

СПЕКТРЫ АТМОСФЕРНЫХ НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

*О. Н. Петрова*¹, *Т. С. Синеговская*², *С. И. Синеговский*³

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

Выполнен расчет энергетических спектров и зенитно-угловых распределений атмосферных мюонных нейтрино высоких энергий для двух вариантов параметризации спектра первичных космических лучей (Гайссера–Хонды и Зацепина–Сокольской) с использованием моделей адронных взаимодействий QGSJET-II-03 и SIBYLL 2.1. Сравнение усредненного по зенитным углам спектра мюонных нейтрино с результатами экспериментов Frejus, AMANDA-II и IceCube40 показывает, что даже при энергиях выше 100 ТэВ вклад нейтрино от распадов очарованных частиц не удастся определить однозначно. Причина этого — малый вклад этой компоненты и все еще большие экспериментальные ошибки.

The calculation of the atmospheric high-energy muon neutrino spectra and zenith-angle distributions is performed for two of the primary spectrum parameterizations (by Gaisser–Honda and by Zatsepin–Sokolskaya) with usage of the hadronic models, QGSJET-II-03, SIBYLL 2.1. The comparison of zenith angle-averaged muon neutrino spectrum with the data of Frejus, AMANDA-II, IceCube40 experiments makes it clear that even at energies above 100 TeV the prompt neutrino contribution is not apparent because of considerable uncertainties of the experimental data in high-energy region.

PACS: 13.85.-t; 13.85.tp; 13.15.+g

Нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, образующиеся при распадах мюонов, пионов, каонов и очарованных частиц широкого атмосферного ливня, порождаемого космическими лучами в атмосфере Земли, составляют неустраняемый фон для детектирования астрофизических нейтрино — важной задачи, для решения которой созданы большие глубоководные телескопы NT200+ [1], ANTARES [2], IceCube40 [3]. Область высоких и сверхвысоких энергий становится доступной для экспериментального изучения атмосферных нейтрино только в последние годы. К настоящему времени энергетический спектр атмосферных мюонных нейтрино высоких энергий измерен на трех установках: Frejus [4] при энергиях до 1 ТэВ, AMANDA-II [5] в интервале энергий 1–100 ТэВ, IceCube40 [3] в диапазоне 100 ГэВ–400 ТэВ. Растущий вклад в нейтринный поток при энергиях выше 100 ТэВ должны давать распады очарованных частиц — источник 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 в области высоких энергий.

¹E-mail: redponick@gmail.com

²E-mail: tanya@api.isu.ru

³E-mail: sinegovsky@api.isu.ru

Представленный в данной работе расчет потоков атмосферных нейтрино в интервале энергий $10\text{--}10^7$ ГэВ для зенитных углов от 0 до 90° и усредненного по зенитному углу энергетического спектра выполнен с использованием моделей адронных взаимодействий SIBYLL 2.1 [6] и QGSJET-II-03 [7], которые широко применяются для моделирования широких атмосферных ливней по методу Монте-Карло, а также для расчетов потоков адронов и мюонов космических лучей [8]. Расчет произведен для двух параметризаций измеренного в эксперименте спектра и состава первичных космических лучей. Модель Зацепина и Сокольской (ZS) [9] хорошо описывает данные прямых измерений АТИС-2 в интервале $10\text{--}10^4$ ГэВ [10] и дает мотивированную экстраполяцию этих данных для области энергий до 100 ПэВ, где спектр и состав восстанавливаются на основе измеренных характеристик широких атмосферных ливней. Другой используемый вариант — известная параметризация спектра и состава первичных космических лучей Гайссера–Хонды (GH) [11] (версия с высоким содержанием ядер гелия). Обе модели согласуются с данными эксперимента KASCADE [12].

Сравнение рассчитанных спектров $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ нейтрино от (μ, π, K) -распадов (усредненных по зенитному углу) с данными, полученными на установках Frejus, AMANDA-II и IceCube40, показано на рис. 1, 2. Различие первичных спектров моделей GH и ZS становится заметным после 100 ТэВ, где на потоке нейтрино сказывается излом первичного спектра космических лучей (рис. 1). При энергии 1 ПэВ расчетный поток нейтрино для спектра GH пятикратно превышает поток для спектра ZS. Предсказанные потоки нейтрино, полученные с использованием модели адронных взаимодействий SIBYLL 2.1, приблизительно в полтора раза выше предсказаний другой модели — QGSJET-II-03 (рис. 2).

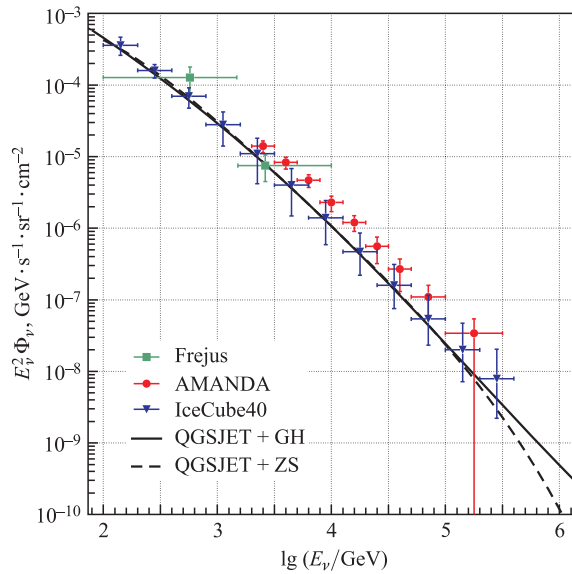


Рис. 1. Спектр атмосферных $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$, усредненный по зенитному углу: сплошная линия — зависимость от спектра первичных космических лучей; точки — данные экспериментов Frejus, AMANDA-II, IceCube40

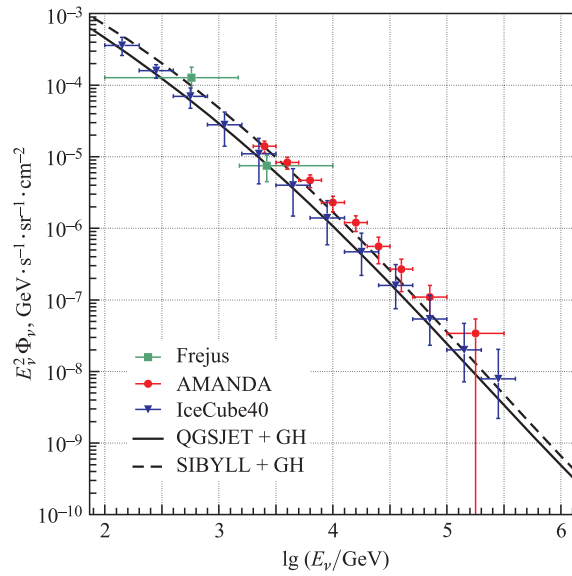


Рис. 2. Энергетический спектр $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$, усредненный по зенитному углу: сплошная линия — зависимость от модели адронных взаимодействий

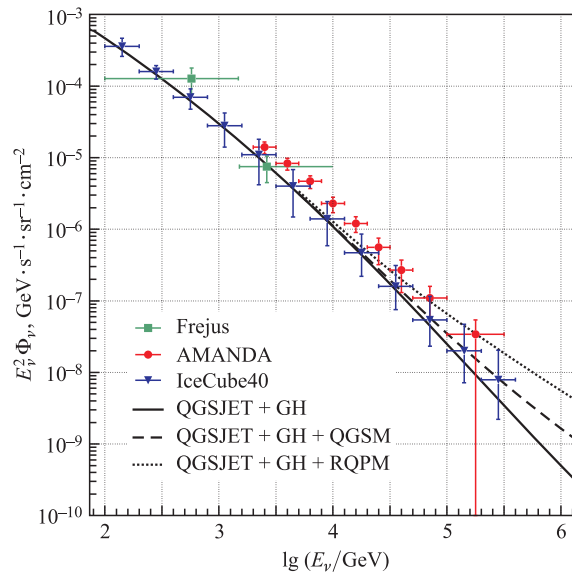


Рис. 3. Поток мюонных нейтрино от (μ, π, K, D) -распадов. Приведены экспериментальные данные Frejus, AMANDA-II и IceCube40. Расчеты для первичного спектра модели ZS: сплошная линия — обычные нейтрино (от (μ, π, K) -распадов); пунктирная — сумма обычных нейтрино и нейтрино от распадов очарованных частиц в рамках RQPM; штриховая — то же самое, но для «прямых» нейтрино в QGSM

Суммарный спектр обычных и «прямых» нейтрино, рассчитанный с использованием QGSJET-II-03 и модели кварк-глюонных струн (QGSM) [13], неплохо описывает данные IceCube40 (рис. 3). Предсказанные с использованием QGSM, потоки мюонных нейтрино в интервале 200–400 ТэВ не противоречат ограничению на диффузный поток астрофизических нейтрино ($7,2 \cdot 10^{-9} E^{-2} \text{ ГэВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$), установленному IceCube59 [14] для интервала энергий 160 ТэВ–40 ПэВ. В отличие от QGSM, рекомбинационная кварк-партоновая модель (RQPM на рис. 3) предсказывает завышенный поток мюонных нейтрино, не согласующийся со спектром, измеренным в эксперименте IceCube40.

Итак, выполненный расчет спектров мюонных нейтрино показал слабую зависимость от модели спектра и состава первичных космических лучей в области 10–10⁵ ГэВ, не включающей излом спектра космических лучей. Однако использование моделей адронных взаимодействий QGSJET-II и SIBYLL 2.1 в этой области энергий приводит к заметному различию потоков нейтрино, основным источником которого при энергиях до 100 ТэВ являются, по-видимому, процессы рождения каонов. При более же высоких энергиях примешиваются неопределенности, связанные с сечениями рождения очарованных частиц.

Сравнение рассчитанного потока мюонных нейтрино с измерениями IceCube40 показывает, что модель QGSJET-II-03 является более предпочтительной. Учет вклада прямых нейтрино в рамках модели кварк-глюонных струн (QGSM) приводит к улучшению согласия расчета и эксперимента. Верхний предел на диффузные потоки астрофизических нейтрино, установленный IceCube59 [14] для интервала 160 ТэВ–40 ПэВ, позволяет получить ограничения на модели рождения очарованных частиц. Модель кварк-глюонных струн не противоречит этому пределу, предсказание же потока прямых нейтрино [13] в рамках рекомбинационной кварк-партоновой модели (RQPM) 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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aynutdinov V. 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;
Аврорин А. В. и др. Поиск астрофизических нейтрино в Байкальском нейтринном проекте // *Письма в ЭЧАЯ.* 2011. Т. 8, № 7. С. 1171–1191.
2. *Biagi S. et al.* 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.
3. *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. 012001.
4. *Daum K. et al.* Determination of the Atmospheric Neutrino Spectra with the Frejus Detector // *Z. Phys. C.* 1995. V. 66. P. 417–428.
5. *Abbasi R. 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.
6. *Fletcher R. S. et al.* SIBYLL: An Event Generator for Simulation of High-Energy Cosmic Ray Cascades // *Phys. Rev. D.* 1994. V. 50. P. 5710–5731;

- Ahn E.-J. *et al.* Cosmic Ray Interaction Event Generator SIBYLL 2.1 // *Phys. Rev. D.* 2009. V. 80. 094003.
7. Ostapchenko S. QGSJET-II: Towards Reliable Description of Very High Energy Hadronic Interactions // *Nucl. Phys. (Proc. Suppl.)*. 2006. V. 151. P. 143–146.
 8. 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;
Sinegovsky S. I. *et al.* Atmospheric Muon Flux at PeV Energies // *Intern. J. Mod. Phys. A.* 2010. V. 25. P. 3733–3740.
 9. Zatsepin V. I., Sokolskaya N. V. Three Component Model of Cosmic Ray Spectra from 10 GeV to 100 PeV // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 458. P. 1–5.
 10. Панов А. Д. и др. Элементарные энергетические спектры космических лучей по данным эксперимента АТIC-2 // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2007. Т. 71. С. 512–515.
 11. Gaisser T. K., Honda M. Flux of Atmospheric Neutrinos // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2002. V. 52. P. 153–199.
 12. Apel W. D. *et al.* Energy Spectra of Elemental Groups of Cosmic Rays: Update on the KASCADE Unfolding Analysis // *Astropart. Phys.* 2009. V. 31. P. 86–91.
 13. Bugaev E. V. *et al.* Prompt Leptons in Cosmic Rays // *Nuovo Cim. C.* 1989. V. 12. P. 41–73;
Bugaev E. V. *et al.* Atmospheric Muon Flux at Sea Level, Underground and Underwater // *Phys. Rev. D.* 1998. V. 58. 54001.
 14. Schukraft A. *et al.* Search for a Diffuse Flux of Astrophysical Muon Neutrinos with the IceCube Detector // *Proc. of the 32 ICRC, Beijing, 2011.* 0736.
<http://indico.ihep.ac.cn/contributionDisplay.py?contribId=736&sessionId=52&confId=1628>.