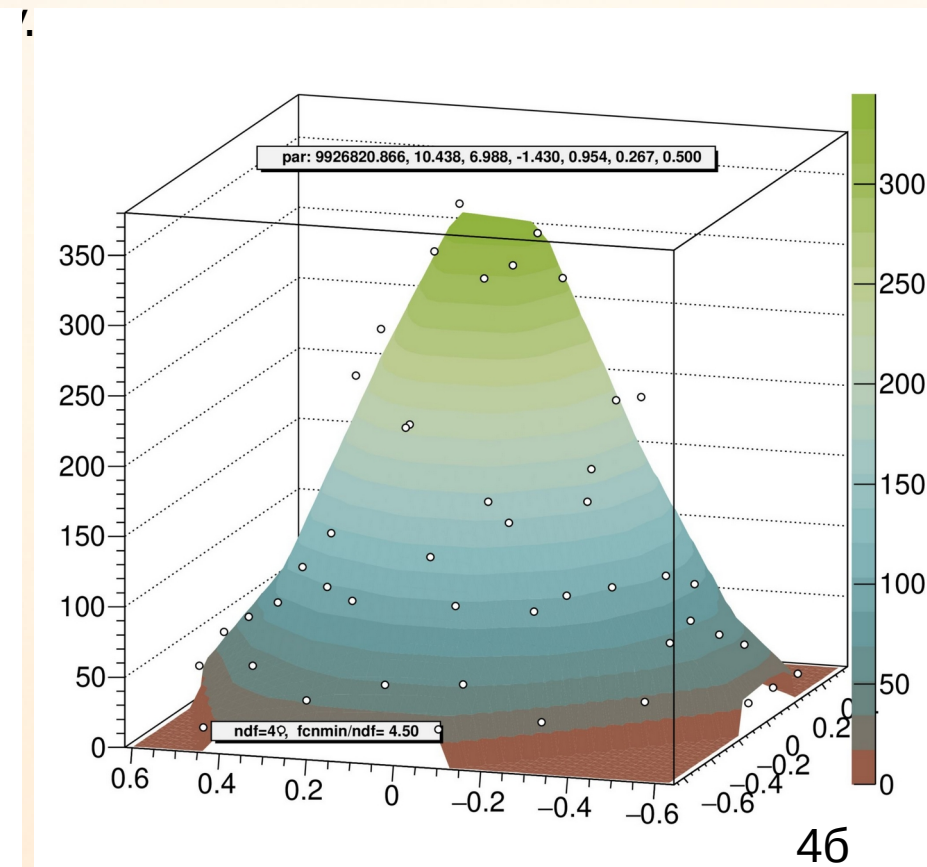
Угловое распределение света чувствительно к массе первичной частицы. При использовании длины большой оси в качестве критерия можно разделить первичные частицы с ошибками классификации не большими, чем при использовании отражённого от снега света.

Лучшие результаты даёт использование сетки superfine при сохранении углового распределения света в процессе моделирования ШАЛ по CORSIKA и использование абсолютного порога при обработке образов.

Для более качественного исследования образа следует использовать аппроксимацию асимметричной функцией. Примеры такой функции на рисунке 4: 4a) (угловое распределение) нормальное распределение по x с помощью нормальной копулы соединено с гамма-распределением по y,



4a



4b

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [4].

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

Источники

[1] Bonvch E. A., Azra C. J., Chernov D. V. et al. // Physics of Atomic Nuclei Vol. 86, No. 6 (2023), p.1048-1055

[2] Д.В. Чернов РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА СФЕРА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА ПКЛ В ОБЛАСТИ 1-1000 ПЭВ. СТАТУС 2024 ГОДА // эта конференция, #33 (чт 04.07.2024, 16:30 – 18:00)

[3] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, et al.// FZKA-6019 (1998).

[4] V.Voevodin, A.Antonov, D.Nikitenko, et. al. // Supercomputing Frontiers and Innovations // 6 (2), 4 (2019)