

КРИВАЯ ПОГЛОЩЕНИЯ И УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ МЮОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В ВОДНОЙ СРЕДЕ: НОВЫЙ РАСЧЕТ

А.В. Кузьмицкий, А.А. Кочанов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия,
a.kuzmitskiy@iszf.irk.ru

DEPTH INTENSITY RELATION AND ANGULAR DISTRIBUTION OF THE HIGH-ENERGY ATMOSPHERIC MUONS IN WATER MEDIUM: NEW CALCULATION

A.V. Kuzmitskiy, A.A. Kochanov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, a.kuzmitskiy@iszf.irk.ru

Аннотация. Одной из актуальных задач астрофизики высоких энергий является поиск космических нейтрино и определение их источников. Для решения этой задачи создаются детекторы большого объема – нейтринные телескопы, которые регистрируют черенковское излучение от заряженных частиц, генерируемых во взаимодействиях нейтрино в среде. Черенковский свет могут давать не только рожденные от нейтрино мюоны или адронные ливни, но и транзитные атмосферные мюоны. Поэтому анализ событий, зарегистрированных в нейтринных телескопах, требуют тщательного исследования фона мюонов. Необходимо знать характеристики потоков мюонов, рожденных в атмосфере Земли, и их зенитно-угловые распределения вблизи детектора. В настоящей работе представлены кривая поглощения и зенитно-угловое распределение атмосферных мюонов в водной среде озера Байкал для детектора Baikal-GVD. Расчеты выполнены с новыми граничными спектрами атмосферных мюонов на уровне моря, полученными в рамках моделей адрон-ядерных взаимодействий Кимеля-Мохова и кварк-глюонных струн QGSJET-II-03, а также параметризации спектра первичных космических лучей Хилласа-Гайсера.

Ключевые слова: атмосферные мюоны, нейтринный телескоп

Abstract. One of the important tasks of high-energy astrophysics is the search for cosmic neutrinos and the determination of their sources. To solve this problem, large-volume detectors are being created – neutrino telescopes that register Cherenkov light from charged particles generated by neutrino interactions in the medium. Cherenkov light can be produced not only by muons from neutrinos or hadron showers, but also by transit atmospheric muons. Therefore, the analysis of events, recorded in neutrino telescopes, requires a thorough study of the background of muons. It is necessary to know the characteristics of muon fluxes generated in the Earth's atmosphere and their zenith-angular distributions near the detector. In this paper, we present the depth intensity relation and zenith-angular distribution of atmospheric muons in the water medium of Lake Baikal for the Baikal-GVD detector. Calculations were performed with new boundary spectra of atmospheric muons at sea level within the hadronic models of Kimel-Mokhov and quark-gluon strings QGSJET-II-03, as well as parameterization of the Hillas-Gaisser spectrum of primary cosmic rays.

Key words: atmospheric muons, neutrino telescope

ВВЕДЕНИЕ

Для поиска и регистрации астрофизических нейтрино высоких энергий были построены крупные нейтринные телескопы: NT-200+ (оз. Байкал) [Aynutdinov et al., 2008], IceCube (Южный полюс) [Abbasi R. et al., 2011; Aartsen M. G. et al., 2013], ANTARES (Средиземное море) [Adrian-Martinez S. et al., 2013] и сооружаются новые: Baikal-GVD [Аворин и др., 2019] и KM3NeT 2.0 (телескопы ORCA и ARCA (Средиземное море) [Adrian-Martinez et al., 2016]. Центральной задачей таких телескопов является измерение диффузного потока нейтрино от астрофизических источников, поиск галактических и локальных внегалактических источников нейтрино. Для анализа событий, зарегистрированных нейтринным телескопом, необходимо выполнить моделирование отклика детектора на прохождение через его рабочий объем мюона, нейтрино и других частиц, рождающихся в результате взаимодействия с веществом атмосферного или астрофизического нейтрино и первичного мюона, генерируемого космическими лучами в атмосфере. В результате такого моделирования вырабатываются критерии отбора полезных событий, отвечающих поставленной задаче.

В настоящей работе выполнен расчет спектров и зенитно-угловых распределений атмосферных

мюонов вблизи детектора Baikal-GVD. В качестве основного инструмента расчета потоков мюонов в водной среде выступает численно-аналитический метод решения транспортных уравнений [Naumov et al., 1994; Bugaev et al., 1998]. Граничные спектры атмосферных мюонов на уровне моря получены в работе [Kochanov et al., 2019] с помощью метода $Z(E, h)$ [Naumov, Sinegovskaya, 2000; Kochanov et al., 2008] решения уравнений адронного каскада в атмосфере Земли. Расчет граничных спектров выполнен для моделей адрон-ядерных взаимодействий Кимеля-Мохова (KM), кварк-глюонных струн QGSJET-II-03, а также параметризации спектра первичных космических лучей Хилласа-Гайсера (вариант H3a).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

На рис. 1 изображены дифференциальные спектры атмосферных мюонов на уровне моря, используемые в качестве граничных в задаче прохождения мюонов в водной среде оз. Байкал. Как видно, граничные спектры мюонов (сплошные кривые) заметно отличаются от классических расчетов работы [Bugaev et al., 1998] (штриховая кривая; вариант расчета — $I: \pi, K$ -мюоны). Спектр космических лучей имеет явный излом («колено») при энергиях

вблизи 3 ПэВ, который ярко проявляется в расчетах потоков мюонов на уровне моря. Неопределенности моделей адрон-ядерных взаимодействий также затрудняют задачу вычисления потоков мюонов. Граничный спектр, полученный в рамках модели кварк-глюонных струн QGSJET-II-03 и первичного спектра НЗа дает нижнюю оценку потока атмосферных мюонов на уровне моря.

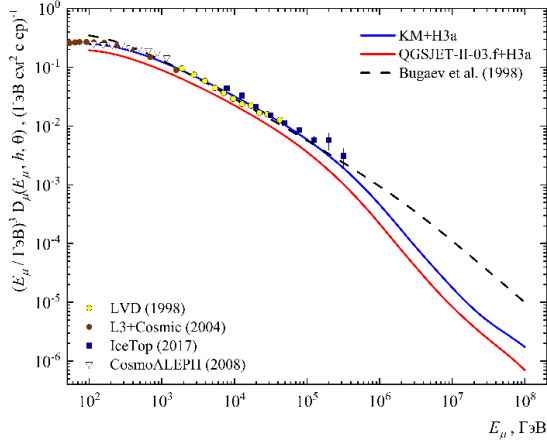


Рис. 1. Граничные спектры атмосферных мюонов на уровне моря

На рис. 2 представлены расчеты настоящей работы кривой поглощения атмосферных мюонов для приведенных на рис. 1 граничных спектров. Показаны характерные глубины 700–1300 м, где расположены оптические модули телескопа Baikal-GVD. Черными кружками нанесены данные предварительной обработки эксперимента Baikal-GVD, полученные в рамках магистерской работы [Ульзутуев, 2023]. Автору [Ульзутуев, 2023] с помощью моделирования по методу Монте-Карло и анализа эксперимента удалось воспроизвести зависимость потока мюонов от глубины, за исключением общей нормировки, которая была взята им из работы [Klimushin et al., 2001]. Как видим, наши расчеты с граничным спектром в модели KM + H3a дают меньший на $\approx 16\%$ (относительно данных Baikal-GVD) интегральный поток атмосферных мюонов;

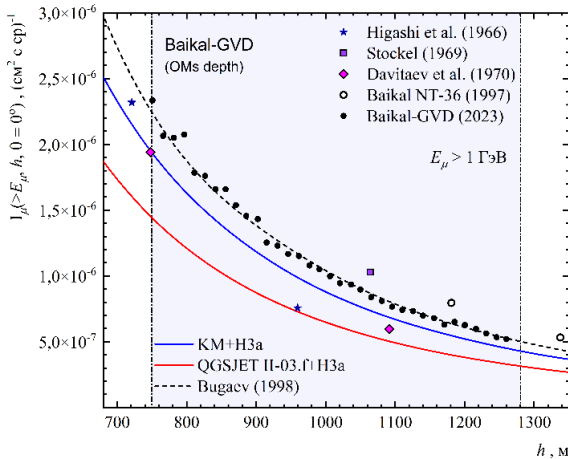


Рис. 2. Кривая поглощения атмосферных мюонов для глубин 700–1300 м

расчет QGSJET-II-03 + H3a дает меньший на $\approx 38\%$ поток. В итоге видно, что до сих пор сохраняется значительный разброс в предсказаниях потока мюонов как неустраняемого фона для проведения экспериментов по регистрации астрофизических нейтрино. При этом модельная нормировка экспериментальных данных играет ключевую роль.

Для сравнения, на рис. 3 мы приводим расчеты кривой поглощения мюонов для больших глубин (до 7 км). Видно, что результаты расчета с граничным спектром в модели QGSJET-II-03 хорошо согласуются с данными телескопа ANTARES и эксперимента NEMO, а расчет с моделью KM воспроизводит данные измерений Baikal NT-36 [Belolapnikov et al., 1997] и AMANDA [Desiati et al., 2003] для глубин $h > 2.5$ км.

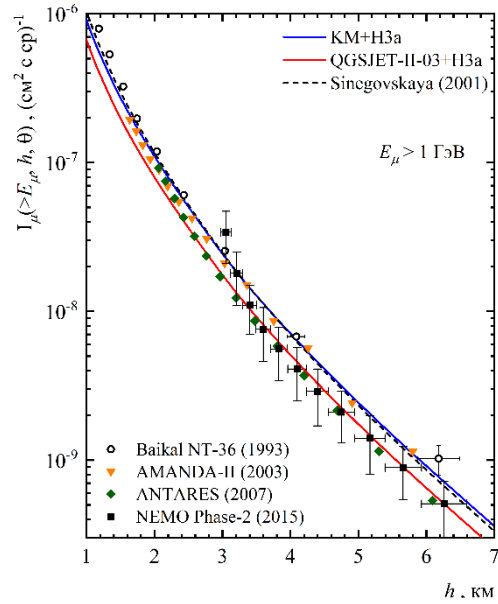


Рис. 3. Кривая поглощения атмосферных мюонов для глубин 1–7 км

На рис. 4 представлено zenith-угловое распределение мюонов для глубины 1.15 км. Как видим, различие в моделях KM и QGSJET-II-03 в среднем составляет 28%. Для сравнения приведены расчеты работ [Sinegovskaya, Sinegovsky, 2001; Klimushin et al., 2001] и данные Baikal NT-36.

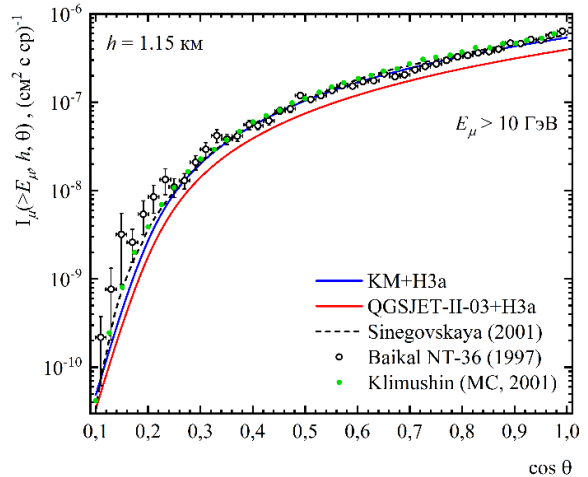


Рис. 4. Zenith-угловое распределение атмосферных мюонов на глубине 1.15 км

Результаты расчета зенитно-угловых распределений мюонов представлены с точностью до 5 % в виде параметризации для $h = 1.15$ км:

$$I_{\mu}(E_{\mu} > 10_{\text{ГэВ}}, h = 1.15_{\text{км}}, \cos \theta \geq 0.3) = C(\cos \theta - a)^n,$$

где параметры C , a и n для соответствующих моделей адрон-ядерных взаимодействий:

$$\begin{aligned} \text{KM: } C &= 7.40 \times 10^{-7}, \\ a &= 0.16, n = 1.78, 0.3 \leq \cos \theta \leq 1.0 \\ \text{QGSJET-II-03: } C &= 5.39 \times 10^{-7}, \\ a &= 0.15, n = 1.83, 0.3 \leq \cos \theta \leq 1.0 \end{aligned}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью численно-аналитического метода решения транспортных уравнений для мюонов и новых граничных спектров выполнены абсолютные (избавленные от нормировок) расчеты потоков высокоэнергетических мюонов для условий телескопа Baikal-GVD; дана параметризация зенитно-углового распределений мюонов. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными и расчетами разных авторов. По-прежнему сохраняется значительный разброс предсказаний потока мюонов (до 40 %) как фона для поиска и регистрации сигналов от астрофизических нейтрино.

Авторы с благодарностью вспоминают своего учителя С. И. Синеговского за выдвинутые им идеи и инициацию данного исследования. А. Кузьмицкий благодарит В. А. Наумова за полезные советы и обсуждение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аворин А.В. и др. Baikal-GVD – нейтринный телескоп следующего поколения на озере Байкал // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83, № 8. С. 1016–1018.

Ульзутуев Б.Б. Измерение потока атмосферных мюонов на Байкальском нейтринном телескопе Baikal-GVD: Магистерская диссертация: 03.04.01. Москва. 2023.

Aartsen M.G. et al. Measurement of the Atmospheric ν_{μ} flux in IceCube // Phys. Rev. Letters. 2013. V. 110, N 15. P. 151105.

Abbasi R. et al. Measurement of the atmospheric neutrino energy spectrum from 100 GeV to 400 TeV with IceCube // Phys. Rev. D. 2011. V. 83, N 1. P. 012001.

Adrian-Martinez S. et al. Measurement of the atmospheric ν_{μ} energy spectrum from 100 GeV to 200 TeV with the ANTARES telescope // Eur. Phys. J. C. 2013. V. 73. P. 1–12.

Adrian-Martinez S. et al. Letter of intent for KM3NeT 2.0 // J. Phys. G. 2016. V. 43, N 8. P. 084001.

Ageron M. et al. Dependence of atmospheric muon flux on seawater depth measured with the first KM3NeT detection units // Eur. Phys. J. C. 2020. V. 80. P. 1–11.

Aynutdinov V. et al. The Baikal neutrino experiment: Status, selected physics results, and perspectives // Nucl. Instrum. Meth. A. 2008. V. 588, Iss. 1–2. P. 99–106.

Belolaptikov I. A. et al. The Baikal underwater neutrino telescope: Design, performance, and first results // Astropart. Phys. 1997. V. 7, N 3. P. 263282.

Bugaev E.V. et al. Atmospheric muon flux at sea level, underground, and underwater // Phys. Rev. D. 1998. V. 58. P. 054001.

Desiati P. et al. Response of AMANDA-II to Cosmic Ray Muons // 28th International Cosmic Ray Conference. 2003. V. 3. P. 1373–1376.

Klimushin S.I., Bugaev E.V., Sokalski I.A. Parametrization of atmospheric muon angular flux underwater // Phys. Rev. D. 2001. V. 64, ISS. 1. P. 014016.

Kochanov A.A., Morozova A.D., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. High-energy atmospheric muon flux calculations in comparison with recent measurements // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V.1181. P.012054.

Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. High-energy cosmic-ray fluxes in the Earth atmosphere: Calculations vs experiments // Astropart. Phys. 2008. V. 30, N 5. P. 219–233.

Naumov V.A., Sinegovsky S.I., Bugaev E.V. High-energy cosmic-ray muons under thick layers of matter // Phys. of Atom. Nucl. 1994. V.57, N 3. P. 412–424.

Naumov V.A., Sinegovskaya T.S. Simple method for solving transport equations describing the propagation of cosmic-ray nucleons in the atmosphere // Phys. Atom. Nucl. 2000. V.63, N 11. P. 1927–1935.

Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. Prompt muon contribution to the flux underwater // Phys. Rev. D. 2001. V.63. P. 096004.