

УДК 524.1

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА АТМОСФЕРНЫХ МЮОНОВ В ДИАПАЗОНЕ ЗЕНИТНЫХ УГЛОВ 85° – 95°

Е. И. Яковлева, В. А. Хомяков, С. С. Хохлов

Приведены результаты исследования околоризонтального потока мюонов в диапазоне зенитных углов 85° – 95° градусов. В этом диапазоне, в частности, регистрируются так называемые альбедные мюоны (атмосферные мюоны, рассеянные в грунте обратно в верхнюю полушару). Анализируются данные измерительных серий, проведенных на экспериментальном комплексе НЕВОД–ДЕКОР за 30 тысяч часов “живого” времени. Методом Монте-Карло по различным моделям проведено моделирование процессов многократного кулоновского рассеяния мюонов в грунте. Измеренная интенсивность потока мюонов сопоставлена с результатами моделирования.

Ключевые слова: альбедные мюоны, черенковский водный детектор, координатно-трековый детектор, околоризонтальный поток мюонов.

Введение. Исследование околоризонтального потока атмосферных мюонов представляет интерес как с точки зрения изучения космических лучей высоких энергий, так и для оценки фона в нейтринных экспериментах. Современные нейтринные обсерватории разворачиваются в озерах, морях и ледниках Антарктиды (БНТ-200+, ANTARES, IceCube) и достигают эффективного объема в 1 км^3 . Их работа основана на регистрации черенковского излучения, возникающего при прохождении релятивистских заряженных частиц через воду детектора. Проходя сквозь Землю, нейтрино в результате взаимодействия с ядрами мишени может образовать мюон или каскад, которые приходят из нижней полусферы и регистрируются детектирующими системами. Однако мюоны, идущие из верхней полусферы, могут претерпевать рассеяние в грунте или воде (льде) и имитировать мюоны, приходящие из нижней полусферы, – это так называемые альбедные мюоны. Такие мюоны являются основным источником неаппаратного фона

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31; e-mail: EYakovleva@mephi.ru.

в подземных нейтринных экспериментах. Теоретические оценки потока альбедных мюонов зависят от используемых моделей, которые дают расходящиеся результаты; поэтому экспериментальные данные по атмосферным мюонам из нижней полусферы играют важную роль для физики нейтрино космических лучей.

Экспериментальные данные. Экспериментальный комплекс НЕВОД–ДЕКОР (НИ-ЯУ МИФИ, г. Москва) предназначен для регистрации всех компонент космических лучей на поверхности Земли, в том числе и альбедных мюонов. Основой комплекса является черенковский водный детектор (ЧВД) НЕВОД [1] объемом 2000 м^3 с детектирующей системой в виде пространственной решетки из 91 квазисферического модуля (КСМ), каждый из которых состоит из 6 фотоумножителей с плоским фотокатодом, направленных по осям ортогональной системы координат. Такая конструкция позволяет восстанавливать направление прихода черенковского света с любого направления практически с равной эффективностью уже на уровне одного КСМ. Вокруг бассейна развернут координатно-трековый детектор ДЕКОР [2] площадью 70 м^2 , в состав которого входят восемь супермодулей (СМ), состоящих из 8 вертикально расположенных плоскостей газоразрядных трубок, работающих в режиме ограниченного стримера. Координатно-трековый детектор позволяет выделять треки заряженных частиц с высокой угловой (лучше 1°) и пространственной (около 1 см) точностью.

В работе анализировались данные измерительных серий, проведенных на экспериментальном комплексе в 2002–2004 годах (10548 часов “живого” времени), и серий, проведенных после модернизации регистрирующей и детектирующей систем ЧВД [3] в 2011–2015 годах (19843 часа “живого” времени).

Отбирались события, в которых сработало два супермодуля, расположенных вдоль противоположных коротких сторон бассейна (СМ00, СМ01 и СМ06, СМ07), причем восстановленные каждым супермодулем треки согласуются в пределах конуса с раствором 5° и предположительно являются треками одного мюона. Тогда в качестве трека мюона принимается “средний” трек, проходящий через центры треков в каждом СМ. Такие события регистрируются в интервале зенитных углов 85° – 95° , пороговая энергия мюонов составляет примерно 7 ГэВ.

Поскольку поток мюонов из верхней полусферы на несколько порядков больше, чем поток мюонов, летящих в восходящем направлении (из-под горизонта), ключевым моментом в выделении альбедных мюонов является надежное определение направления движения частицы.

На экспериментальном комплексе одновременно реализованы два метода определения направления – с использованием направленности черенковского излучения и на основе времяпролетной методики.

Обычно при регистрации событий с околоразрешенными мюонами большинство сработавших ФЭУ направлены в сторону прихода мюона, поэтому определить направление движения частицы можно по относительной разнице амплитуд сработавших ФЭУ, ориентированных в противоположные короткие стороны бассейна.

Триггерная система координатно-трекового детектора содержит информацию об относительных временах срабатывания супермодулей с дискретностью 25 нс. Время пролета мюона между СМ составляет около 90 нс, поэтому события могут быть разделены и времяпролетным методом.

Перекрестный анализ методов показал, что вероятность ошибки амплитудного метода составляет $\sim 10^{-3}$ для измерительных серий 2002–2004 годов и $\sim 10^{-5}$ для измерительных серий 2011–2015 годов. Вероятность ошибки времяпролетного метода для всех серий $\sim 10^{-3}$. Совместное использование двух методов позволяет снизить вероятность ошибки определения направления движения мюона до $\sim 10^{-6}$ и $\sim 10^{-8}$ для серий 2002–2004 и 2011–2015 годов соответственно, при этом эффективность отбора событий составляет $\sim 96\%$ [4].

На рис. 1 представлен пример события с альбедным мюоном. Наклонные линии – это треки, восстановленные по данным каждого супермодуля, и реконструированный “средний” трек. Крестиками отмечены сработавшие КСМ, кружками – сработавшие ФЭУ. Сработал 41 фотоумножитель, направленный в сторону СМ06, и только 2 ФЭУ,

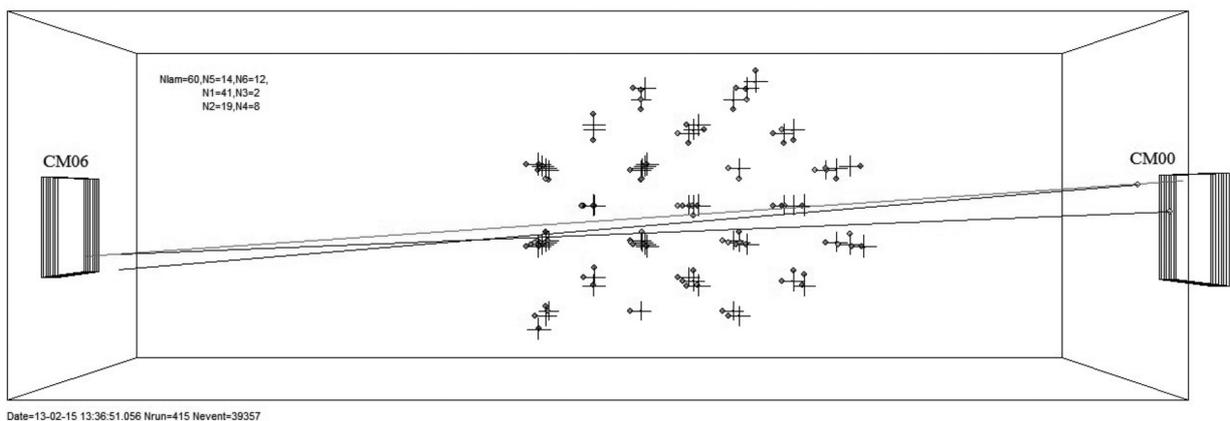


Рис. 1: Пример события с альбедным мюоном ($\theta = 94.1^\circ$).

направленных в сторону СМ00, что указывает на то, что мюон пришел из-под горизонта.

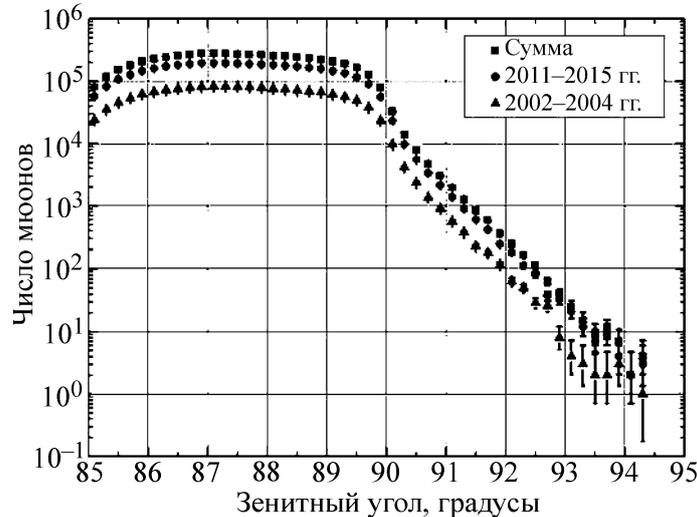


Рис. 2: Распределение зарегистрированных мюонов по зенитному углу.

В течение эксперимента в диапазоне зенитных углов 85° – 95° было зарегистрировано 5.46 млн мюонов. Распределение мюонов по зенитному углу приведено на рис. 2. При этом 5717 мюонов пришли в установку под зенитными углами более 91° , т.е. являются альбедными. Результаты измерений 2002–2004 и 2011–2015 годов хорошо согласуются между собой.

Интенсивность потока мюонов. На основе данных о светосиле детектора ДЕКОР распределение мюонов по зенитному углу было пересчитано в интенсивность потока мюонов, результаты представлены на рис. 3. Из-за особенностей рельефа поверхности в окрестности экспериментального комплекса, интенсивность посчитана отдельно для потока мюонов, прошедших через ЧВД от СМ 06, 07 к СМ 00, 01 (интервал азимутальных углов 75° – 105°), и для мюонов, прошедших в обратном направлении (интервал азимутальных углов 255° – 285°). Географически интервалу углов 255° – 285° соответствует направление, на котором расположена возвышенность; интенсивность потока мюонов вблизи горизонта с этой стороны значительно ниже.

С помощью метода Монте-Карло было проведено моделирование прохождения мюонов в поверхностных слоях грунта. Расчеты проводились для моделей рассеяния мюонов в приближениях точечного ядра (теория Мольера [5, 6]) и ядра конечных размеров согласно [7]. Энергия мюонов моделировалась в зависимости от зенитного угла на основе дифференциального спектра мюонов, рассчитанного по формулам Л. В. Волковой

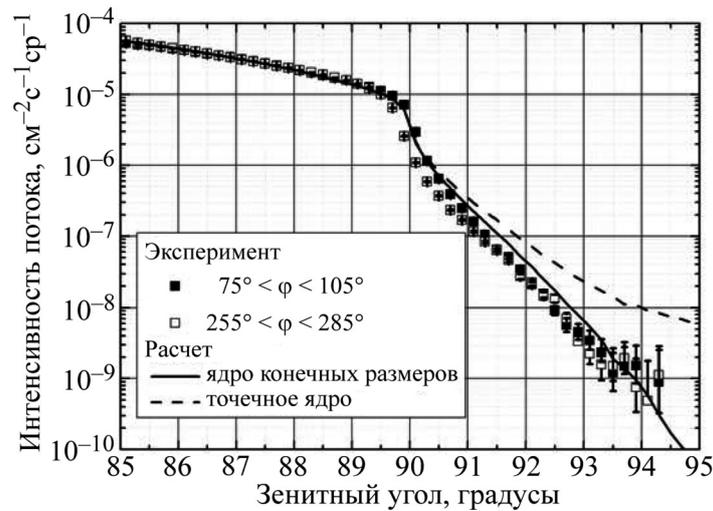


Рис. 3: Зависимость интенсивности потока мюонов от зенитного угла.

[8] в предположении степенного спектра первичных космических лучей с показателем интегрального спектра $\gamma = -1.7$. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными на рис. 3. Из рисунка видно, что рассчитанное число альбедных мюонов при использовании модели точечного ядра значительно превышает экспериментальные результаты, а использование модели рассеяния на ядре конечных размеров неплохо согласуется с экспериментальным потоком со стороны относительно ровной поверхности грунта.

Заключение. В результате измерительных серий общей продолжительностью около 30 тысяч часов “живого” времени на экспериментальном комплексе НЕВОД–ДЕКОР измерена интенсивность потока атмосферных мюонов в диапазоне зенитных углов 85° – 95° . Найдено, что применение модели рассеяния, разработанной в приближении точечного ядра (теория Мольера), приводит к сильному завышению расчетного потока альбедных мюонов по сравнению с экспериментом. Использование модели рассеяния на ядре конечных размеров неплохо согласуется с экспериментальным потоком, точность данной модели можно будет оценить после детального учета рельефа местности вблизи установки.

Работа выполнена в Научно-образовательном центре НЕВОД (НИЯУ МИФИ) при поддержке гранта Президента РФ МК–7145.2015.2 и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. M. Aynutdinov, V. V. Kindin, K. G. Kompaniets, et al., *Astrophysics and Space Science* **258**, 105 (1998).
- [2] Н. С. Барбашина, А. А. Езубченко, Р. П. Кокоулин и др., *ПТЭ*, № 6, 20 (2000).
- [3] V. V. Kindin, M. B. Amelchakov, N. S. Barbashina, et al., *Physics Procedia* **74**, 435 (2015).
- [4] В. С. Кругликова, Н. С. Барбашина, А. Г. Богданов и др., *Изв. РАН. Сер. физ.* **79**(3), 408 (2015).
- [5] V. G. Moliere and Z. Naturforschg **2a**, 133 (1947).
- [6] H. A. Bethe, *Phys. Rev.* **89**, 1253 (1953).
- [7] A. V. Butkevitch, R. P. Kokoulin, G. V. Matushko, and S. P. Mikheyev, *NIM A* **488**, 282 (2002).
- [8] Т. П. Аминева, В. А. Астафьев, А. Я. Варковицкая и др., *Исследование мюонов высоких энергий. Метод рентгеноэмulsionных камер* (М., Наука, 1975).

По материалам V Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.

Поступила в редакцию 12 июля 2016 г.