Оценка точности измерения энергии атмосферных мюонов методом парметра в водно-черенковском детекторе WCDA

Малий И.О., Буткевич А.В., Карпиков И.С., Куринов К.О, Стенькин Ю.В., Щеголев О.Б.

Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Дубна, 3 июля 2026

Мотивация

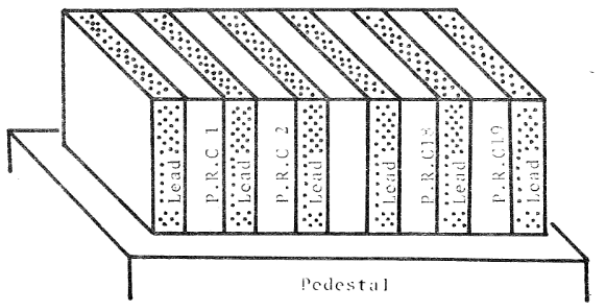
- Проблема в спектре космических лучей: в спектре первичных КЛ наблюдается излом, в спектре мюонов – нет
- Спектр мюонов хорошо измерен прямыми методами с помощью магнитных спектрометров (MUTRON, DEIS) в диапазоне только до 10-20 ТэВ
- Рассматриваемый в данной работе детектор LHAASO-WCDA позволяет измерять спектр мюонов прямым методом в области более высоких энергий

Метод парметра

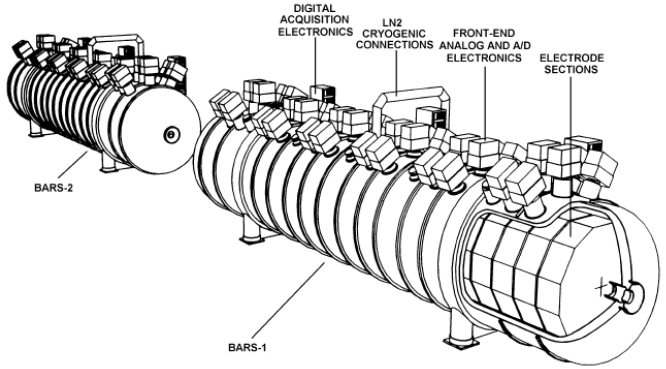
- Теория парметра была развита Кокоулиным и Петрухиным в 1987 г.
- Энергетические потери мюонов $\frac{dE\mu}{dX} = -\alpha - \beta E_{\mu}$.

  Здесь α – медленно меняющиеся ионизационные процессы, а $\beta \to \beta_{br} + \beta_{pair} + \beta_{ph}$. Зная β, можно определить $\boldsymbol{E_{\mu}}$.
- При больших энергиях (от 10 ТэВ и выше, вне рабочего диапазона магнитных спектрометров) можно использовать потери энергии для оценки E_{μ}. Сечение рождения мюоном электрон-позитронных пар достаточно велико и медленно растет с E_{μ}, в то время как передача энергии пропорциональна E_{μ}. Вот почему этот метод известен как парметр.
- Оценка погрешности: $\delta_E = \sqrt{9\pi/28\alpha T}$. Здесь $\delta_E = \sigma_{\ln(E)}$, $\alpha = \frac{1}{137}$, T – толщина в рад.ед.
- Для корректной работы метода парметра необходима толщина не менее 200 r.l.
- Цель работы – измерение спектра атмосферных мюонов методом парметра

Предшествующие установки



Парметр, установленный перед спектрометром MUTRON: **l ~ 200 r.l.**



Установка БАРС: **l ~ 140 r.l.**

R.P . KOKOULIN and A.A. PETRUKHIN
"THEORY OF THE PAIR METER FOR HIGH ENERGY MUON MEASUREMENTS", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A263 (1988) 468-479, 1987

Экспериментальная установка

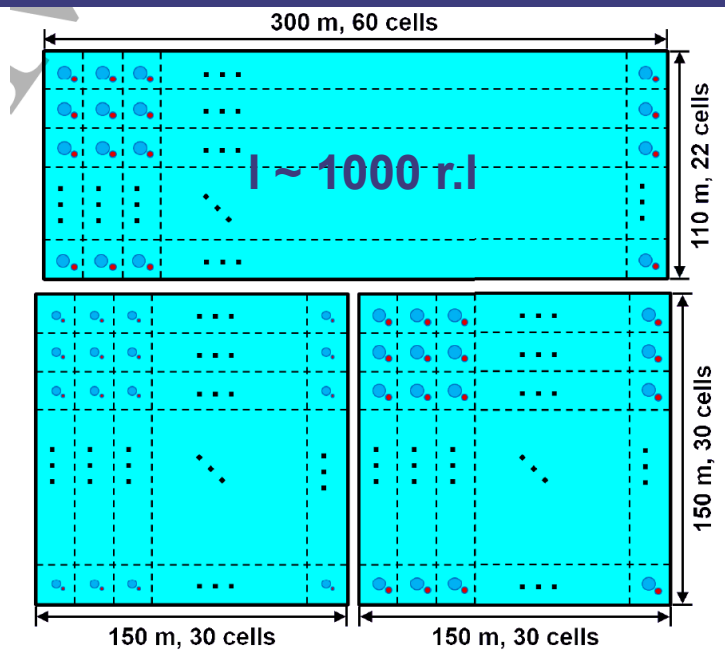
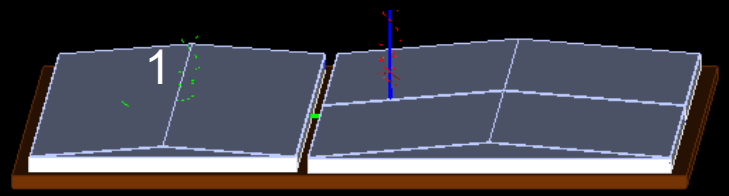
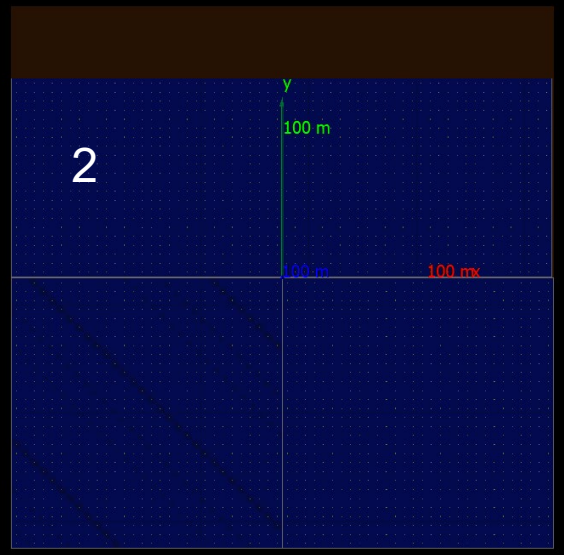


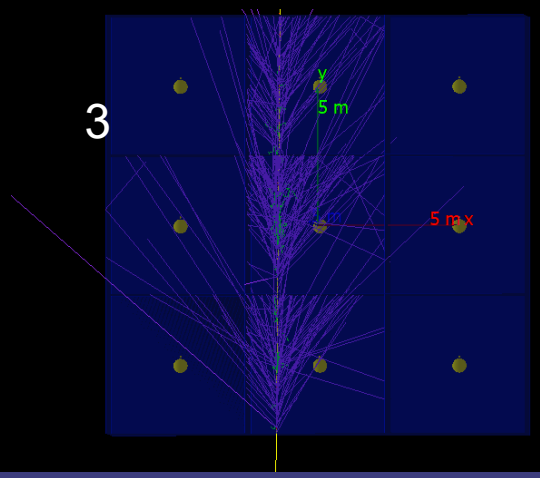
Схема WCDA

WCDA имеет огромную площадь (78000 $м^2$) и обладает ячеистой структурой (размер одной ячейки: 5x5x4 м). Такая структура создается шторками. В центре каждой ячейки располагается основной ФЭУ с малым ФЭУ сбоку от него

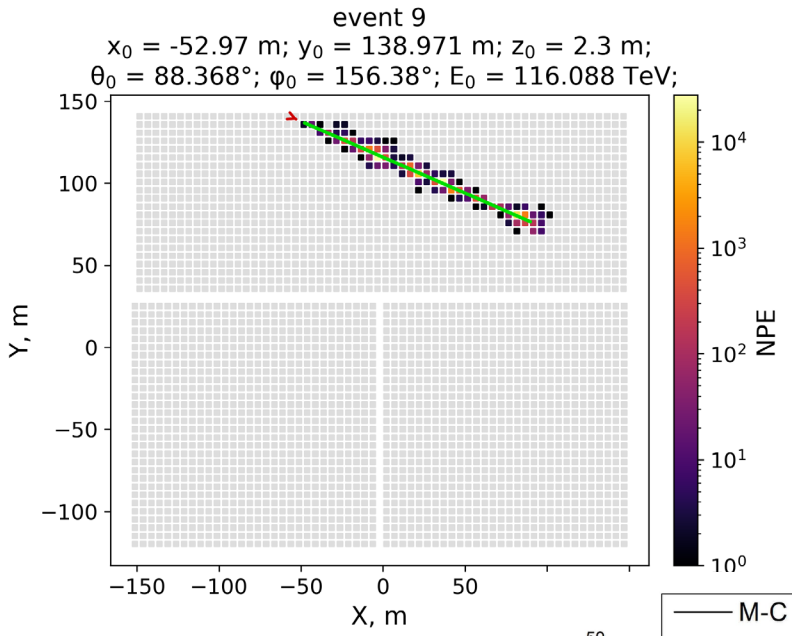
Модель в Geant4





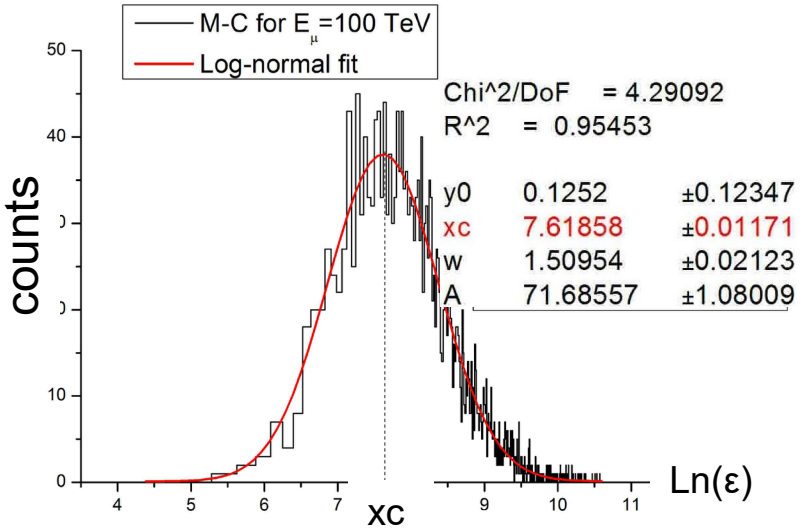


Визуализация модели.
1 – общий вид;
2 – план;
3 – событие с μ^- крупным планом;
4 – большой и малый ФЭУ



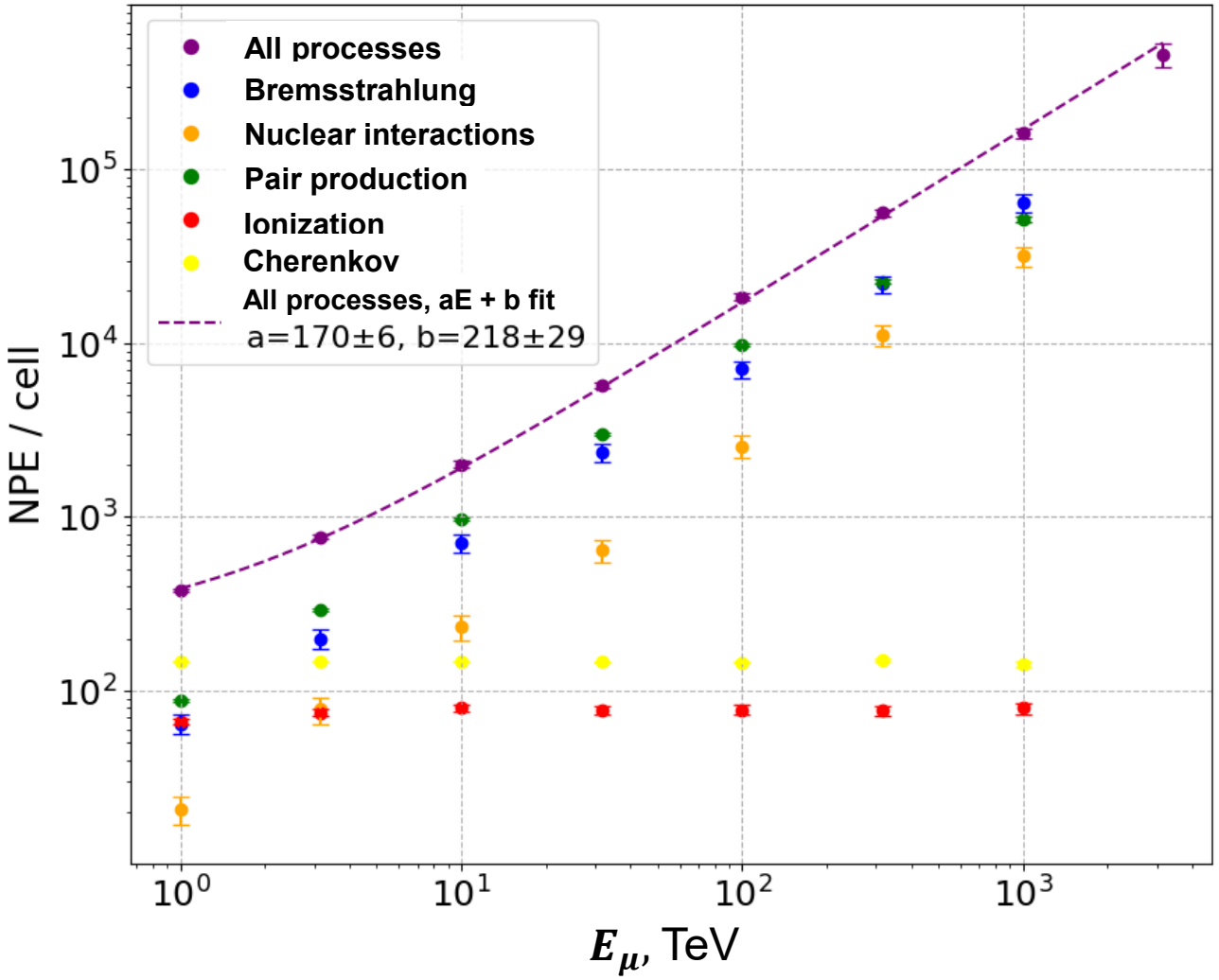
Модельное событие (первичная частица: μ^-). WCDA действительно можно использовать в качестве трекового детектора

Распределение событий по среднему светосбору в пересчете на 1 ячейку для мюонов с энергией 100 ТэВ, прошедших 23 ячейки WCDA при зенитном угле 88 ˚



Stenkin, Yuri & Butkevich, A. & Karpikov, I. & Kurinov, K. & Ma, Xin-Hua & Maliy, I. & Shchegolev, Oleg & Yao, Z.. (2025). WCDA Detector of the Lhaaso Experiment as a Pair-Meter to Measure Atmospheric Muon Spectrum. 10.21203/rs.3.rs-6998918/v1.

Результаты моделирования



Энерговыделение мюонов в различных процессах в зависимости от энергии.
Разные цвета соответствуют: фиолетовый – случаю, когда все процессы включены в моделирование; остальные – все процессы для мюонов, кроме выбранного, отключены

Динамический диапазон

В настоящее время разрабатывается методика с использованием показаний двух ФЭУ, которая позволяет расширить динамический диапазон с 4000 до 8000000 фотоэлектронов для WCDA-1 и с 4000 до 1500000 фотоэлектронов для WCDA-2 и WCDA-3.

Однако, при их подключении приходится выполнять трехступенчатую процедуру сшивки, которая не всегда является гладкой, и вносит свои погрешности.

Предварительно, диапазон энергий, в котором можно восстанавливать энергию мюонов методом парметра, составляет от ~10 ТэВ до ~3 ПэВ

Заключение

- Ранее было выдвинуто предложение использования детектора WCDA обсерватории LHAASO в качестве парметра. Предложение было принято коллаборацией LHAASO
- Создана модель данной установки в Geant4
- С помощью моделирования показана возможность применения WCDA в качестве трекового детектора и парметра в диапазоне энергий от 10 ТэВ до 3 ПэВ
- Точность определения энергии в индивидуальном событии составляет ~65% для E_{μ} =100 ТэВ. С учетом наличия хорошей статистики такая точность является приемлемой для измерения спектра окологоризонтальных мюонов

Спасибо за внимание!