

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

Т. С. Синеговская<sup>1</sup>, А.Д. Морозова<sup>2</sup>, С. И. Синеговский<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Иркутский 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 ( $5.7\sigma$ ) 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<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>ср<sup>-1</sup> (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  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$  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  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$  на интервале 80 ГэВ - 6 ТэВ. Величина  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$ , чувствительная к вкладам прямых и астрофизических нейтрино, даст подтверждение диффузного потока астрофизических нейтрино в области сравнительно небольших энергий, если в эксперименте IceCube измерить спектры  $\nu_e$  на интервале 10 – 50 ТэВ.

# Источники атмосферных нейтрино

## $\pi/K$ -нейтрино

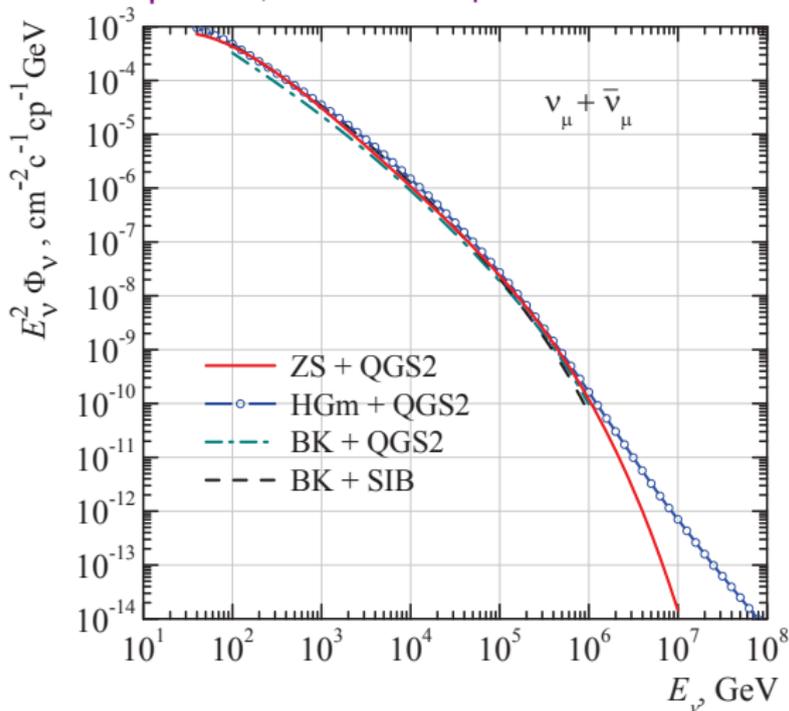
|           | Мода распада  | Вероятность          |
|-----------|---|----------------------|
| $\mu^\pm$ | $e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$ | $\simeq 100\%$       |
| $\pi^\pm$ | $\mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$                    | $\simeq 100\%$       |
| $K^\pm$   | $\mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$                    | 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 %              |
|           | $\pi^\pm + \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$          | $4.66 \cdot 10^{-4}$ |

## $D/\Lambda_c$ -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 %           |
| $\Lambda_c^+$    | $\Lambda + \mu^+ + \nu_\mu$            | $2.0 \pm 0.7\%$ |
|                  | $\Lambda + e^+ + \nu_e$                | $2.1 \pm 0.6\%$ |

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

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



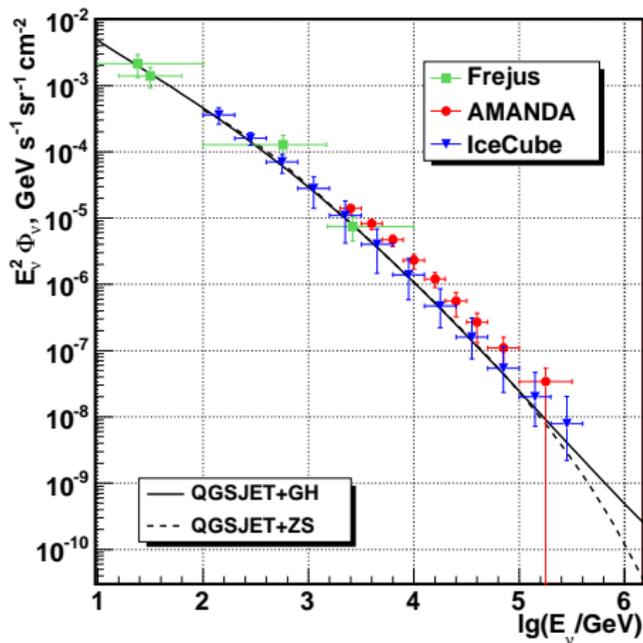
**ZS:** Модель В.И.Зацепина, Н.В. Сокольской (*Astronomy & Astrophys.* 458, 1 (2006));

**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, K.-H. 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  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$   
( $\pi/K$ ), 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 “коленином”)

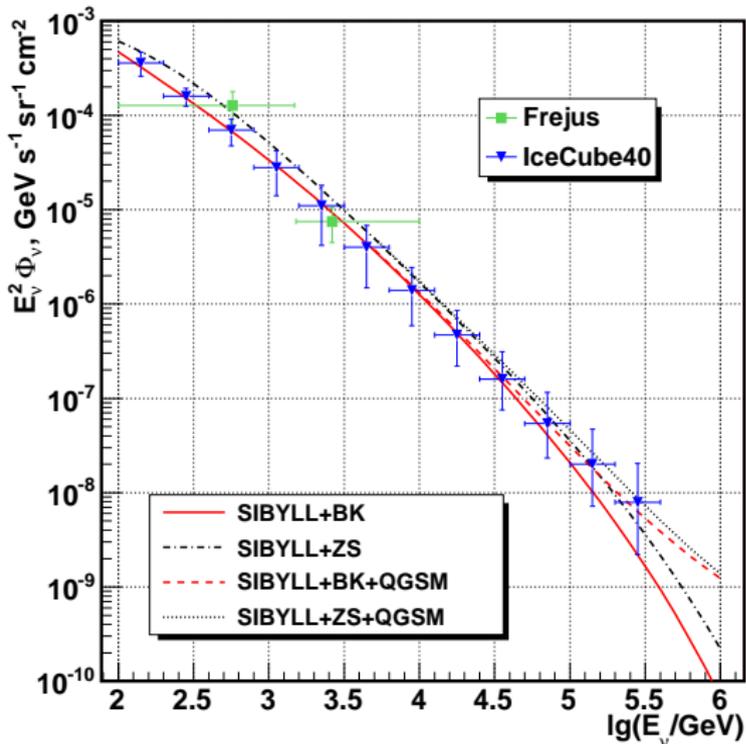
# Потоки нейтрино, зависящие от модели

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.

| $E_\nu$ , 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 |

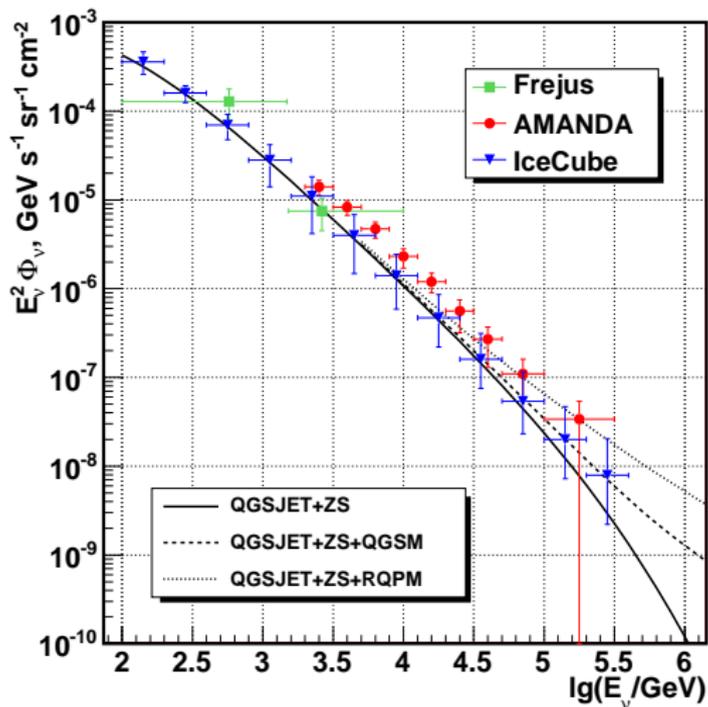
# $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ : SIBYLL 2.1 + ZS, BK

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



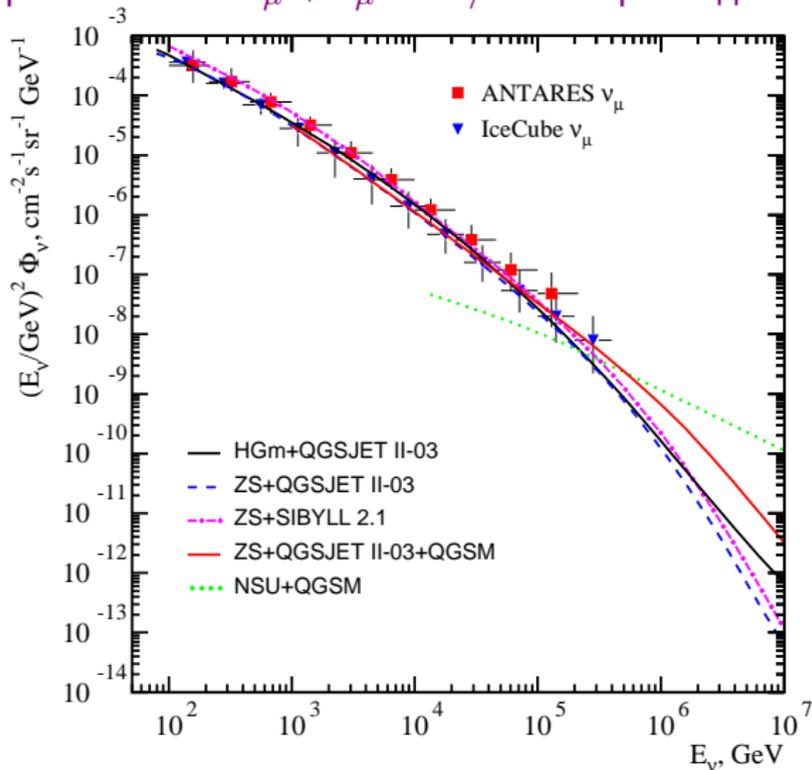
# $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ : QGSJET II-03 + ZS

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  $\pi/K$  и  $D$ -распадов

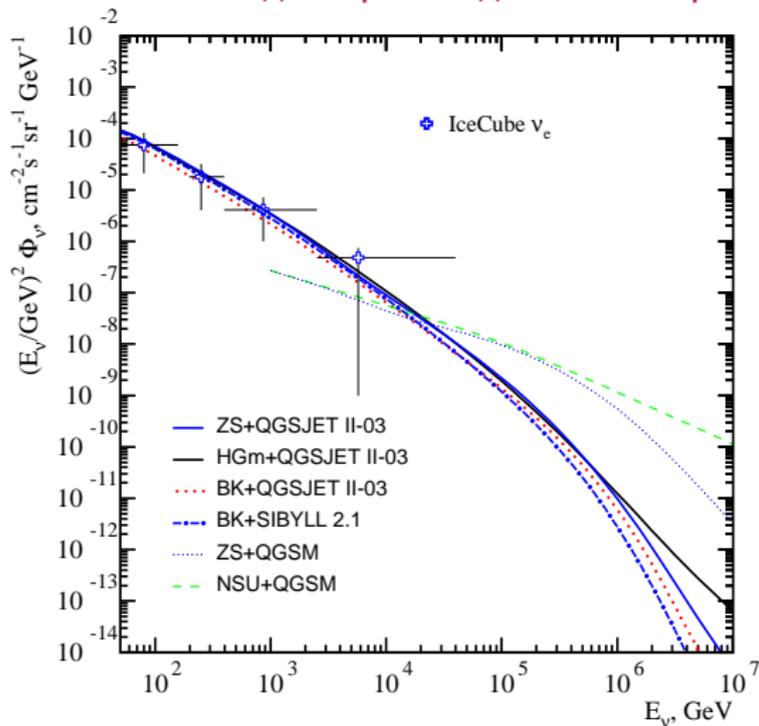


# Атмосферные потоки $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ как фон

| Модель                                       | $E_\nu^2 \phi_\nu, \text{ГэВ}(\text{см}^2 \text{с ср})^{-1}$ |
|--|--|
| $\pi/K$ -нейтрино:<br>(усредн. по $\theta$ ) | 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:                 | $E_\nu = 1 \text{ PeV}$                                      |
| $\pi/K$ (усредн. по $\theta$ ) + QGSM        | $0.70 \times 10^{-9}$  |
| $\pi/K$ (усредн. по $\theta$ ) + DM          | $1.01 \times 10^{-9}$  |
| $\pi/K$ ( $\cos \theta = 0.1$ ) + QGSM       | $0.92 \times 10^{-9}$  |
| <b>диффузные потоки:</b>                     |  |
| IC59 limit<br>(34.5 TeV – 36.6 PeV)          | $< 1.44 \times 10^{-8}$                                      |
| IC59 best fit                                | $0.25 \times 10^{-8}$  |
| [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

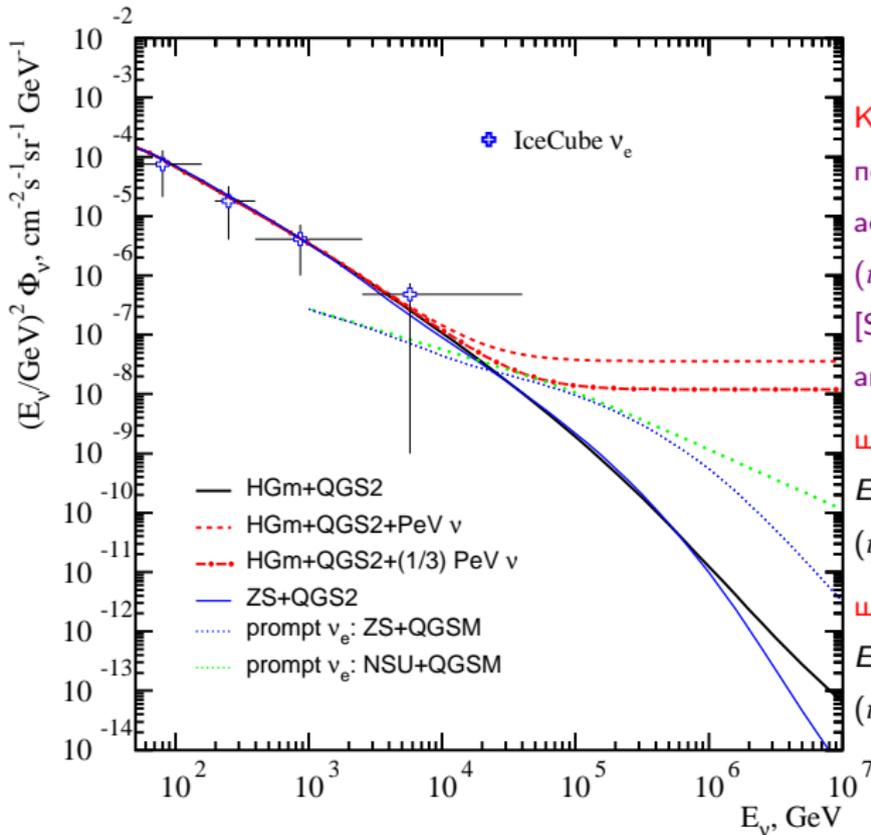


IceCube  $\nu_e$ : Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 151105;

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

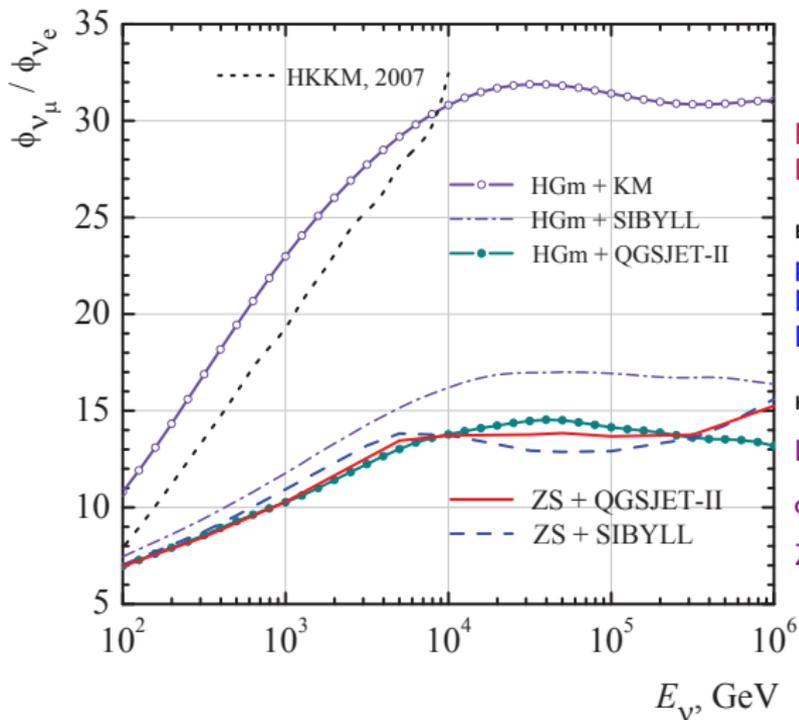


Красные линии – суммарный поток атмосферных и астрофизических нейтрино ( $\nu_e + \bar{\nu}_e$ ) (37 событий Icescube [Science 342, 1242856 (2013); arXiv:1405.5303v2]):

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

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

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

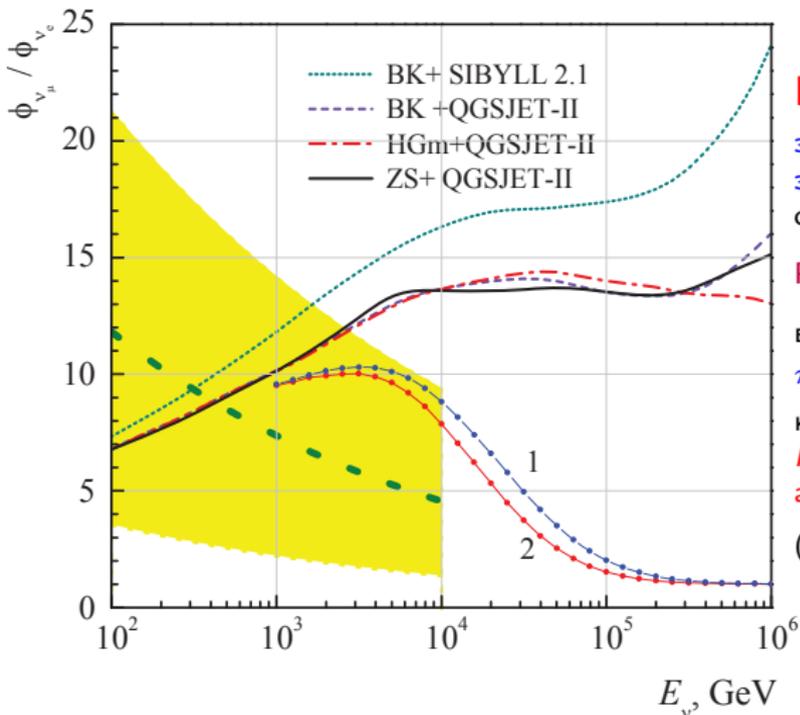


Расчет для  $\pi/K$ -нейтрино (QGSJET II-03, SIBYLL 2.1, KM):

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  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$ ; закрашенная область: оценка ошибок измерений.

Расчет с QGSJET II-03 и SIBYLL 2.1:

верхние кривые:  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$  для  $\pi/K$ -нейтрино;

кривые 1, 2: суммарное отношение  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$  полных потоков нейтрино – атмосферных и астрофизических

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

Диффузный поток резко понижает отношение  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$  с  $\sim 15$  ( $\pi/K$ -нейтрино) до  $\sim 5$  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  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$  (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  $\nu_e$  на порядок ниже потока  $\nu_\mu$ ; диффузный поток  $\nu_e$  начинает доминировать уже при энергиях вблизи 10 ТэВ, если фит IceCube  $E^2 \phi_\nu \sim 10^{-8}$  (ГэВ см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>ср<sup>-1</sup>) [M.G.Aartsen et al., arXiv:1405.5303v2] экстраполировать до 10 ТэВ.
- ▶ Уменьшение величины  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$  до  $\sim 5$  на интервале 10 – 30 ТэВ указывает на возможность прямого наблюдения в этой области вклада астрофизических  $\nu_e$ .

# 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.