

УДК 524.1, 539.14

СПЕКТРЫ И ЗЕНИТНО-УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ И МЮОННЫХ НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

¹О.Н. Петрова, ²Т.С. Синеговская, ¹С.И. Синеговский

HIGH-ENERGY SPECTRUM AND ZENITH-ANGLE DISTRIBUTION OF ELECTRON AND MUON NEUTRINOS IN THE EARTH ATMOSPHERE

¹O.N. Petrova, ²T.S. Sinegovskaya, ¹S.I. Sinegovsky

В работе представлен расчет энергетических спектров и зенитно-угловых распределений мюонных и электронных атмосферных нейтрино в интервале энергий $10\text{--}10^7$ ГэВ, являющихся фоном для нейтрино от удаленных астрофизических источников. Расчет выполнен с использованием известных моделей адронных взаимодействий (QGSJET-II-03, SIBYLL 2.1) для двух вариантов параметризации спектра первичных космических лучей – Гайссера–Хонды и Зацепина–Сокольской. Результаты расчета спектра нейтрино сопоставлены с данными экспериментов Frejus, AMANDA-II, IceCube 40. Сравнение усредненного по зенитным углам спектра мюонных нейтрино с измеренным в эксперименте IceCube ясно показывает, что даже при энергиях выше 100 ТэВ вклад прямых нейтрино все еще незаметен из-за наложения неопределенностей сечений рождения странных (K -мезоны) и очарованных (D -мезоны) частиц.

This work presented the calculation of the energy spectra and zenith-angle distributions of the muon and electron atmospheric neutrinos in the energy range $10\text{--}10^7$ GeV which form a background to the astrophysical neutrinos. The calculation was performed with usage of known hadronic models (QGSJET-II-03, SIBYLL 2.1) for two of the primary spectrum parameterizations, by Gaisser & Honda and by Zatsepin & Sokolskaya. The calculation results are compared with the experimental data obtained with Frejus, AMANDA-II, IceCube 40. The comparison of zenith angle-averaged muon neutrino spectrum with the measurement data in IceCube experiment makes it clear that even at energies above 100 TeV no the prompt neutrino contribution becomes apparent because of tangled uncertainties in the strange (K -mesons) and charm (D -mesons) particle production cross sections.

Введение

Взаимодействие космических лучей с ядрами атомов воздуха приводит к образованию большого числа мезонов. Нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, рождающиеся в слабых распадах этих частиц, составляют неустраняемый фон при детектировании астрофизических нейтрино – важнейшей задачи, для решения которой созданы большие глубоководные телескопы HT200+ [Aynutdinov et al., 2006], ANTARES [Biagi, 2011], IceCube [Abbasi et al., 2011].

Несмотря на большое число опубликованных расчетов спектров атмосферных нейтрино, остается невыясненным, насколько велики различия, обусловленные неопределенностями существующих моделей адрон-ядерных взаимодействий при высоких энергиях – в области, где нет прямых измерений сечений взаимодействия частиц. Также неясны неопределенности восстановления спектра и состава первичных космических лучей в окрестности «колена» по экспериментальным данным установок, регистрирующих широкие атмосферные ливни (ШАЛ).

Область высоких и сверхвысоких энергий становится доступной для экспериментального изучения атмосферных нейтрино только в последние годы. К настоящему моменту энергетический спектр атмосферных мюонных нейтрино высоких энергий измерен на трех установках: Frejus [Daum et al., 1995] при энергиях до 1 ТэВ, AMANDA-II [Abbasi et al., 2010] в интервале энергий 1–100 ТэВ, IceCube 40 [Abbasi et al., 2011] в диапазоне 100 ГэВ – 400 ТэВ. Основной вклад в нейтринный поток вблизи 400 ТэВ должны давать распады очарованных частиц, что остается источником наибольшей неопределенности. Поэтому сравнение расчета для разных моделей адронных взаимодействий с результатами измерений спектра нейтрино представляет интерес, несмотря на

большие статистические и систематические ошибки эксперимента.

Представленный в данной работе расчет потоков атмосферных нейтрино в интервале энергий $10\text{--}10^7$ ГэВ для зенитных углов от 90° до 180° и усредненного по зенитному углу энергетического спектра выполнен с использованием моделей адронных взаимодействий SIBYLL 2.1 [Fletcher et al., 1994; Ahn et al., 2009] и QGSJET-II [Ostapchenko, 2006], которые широко используются для моделирования ШАЛ по методу Монте-Карло, а также для расчетов потоков адронов и мюонов космических лучей [Kochanov et al., 2008; Sinegovsky et al., 2010a]. Приведены результаты сравнения рассчитанного спектра мюонных нейтрино с экспериментом.

Расчет спектров атмосферных нейтрино и данные измерений

Расчет выполнен на основе метода [Kochanov et al., 2008] решения уравнений адрон-ядерного каскада, который позволяет учесть нестепенной характер первичного спектра космических лучей, нарушение скейлинга сечений рождения частиц и рост с энергией полных неупругих сечений адрон-ядерных столкновений (см. также [Sinegovsky et al., 2010a]).

Модель спектра первичных космических лучей Зацепина и Сокольской (ZS) [Zatsepin, Sokolskaya, 2006] хорошо описывает данные прямых измерений ATIC-2 в интервале $10\text{--}10^4$ ГэВ [Панов и др., 2007] и дает мотивированную экстраполяцию этих данных на область энергий до 100 ПэВ, где спектр и состав восстанавливаются из характеристик широких атмосферных ливней. Другой используемый вариант – известная параметризация спектра и состава первичных космических лучей Гайссера–Хонды (GH) [Gaisser, Honda, 2002], точнее ее версия с учетом высокого содержания ядер гелия. Обе модели согласуются с данным эксперимента KASCADE [Apel et al., 2009].

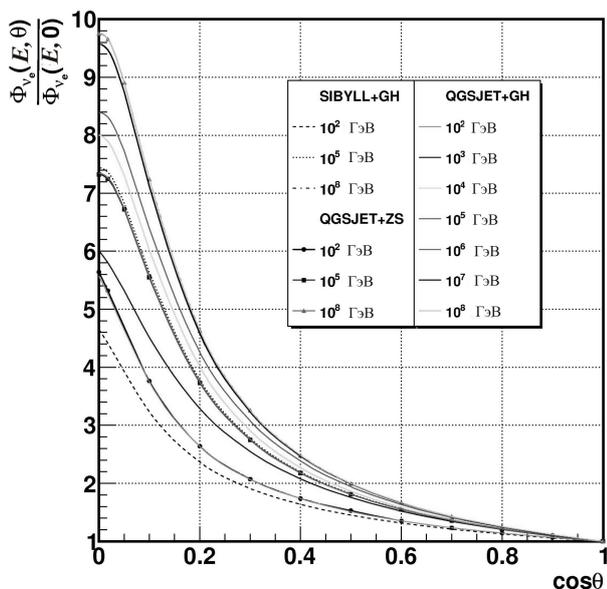


Рис. 1. Зенитно-угловое распределение электронных нейтрино, рассчитанное для двух моделей адрон-ядерных взаимодействий.

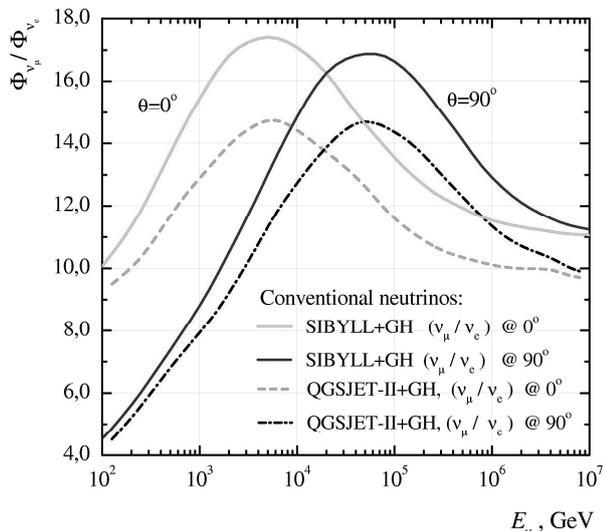


Рис. 2. Отношения потоков мюонных и электронных нейтрино.

Зенитно-угловые распределения электронных нейтрино $\Phi_{\nu_e}(E, \theta) / \Phi_{\nu_e}(E, 0^\circ)$ в интервале энергий $1-10^5$ ТэВ (рис. 1) рассчитаны с использованием моделей QGSJET-II-03 и SIBYLL 2.1 для спектров первичных космических лучей GH и ZS. Влияние первичных спектров и адронных моделей на угловое распределение нейтрино при энергиях выше 1 ТэВ едва заметно. Распределения мюонных нейтрино (см. [Sinegovsky et al., 2010]) похожи на распределения электронных, но в области высоких энергий потоки $(\nu_e + \bar{\nu}_e)$ примерно на порядок меньше потоков $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)$ (рис. 2).

Сравнение усредненных по зенитному углу спектров $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)$ нейтрино от μ -, π -, K-распадов с данными, полученными на установках Frejus, AMANDA-II и IceCube [Abbasi et al., 2011], показано на рис. 3, 4. Различие спектров по моделям Гайссе-

ра-Хонды и Зацепина-Сокольской становится заметным после 100 ТэВ, где на потоке нейтрино скажется излом первичного спектра космических лучей. При энергии 1 ПэВ расчетный поток нейтрино для спектра GH пятикратно превышает поток для спектра ZS. Различие предсказаний для моделей SIBYLL 2.1 и QGSJET-II-03 достаточно велико в широком диапазоне энергий (рис. 4) – до 70 % в максимуме.

Суммарный спектр обычных и прямых нейтрино (рис. 5), рассчитанный с использованием QGSJET-II-03 и модели кварк-глюонных струн (QGSM) [Bugaev et al., 1989, 1998], неплохо описывает данные IceCube. Предсказанные с использованием QGSM потоки мюонных нейтрино в интервале энергий

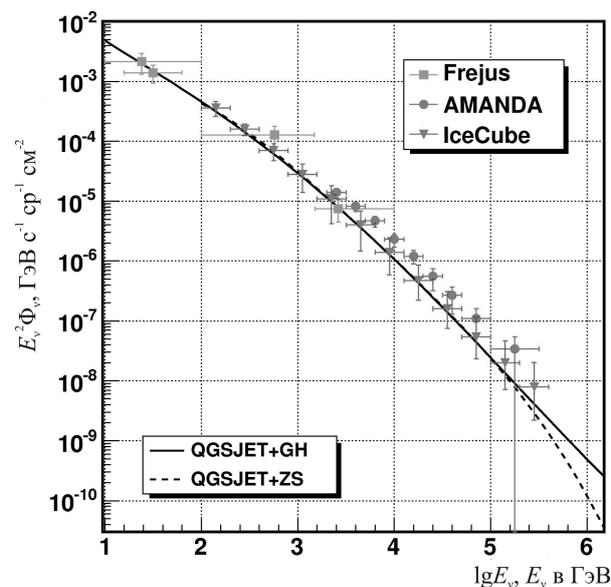


Рис. 3. Энергетический спектр мюонных нейтрино, усредненный по зенитному углу (зависимость от первичного спектра). Точки – данные экспериментов Frejus, AMANDA-II, IceCube 40.

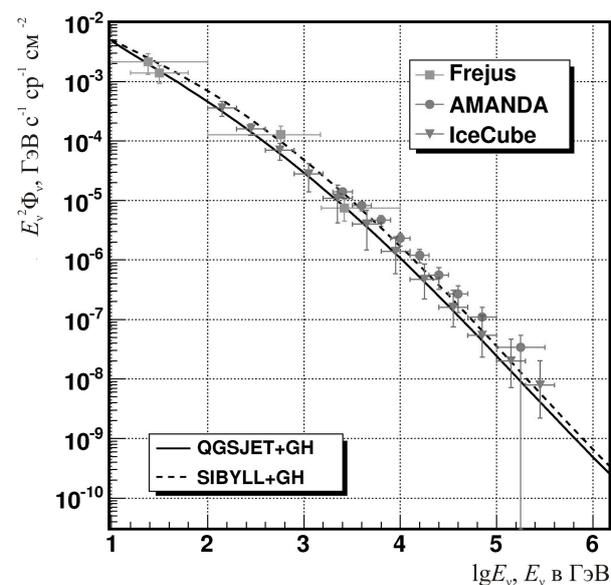


Рис. 4. Энергетический спектр мюонных нейтрино, усредненный по зенитному углу (зависимость от модели адронных взаимодействий).

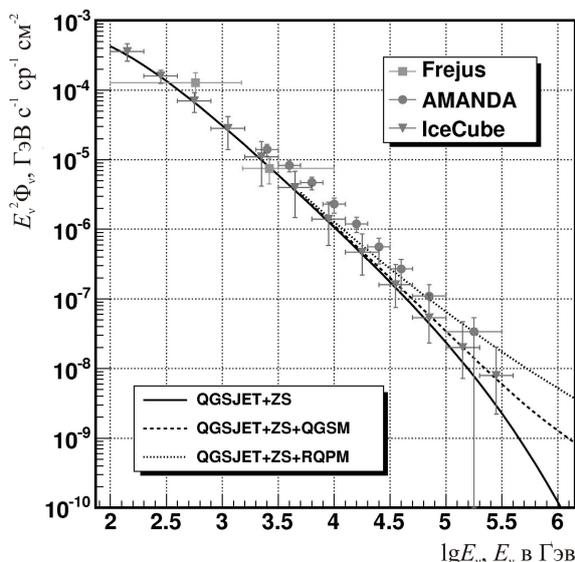


Рис. 5. Потоки мюонных нейтрино от μ -, π -, K -, D -распадов. Экспериментальные данные – Frejus, AMANDA-II и IceCube 40. Расчеты для первичного спектра Зацепина–Сокольской (ZS): сплошная линия – обычные нейтрино (от μ -, π -, K -распадов); пунктирная – сумма обычных нейтрино и нейтрино от чарма в рамках RQPM, штриховая – то же самое, но для «прямых» нейтрино в QGSM.

200–400 ТэВ не противоречат ограничению на диффузный поток астрофизических нейтрино ($7.2 \times 10^{-9} \text{ E}^{-2} \text{ ГэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$), установленному в эксперименте IceCube 59 [Schukraft et al., 2011] для интервала энергий 160 ТэВ – 40 ПэВ. В отличие от QGSM, рекомбинационная кварк-партоновая модель (RQPM на рис. 5) предсказывает завышенный поток мюонных нейтрино, не согласующийся со спектром, полученным в эксперименте IceCube 40.

Заключение

Расчет спектров атмосферных нейтрино показал слабую зависимость от модели спектра и состава первичных космических лучей в области $10\text{--}10^5 \text{ ГэВ}$, не включающей излом спектра космических лучей. Однако использование моделей адронных взаимодействий QGSJET-II и SIBYLL 2.1 приводит к заметному различию потоков нейтрино. При энергиях до 100 ТэВ основным источником этого являются процессы рождения каонов. При более высоких энергиях вмешиваются неопределенности, связанные с сечениями рождения очарованных частиц.

Сравнение расчета потока мюонных нейтрино с измерениями в эксперименте IceCube 40 показывает, что модель QGSJET-II-03 является более предпочтительной по сравнению с SIBYLL 2.1. Учет вклада прямых нейтрино в рамках QGSM приводит к улучшению согласия расчета и эксперимента. Верхний предел на диффузные потоки астрофизических нейтрино, установленный в эксперименте IceCube 59 [Schukraft et al., 2011] для интервала 160 ТэВ – 40 ПэВ, позволяет получить ограничения на модели рождения очарованных частиц. Модель кварк-глюонных струн не противоречит этому пределу, а предсказание потока прямых нейтрино [Bugaev et al., 1989] в рамках рекомбинационной кварк-партоновой модели не получает подтверждения.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК № 14.740.11.0890, П681) и АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (грант 2.2.1.1/12360).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Панов А.Д., Адамс Дж.Х., Ан Х.С. и др. Элементарные энергетические спектры космических лучей по данным эксперимента ATIC-2 // Известия РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. С. 512–515.
- Abbasi R., Abdou Y., Abu-Zayyad T., et al. The energy spectrum of atmospheric neutrinos between 2 and 200 TeV with the AMANDA-II detector // Astropart. Phys. 2010. V. 34. P. 48–58.
- Abbasi R., Abdou Y., Abu-Zayyad T., et al. (IceCube Collaboration). Measurement of the atmospheric neutrino energy spectrum from 100 GeV to 400 TeV with IceCube // Phys. Rev. D. 2011. V. 83, Iss. 1. 012001.
- Ahn E.-J., Engel R., Gaisser T.K., et al. Cosmic ray interaction event generator SIBYLL 2.1 // Phys. Rev. D. 2009. V. 80. P. 094003.
- Apel W. D., Arteaga J.C., Badea A.F., et al. Energy spectra of elemental groups of cosmic rays: Update on the KASCADE unfolding analysis // Astropart. Phys. 2009. V. 31. P. 86–91.
- Aynutdinov V., Balkanov V., Belolaptikov I., et al. Search for a diffuse flux of high-energy extraterrestrial neutrinos with the NT200 neutrino telescope // Astropart. Phys. 2006. V. 25. P. 140–150.
- Biagi S. Upper limit on the diffuse flux of cosmic ν_{μ} with ANTARES Neutrino Telescope // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2011. V. 212–213. P. 109–114.
- Bugaev E.V., Naumov V.A., Sinegovsky S.I., Zaslavskaya E.S. Prompt leptons in cosmic rays // Nuovo Cim. C. 1989. V. 12. P. 41–73.
- Bugaev E.V., Misaki A., Naumov V.A., et al. Atmospheric muon flux at sea level, underground and underwater // Phys. Rev. D. 1998. V. 58. P. 054001; hep-ph/9803488.
- Daum K., Rhode W., Bareyre P., et al. Determination of the atmospheric neutrino spectra with the Frejus detector // Z. Phys. C. 1995. V. 66. P. 417–428.
- Gaisser T.K., Honda M. Flux of atmospheric neutrinos // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2002. V. 52. P. 153–199.
- Fletcher R.S., Gaisser T. K., Lipari P., Stanev T. SIBYLL: An event generator for simulation of high-energy cosmic ray cascades // Phys. Rev. D. 1994. V. 50. P. 5710–5731.
- 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. P. 219–233.
- Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. Impact of high-energy hadron interactions on the atmospheric neutrino flux predictions // Proc. of the 31th International Cosmic Ray Conference. 7–15 July 2009, Lodz, Poland. OG 2.5, ID. 0693. arXiv: 0906.067143v1 [astro-ph.HE].
- Ostapchenko S. QGSJET-II: towards reliable description of very high energy hadronic interactions // Nucl. Phys. B. 2006. V. 151. P. 143–146. (Proc. Suppl.).
- Sinegovsky S.I., Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S., et al. Atmospheric muon flux at PeV energies // Int. J. Mod. Phys. A. 2010. V. 25. P. 3733–3740. arXiv:0906.3791.
- Sinegovsky S.I., Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S. High-energy atmospheric neutrinos // Proc. XVI ISVHECRI. 2010, Batavia, IL, C37. Fermilab eConf C1006284. eds H. Glass, L.W. Jones, B. Pattison, <http://www.slac.stanford.edu/econf/C1006284>. arXiv:1010.2336.
- Schukraft A., Walraff M., Grullon S. Search for a diffuse flux

of astrophysical muon neutrinos with the IceCube detector // Proc. 32 ICRC. 2011. Beijing. 0736. <http://indico.ihep.ac.cn/contributionDisplay.py?contribId=736&sessionId=52&confId=1628>.

Zatsepin V.I., Sokolskaya N.V. Three component model of cosmic ray spectra from 10 GeV to 100 PeV // *Astronomy & Astrophys.* 2006. V. 458. P. 1–5.

¹*Иркутский государственный университет, Иркутск*

²*Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск*