Реконструкция треков от одиночных окологоризонтальных мюонов высоких энергий в установке WCDA

Куринов К.О.*[1], Буткевич А.В.[1], Карпиков И.С.[1], Кулешов Д.А.[1], Малий И.О.[1], Стенькин Ю.В.[1,2], Щеголев О.Б.[1,2]

[1]Институт ядерных исследований РАН [2]Московский физико-технический институт

Цель и мотивация работы

Измерения энергетического спектра атмосферных мюонов высоких энергий позволит прояснить детали спектра ПКЛ, а также может использоваться для проверки адронных моделей. Энергию мюонов от ~10 ТэВ и выше предполагается определять с помощью прямого метода парметр [1,2], используя данные установки WCDA (Water Cherenkov Detector Array) эксперимента LHAASO. WCDA состоит из 3 бассейнов с суммарным количеством из 3120 разделенных между собой чёрными пластиковыми шторами ячеек размером 5 на 5 метров и высотой в 4.4 метра и в данной задаче рассматривается как трековый детектор.

Целью работы было создание алгоритма выделения событий от одиночных окологоризонтальных мюонов высоких энергий и реконструкции их направления прихода.

Описание моделирования

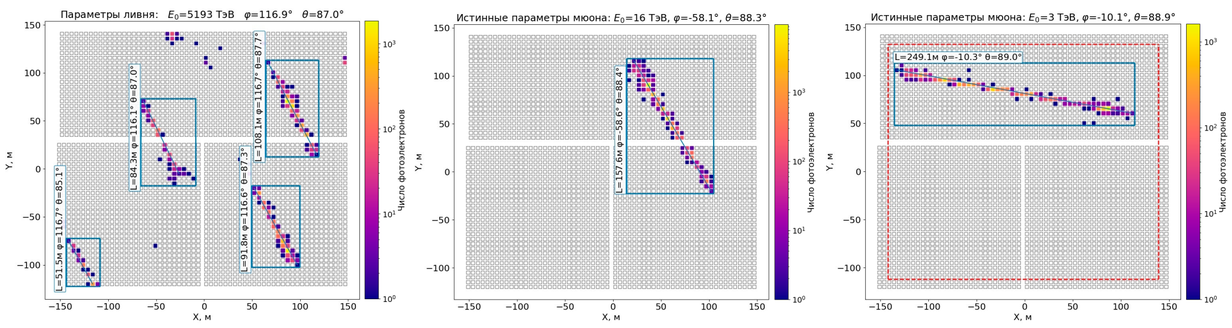
В процессе моделирования были сформированы выборки с откликом установки на прохождение окологоризонтальных ливней и одиночных мюонов. Для моделирования ШАЛ использовалась программа CORSIKA версии 7.7420, с опцией EGS4 и моделью адронных взаимодействий высоких энергий QGSJET-II-04, моделирование отклика WCDA проводилось с помощью фреймворка Geant4. Ниже представлены некоторые параметры выборок.

Параметр	События ШАЛ	Одиночные мюоны
Зенитный угол (θ)	$80^\circ \div 89^\circ$ равномерно по $cos\theta$	
Азимутальный угол (φ)	$0 \div 2\pi$ равномерно	
Первичная энергия (E_0)	0.1 ÷ 100 ПэВ (протон)	1 ÷ 100 ТэВ
Показатель дифференциального спектра (γ)	-1	
Количество событий	~ 13 000	~ 68 000

Краткое описание алгоритма реконструкции

На первом этапе алгоритма проводится поиск кластеров из сработавших ячеек, где соседние ячейки должны удовлетворять условию попадания в заданное временное окно. Затем по ячейкам каждого отдельного кластера с помощью метода наименьших квадратов с итеративным перевзвешиванием проводится линейный фит, оценивается скорость частицы и её направление (θ, φ). В выходных данных события записываются реконструированные параметры и параметры определяющие качество фита (сумма квадратов отклонений, доля ячеек кластера, лежащая на реконструированной траектории и другие).

На рисунке снизу представлены примеры события от группы мюонов (слева) и от одиночного мюона (по центру) с отображением их реконструированных траекторий. Во избежание случая недооценки зенитного угла мюона вводится область отбора треков с отступом в две ячейки от границ установки, а в дальнейшем отбираются только одиночные траектории, лежащие полностью только в одном бассейне. Пример принимаемого события показан снизу (справа).



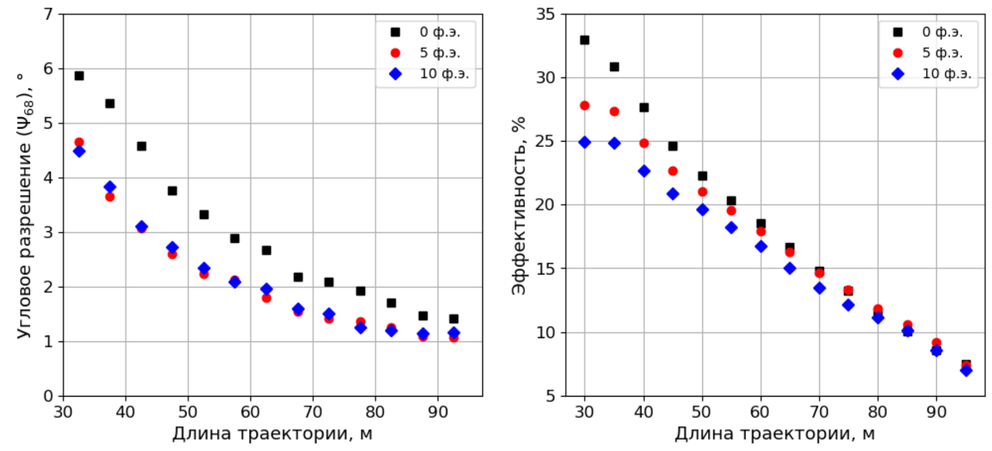
Ссылки

1. R.P. Kokoulin, A.A. Petrukhin, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 263, 468 (1988).

2. Yu.V. Stenkin, A.V. Butkevich, I.S. Karpikov, et al. Exp Astron 61, 15 (2026).

Результаты

По выборке событий от одиночных мюонов была получена зависимость углового разрешения (квантиль 68% распределения ошибки реконструкции направления прихода мюона) и эффективности (полноты) от длины траектории для трёх различных порогов (0, 5 и 10 ф.э.), накладываемых на величину сигнала ячейки.

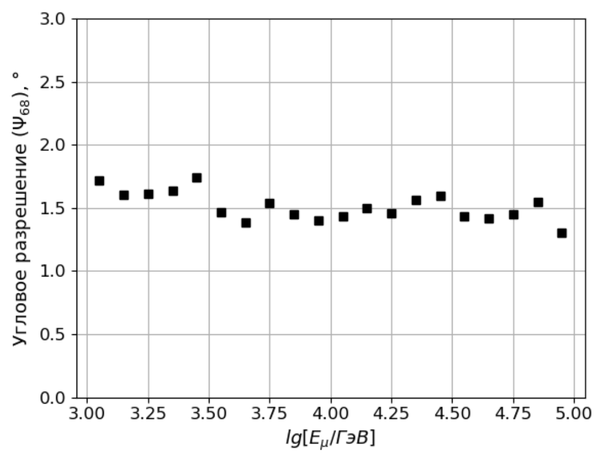


Применение порога позволяет улучшить качество реконструкции. Ошибка реконструкции направления прихода при пороге в 10 ф.э. не сильно отличается от результатов при пороге в 5 ф.э., однако эффективность отбора событий ниже. Следующим критерием отбора была длина траектории, значение в 50 м было выбрано как компромисное значение между качеством реконструкции и эффективностью отбора.

Качество выделения одиночных мюонов оценивалось по выборке событий ШАЛ, которая была предварительно размечена на класс сигнальных (события от одиночных мюонов) и фоновых (два и более мюона) событий. В результате получилось 6333 фоновых и 6847 сигнальных событий. Была получена оценка качества выделения сигнальных событий ($Purity$, $Efficiency$), а также оценка эффективности выделения однотрековых событий в которых истинная длина траектории была больше 50 м ($Efficiency^{50}$). В таблице ниже приведены значения метрик классификации после последовательного применения каждого критерия отбора.

Критерий отбора	$Purity$, %	$Efficiency$, %	$Efficiency^{50}$, %
Трек от одиночного мюона с длиной > 50 м	90	22	74
Трек лежит в выбранной области внутри установки	91	14	47
Трек лежит полностью в одном бассейне	94	8	22
Доля ячеек кластера, лежащая на реконструированном треке больше 40 %	96	7	22

На рисунке снизу представлена зависимость углового разрешения от энергии мюона с применением всех выбранных критериев отбора.



Заключение

Был разработан алгоритм выделения траекторий от одиночных окологоризонтальных мюонов высоких энергий в установке WCDA. Чистота выделения одиночных траекторий составила 96%, эффективность 7% относительно всех траекторий и 22% от траекторий с длиной больше 50 метров. Угловое разрешение лучше чем 1.5°.

kyrinov.ko@gmail.com