

УДК 524.1: 539.14

СПЕКТР АТМОСФЕРНЫХ НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ:  
РАСЧЕТ И ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ<sup>1</sup>Т.С. Синеговская, <sup>2</sup>С.И. СинеговскийHIGH-ENERGY ATMOSPHERIC NEUTRINO SPECTRUM:  
THE COMPUTATION AND MEASURING DATA<sup>1</sup>T.S. Sinegovskaya, <sup>2</sup>S.I. Sinegovsky

Приведено сравнение рассчитанного дифференциального спектра атмосферных нейтрино в области высоких энергий с предварительными данными измерений на установке AMANDA. Обсуждается модельный вклад прямых нейтрино в поток атмосферных мюонных нейтрино для разных зенитных углов в области энергий 100–300 ТэВ.

The calculation of the atmospheric neutrino spectrum at high energies is compared with the preliminary data obtained with the AMANDA array. Discussed is the model dependent prompt neutrino contribution to the total atmospheric  $\nu_\mu$  flux under various zenith angles in the energy range 100–300 TeV.

**Введение**

Регистрация потоков нейтрино высоких энергий от астрофизических источников – одна из важнейших задач современной астрофизики, для решения которой созданы большие глубоководные (подледные) нейтринные телескопы (HT-200+, AMANDA-II) [1, 2], а также проектируются гигантские детекторы нового поколения с эффективным объемом до  $1 \text{ км}^3$  (IceCube, NEMO) [3, 4]. Неустрашимый фон в этих задачах составляют атмосферные нейтрино, генерируемые космическими лучами в атмосфере Земли. С другой стороны, атмосферные нейтрино могут служить тестом для установки, поскольку возможен расчет потоков нейтрино и мюонов, проверяемый в свою очередь на основе измерений потоков атмосферных мюонов.

Если спектр атмосферных нейтрино в области низких энергий ( $\sim 1 \text{ ТэВ}$ ) интенсивно исследовался экспериментально и теоретически [5–7], что было мотивировано интересом к обнаруженной на установке Super-Kamiokande «аномалии» атмосферных нейтрино (интерпретируемой в настоящее время как проявление нейтринных осцилляций), то область высоких энергий ( $E > 1 \text{ ТэВ}$ ) становится доступной для изучения только сейчас.

В недавней работе [8] были опубликованы предварительные результаты измерения энергетического спектра атмосферных мюонных нейтрино, зарегистрированных в направлении снизу вверх. Это первый измеренный спектр атмосферных нейтрино (АН) в области высоких энергий от 1.5 до 300 ТэВ. Представляет интерес сравнение этих измерений с ранее предсказанными спектрами [7, 9, 10]. Поскольку в работе [9] было приведено сравнение предсказаний разных авторов, ограничимся здесь сравнением спектра, измеренного на установке AMANDA-II, с расчетом, выполненным в рамках модели высокоэнергетического атмосферного адронного каскада [11, 12]. Дифференциальные спектры мюонных и электронных АН, рассчитанные для широкой области энергий ( $0.1\text{--}10^{10} \text{ ТэВ}$ ) с учетом вклада от распадов очарованных частиц, приведены в работе [7].

**Измерения спектра мюонных нейтрино высоких энергий**

Детектор AMANDA-II [2, 8] представляет 677 оптических модулей, закрепленных на 19 вертикаль-

ных стрингах и погруженных в лед на Южном полюсе на глубину от 1.5 до 2 км. Оптические модули регистрируют черенковский свет заряженных мюонов, рождающихся вблизи детектора в реакциях  $\nu_\mu + N \rightarrow \mu + X$ . Фон атмосферных мюонов для зенитных углов  $0\text{--}90^\circ$  (направление сверху вниз) велик (на несколько порядков превышает сигнал от нейтрино-индуцированных мюонов), поэтому измерения спектра атмосферных нейтрино возможны только для направлений снизу вверх (надирные углы  $0\text{--}90^\circ$ ), на которых атмосферные мюоны поглощаются в толще Земли. Результаты измерений на нейтринном телескопе AMANDA-II (рис. 1) хорошо согласуются с измерениями спектра при более низких энергиях, выполненными на установке Frejus [13].

Кривые на рис. 1 представляют потоки АН, рассчитанные без учета вклада от распадов очарованных частиц. В работе [8] не приведены данные об углах, которым отвечают зарегистрированные события, поэтому расчет дифференциальных спектров атмосферных мюонных нейтрино от распадов пионов, каонов и мюонов в интервале энергий  $0.5\text{--}10^3 \text{ ТэВ}$  сделан для диапазона углов  $0\text{--}90^\circ$  (на рисунках представлены четыре угла).

**Расчет спектра атмосферных нейтрино**

В расчете потоков мюонных нейтрино наряду с двухчастичными распадами  $\pi$ -,  $K$ -мезонов и распадами

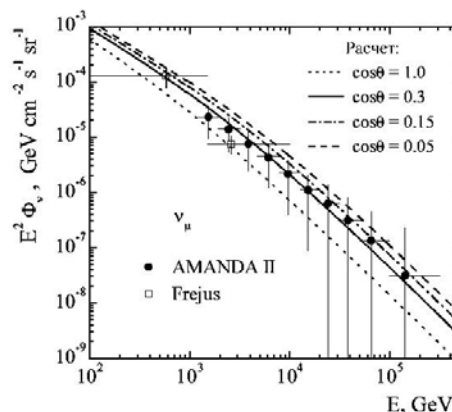


Рис. 1. Дифференциальный энергетический спектр атмосферных мюонных нейтрино. Кривые представляют расчет потоков нейтрино от распадов  $\pi$ - и  $K$ -мезонов.

мюонов были учтены такие источники, как трехчастичные полулептонные распады заряженных и нейтральных каонов, а также пионы от распадов каонов. Эта  $\pi$ -,  $K$ -компонента АН является доминирующей до энергий порядка 100 ТэВ. Вклад в потоки («прямых») нейтрино от распада очарованных частиц был рассчитан для двух моделей рождения чарма – кварк-глюонных струн (МКГС) и рекомбинационной кварк-партонной (РКПМ) [14] (см. также [12]).

Настоящий расчет выполнен без учета поправок на поглощение и регенерацию нейтрино в Земле [15, 16]. Для нейтрино с энергией  $E = 100$  ТэВ пробег до взаимодействия (в процессах с заряженными и нейтральными токами) с нуклонами вещества – величина порядка  $10^{10}$  г/см<sup>2</sup> [17]:  $\ell_\nu \simeq 6 \cdot 10^9$  см водного эквивалента. Для углов  $\theta > 60^\circ$  толщина Земли составляет менее  $2 \cdot 10^9$  г/см<sup>2</sup> [16, 17], т.е. треть пробега, поэтому в первом приближении можно пренебречь поглощением нейтрино. Наибольшая толщина отвечает направлениям вблизи вертикального, захватывающим ядро Земли, и для этих углов искажение спектра в области 100–300 ТэВ может быть значительным. Для интервала  $\theta = 80\text{--}90^\circ$  коэффициент прохождения нейтрино с  $E \leq 100$  ТэВ близок к единице [16]. В дальнейшем предполагается сделать более полный расчет, учитывающий потери энергии при рассеянии и регенерацию нейтрино.

В табл. 1 приведено отношение потоков нейтрино  $R_c = \phi_\nu^{\text{charm}} / \phi_\nu^{(\pi,K)}$ , рассчитанных для трех значений зенитного угла, двух энергий и двух моделей рождения очарованных частиц (МКГС, РКПМ). Величина  $R_c$  при  $10^2$  ТэВ уменьшается с ростом зенитного угла, а при  $10^3$  ТэВ видна немонотонность. Это обстоятельство связано с разной угловой зависимостью потоков  $\pi$ -,  $K$ -нейтрино и прямых нейтрино: последние практически изотропны при  $E < 10^3$  ТэВ, тогда как для  $\pi$ -,  $K$ -нейтрино имеет место значительное угловое усиление, в частности,  $\phi_\nu^{(\pi,K)}|_{\theta=90^\circ} / \phi_\nu^{(\pi,K)}|_{\theta=0^\circ} \sim 8$ . Оптимальными зенитными углами для выделения вклада прямых нейтрино являются углы вблизи  $80^\circ$ : здесь  $R_c$  еще не мало (не так велик коэффициент углового усиления  $\pi$ -,  $K$ -нейтрино), а коэффициент прохождения нейтрино близок к единице и величина потока в несколько раз выше по сравнению с малыми углами [16]. С ростом энергии преимущество интервала  $70\text{--}80^\circ$  становится еще более значимым (табл. 1): именно на этом интервале, а не вблизи вертикали, достигается максимум величины  $R_c$ .

Таблица 1.

Модель	$E_\nu=10^2$ ТэВ			$E_\nu=10^3$ ТэВ		
	$0^\circ$	$72.5^\circ$	$90^\circ$	$0^\circ$	$72.5^\circ$	$90^\circ$
	$R_c = \phi_\nu^{\text{charm}} / \phi_\nu^{(\pi,K)}$					
МКГС	0.87	0.28	0.10	4.8	10	0.63
РКПМ	3.33	1.05	0.37	23.3	43.8	2.75

Рассчитанные для интервала углов  $70\text{--}80^\circ$  спектры мюонных нейтрино в целом не противоречат экспериментальным данным установки AMANDA-II. На рис. 2 показаны результаты расчета спектра АН вместе с измерениями, полученные на установке AMANDA-II [8] (кружки) и детекторе Frejus [13] (квадратики). Кривые представляют суммарные спектры  $\pi$ -,  $K$ -нейтрино и прямых нейтрино (ПН) для четырех зенитных углов, предсказанные в РКПМ. То же самое, но для ПН, рассчитанных в МКГС, показано на рис. 3, где сплошные линии (жирная отвечает  $\cos\theta = 0.3$ ) изображают суммарный спектр, а пунктирная, сплошная тонкая, штрихпунктирная и штриховая – спектры  $\pi$ -,  $K$ -нейтрино.

Разумеется, на основе приведенных данных нельзя сделать определенного вывода о вкладе чарма – слишком мало экспериментальной информации и довольно груба прикидка. Тем не менее, основания для оптимизма имеются: экспериментальные точки находятся в коридоре предсказаний рассматриваемых моделей, и даже можно увидеть намек на выполаживание («ужесточение») спектра (см. жирную линию на рис. 3; ср. также рис. 1 и 2).

**Заключение**

Неопределенности измеренных спектров атмосферных нейтрино при энергиях до 300 ТэВ пока не позволяют сделать определенных заключений о вкладе

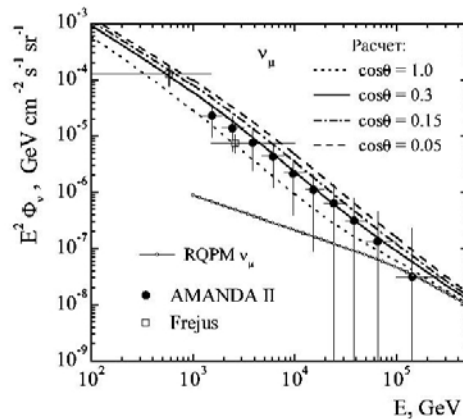


Рис. 2. Суммарный спектр атмосферных мюонных нейтрино с учетом вклада от распадов очарованных частиц – «прямых» нейтрино в РКПМ.

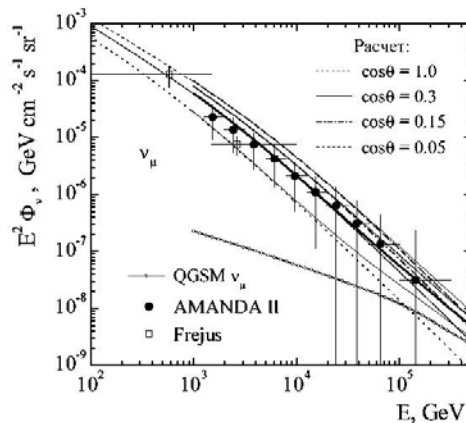


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для вклада «прямых» нейтрино согласно МКГС.

нейтрино от распадов очарованных частиц, однако не исключают, по-видимому, предсказаний [9, 10, 14] рекомбинационной кварк-партоновой модели и модели кварк-глюонных струн.

Количественные результаты могут быть получены при условии определения направления прихода нейтрино (с ошибками, не превышающими  $10^\circ$ ), продвижения по энергиям до 1 ПэВ и учета энергетических потерь нейтрино в Земле. Решающими для определения вклада прямых нейтрино станут измерения при более высоких энергиях  $E_\nu > 10^6$  ГэВ.

Авторы благодарят В.А. Наумова за полезные обсуждения и Р. Desiati за предоставленные таблицы спектров атмосферных нейтрино, измеренных на установке AMANDA-II.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aynutdinov V. et al. The Baikal neutrino experiment: status and beyond // *Ядерная физика*. 2004. Т. 67. С. 1186–1194; Aynutdinov V., Balkanov V., Belolaptikov I. et al. Search for a diffuse flux of high-energy extraterrestrial neutrinos with the NT200 Neutrino Telescope // astro-ph/0508675; Aynutdinov V. et al. (Baikal Collaboration). The Baikal neutrino experiment: From NT200 to NT200+ // astro-ph/0507709.
2. Ackermann M., Ahrens J., Albrecht H. et al. Flux limits on ultra high energy neutrinos with AMANDA-B10 // *Astropart. Phys.* 2005. V. 22. P. 339–353.
3. Ahrens A., Bahcall J.N., Bai X. et al. Sensitivity of the IceCube detector to astrophysical sources of high energy muon neutrinos // *Astropart. Phys.* 2004. V. 20. P. 507–532.
4. Spiering C. High energy neutrino astronomy: the experimental road // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2003. V. 29. P. 843–851; Spiering C. (IceCube Collaboration). The IceCube Project // astro-ph/0404090; Spiering C. Neutrino Astrophysics in the cold: Amanda, Baikal and IceCube // astro-ph/0503122; Montaruli T. et al. (NEMO Collaboration). Capabilities of an underwater detector as neutrino telescope and for the neutrino oscillation search // hep-ex/9905019.
5. Naumov V.A. Physics of atmospheric neutrinos (introductory overview) // *Астрофизика и физика микромира. Материалы Байкальской школы по фундаментальной физике (11–17 октября 1998, Иркутск)*. Иркутск: изд-во Иркутского университета, 1998. С. 66–85.
6. Fiorentini G., Naumov V.A., Villante F.L. Atmospheric neutrino flux supported by recent muon experiments // *Phys. Lett. B*. 2001. V. 510. P. 173–188.
7. Naumov V. A. Atmospheric muons and neutrinos // *Proc. of 2nd Workshop on methodical aspects of underwater/underice neutrino telescopes, 5–16 Aug 2001, Hamburg*. P. 31–46; hep-ph/0201310.
8. Ackermann M., Ahrens J., Albrecht H. et al. New results from the Antarctic muon and neutrino detector array // astro-ph/0409423.
9. Naumov V.A., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. The K13 form factors and atmospheric neutrino flavor ratio at high energies // *Nuovo Cim. A*. 1998. V. 111. P. 129–148.
10. Kuzmin K.S., Naumov V.A., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. Atmospheric prompt neutrinos as a background to high-energy neutrino astronomy // *18<sup>th</sup> European Cosmic Ray Symposium. Moscow, 8–12 July, 2002*. М.: МГУ, 2002. HE41P.
11. Валл А.Н., Наумов В.А., Синеговский С.И. Адронная компонента космических лучей высоких энергий и рост неупругих сечений // *Ядерная физика*. 1986. Т. 44. С. 1240–1250.
12. 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. 054001.
13. 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.
14. 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.
15. Березинский В.С., Газизов А.З., Зацепин Г.Т., Розенталь И.Л. О прохождении нейтрино высоких энергий сквозь Землю и возможности их регистрации с помощью ШАЛ // *Ядерная физика*. 1986. Т. 43. С. 637–649.
16. Naumov V.A., Perrone L. Neutrino propagation through dense matter // *Astropart. Phys.* 1999. V. 10. P. 239–252.
17. Gandhi R., Quigg C., Reno M.H., Sarcevic I. Ultra-high-energy neutrino interactions // *Astropart. Phys.* 1996. V. 5. P. 81–110.

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск