

ПРЯМЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ НЕЙТРИНО В МОДЕЛИ КВАРК-ГЛЮОННЫХ СТРУН

М.Н. Сороковиков, С.И. Синеговский

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
waleralincoln@mail.ru

PROMPT ATMOSPHERIC NEUTRINOS IN THE QUARK-GLUON STRING MODEL

M.N. Sorokovikov, S.I. Sinegovsky

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Аннотация. Выполнен расчет потока прямых атмосферных нейтрино в интервале энергий $1-10^5$ ТэВ, генерируемых в распадах очарованных частиц. Сечения рождения очарованных D -мезонов и Λ_c -барионов в pA - и πA -соударениях рассчитаны в феноменологической модели кварк-глюонных струн, значения свободных параметров которой уточнены на основе данных экспериментов на Большом адронном коллайдере. Приведено сравнение с результатами расчетов авторов, использующих другие модели рождения чарма. Рассчитанный поток прямых атмосферных нейтрино не противоречит ограничению, установленному в эксперименте IceCube.

Ключевые слова: космические лучи высоких энергий, модель кварк-глюонных струн, рождение очарованных частиц, атмосферные нейтрино, нейтринный телескоп

Abstract. We calculate the prompt atmospheric neutrino flux in the energy range $1-10^5$ TeV arising from decays of the charmed particles. Cross sections of D -mesons and Λ_c -baryons production in pA - and πA -collisions are calculated with the phenomenological quark-gluon string model (QGSM), free parameters of which were improved using measurement data of the LHC experiments. Predicted prompt neutrino flux is compatible with the constraint obtained in IceCube experiment. Also we compare our calculation with other predictions obtained for different charm production models.

Keywords: high-energy cosmic rays, quark-gluon string model, charm production, prompt atmospheric neutrino, neutrino telescope.

Введение

Нейтрино высоких энергий от распадов мезонов и барионов, рождающихся при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли, образуют неустранимый фон в задаче детектирования нейтрино от удаленных астрофизических источников. Регистрация нескольких десятков событий от нейтрино с энергиями 20 ТэВ–4 ПэВ на установке IceCube [Aartsen et al., 2016] сделала проблему фона атмосферных нейтрино актуальной задачей. Важная высокоэнергетическая (сотни ТэВ) составляющая фона (“прямые” нейтрино) генерируется в распадах очарованных частиц — D -мезонов и Λ_c -барионов.

С созданием гигантских детекторов нейтринных телескопов NT200+ [Avrorin et al., 2015], IceCube [Aartsen et al., 2016], ANTARES [Adrian-Martinez et al., 2013] достигнут значительный прогресс в экспериментальных исследованиях атмосферных нейтрино. Однако спектр прямых нейтрино до сих пор не измерен, и нельзя исключить, что часть событий, отнесенных к астрофизическим нейтрино в эксперименте IceCube, обусловлена именно нейтрино от очарованных частиц, рождающихся в атмосфере.

В настоящей работе сделана оценка потока прямых атмосферных нейтрино на основе расчета сечений рождения очарованных частиц в модели кварк-глюонных струн (МКГС), которая ранее уже использовалась для расчета потоков прямых мюонов и нейтрино [Bugaev et al., 1989; Naumov et al., 1998] (см. также [Sinogovskaya et al., 2015]). Значения сво-

бодных параметров МКГС уточнены на основе сравнения нового расчета сечений рождения чарма с данными экспериментов на Большом адронном коллайдере [Abelev et al., 2012; Aad et al., 2016; Adam et al., 2016]. Спектр прямых атмосферных нейтрино при энергиях до 100 ПэВ был рассчитан в рамках простой модели адронного каскада [Валл и др., 1986], в которую были включены дифференциальные и полные сечения рождения D -мезонов и Λ_c -гиперонов в pA - и πA -соударениях, рассчитанные в МКГС с новыми параметрами. Полученная оценка потока прямых атмосферных нейтрино сопоставлена с результатами других расчетов, выполненных на основе дипольной модели [Enberg et al., 2008], КХД-модели [Bhattacharya et al., 2016] и модели SIBYLL 2.3rc1 [Fedynitch et al., 2015], а также с ограничением, установленным в эксперименте IceCube [Aartsen et al., 2016].

Сечения рождения очарованных частиц в модели кварк-глюонных струн

Модель кварк-глюонных струн (МКГС) представляет собой непертурбативный подход, описывающий мягкие адронные процессы. Модель основана на теории Редже и топологическом $1/N$ -разложении амплитуд (разложении по степени сложности диаграмм), где N — число ароматов кварков или число цветов (более подробную информацию о модели см. в работах [Кайдалов, Пискунова, 1986; Шабельский, 1986; Arakelian, 1998; Лыкасов и др., 1999; Кайдалов, 2003]).

Инклюзивные сечения рождения очарованных адронов $d\sigma/dx$ (x — фейнмановская переменная) содержат свободные параметры, такие как пересечение реджевской $c\bar{c}$ -траектории $\alpha_\psi(0)$ и коэффициент a_1 (входящий в лидирующие функции фрагментации), значения которых находят из сравнения расчетов с экспериментом. Пересечение малоизученной траектории $\alpha_\psi(0)$ заметно влияет на сечения рождения очарованных адронов. Теории возмущений КХД отвечает нелинейная траектория с $\alpha_\psi(0)=0$. Если траектория $\alpha_\psi(t)$ линейна (как траектории для легких адронов), то ее интерсепт $\alpha_\psi(0)=-2.2$, и x -распределения очарованных частиц оказываются более мягкими по сравнению с вариантом $\alpha_\psi(0)=0$. Данные о рождении очарованных частиц, полученные в последние годы, как будто указывают на предпочтительность значения $\alpha_\psi(0)=-2.2$, учитывающего эффекты за рамками теории возмущений КХД [Кайдалов, 2003].

В настоящее время для коэффициента a_1 , обеспечивающего единое описание кинематических областей $x \rightarrow 0$ и $x \rightarrow 1$ в случае лидирующей фрагментации D -мезонов, нет ясных аргументов в пользу того или иного выбора его значения. Среди множества значений параметра a_1 , которые используются в литературе, можно выделить два крайних — $a_1=30$ [Кайдалов, Пискунова, 1986] и $a_1=2$ [Arakelian, 1998]. Измерения полных сечений рождения очарованных мезонов при высоких энергиях в экспериментах ALICE [Abelev et al., 2012; Adam et al., 2016] и ATLAS [Aad et al., 2016] дают возможность уточнить значения параметра a_1 из сопоставления предсказаний МКГС и новых экспериментальных данных.

Результаты расчета сечений рождения очарованных частиц в pp - и $p\bar{p}$ -соударениях, выполненные в настоящей работе, в сравнении с экспериментом представлены на рис. 1, 2.

При небольших энергиях ($\sqrt{s} < 1$ ТэВ) сечения для крайних значений параметра a_1 отличаются в 2–5 раз, но с ростом энергии зависимость от параметра a_1 уменьшается. В области высоких энергий ($\sqrt{s} \gg 1$ ТэВ) влияние параметра a_1 незначительно.

Для расчета потоков атмосферных нейтрино необходимо знать сечения рождения очарованных частиц в столкновениях адронов с ядрами. Пересчет сечений на ядерную мишень со средним массовым числом $A=14.5$ (воздух) выполнен по формуле $d\sigma_{pA}/dx = A^\alpha d\sigma_{pp}/dx$, где $\alpha=0.72$.

Расчет потоков атмосферных нейтрино

В настоящей работе выполнен расчет потоков атмосферных нейтрино (рис. 3) в рамках метода [Валл и др., 1986; Bugaev et al., 1989] для модели кварк-глюонных струн и параметризаций спектра космических лучей Никольского, Стаменова, Ушева (НСУ) [Никольский и др., 1984] и Ерлыкина, Крутиковой, Шабельского (ЕКШ) [Ерлыкин и др., 1987], отражающих элементный состав ПКЛ. Кроме того, используется упрощенная модель Thunman, Ingelman, Gondolo (TIG) [Thunman et al., 1996] без детального состава КЛ, учитывающая «колесо» спектра.

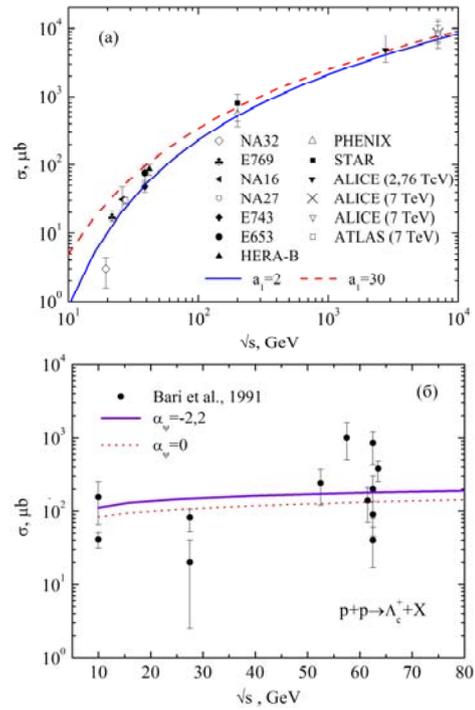


Рис. 1. Полное сечение рождения D/\bar{D} -мезонов (а) и Λ_c -бариона (б) в pp -взаимодействии как функция энергии в с.д.м. Расчет: а — $\alpha_\psi(0)=-2.2$, $a_1=2$ (сплошная линия) и $a_1=30$ (штриховая); б — $\alpha_\psi(0)=-2.2$ (сплошная линия) и $\alpha_\psi(0)=0$ (штрих-пунктир). Эксперимент: \diamond — [Barlag et al., 1988]; \clubsuit — [Alves et al., 1996]; \blacktriangleleft — [Aguilar-Benitez et al., 1984]; \circ — [Aguilar-Benitez et al., 1988]; \blacklozenge — [Ammar et al., 1988]; \bullet — [Kodama et al., 1991]; \blacktriangle — [Zoccoli et al., 2005]; Δ — [Adare et al., 2006]; \blacksquare — [Adamczyk et al., 2012]; \blacktriangledown , \times — [Abelev et al., 2012]; ∇ — [Adam et al., 2016]; \square — [Aad et al., 2016] (а); \bullet — [Bari et al., 1991] (б)

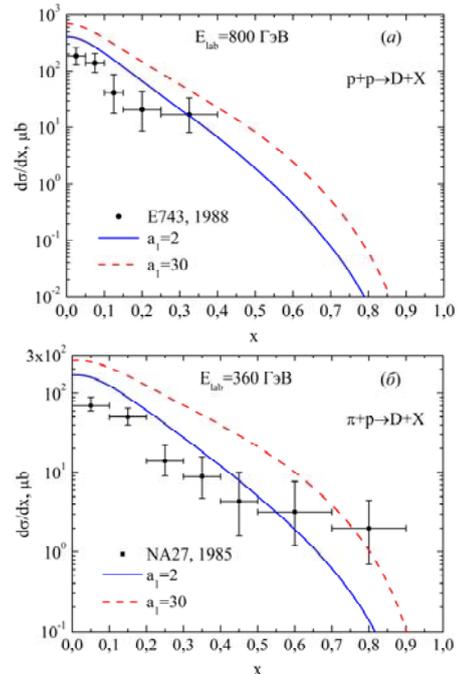


Рис. 2. Дифференциальные сечения рождения D -мезонов ($D^+ + D^- + D^0 + \bar{D}^0$) в pp -соударениях (а) и $p\bar{p}$ -соударениях (б). Эксперимент: \bullet — [Ammar et al., 1988]; \blacksquare — [Aguilar-Benitez et al., 1985]. Кривые — расчет для $a_1=2$ и $a_1=30$

Неопределенность расчета настоящей работы (с интерсептом $\alpha_\psi(0)=-2.2$), зависящая от параметра a_1 , показана полосой (нижняя граница — $a_1=2$, верхняя — $a_1=30$).

Влияние модели рождения чарма отчетливо видно на рис. 3, а, где показаны результаты расчета потоков нейтрино для одного и того же спектра космических лучей TIG. При энергии $E_\nu > 10^6$ ГэВ расчет МКГС практически совпадает с результатом, полученным в теории возмущений КХД (BEJKRSS) [Bhattacharya et al., 2016]. В важной области энергии $E_\nu > 1$ ПэВ, где доминирует вклад в поток атмосферных нейтрино от распада очарованных частиц, наш расчет оказывается существенно ниже расчета дипольной модели ERS [Enberg et al., 2008]. Отметим, что при обработке данных в эксперименте IceCube дипольная модель использовалась в качестве базовой, хотя сечения этой модели не были проверены на эксперименте, а поток прямых нейтрино с ее использованием был рассчитан с упрощенной версией спектра космических лучей TIG.

На рис. 3, б показан поток прямых нейтрино, рассчитанный в настоящей работе со спектром ЕКШ, в сравнении с результатами расчетов модели SIBYLL 2.3rc1 [Fedynitch et al., 2015] и КХД-модели BEJKRSS с одним и тем же спектром космических лучей H3a [Gaisser, 2012]. В интервале энергий 1–10 ПэВ спектр прямых нейтрино, рассчитанный для модели BEJKRSS+H3a, оказывается чуть ниже расчета настоящей работы для спектра ЕКШ. Это различие обусловлено в основном тем, что спектр ПКЛ в модели H3a в этой области энергий раза в полтора

ниже спектра ЕКШ. С ростом энергии эти отличия уменьшаются, и верхняя граница расчета КХД-модели после 10 ПэВ очень близка к нашему результату, полученному для МКГС с новыми значениями параметров $a_1=2$ и $\alpha_\psi(0)=-2.2$.

Заключение

Данные о рождении очарованных мезонов при высоких энергиях, полученные в экспериментах ALICE ($\sqrt{s} = 2.76$ и 7 ТэВ), ATLAS (7 ТэВ), позволили уточнить значения свободных параметров a_1 и $\alpha_\psi(0)$ модели кварк-глюонных струн и выполнить новый расчет сечений рождения очарованных частиц в pA - и πA -соударениях. Дифференциальные сечения рождения чарма (в отличие от полного сечения) при высоких энергиях чувствительны к изменению параметра a_1 , что приводит к изменению потока прямых нейтрино на 20–40 % для крайних значений параметра a_1 . Более существенное влияние на потоки нейтрино оказывает интерсепт реджевской $c\bar{c}$ -траектории $\alpha_\psi(0)$: новый расчет для $\alpha_\psi(0)=-2.2$ привел к заметному (фактор ~ 3) понижению потока нейтрино по сравнению с результатом прежнего расчета для МКГС [Bugaev et al., 1989], который был выполнен для $\alpha_\psi(0)=0$. При использовании одинакового спектра космических лучей (TIG) расчет потока прямых мюонных нейтрино для МКГС практически совпадает в важной области энергий $E_\nu > 100$ ТэВ с результатом, полученным для КХД-модели [Bhattacharya et al., 2016]. Полученная в настоящей работе оценка потока прямых нейтрино оказывается заметно ниже результата дипольной модели ERS и не противоречит ограничению, установленному в эксперименте IceCube.

Список литературы

Валл А.Н., Наумов В.А., Синеговский С.И. Адронная компонента космических лучей высоких энергий и рост неупругих сечений // Ядерная физика. 1986. Т. 44, вып. 5. С. 1240–1250.

Ерлыкин А.Д., Крутикова Н.П., Шабельский Ю.М. Прохождение космических лучей через атмосферу в модели кварк-глюонных струн // Ядерная физика. 1987. Т. 45. С. 1075–1084.

Кайдалов А.Б. Особенность Померанчука и взаимодействия адронов при высоких энергиях // Успехи физ. наук. 2003. Т. 173, № 11. С. 1153–1170.

Кайдалов А.Б., Пискунова О.И. Образование очарованных частиц в модели кварк-глюонных струн // Ядерная физика. 1986. Т. 43, вып. 6. С. 1545–1552.

Лыкасов Г.И., Аракелян Г.Г., Сергеев М.Н. Модель кварк-глюонных струн: мягкие и полужесткие адронные процессы // ЭЧАЯ. 1999. Т. 30, вып. 4. С. 819–869.

Никольский С.И., Стаменов Й.Н., Ушев С.З. Энергетический спектр и ядерный состав первичных космических лучей // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. С. 18–36.

Шабельский Ю.М. Инклюзивные спектры вторичных частиц в $p\pi$ - и pp -соударениях в модели кварк-глюонных струн // Ядерная физика. 1986. Т. 44, вып. 1. С. 186–196.

Aad G. et al. Measurement of $D^{*\pm}$, D^\pm and D_s^\pm meson production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with

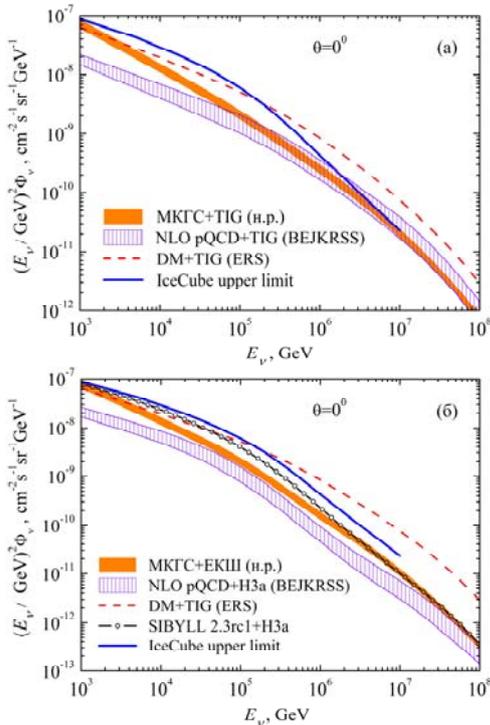


Рис. 3. Поток прямых атмосферных нейтрино вблизи вертикали. Закрашенная полоса — расчет МКГС со спектрами космических лучей TIG (а) и ЕКШ (б); заштрихованная область — КХД-модель (BEJKRSS), штрих-пунктирная линия — дипольная модель ERS; модель SIBYLL 2.3rc1 (линия с символами). Сплошная линия — ограничение IceCube (см. текст)

- the ATLAS detector // Nucl. Phys. B. 2016. V. 907. P. 717–763.
- Aarsten M.G. et al. Observation and characterization of a cosmic muon neutrino flux from the northern hemisphere using six years of IceCube data // Astrophys. J. 2016. V. 833. P. 3–20.
- Abelev B. et al. (ALICE Collaboration). Measurement of charm production at central rapidity in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV // JHEP. 2012. V. 7. P. 191–217; arXiv:1205.4007.
- Adam J. et al. (ALICE Collaboration). D -meson production in p -Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV and in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // Phys. Rev. C. 2016. V. 94. P. 054908.
- Adamczyk L. et al. (STAR Collaboration). Measurement of D^0 and D^* production in $p + p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV // Phys. Rev. D. 2012. V. 86. P. 072013.
- Adare A. et al. (PHENIX Collaboration). Measurement of high- p_T single electrons from heavy-flavor decays in $p + p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 252002.
- Adrian-Martinez S. et al. Measurement of the atmospheric ν_μ energy spectrum from 100 GeV to 200 TeV with the ANTARES telescope // Eur. Phys. J. C. 2013. V. 73, no. 2606. P. 1–12.
- Aguilar-Benitez M. et al. (NA16 Collaboration). D meson branching ratios and hadronic charm production cross section // Phys. Lett. B. 1984. V. 135. P. 237–242.
- Aguilar-Benitez M. et al. (NA27 Collaboration). Inclusive properties of D mesons produced in 360 GeV $\pi^- p^-$ interactions // Phys. Lett. B. 1985. V. 161. P. 400–406.
- Aguilar-Benitez M. et al. (NA27 Collaboration). Charm hadron properties in 400 GeV/c pp interactions // Z. Phys. C. 1988. V. 40. P. 321–346.
- Alves G.A. et al. (E769 Collaboration). Forward cross sections for production of D^+ , D_0 , D_s , D^{*+} and Λ_c in 250 GeV π^\pm , K^\pm and p interactions with nuclei // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77, no. 12. P. 2388–2391.
- Ammar R. et al. (E743 Collaboration). D -meson production in 800-GeV/c pp interactions // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61, no. 19. P. 2185–2188.
- Arakelian G.H. Charmed sea contribution to the inclusive hadroproduction of the mesons with open charm in the quark gluon string model // Phys. Atom. Nucl. 1998. V. 61. P. 1570–1576.
- Avrorin A.D. et al. (Baikal Collaboration). Status and recent results of the BAIKAL-GVD project // Phys. Part. Nucl. 2015. V. 46, no. 2. P. 211–221.
- Bari G. et al. (R422 Collaboration). A measurement of Λ_c baryon production in proton-proton interactions at $\sqrt{s} = 62$ GeV // Nuovo Cim. C. 1991. V. 104, no. 4. P. 571–599.
- Barlag S. et al. (NA32 Collaboration). Production of D , D^* and D_s mesons in 200 GeV/c π^- , K^- and p -Si interactions // Z. Phys. C. 1988. V. 39. P. 451–460.
- Bhattacharya A. et al. Prompt atmospheric neutrino fluxes: perturbative QCD models and nuclear effects // JHEP. 2016. V. 11. P. 167–218.
- Bugaev E.V., Naumov V.A., Sinegovsky S.I., et al. Prompt leptons in cosmic rays // Nuovo Cim. C. 1989. V. 12, no. 1. P. 41–73.
- Enberg R., Reno M.H., Sarcevic I. Prompt neutrino fluxes from atmospheric charm // Phys. Rev. D. 2008. V. 78. P. 043005.
- Fedynitch A. et al. Calculation of conventional and prompt lepton fluxes at very high energy // EPJ Web Conf. 2015. V. 99, 08001; arXiv:1503.00544.
- Gaisser T. Spectrum of cosmic-ray nucleons, kaon production, and the atmospheric muon charge ratio // Astropart. Phys. 2012. V. 24. P. 801–806.
- Kodama K. et al. (E653 Collaboration). Charm meson production in 800 GeV/c proton-emulsion interactions // Phys. Lett. B. 1991. V. 263. P. 573–578.
- Naumov V.A., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. The K_{13} form factors and atmospheric neutrino flavor ratio at high energies // Nuovo Cim. A. 1998. V. 111, N 2. P. 129–147.
- Sinegovskaya T.S., Morozova A.D., Sinegovsky S.I. High-energy neutrino fluxes and flavor ratio in the Earth's atmosphere // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. P. 063011.
- Thunman M., Ingelman G., Gondolo, P. Charm production and high energy atmospheric muon and neutrino fluxes // Astropart. Phys. 1996. V. 5. P. 309–332.
- Zoccoli A. et al. Charm, beauty and charmonium production at HERA-B // Eur. Phys. J. C. 2005. V. 43. P. 179–186.