

ВЫДЕЛЕНИЕ СИГНАЛА И РЕКОНСТРУКЦИЯ ОКОЛОВЕРТИКАЛЬНЫХ МЮОННЫХ ТРЕКОВ ПО ДАННЫМ ОДНОЙ ГИРЛЯНДЫ УСТАНОВКИ BAIKAL-GVD**М.Г. Крестьянских, И.А. Первалова**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», Иркутск, Россия,
quatumax@gmail.com**HIT SELECTION AND RECONSTRUCTION OF NEAR-VERTICAL MUON TRACKS BASED ON DATA FROM ONE STRING OF THE BAIKAL-GVD****M.G. Krestyanskikh, I.A. Perevalova**

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Аннотация. Байкальский нейтринный телескоп является глубоководной установкой, используемой для обнаружения астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий вплоть до 10^{18} эВ. Нейтрино крайне слабо взаимодействует с веществом, поэтому процесс его регистрации достаточно сложен. Пролетая сквозь Землю, нейтрино может вступить в слабое взаимодействие со средой с образованием вторичной частицы, например, мюона, который сохраняет направление первоначального нейтрино, а также известную часть его энергии. Порождённый таким образом мюон, двигаясь в воде, обладает скоростью, превышающей фазовую скорость света и поэтому производит черенковское излучение. Работа посвящена выделению сигнальных данных от мюонов с энергией 100 ГэВ и реконструкции их треков на одной гирлянде установки Baikal-GVD. Процедура отбора основана на циклическом построении теоретических временных окон, в которые должны укладываться сигналы на соответствующих каналах. Процедура была применена к модельным данным. Исследуется интервал малых зенитных углов (от 0 до 30 градусов).

Ключевые слова: нейтрино, Байкальский Нейтринный Телескоп, обработка данных, реконструкция мюонного трека, фитирование.

Abstract. Baikal neutrino telescope is a deep water installation used for detection of high-energy astrophysical neutrinos, with energies up to 10^{18} eV. Neutrinos interact with matter extremely weakly, so the process of its registration is quite complicated. Flying through the Earth, a neutrino can interact weakly with the matter, with secondary particle appearing, for example muon, which keeps direction the first neutrino direction, and its known energy part as well. Moving in water, a muon that appeared this way has the speed exceeding the phase speed of light and, therefore, outputs Cherenkov radiation. The work is devoted to the isolation of signal data from muons with an energy of 100 GeV and the reconstruction of their tracks on one string of the Baikal-GVD. The selection procedure is based on the cyclic construction of theoretical time windows, in which the signals on the corresponding channels should fit. The procedure was applied to the model data. The interval of small zenith angles (from 0 to 30 degrees) is investigated.

Keywords: neutrino, Baikal Neutrino Telescope, Baikal-GVD, data analysis, muon track reconstruction, fit.

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы являлась реализация процедуры реконструкции околорвертикальных мюонных треков по одной гирлянде нейтринного телескопа и применение процедуры к данным Монте-Карло с использованием нового моделирования. Байкальский нейтринный телескоп может восстанавливать большую часть высокоэнергичных событий, однако вблизи зенита имеется «слепое пятно» и низкоэнергичные околорвертикальные события отбрасываются вместе с шумом на этапе обработки. Отсюда возникает необходимость реконструкции треков с малыми зенитными углами.

ЧТО ЗНАЧИТ РЕКОНСТРУИРОВАТЬ ТРЕК?

Нейтрино летят со всех возможных направлений, и два параметра: зенитный угол θ и азимутальный угол ϕ однозначно определяют направление трека мюона (а вместе с ним и нейтрино). Зная времена срабатывания оптических модулей и их координаты можно определить траекторию мюона. Полное восстановление траектории возможно только при условии, что ОМ разнесены в пространстве и образуют трехмерную структуру. Стандартная процедура реконструкции включает события, зарегистрированные как минимум на

двух различных гирляндах, и нацелена на анализ частиц и каскадов сверхвысоких энергий. В данной же работе рассматривается реконструкция на одной гирлянде, рассматриваются мюоны с энергией 100 ГэВ и исследуется диапазон малых зенитных углов мюона (от 0 до 30 градусов). Данное значение энергии расположено вблизи порога чувствительности ФЭУ. На одной гирлянде возможно восстановление только по зенитному углу θ и невозможно по азимутальному углу ϕ из-за радиальной симметрии гирлянды.

РЕКОНСТРУКЦИЯ МЮОННОГО ТРЕКА

Трек мюона можно задать четырьмя величинами: u_z — косинусом зенитного угла θ ; Наименьшим расстоянием между треком и гирляндой d_c ; Соответствующей высотой z_c ; Моментом времени, когда мюон максимально приближается к гирлянде t_c .

Эти параметры входят в функцию зависимости времени сигнала от высоты, на которой расположен ОМ [1]:

$$t_\gamma(z) = t_c - t_0 + \frac{1}{c} \left((z - z_c)u_z + \frac{n^2 - 1}{n} d_\gamma(z) \right),$$

$$d_\gamma(z) = \frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} \sqrt{d_c^2 + (z - z_c)^2 (1 - u_z^2)},$$

Зная времена срабатывания ОМ и высоты, на которых они расположены, можно восстановить косинус зенитного угла (u_z) фитированием функции $t_\gamma(z)$.

Процедура реконструкции была применена к модельным данным. Моделировались мюонные треки с зенитными углами в диапазоне от 0 до 30 градусов и энергиями 100 ГэВ.

ОТБОР ДАННЫХ

Цель выбора сигнала — выбрать попадания (хиты), обусловленные фотонами Черенкова, и избежать случайных хитов оптического фона или рассеянных поздних хитов.

Для треков, которые не параллельны линии детектора, большая часть черенковского излучения ожидается вблизи точки наибольшего приближения трека к линии детектора. Таким образом, первый шаг выбора хита состоит в нахождении «горячей точки» света на линии детектора, которая возникает из черенковского света, индуцированного пролетающей частицей. При наличии фонового освещения единичный хит высокого заряда не обеспечивает достаточной чистоты «горячей точки»; необходимо как минимум два хита высокого заряда на соседних и смежных каналах. Каналы нумеруются последовательно по оси z . Для данного канала i соседние и смежные каналы имеют номера $i \pm j$ с $j = 1, 2$. Чтобы гарантировать, что хиты на каналах i и $i \pm j$ были вызваны одной и той же частицей, накладывается следующее условие на абсолютную разницу во времени двух хитов Δt (условие причинности):

$$\Delta t < j\Delta z \frac{n}{c} + t_s,$$

где Δz — абсолютное расстояние по вертикали между соседними каналами, c — скорость света в вакууме, n — показатель преломления среды и t_s — дополнительная временная задержка, компенсирующая упрощение геометрии детектора. Здесь рассматриваются только объединенные хиты, которые происходят от разных ФЭУ или с зарядом более 2,5 фотоэлектронов, поскольку они с высокой вероятностью могут быть вызваны треком частицы. Новые попадания рекурсивно ищутся в узком временном окне вокруг времени уже выбранных попаданий. Из анализа разности времен срабатывания двух соседних и смежных ОМ следует, она не превышает 60 нс для соседних каналов и 105 нс для смежных (рис. 1). Тогда границы временных окон для соседних каналов будут следующие:

$$t_{early} = t_i - 60,$$

$$t_{late} = t_i + 60,$$

Данные с временными окнами приведены на рис. 2.

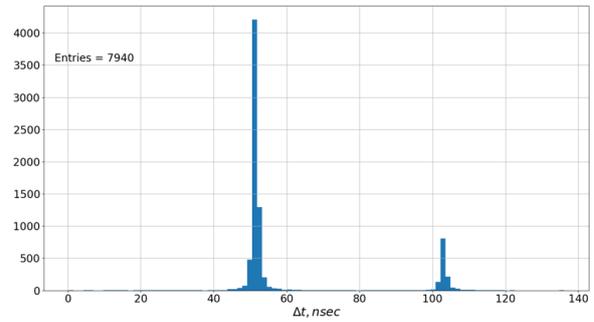


Рис. 1. Гистограмма распределения разности времен срабатывания двух ОМ

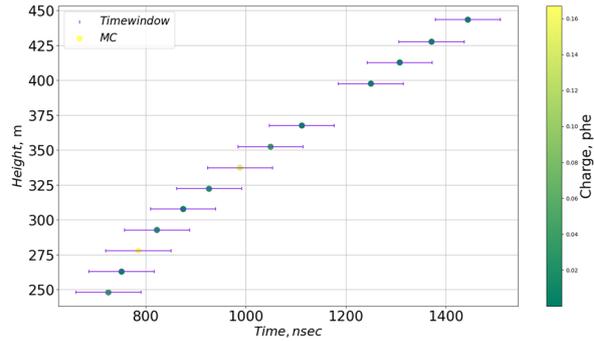


Рис. 2. Мюонное событие по данным МС с зенитным углом 29.01 градусов. Фиолетовыми линиями отображены временные окна.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате работы была проведена реализована процедура отбора и реконструкции околоразвертикальных мюонных треков по данным одной гирлянды. Пример восстановленного события представлен на рис. 3. Для оценки точности были построены гистограммы разности восстановленных и модельных параметров трека (рис. 4). Описанная процедура фитирования позволяет восстанавливать зенитный угол околоразвертикальных мюонных треков.

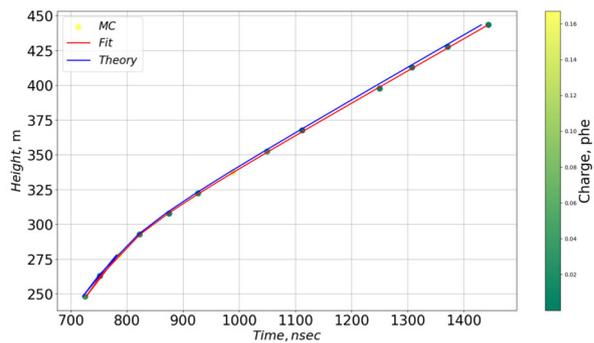


Рис. 3. Восстановленное мюонное событие по данным МС с зенитным углом 29.01 градусов. Кривая, полученная при подстановке параметров моделирования в выражение зависимости $t_\gamma(z)$ представлена синим цветом.

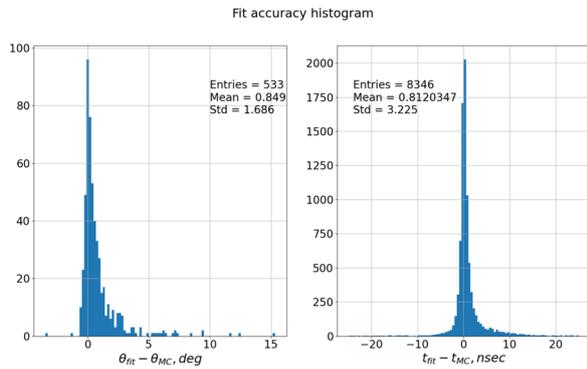


Рис. 4. Гистограммы точности восстановления зенитного угла (слева) и времени (справа) по 533 событиям

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект FZZE-2022-0001

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ageron M. et al. Performance of the First ANTARES Detector Line // *Astroparticle Phys.* 2009. V. 31(4). P. 277–283.
- Aguilara J.A. et al. A Fast Algorithm for Muon Track Reconstruction and its Application to the ANTARES Neutrino Telescope // *Astroparticle Phys.* 2011. N 34. P. 652–662.
- Arends H. et al. Muon Track Reconstruction and Data Selection Techniques in AMANDA // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment.* 2004. V. 524(1–3). P. 169–194.