

Спектры и флейворное отношение атмосферных нейтрино высоких энергий: расчет и измерения

Т. С. Синеговская¹, А.Д. Морозова², С. И. Синеговский²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск

²Иркутский государственный университет, Иркутск

33-я ВККЛ, ОИЯИ, Дубна, 11-15 авг. 2014

Задача [T.S.Sinegovskaya et al., arXiv:1407.3591v1]

Эксперименты IceCube и ANTARES достигли области энергий, где возможно перекрытие потоков атмосферных нейтрино и диффузных потоков космических нейтрино. Для разделения этих составляющих в нейтринных событиях необходимы более тщательные расчеты спектров и зенитно-угловых распределений атмосферных нейтрино с учетом излома спектров космических лучей. 37 нейтринных событий в эксперименте IceCube (2010-2013 гг.) с энергиями 30 ТэВ - 2 ПэВ заметно превышают (5.7σ) фон атмосферных мюонов и нейтрино (15 событий), и вероятный источник этих событий (или их части) - астрофизические нейтрино. Если спектр диффузных нейтрино $\propto E^{-2}$, а величина масштабированного потока $E^2\phi_\nu \approx 10^{-8}$ ГэВ см⁻²с⁻¹ср⁻¹ (при гипотезе флейворного состава 1 : 1 : 1 или 1 : 0 : 0), то интерполяция спектра на область вблизи 10 – 30 ТэВ приведет к заметному понижению флейворного отношения нейтрино $R_{\nu_\mu/\nu_e} = \phi_{\nu_\mu}/\phi_{\nu_e}$.

В настоящей работе рассчитаны спектры атмосферных нейтрино и R_{ν_μ/ν_e} в интервале 100 ГэВ - 10 ПэВ для параметризаций спектра КЛ, учитывающих излом с использованием трех моделей адрон-ядерных взаимодействий - QGSJET-II, SIBYLL 2.1 и Кимеля-Мохова. Вклад прямых нейтрино учтен в рамках моделей кварк-глюонных струн (QGSM) и рекомбинационной кварк-партонной (RQPM). Измеренные IceCube атмосферные потоки $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ и $\nu_e + \bar{\nu}_e$ позволяют извлечь R_{ν_μ/ν_e} на интервале 80 ГэВ - 6 ТэВ. Величина R_{ν_μ/ν_e} , чувствительная к вкладам прямых и астрофизических нейтрино, даст подтверждение диффузного потока астрофизических нейтрино в области сравнительно небольших энергий, если в эксперименте IceCube измерить спектры ν_e на интервале 10 – 50 ТэВ.

Источники атмосферных нейтрино

π/K -нейтрино

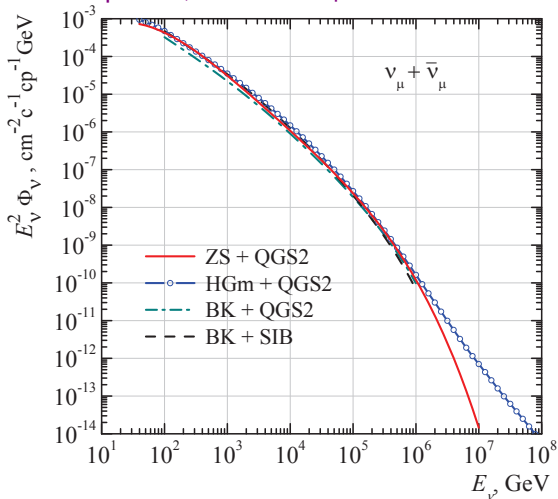
	Мода распада	Вероятность
μ^\pm	$e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$	$\simeq 100\%$
π^\pm	$\mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$	$\simeq 100\%$
K^\pm	$\mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$	63.44 %
	$\pi^0 + \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$	3.353 %
	$\pi^0 + e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e)$	5.07 %
	$\pi^\pm + \pi^0$	20.66 %
K_L^0	$\pi^\pm + \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$	27.04 %
	$\pi^\pm + e^\mp + \bar{\nu}_e(\nu_e)$	40.55 %
K_S^0	$\pi^+ + \pi^-$	69.20 %
	$\pi^\pm + \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$	$4.66 \cdot 10^{-4}$

D/Λ_c -нейтрино ("прямые")

	Мода распада	Вероятность
D^\pm	$\mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + X$	17.6 %
D^0, \bar{D}^0	$\mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + X$	6.7 %
D_s^\pm	$e^\pm + X$	6.5 %
Λ_c^+	$\Lambda + \mu^+ + \nu_\mu$	$2.0 \pm 0.7\%$
	$\Lambda + e^+ + \nu_e$	$2.1 \pm 0.6\%$

Влияние спектра КЛ на потоки $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$

Сравнение расчетов, выполненных для трех параметризаций спектра КЛ, включающих излом



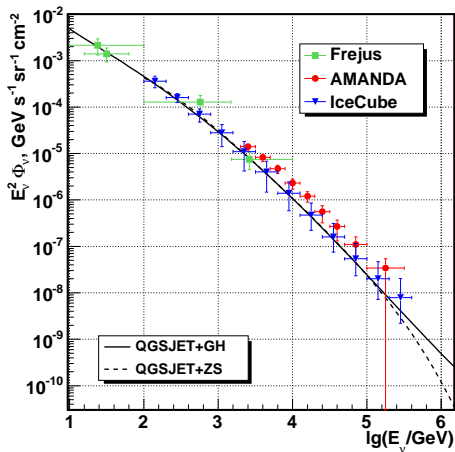
ZS: Модель В.И.Зацепина, Н.В. Сокольской (Astronomy & Astrophys. 458, 1 (2006));

HGm: Модель трех источников (А.М. Hillas astro-ph/0607109, Т.К.Gaisser AP, 24, 801 (2012));

BK: Модифицированная polygonato-модель (D.Bindig, C.Bleve, К.-Н. Kampert), 32 ICRC, Beijing, 2011, v. 1, p. 161.

Влияние излома в спектре КЛ на спектр

$\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ заметно только после 100 ТэВ



Энергетический спектр $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$
(π/K), рассчитанный с
QGSJET II-03:

сплошная линия – спектр КЛ by
Gaisser & Honda (GH) [ARNPS
52,153 (2002)] (“колени” не
учтено)

штриховая – спектр КЛ модели
Зацепина & Сокольской (ZS)
(с “колени”)

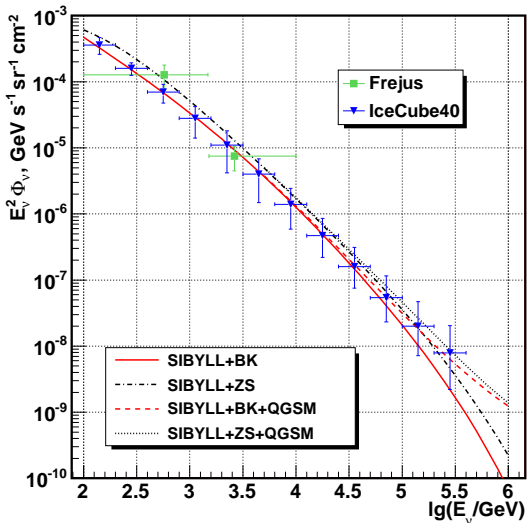
Потоки нейтрино, зависящие от модели

Отношение потоков атмосферных нейтрино, рассчитанных с SIBYLL 2.1, QGSJET II-03 и KM для спектров космических лучей ZS и HGm: 1 (4) – sib/qgs2; 2 (5) – km/qgs2; 3 (6) – sib/km.

E_ν , ТэВ	1	2	3	4	5	6
	ZS: $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)$			ZS: $(\nu_e + \bar{\nu}_e)$		
1	1.70	1.05	1.62	1.41	0.51	2.76
10	1.53	1.04	1.47	1.32	0.48	2.75
10^2	1.53	1.10	1.39	1.29	0.54	2.39
10^3	1.79	1.64	1.09	1.41	0.84	1.68
10^4	1.85	2.08	0.89	1.38	1.06	1.30
	HGm: $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)$			HGm: $(\nu_e + \bar{\nu}_e)$		
1	1.59	0.85	1.87	1.39	0.49	2.84
10	1.57	1.12	1.40	1.33	0.50	2.66
10^2	1.57	1.27	1.24	1.31	0.57	2.30
10^3	1.63	1.63	1.00	1.31	0.70	1.87
10^4	1.47	1.53	0.96	1.23	0.59	2.08

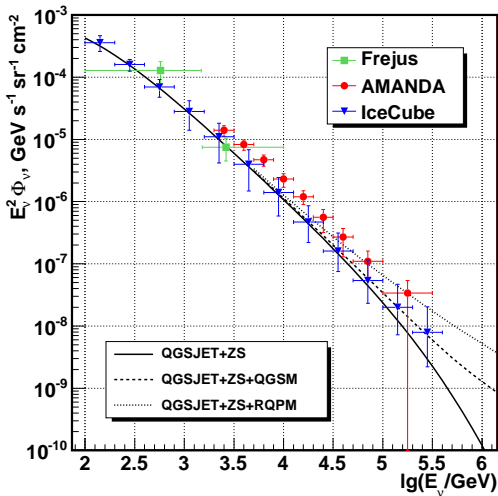
$\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$: SIBYLL 2.1 + ZS, BK

Спектры обычных (SIBYLL 2.1) и прямых (QGSM) нейтрино: расчет и данные экспериментов Frejus и IceCube40



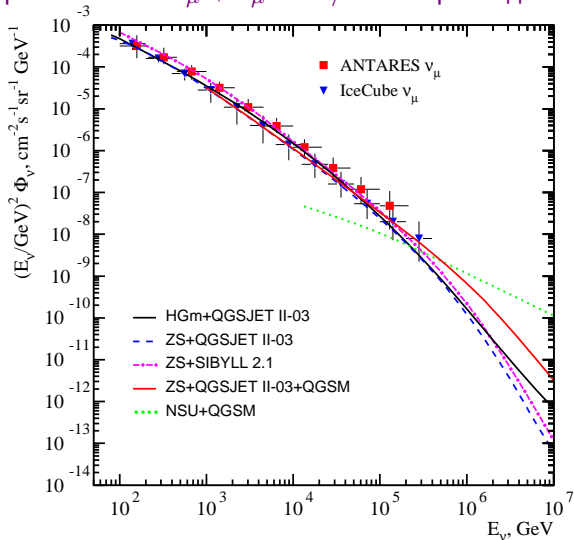
$\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$: QGSJET II-03 + ZS

Спектры обычных (QGSJET II-03) и прямых (QGSM, RQPM) нейтрино. Символы - измерения Frejus, AMANDA и IceCube40



Мюонные нейтрино: IceCube и ANTARES

Атмосферные потоки $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ от π/K и D -распадов

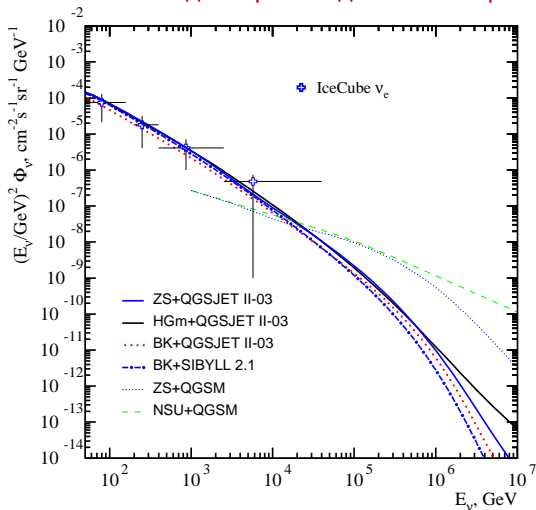


Атмосферные потоки $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ как фон

Модель	$E_\nu^2 \phi_\nu, \text{ГэВ}(\text{см}^2 \text{с ср})^{-1}$
π/K -нейтрино: (усредн. по θ)	400 ТэВ - 1 PeV
ZS+SIBYLL 2.1	$(2.21 - 0.214) \times 10^{-9}$
ZS+QGSJET II	$(1.32 - 0.149) \times 10^{-9}$
HGm+QGSJET II	$(1.45 - 0.163) \times 10^{-9}$
D/L_c -нейтрино ("прямые") :	400 TeV - 1 PeV
NSU+QGSM	$(2.86 - 1.15) \times 10^{-9}$
HGm+QGSM	$(2.2 - 0.54) \times 10^{-9}$
$174E_N^{-3} + \text{DM}$	$(1.87 - 0.85) \times 10^{-9}$
$(\pi/K + D/L_c)$ -нейтрино:	$E_\nu = 1 \text{ PeV}$
π/K (усредн. по θ) + QGSM	0.70×10^{-9}
π/K (усредн. по θ) + DM	1.01×10^{-9}
π/K ($\cos \theta = 0.1$) + QGSM	0.92×10^{-9}
диффузные потоки:	
IC59 limit (34.5 TeV – 36.6 PeV)	$< 1.44 \times 10^{-8}$
IC59 best fit	0.25×10^{-8}
[Phys.Rev. D 89, 062007 (2014)]	
IceCube best fit (988 дней)	$(0.95 \pm 0.3) \times 10^{-8}$
[arXiv:1405.5303v2]	

Атмосферные потоки $\nu_e + \bar{\nu}_e$

Потоки $\nu_e + \bar{\nu}_e$: измерения IceCube и расчет с QGSJET II-03, SIBYLL 2.1 для трех моделей спектра КЛ – ZS, HGm и BK

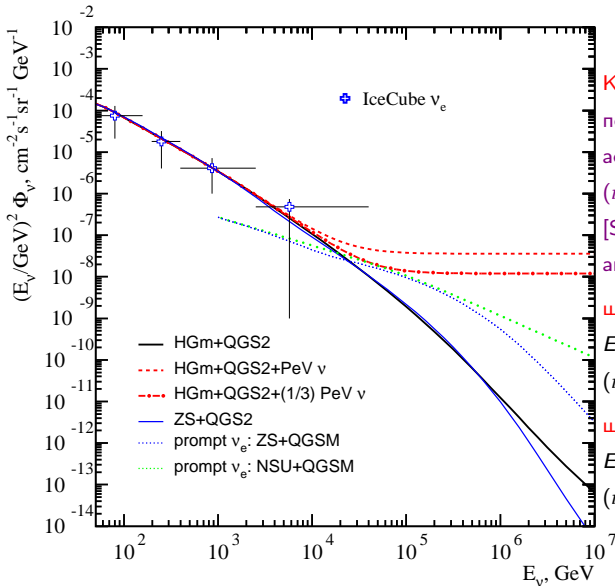


IceCube ν_e : Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 151105;

NSU: С.И.Никольский,
Й.Н.Стаменов, С.З.Ушев,
ЖЭТФ 87, 18 (1984)

Прямые нейтрино - расчет для модели QGSM [Nuovo Cim. C 12, 41 (1989)] и двух моделей спектра КЛ: NSU (штриховая линия) и ZS (пунктир)

Атмосферные и диффузные потоки $\nu_e + \bar{\nu}_e$

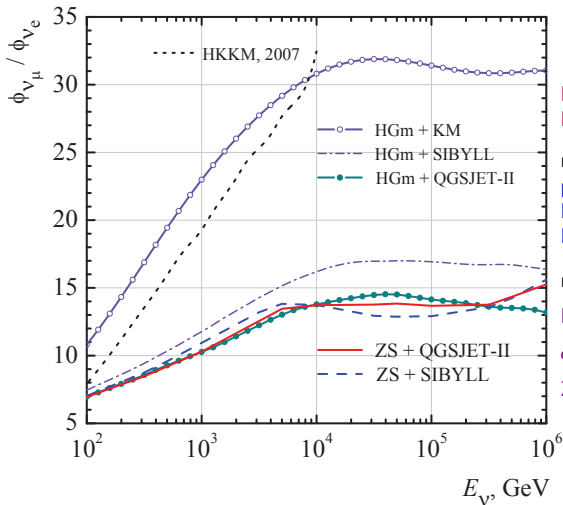


Красные линии – суммарный поток атмосферных и астрофизических нейтрино ($\nu_e + \bar{\nu}_e$) (37 событий Icecube [Science 342, 1242856 (2013); arXiv:1405.5303v2]):

Штриховая – $E_\nu^2 \phi_\nu = 3.6 \cdot 10^{-8} (\text{cm}^2 \text{c sr})^{-1} \text{ГэВ}$ ($\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 0 : 0$)

Штрих-пунктир – $E_\nu^2 \phi_\nu = 1.2 \cdot 10^{-8} (\text{cm}^2 \text{c sr})^{-1} \text{ГэВ}$ ($\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1$)

Флейворное отношение $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)$

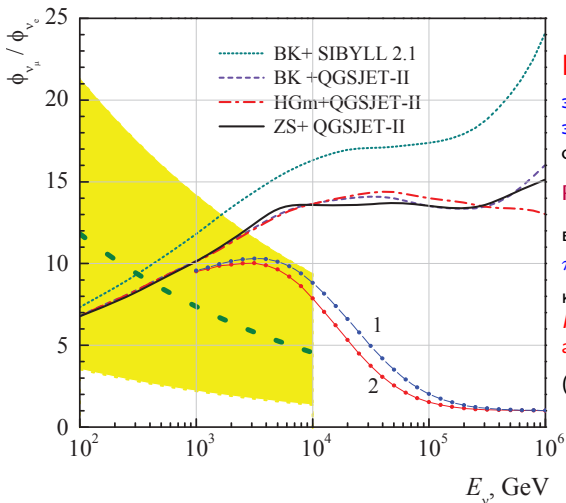


Расчет для π/K -нейтрино (QGSJET II-03, SIBYLL 2.1, KM):

верхние кривые: расчет данной работы с моделью KM и расчет HKKMS (2007) для модели DPMJET-III;

нижние кривые: расчет для QGSJET II-03, SIBYLL 2.1 и двух вариантов спектра КЛ, включающих "колени" – ZS и HGm.

Флейворное отношение $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)$



IceCube data:

зеленая штриховая кривая: среднее значение R_{ν_μ/ν_e} ; закрашенная область: оценка ошибок измерений.

Расчет с QGSJET II-03 и SIBYLL 2.1:

верхние кривые: R_{ν_μ/ν_e} для π/K -нейтрино;

кривые 1, 2: суммарное отношение R_{ν_μ/ν_e} полных потоков нейтрино – атмосферных и астрофизических

(см. также arXiv: 1306.5907v2, 1310.3543).

Диффузный поток резко понижает отношение R_{ν_μ/ν_e} с ~ 15 (π/K -нейтрино) до ~ 5 при 30 ТэВ (поток диффузных нейтрино $\sim 10^{-8} E^{-2}$ (cm ssr GeV) $^{-1}$).

Резюме

- ▶ Потоки атмосферных нейтрино, рассчитанные для моделей SIBYLL 2.1 и QGSJET II-03 заметно отличаются: для мюонных нейтрино до 85%, для электронных до 40%; основной фактор - различие сечений рождения каонов.
- ▶ Учет излома спектра КЛ существенно влияет на расчетные потоки атмосферных нейтрино при $E_\nu \gtrsim 300$ ТэВ.
- ▶ Наблюдение в эксперименте IceCube (988 дней) 32 нейтринных событий с энергиями 30 ТэВ – 2 ПэВ от внеатмосферных источников должно привести к заметному уменьшению флейворного отношения R_{ν_μ/ν_e} (вблизи детектора) даже при флейворном отношении астрофизических нейтрино 1 : 1 : 1 (и уж и тем более для 1 : 0 : 0 или 1 : 0 : 1): поток атмосферных ν_e на порядок ниже потока ν_μ ; диффузный поток ν_e начинает доминировать уже при энергиях вблизи 10 ТэВ, если фит IceCube $E^2 \phi_\nu \sim 10^{-8}$ (ГэВ см⁻²с⁻¹ср⁻¹) [M.G.Aartsen et al., arXiv:1405.5303v2] экстраполировать до 10 ТэВ.
- ▶ Уменьшение величины R_{ν_μ/ν_e} до ~ 5 на интервале 10 – 30 ТэВ указывает на возможность прямого наблюдения в этой области вклада астрофизических ν_e .

Благодарности

Авторы благодарят О. Н. Петрову, внесшую вклад в работу на начальном этапе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания № 3.889.2014/к.

References

- [1] R. Abbasi et al. (IceCube Collaboration), Phys. Rev. D **83**, 012001 (2011).
- [2] S. Adrian-Martinez et al. Eur. Phys. J. C **73**, 2606 (2013).
- [3] V. Van Elewyck (ANTARES Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. A **742**, 63 (2014).
- [4] M. G. Aarsten et al. (IceCube Collaboration), Phys. Rev. Lett. **110**, 151105 (2013).
- [5] M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Science **342**, 1242856 (2013);
M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), arXiv:1405.5303v2.
- [6] M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Phys. Rev. Lett. **111**, 021103 (2013);
- [7] A.A. Kochanov, T.S. Sinegovskaya, S.I. Sinegovsky, ЖЭТФ **143**, 459 (2013).
- [8] A. A. Kochanov, T. S. Sinegovskaya, S. I. Sinegovsky, Astropart. Phys. **30**, 219 (2008); arXiv:0803.2943v2 [astro-ph]
- [9] T. S. Sinegovskaya, E. V. Ogorodnikova, S. I. Sinegovsky, arXiv:1306.5907v2.
- [10] S. I. Sinegovsky, A. D. Morozova, S. I. Sinegovsky, arXiv:1407.3591.