

**СПЕКТРЫ И ФЛЕЙВОРНОЕ ОТНОШЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**<sup>1</sup>А.Д. Морозова, <sup>2</sup>Т.С. Синеговская, <sup>1</sup>С.И. Синеговский**THE SPECTRUM AND FLAVOR RATIO OF HIGH-ENERGY ATMOSPHERIC NEUTRINOS**<sup>1</sup>A.D. Morozova, <sup>2</sup>T.S. Sinegovskaya, <sup>1</sup>S.I. Sinegovsky

Для надежной идентификации событий от астрофизических нейтрино необходим тщательный расчет фона атмосферных нейтрино. В работе выполнен расчет спектров атмосферных нейтрино в интервале энергий 100 ГэВ–10 ПэВ для ряда моделей адрон-ядерных взаимодействий с использованием нескольких параметризаций спектра космических лучей, опирающихся на экспериментальные данные и учитывающих излом спектра. Извлеченное из данных IceCube флейворное отношение потоков нейтрино дает указание на то, что измеренный спектр атмосферных электронных нейтрино содержит примесь диффузного потока астрофизических нейтрино при энергиях 20–50 ТэВ.

To identify reliably the astrophysical neutrino events, a thorough calculation of the atmospheric neutrino background is required. In this work we calculate the atmospheric neutrino spectra in the energy range 100 GeV–10 PeV with usage of several hadronic models and a few parametrizations of the cosmic ray spectra, supported by experimental data, which take into account the knee. The neutrino flavor ratio, extracted from the IceCube data, possibly indicates that the conventional atmospheric electron neutrino flux obtained in the IceCube experiment contains an admixture of the astrophysical neutrinos in the range 20–50 TeV.

**Введение**

Нейтрино высоких энергий рождаются в распадах мезонов, генерируемых в соударениях космических лучей с ядрами атомов атмосферы Земли, образуя неустранимый фон в задаче детектирования нейтрино от астрофизических источников, расположенных в Галактике или за ее пределами. Проблема спектра атмосферных нейтрино чрезвычайно актуальна: обработка данных эксперимента IceCube (Южный Полюс) за 2010–2013 гг. обнаружила 37 нейтринных событий с энерговыделением от 30 ТэВ до 2 ПэВ [Aartsen, 2013a, b; 2014]. Астрофизическое происхождение этих нейтрино подтверждается на уровне статистической значимости выше пяти стандартных отклонений ( $5.7 \sigma$ ) от ожидаемого фона атмосферных мюонов и нейтрино, который по оценкам экспериментаторов составляет 15 событий. Регистрация событий от нейтрино с энергиями порядка 1 ПэВ на установке IceCube существенно меняет оценку роли вклада распадов очарованных частиц в поток атмосферных нейтрино – основной составляющей фона для астрофизических нейтрино высоких энергий.

Обработка данных нейтринного телескопа IceCube за 641 день (2010–2012 гг.) при понижении порога для нейтрино показала [Aartsen, 2015a], что в южном полушарии доминирует астрофизическая компонента нейтринного потока с энергией выше 10 ТэВ. Полное число событий от астрофизических нейтрино при таком низком пороге возросло до  $87_{-10}^{+14}$ . Подобное развитие событий было предсказано в работах [Sinegovskaya, 2013; 2015] на основе анализа измеренных в эксперименте IceCube спектров атмосферных нейтрино [Abbasi, 2011; Aartsen, 2013c].

В данной работе представлен расчет энергетических спектров и флейворного отношения атмосферных нейтрино, выполненный в рамках подхода [Naumov, 2000; Kochanov, 2008; 2013] для известных моделей адрон-ядерных взаимодействий (SIBYLL2.1, QGSJET-II, модель Кимеля-Мохова) и двух параметризаций спектра космических лучей, включающих его излом. Приведено сравнение расчета с новой обработкой данных IceCube по спек-

трам атмосферных нейтрино и с первым измеренным значением флейворного отношения [Aartsen, 2015b, c].

**Энергетические спектры атмосферных нейтрино**

В эксперименте IceCube измерены атмосферные потоки мюонных нейтрино (в интервале энергий 100 ГэВ–400 ТэВ) и электронных нейтрино (80 ГэВ–6 ТэВ), что позволяет извлечь флейворное отношение атмосферных нейтрино, чувствительное к дополнительному вкладу – нейтрино от распадов очарованных частиц и/или нейтрино от астрофизических источников. Кроме того, сравнительно недавно были опубликованы данные измерений нейтринного телескопа ANTARES спектра мюонных нейтрино (0.1–100 ТэВ) [Adrian-Martinez, 2013], которые, в целом согласуясь с данными IceCube [Aartsen, 2015b], обнаруживают систематическое превышение потока при энергиях выше 10 ТэВ. На рис. 1 показаны результаты расчета спектра атмосферных электронных нейтрино в сравнении с данными экспериментов IceCube отношения [Aartsen, 2015c]. В расчетах использовались модели адронных взаимодействий QGSJET-II, SIBYLL 2.1, KM и две версии спектра и состава первичных космических лучей Хилласа-Гайссера (HGM) [Gaisser, 2012] и модель Зацепина-Сокольской (ZS) [Zatsepin, 2006].

**Флейворное отношение атмосферных нейтрино**

Гипотеза о том, что часть нейтринных событий, отнесенных к атмосферным электронным нейтрино на ранних этапах обработки данных (до регистрации космических нейтрино), могла иметь источником астрофизические нейтрино при энергиях выше 10 ТэВ, опиралась [Sinegovskaya, 2013] на извлеченное из данных IceCube флейворное отношение потоков нейтрино  $R_{\nu_\mu/\nu_e}(E) = (\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu) / (\nu_e + \bar{\nu}_e)$  (треуголь-

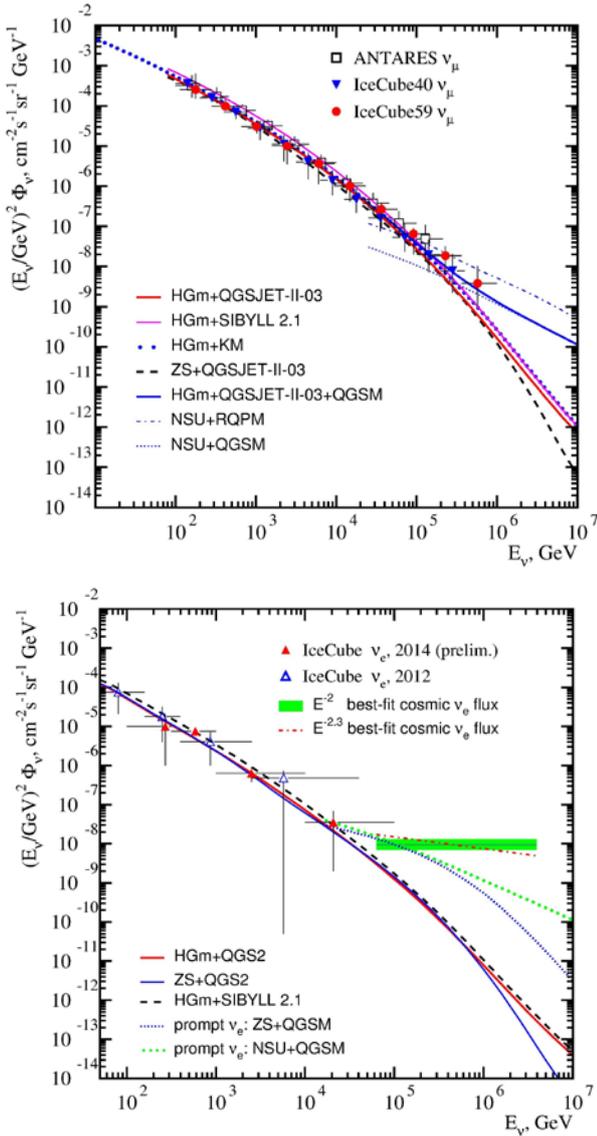


Рис. 1. Спектры атмосферных мюонных (а) и электронных (б) нейтрино, измеренные в экспериментах IceCube [Abbasi, 2011; Aartsen, 2013a, b, c] и ANTARES [Adrian-Martinez, 2013] (символы). Зеленая полоса и красная штрихпунктирная линия – фиты IceCube степенного спектра астрофизических нейтрино [Aartsen, 2014]. Кривые – расчет настоящей работы.

которая заключалась в вычитании из полного числа событий части, отнесенной к мюонным нейтрино [Aartsen, 2013c], могла привести к завышению именно числа  $\nu_e$  – событий при энергиях порядка 10 ТэВ, поскольку в этом интервале поток астрофизических  $\nu_\mu$  пренебрежимо мал по сравнению с атмосферными  $\nu_\mu$ .

Опубликованные данные по измерениям спектра атмосферных нейтрино позволяют сконструировать нейтринное флейворное отношение  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$ , очень чувствительное даже к малым изменениям потоков, и сравнить его с результатами расчета. Таким образом, можно изучать флейворный состав диффузных потоков астрофизических нейтрино, и исследовать прямую компоненту атмосферных нейтрино. На рис. 2 показано усредненное по зенитному углу флейворное отношение  $R_{\nu_\mu/\nu_e} = \Phi_{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu} / \Phi_{\nu_e+\bar{\nu}_e}$ , рассчитанное для моделей SIBYLL, QGSJET-II и KM с первичным

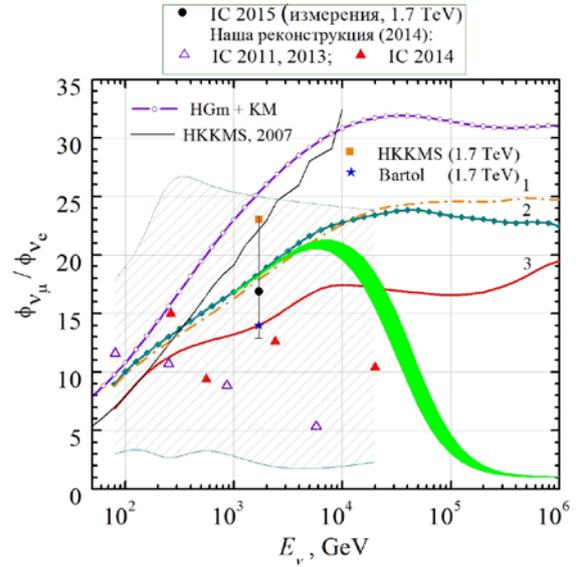


Рис. 2. Флейворное отношение атмосферных нейтрино, рассчитанное для двух моделей спектра ПКЛ, учитывающих излом спектра. Кривые, обозначенные цифрами, – расчет для моделей SIBYLL 2.1 и QGSJET-II-03: 1 – HGm + SIBYLL, 2 – HGm + QGSJET-II, 3 – ZS + QGSJET-II, линия -o- – расчет для модели Кимеля-Мохова. Тонкая черная линия – расчет [Honda, 2007] ( $\cos\theta=0.3$ ). Символы  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  – наша реконструкция  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$  из данных эксперимента IceCube [Abbasi, 2011; Aartsen, 2013c; 2015c], заштрихованная область отражает ошибки эксперимента. Символ  $\bullet$  – результат измерений при  $E_\nu=1.7$  ТэВ [IceCube, 2015c],  $\square$ ,  $\star$  – расчеты Honda и группы Bartol.

спектрами ZS и HGm (без учета вклада прямых нейтрино), а также  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$ , рассчитанное в работе [Honda, 2007]. Предварительное изучение показало, что при энергиях выше 10 ТэВ из эксперимента извлекается меньшее по величине отношение  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$ , чем ожидалось из расчетов. Ломаной линией показан расчет [Honda, 2007] для  $\cos\theta=0.3$ , тогда как оранжевый квадрат – это усредненный по зенитному углу расчет [Honda, 2007] (из работы [IceCube, 2015c]). Звездочкой на рис. 2 обозначен расчет группы Bartol, взятый также из работы [IceCube, 2015c].

Как видно из рисунка, модель KM с первичным спектром HGm очень близка к расчету M.Honda, а модель QGSJET II-03 дает заметное отличие для параметризации спектра космических лучей ZS и HGm – примерно в 1.5 раза при энергиях 10 ТэВ. Наша реконструкция ошибок эксперимента IceCube (заштрихованная область на рис. 2) выполнена с запасом: значение  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$ , восстановленное экспериментаторами [IceCube, 2015c] (сплошной кружок), имеет заметно меньшую неопределенность –  $16.9^{+6.9}_{-4.0}$  для энергии 1.7 ТэВ. Это значение хорошо согласуется с нашим расчетом для моделей SIBYLL 2.1 и QGSJET-II-03 с использованием спектра космических лучей HGm (кривые 1 и 2).

### Заключение

Расчет показывает, что интервал энергий, при которых происходит переход к доминированию аст-

рофизических нейтрино, составляет 30-50 ТэВ, если принять во внимание вклад атмосферных нейтрино от распада очарованных частиц, рассчитанный для модели кварк-глюонных струн. Флейворное отношение атмосферных нейтрино, извлеченное из измерений IceCube, не обнаруживает тенденции к росту с энергией, как ожидалось для ( $\mu$ ,  $K$ ) -нейтрино в интервале 100 ГэВ – 30 ТэВ. Уменьшение отношения  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$  возможно указывает на примесь астрофизических нейтрино в спектре электронных атмосферных нейтрино, полученном в эксперименте IceCube ранее, еще до обнаружения 37 высокоэнергетических нейтринных событий.

Неоднозначность предсказаний сечений рождения пионов и особенно каонов в нуклон-ядерных соударениях при высоких энергиях существенно сказывается на расчетном потоке нейтрино. Сравнение усредненного по зенитным углам спектра мюонных нейтрино с измеренным в эксперименте IceCube показывает, что при энергиях выше 400 ТэВ вклад прямых нейтрино как будто заметен (QGSM), однако экспериментальные ошибки велики, и экспериментаторы не дают определенного ответа относительно этой компоненты атмосферных нейтрино. Так же нет пока ответа и о вкладе астрофизических мюонных нейтрино, которые должны быть видны на установке потока выше верхней ошибки, как это следует из фита IceCube.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, Договор 14.Б25.31.0010, задание 3.889.2014/К.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кочанов А.А., Синеговская Т.С., Синеговский С.И. Мюоны космических лучей высокой энергии в атмосфере Земли // ЖЭТФ. 2013. Т. 143. С. 459–475.

Наумов В.А. Синеговская Т.С. Элементарный метод решения уравнений переноса нуклонов космических лучей в атмосфере // Ядерная физика. 2000. Т. 63. С. 2020–2028.

Aartsen M.G. et al. (IceCube Collaboration). First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. P. 021103.

Aartsen M.G. et al. (IceCube Collaboration) Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube detector // Science. 2013. V. 342. P. 1242856.

Aartsen M.G. et al. (IceCube Collaboration). Measurement of the  $\nu_e$  flux in IceCube // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 151105.

Aartsen M.G. et al. (IceCube Collaboration). Observation of high-energy astrophysical neutrinos in three years of IceCube data // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 113. P. 101101.

Aartsen M.G. et al. (IceCube Collaboration). Atmospheric and astrophysical neutrinos above 1 TeV interacting in IceCube // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. P. 022001.

Aartsen M.G. et al. (IceCube Collaboration). Development of a general analysis and unfolding scheme and its application to measure the energy spectrum of atmospheric neutrinos with IceCube // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75, N 116. 14 p.

Aartsen M.G. et al. (IceCube Collaboration). Measurement of the atmospheric  $\nu_e$  spectrum with IceCube. arXiv:1504.03753v2, 2015. 15 p.

Abbasi R. 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. P. 012001.

Adrian-Martinez S. et al. Measurement of the atmospheric  $\nu_\mu$  energy spectrum from 100 GeV to 200 TeV with the ANTARES telescope // Eur. Phys. J. C. 2013. V. 73. P. 2606.

Gaisser T. Spectrum of cosmic-ray nucleons, kaon production, and the atmospheric muon charge ratio // Astropart. Phys. 2012. V. 24. P. 01–806.

Honda M. et al. Calculation of atmospheric neutrino flux using the interaction model calibrated with atmospheric muon data // Phys. Rev. D. 2007. V. 75, 043006. 26 p.

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

Sinegovskaya T.S., Ogorodnikova E.V., Sinegovsky S.I. High-energy fluxes of atmospheric neutrinos // Proc. of 33<sup>rd</sup> ICRC, Rio de Janeiro, 2013; arXiv: 1306.5907v2. 2013.

Sinegovskaya T.S., Morozova A.D., Sinegovsky S.I. High-energy neutrinos fluxes and flavor ratio in the Earth's atmosphere // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. P. 093011.

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.

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

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