

## ФЛЕЙВОРНЫЕ И ЗАРЯДОВЫЕ ОТНОШЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

<sup>1</sup>А.Д. Морозова, <sup>2</sup>А.А. Кочанов, <sup>3</sup>Т.С. Синеговская, <sup>4</sup>С.И. Синеговский

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

<sup>4</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

refriz@yandex.ru

## FLAVOUR AND CHARGE RATIOS OF HIGH-ENERGY ATMOSPHERIC NEUTRINOS

<sup>1</sup>A.D. Morozova, <sup>2</sup>A.A. Kochanov, <sup>3</sup>T.S. Sinegovskaya, <sup>4</sup>S.I. Sinegovsky

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup>Irkutsk State University of Railway Engineering, Irkutsk, Russia

<sup>4</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

---

**Аннотация.** На основе расчета потоков нейтрино в интервале энергий  $10^2$ – $10^8$  ГэВ показано различие  $\nu/\bar{\nu}$  и флейвормого отношения  $\nu_\mu/\nu_e$  для ряда адронных моделей. Сравнительный анализ характеристик потока атмосферных нейтрино, рассчитанных в рамках двух разных подходов — метода  $Z(E, h)$  — функций и метода матричных каскадных уравнений (MCEq), показал хорошее согласие друг с другом по абсолютной величине и форме энергетических спектров.

**Ключевые слова:** атмосферные нейтрино, нейтринные телескопы, космические лучи, модели адрон-ядерных взаимодействий при высоких энергиях.

**Abstract.** Basing on calculations of the atmospheric neutrino spectra in the energy range  $10^2$ – $10^8$  GeV we display differences of  $\nu/\bar{\nu}$  and the flavor ratio  $\nu_\mu/\nu_e$  for the set of hadronic models. Comparative analysis of atmospheric neutrino fluxes, calculated in framework of the two methods —  $Z(E, h)$  functions approach and the Matrix Cascade Equations method (MCEq), demonstrates the close agreement of both calculations in the spectra shape and values.

**Key words:** atmospheric neutrinos, neutrino telescopes, cosmic rays, high-energy hadronic interaction models

---

Отношения атмосферных потоков нейтрино/антинейтрино  $\nu_e/\bar{\nu}_e, \nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$  и флейворное отношение  $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)$ , несут отпечаток элементного состава космических лучей (КЛ) и зависят от сечений рождения заряженных и нейтральных каонов в адрон-ядерных соударениях. Элементный состав КЛ влияет на эти характеристики через протон-нейтронное отношение, влияющее на развитие адронного каскада ШАЛ, а также через  $\pi^+/\pi^-, \pi/K$  — отношения вторичных мезонов — источников нейтрино. Отношение потоков  $\nu/\bar{\nu}$  при высоких энергиях определяются в значительной мере именно каонными источниками (интенсивностью рождения заряженных и нейтральных каонов в адронном каскаде ШАЛ). Однако  $\nu/\bar{\nu}$  — отношение не наследует однозначно р/п-отношение, зависящее от ядерного состава КЛ, поскольку реакция ассоциативного рождения  $K^+$ -мезона протоном  $p+A \rightarrow K^+ + \Lambda + X$  не имеет аналога для рождения  $K^-$ . Таким образом, зарядовое и флейворное отношения нейтрино зависят не только от химического состава первичных КЛ, но также и от деталей развития адронного каскада. Флейворное отношение  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$  интересно своей повышенной чувствительностью к дополнительным источникам нейтрино. Это может быть вклад распада очарованных частиц в потоки атмосферных нейтрино (приводит к заметному понижению отно-

шения при  $E_{\nu_e} > 30$  ТэВ) или вклад астрофизических нейтрино.

В работе представлен расчет характеристик атмосферных нейтрино в интервале энергий 100 ГэВ–10 ПэВ, выполненный для моделей адрон-ядерных взаимодействий Кимеля-Мохова, QGSJET-II, SIBYLL 2.1 и двух моделей спектра космических лучей — Зацепина-Сокольской и Хилласа-Гайссера. Выполнен также сравнительный анализ характеристик потока атмосферных нейтрино, рассчитанных в рамках двух разных методов —  $Z$ -факторного [Sinegovskaya, 2013 et al.; 2015] и недавно опубликованного метода матричных каскадных уравнений (MCEq — Matrix Cascade Equations) [Fedynitch et al., 2015a; 2015b].

Расчет энергетические спектров, зарядового и флейворного отношений атмосферных нейтрино в интервале энергий  $10^2$ – $10^8$  ГэВ выполнен в рамках метода  $Z(E, h)$  — функций ( $Z$ -факторов) [Наумов, Синеговская, 2000; Kochanov et al., 2008; Кочанов и др., 2013; Sinegovskaya et al., 2015] для моделей адрон-ядерных взаимодействий QGSJET-II [Калмыков и др., 1993; Kalmykov et al., 1997; Ostapchenko, 2008], SIBYLL 2.1 [Ahn et al., 2009] и параметризации Кимеля-Мохова [Кимель, Мохов, 1974]. В качестве моделей спектра и состава космических лучей выбраны параметризации Зацепина-Сокольской Н.В. (ZS) [Zatsepin et al., 2006] и Хилласа-Гайссера (HGM и H3a) [Gaisser, 2012], опирающиеся на данные экс-

периментов и учитывающие излом спектра. Спектр Зацепина-Сokolьской опирается на данные прямых измерений, полученные в эксперименте АТIC-2 в интервале энергий ~10–10<sup>4</sup> ГэВ [Панов, 2007], и является их экстраполяцией на область энергий до 100 ПэВ. Модель спектра космических лучей Хиллса-Гайссера учитывает три вида источников: остатки сверхновых, галактические источники, дающие вклад в поток космических лучей между «коленом» (~3 ПэВ) и «лодыжкой» (~4 ЭэВ), и внегалактические объекты — активные ядра галактик, источники гамма-всплесков. В параметризации внегалактической компоненты учтены данные измерений PAO, HiRes и Telescope Array. Здесь мы используем версию модели со смешанным составом для внегалактических источников (обозначена как HGm и H3a).

Сравнительный анализ характеристик потока атмосферных нейтрино выполнен в рамках двух разных методов — Z-факторного [Sinegovskaya et al., 2013; Sinegovskaya et al., 2015] и недавно опубликованного метода матричных каскадных уравнений (MCEq – Matrix Cascade Equations) [Fedynitch et al., 2015a; 2015b]. Суммарные спектры  $\nu_e + \bar{\nu}_e$  и  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ , рассчитанные для одних и тех же моделей адронных взаимодействий и одинаковых параметризаций спектра и состава первичных космических лучей, по абсолютной величине и форме хорошо согласуются друг с другом (различие составляет не более 15% — при сравнительно низких энергиях 50–100 ГэВ и больших зенитных углах (рис. 1, 2).

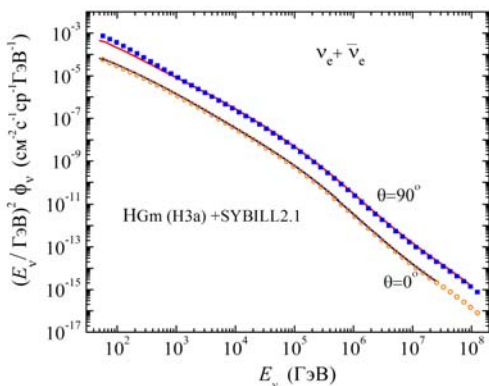


Рис. 1. Сравнение спектров  $\nu_e + \bar{\nu}_e$ , рассчитанных Z-факторным методом (сплошные линии) и методом MCEq (символы)

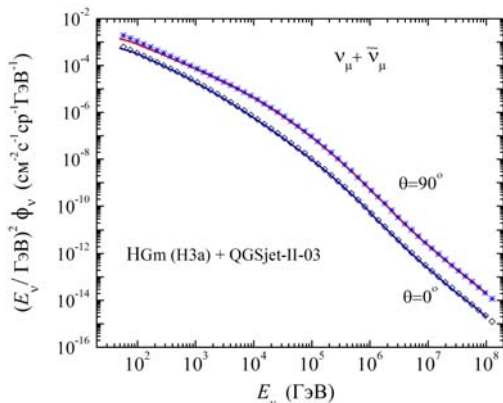


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для спектра  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ , рассчитанного с моделью QGSJET-II

Сравнение парциальных вкладов (нейтрино от распада пионов и различных мод распада каонов) в потоки электронных и мюонных нейтрино вблизи вертикали, рассчитанных для модели адронных взаимодействий SYBILL2.1 с параметризацией космических лучей Хиллса-Гайссера показаны на рис. 3, 4. Парциальные вклады электронных и мюонных нейтрино для модели HGm(H3a)+SYBILL2.1 в сравнении с методом MCEq для угла  $\theta=0^\circ$ . Сплошными кривыми показан Z-факторный расчет, штриховыми — расчет по методу MCEq. Для электронных нейтрино парциальные вклады двух методов расчета находятся в хорошем согласии (рис. 3). Однако парциальные вклады от распада  $K_{L\mu3}^0$  в спектры  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$  в этих двух расчетах заметно отличаются (рис. 4). Причины этого расхождения предположительно связаны с различием спектров нейтрино, генерируемых в этой моде распада. Поскольку вклад моды  $K_{L\mu3}^0$  мал (менее 10%), то различие это не сказывается существенно на полном потоке  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ . Вклад моды  $K_{S\mu3}^0$  в расчете MCEq не учтен.

На рис. 5, 6 показаны зарядовые отношения  $(\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu, \nu_e / \bar{\nu}_e)$  потоков атмосферных нейтрино, рассчитанные для спектра космических лучей Хиллса-Гайссера (H3a) с тремя моделями адронных взаимодействий — SYBILL2.1, QGSJET-II-03 и QGSJET-II-04.

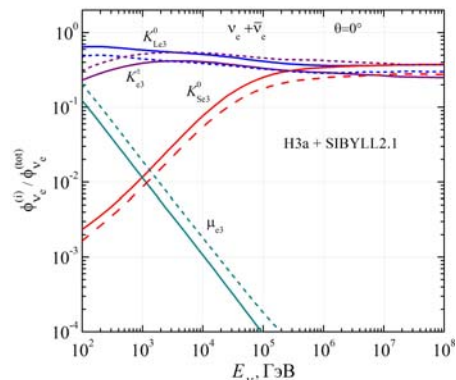


Рис. 3. Парциальные вклады в вертикальные потоки  $\nu_e + \bar{\nu}_e$  для модели H3a + SYBILL2.1 Сплошные линии — Z-факторный метод, штриховые — MCEq

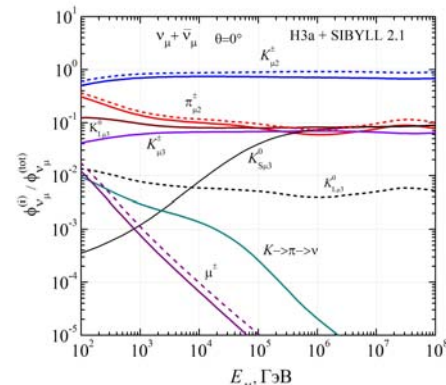


Рис. 4. То же что на рис. 3, но для  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ . Верхняя штриховая кривая (расчет MCEq), представляет сумму вкладов  $(K_{\mu2}^\pm + K_{\mu3}^\pm)$

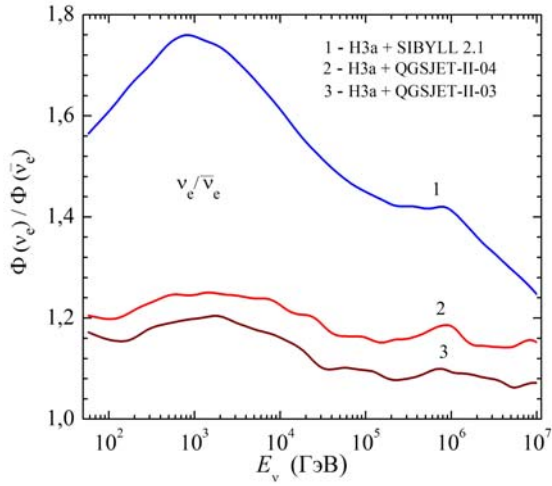


Рис. 5. “Зарядовое” отношение потоков электронных нейтрино  $\nu_e/\bar{\nu}_e$  для трех моделей адронных взаимодействий

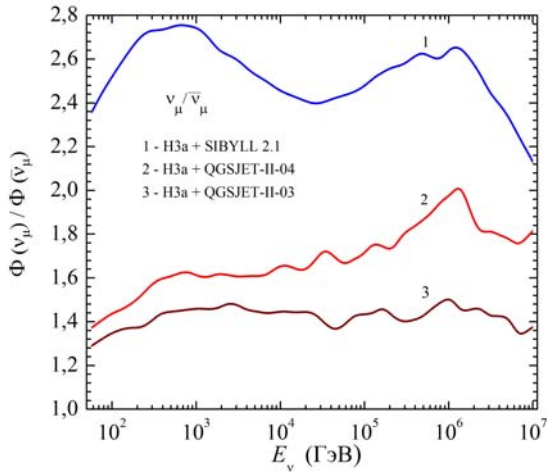


Рис. 6. “Зарядовое” отношение потоков мюонных нейтрино  $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$

Флейворное отношение  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$  потоков атмосферных нейтрино вблизи вертикального направления, рассчитанное для двух моделей спектра космических лучей и четырех моделей адронных взаимодействий показано на рис. 7. Кривые 1, 5 и 6 — расчет в рамках Z-факторного метода, 2, 3 и 4 рассчитаны с помощью MCEq. Вклад модели адронных взаимодействий в различие  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$  (при одинаковом спектре КЛ) иллюстрируют кривые 1–4, кривые 3 и 5 иллюстрируют влияние спектра КЛ (расчет для одной и той же модели QGSJET-II-03). Расчет модели ZS+QGSJET-II-03, показанный для двух значений зенитного угла,  $\theta=0^\circ$  (кривая 5) и  $\theta=72.5^\circ$  (кривая 6), иллюстрирует зависимость  $R_{\nu_\mu/\nu_e}$  от зенитного угла (влияние направления) — флейворное отношение уменьшается с ростом зенитного угла.

В 2011–2015 г. IceCube опубликовал результаты измерений спектра атмосферных нейтрино — мюонных при энергиях 100 ГэВ–575 ТэВ, электронных в диапазоне энергий 80 ГэВ–20 ТэВ (сравнение расчета с этими данными см. в работах [Sinegovskaya et al., 2015; Кочанов и др., 2015]). Кроме

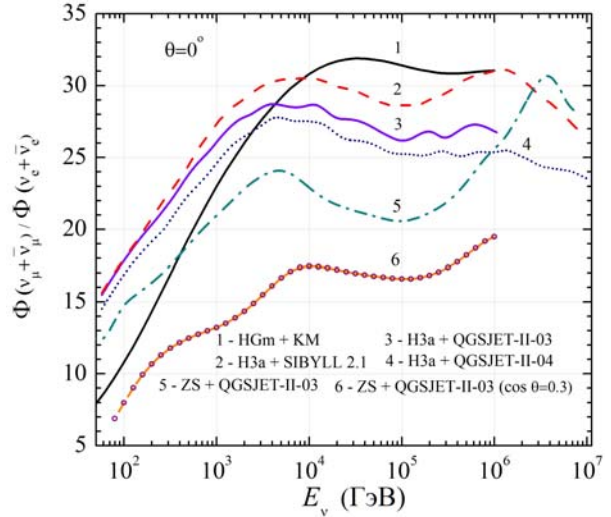


Рис. 7. Флейворное отношение  $R_{\nu_\mu/\nu_e} = (\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)$ , потоков атмосферных нейтрино вблизи вертикального направления. Кривые 1, 5, 6 рассчитаны в рамках Z-факторного метода, 2, 3, 4 — с помощью MCEq

того, при дополнительной обработке данных IceCube [Aartsen et al., 2015b] все зарегистрированные события от атмосферных мюонных нейтрино были отнесены к двум интервалам восстановленных зенитных углов —  $90\text{--}120^\circ$  (см. рис. 8) и  $120\text{--}180^\circ$  (рис. 9). В расчете спектров  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ , усредненных по каждому из этих двух интервалов углов, использовалась модель HGm спектра КЛ и адронные модели SIBYLL2.1 (штриховые линии) и QGSJET-II-03 (сплошные линии). В целом рассчитанные спектры атмосферных нейтрино неплохо описывают экспериментальные результаты для двух интервалов зенитных углов.

Сравнительный анализ характеристик потока атмосферных нейтрино, рассчитанных в рамках двух схем расчета (Z-факторного и MCEq), показал хорошее согласие энергетических спектров нейтрино (рис. 1, 2) и заметное расхождение (рис. 4) в величине

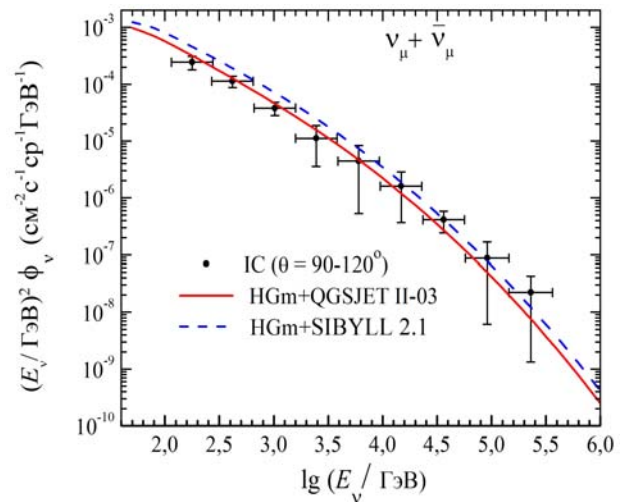


Рис. 8. Спектры  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$  в интервале углов  $90\text{--}120^\circ$  Кривые — расчет, точки — измерения IceCube [Aartsen et al., 2015b]



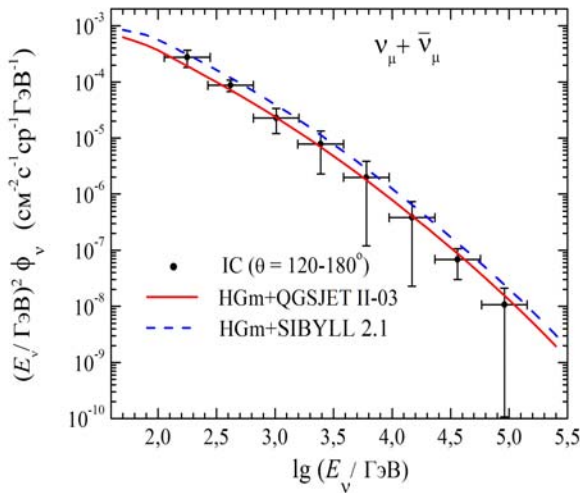


Рис. 9. Спектры  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ , в интервале зенитных углов 120–180°

вклада моды  $K_{L\mu 3}^0$  в поток  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ . Для модели SIBYLL2.1 характерен повышенный выход каонов, и более высокие значения зарядовых соотношений  $\pi$ - и  $K$ -мезонов по сравнению с QGSJET-II. Модель SIBYLL2.1, в отличие от QGSJET-II, включает канал ассоциативного рождения  $K^+$ -мезонов, результатом чего являются большие значения зарядового и флейворного соотношений потоков атмосферных нейтрино.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, задание № 3.904.2017/ПЧ.

### Список литературы

Калмыков Н.Н., Остапченко С.С. Ядро-ядерное взаимодействие, ядерная фрагментация, флуктуации широких атмосферных ливней // *Ядерная физика*. 1993. Т. 56, № 3. С. 105–119.

Кимель Л.Р., Мохов Н.В. Распределения частиц в диапазоне энергий  $10^2$ – $10^{12}$  эВ, инициированные в плотных средах высокоэнергетическими адронами // *Изв. вузов. Физика*. 1974. Вып. 10. С. 17–23.

Кочанов А.А., Синеговская Т.С., Синеговский С.И. Мюоны космических лучей высокой энергии в атмосфере Земли // *ЖЭТФ*. 2013. Т. 143, № 3. С. 459–475.

Кочанов А.А., Морозова А.Д., Синеговская Т.С., Синеговский С.И., Характеристики потока нейтрино высоких энергий в атмосфере Земли // *Солнечно-земная физика*. 2015. Т. 1, вып. 4. С. 3–10.

Наумов В.А. Синеговская Т.С. Элементарный метод решения уравнений переноса нуклонов космических лучей в атмосфере // *Ядерная физика*. 2000. Т. 63, № 11. С. 2020–2028.

Панов А.Д. и др. Элементарные энергетические спектры космических лучей по данным эксперимента АТИС-2 // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2007. Т. 71. С. 512–515.

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*. 2015a. V. 75, 116. P. 1–16.

Ahn Eun-Joo et al. Cosmic ray interaction event generator SIBYLL 2.1 // *Phys. Rev. D*. 2009. V. 80, 094003.

Fedynitch A., Engel R., Gaisser T.K., et al. Calculation of conventional and prompt lepton fluxes at very high energy // *EPJ Web Conf.* 2015a. V. 99, 08001. arXiv:1503.00544.

Fedynitch A., Engel R., Gaisser T.K., et al. MCEQ — numerical code for inclusive lepton flux calculations. *Proc. Sci.* 2015b. P. 1129. PoS (ICRC2015) 1129.

Gaisser T. Spectrum of cosmic-ray nucleons, kaon production, and the atmospheric muon charge ratio // *Astropart. Phys.* 2012. V. 24. P. 801–806. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2012.02.010.

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

Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I. Quark-gluon string model and EAS simulation problems at ultra-high energies // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 1997. V. 52. P. 17–28. DOI: 10.1016/S0920-5632(96)00846-8.

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.

Ostapchenko S. Hadronic interactions at cosmic ray energies // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 2008. V. 175–176. P. 73–80.

Sinegovskaya T.S., Ogorodnikova E.V., Sinegovsky S.I. High-energy fluxes of atmospheric neutrinos // *Proc. 33<sup>rd</sup> ICRC, Rio de Janeiro, 2013*; arXiv: 1306.5907, 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. 063011. DOI: 10.1103/PhysRevD.91.063011.

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.