

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

На правах рукописи



A handwritten signature in black ink is located in the upper right corner of the page. The signature is cursive and appears to read 'S. S. Sorokovikov'.

Сороковиков Максим Николаевич

Рождение очарованных частиц в адрон-ядерных
взаимодействиях при высоких энергиях в
феноменологической модели кварк-глюонных струн и
расчет потоков атмосферных мюонов и нейтрино

Специальность 1.3.15—
«физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких
энергий»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2024

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзелепова
Объединённого Института Ядерных Исследований.

Научный руководитель: **Бугаев Эдгар Валерьевич**,
доктор физико-математических наук,
ИЯИ РАН,
ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Калмыков Николай Николаевич**,
доктор физико-математических наук,
МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИЯФ им. Д.В.
Скобельцына,
главный научный сотрудник

Наумов Вадим Александрович,
кандидат физико-математических наук,
ОИЯИ,
начальник сектора

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Карамышева Г. А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Первичные космические лучи (ПКЛ) при взаимодействии с ядрами атмосферы Земли генерируют потоки вторичных адронов. Стабильные нуклоны, продолжая взаимодействовать, составляют основу широких атмосферных ливней (ШАЛ). Нестабильные адроны, в зависимости от своей энергии, могут взаимодействовать или распадаться. Распады нестабильных адронов – пионов, каонов, а также более тяжёлых мезонов и барионов являются источником атмосферных мюонов и нейтрино. Сравнение расчетных и измеренных характеристик потоков атмосферных мюонов и нейтрино позволяет получать информацию о спектре и составе первичных космических лучей, если задана модель адрон-ядерных взаимодействий. Такой способ исследования ПКЛ особенно важен для высоких энергий (> 100 ТэВ), при которых доступны только непрямые методы измерения ПКЛ, с помощью регистрации широких атмосферных ливней наземными детекторами. С другой стороны, если энергетический спектр и состав первичных космических лучей хорошо изучен, то сопоставление расчета и измерений спектра и зенитно-углового распределения мюонов и нейтрино дает возможность изучения процессов рождения и распада адронов. Такой подход является источником уточнений моделей адрон-ядерных взаимодействий при энергиях, недостижимых на современных ускорителях.

Потоки атмосферных мюонных нейтрино и мюонов состоят из двух компонент, различающихся по энергетическому спектру и зенитно-угловому распределению. Анизотропная компонента генерируется в распадах пионов и каонов и имеет более мягкий спектр - это «обычные» («conventional») или (π, K) -лептоны. Вторая компонента доминирует при высоких энергиях и генерируется, в основном, в распадах короткоживущих тяжёлых очарованных мезонов и барионов ($D^\pm, D^0, \bar{D}^0, \Lambda_c^+$). Из-за малого времени жизни очарованных адронов, они практически всегда распадаются до взаимодействия в атмосфере. В результате эта составляющая атмосферных лептонов имеет более жёсткий спектр, близкий к спектру ПКЛ, а также слабую зависимость от зенитного угла. Эту квазиизотропную компоненту называют «прямыми» («prompt») лептонами или лептонами «прямой генерации», которые, как ожидается, внесут заметный вклад в регистрируемые события при энергиях выше ~ 100 ТэВ.

Атмосферные нейтрино и мюоны высоких энергий образуют неустранимый фон в задаче детектирования нейтрино от удаленных астрофизических источников. Расчет энергетического спектра и зенитно-углового распределения атмосферных лептонов как фона стал особенно актуален в связи с открытием астрофизических нейтрино на телескопе IceCube [1–3]. Независимым подтверждением существования нейтрино внеземного происхождения стала регистрация потока астрофизических нейтрино на уровне

статистической значимости 3σ на нейтринном телескопе Baikal-GVD [4]. Несмотря на значительный прогресс в исследованиях потоков нейтрино, достигнутый на крупномасштабных нейтринных телескопах, вклад более жёсткой атмосферной компоненты – нейтрино прямой генерации, до сих пор не измерен. Эта компонента вносит самую большую неопределенность в расчетные потоки атмосферных нейтрино из-за недостатка экспериментальных данных о сечениях рождения очарованных частиц при высоких энергиях, а также большого разброса теоретических предсказаний сечений.

Во взаимодействиях ПКЛ высоких энергий с атмосферой Земли доминируют мягкие процессы с малым переданным моментом, выходящие за рамки пертурбативной техники квантовой хромодинамики (КХД). Пертурбативные КХД-модели рождения очарованных частиц сталкиваются с трудностями, связанными с вкладом непертурбативной динамики (можно вспомнить об известных трудностях, связанных с явлением конфайнмента кварков, в основе которого лежат сильные непертурбативные эффекты). Поэтому для всестороннего исследования рождения очарованных частиц в адронных взаимодействиях высоких энергий требуется развитие феноменологических моделей, находящихся за рамками пертурбативной КХД.

В последнее время появились новые экспериментальные данные по рождению очарованных адронов при высоких энергиях, полученные на Большом адронном коллайдере (БАК) [5–11]. Новые измерения получены как для дифференциальных, так и для полных сечений рождения очарованных частиц. Измерения БАК дают возможность проверки модельных предсказаний рождения очарованных частиц при высоких энергиях и уточнения значений свободных параметров феноменологических моделей. Экспериментальные исследования особенностей рождения очарованных адронов при высоких энергиях позволяют уменьшить неопределенность предсказаний сечений рождения и, как следствие, расчета потоков прямых лептонов. Одной из предпочтительных моделей рождения очарованных частиц, не подверженной затруднениям пертурбативной техники КХД, является модель кварк-глюонных струн (МКГС). Модель кварк-глюонных струн разработана (см. [12–17] и ссылки в них) для описания мягких и полужёстких процессов при высоких энергиях: успешно применялась для описания характеристик рождения мезонов и барионов в адрон-ядерных взаимодействиях. МКГС была одной из первых моделей адрон-ядерных взаимодействий, с помощью которой были рассчитаны потоки прямых атмосферных нейтрино и мюонов [18]. Учитывая большие неопределенности расчетов прямых лептонов, представляет значительный интерес новый расчет потоков в рамках МКГС, уточненной на основе данных БАК, а также с использованием современных параметризаций спектра ПКЛ.

Целью данной работы является изучение энергетических спектров и зенитно-угловых распределений прямых атмосферных мюонных нейтрино и мюонов на уровне моря.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. создание программ расчета дифференциальных и полных сечений рождения очарованных D -мезонов и Λ_c^+ -барионов в нуклон- и пион-ядерных взаимодействиях в МКГС;
2. расчёт инклюзивных сечений рождения очарованных адронов в МКГС;
3. модернизация программы расчёта потоков прямых лептонов, позволяющая использовать как современные параметризации спектра космических лучей, так и улучшенный метод решения уравнений переноса нуклонной компоненты адронного каскада в атмосфере;
4. расчёт энергетических спектров и зенитно-угловых распределений прямых атмосферных мюонных нейтрино и мюонов на уровне моря.

Научная новизна:

1. Выполнено сравнение сечений рождения очарованных мезонов, рассчитанных в МКГС, с результатами измерений на экспериментах БАК.
2. Выполнен расчёт потоков прямых атмосферных мюонных нейтрино и мюонов в рамках того же метода решения уравнений переноса нуклонной компоненты адронного каскада в атмосфере, что и расчёт потоков (π, K) -лептонов.
3. Показано влияние значений свободных параметров МКГС на спектральные и зенитно-угловые характеристики прямых атмосферных мюонных нейтрино и мюонов.
4. Получены минимальные и максимальные значения энергий, при которых потоки прямых и обычных мюонных нейтрино и мюонов сопоставимы.
5. Показано, что наличие прямых атмосферных лептонов в экспериментальных данных может быть обнаружено в энергетическом диапазоне, в котором компонента спектра обычных лептонов доминирует над вкладом прямых лептонов в суммарном атмосферном потоке.

Научная и практическая ценность

1. Рассчитанные спектры прямых атмосферных мюонных нейтрино и мюонов могут быть использованы в задаче моделирования атмосферного фона на нейтринных телескопах.
2. Метод выделения потоков прямых нейтрино и мюонов в экспериментальных данных, основанный на сравнении зенитно-углового

усиления частиц, может быть применён в энергетическом диапазоне, в котором компонента спектра обычных лептонов доминирует над вкладом прямых лептонов в суммарном атмосферном потоке.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты сравнения рассчитанных в МКГС сечений рождения очарованных частиц с современными ускорительными данными.
2. Результаты расчета энергетических спектров и зенитно-угловых распределений прямых атмосферных мюонных нейтрино и мюонов на уровне моря, полученные с использованием улучшенного метода решения уравнений переноса нуклонной компоненты адронного каскада в атмосфере.
3. Вывод о согласованности рассчитанного потока прямых атмосферных мюонных нейтрино с верхним пределом на соответствующий поток, полученным в эксперименте IceCube.
4. Исследование зависимости характеристик потоков атмосферных мюонных нейтрино и мюонов, позволяющих обнаружить атмосферные лептоны прямой генерации в экспериментальных данных на фоне ожидаемого сигнала от (π, K) -лептонов, от значений свободных параметров МКГС, типа спектра (дифференциальный, интегральный), значений зенитного угла и предсказаний потоков (π, K) -лептонов.
5. Вывод о преимуществе способа обнаружения прямых атмосферных мюонных нейтрино и мюонов в экспериментальных данных, основанного на сравнении зенитно-углового усиления атмосферных лептонов над способом, основанном на сравнении спектров атмосферных лептонов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

1. Применением для решения уравнений переноса нуклонной компоненты адронного каскада в атмосфере того же метода, с помощью которого ранее были рассчитаны энергетические спектры и зенитно-угловые распределения атмосферных нейтрино и мюонов от распадов пионов и каонов, надёжность расчётов которых подтверждается многочисленными проверками с экспериментальными данными, полученными в наземных и подземных детекторах.
2. Наличием согласия расчётных сечений рождения очарованных частиц с рядом экспериментальных данных.
3. Отсутствием существенных разногласий между потоками прямых атмосферных нейтрино, полученными в работе, и потоками, рассчитанными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. Байкальских международных школах по физике элементарных частиц и астрофизике (п. Большие Коты, 2016, 2017, 2018 гг.).
2. 15-ой Международной Байкальской школе по фундаментальной физике (г. Иркутск, 2017 г.).
3. 26-ом Европейском симпозиуме по космическим лучам и 35-ой Всероссийской конференции по космическим лучам (г. Барнаул, 2018).
4. семинаре кафедры теоретической физики физического факультета ИГУ (г. Иркутск, 2018 г.).
5. 8-ой Международной школе им. Понтекорво по физике нейтрино (г. Синая, Румыния, 2019 г.).
6. 37-ой Всероссийской конференции по космическим лучам (г. Москва, 2022 г.).

Личный вклад. Автору принадлежат разработка и модернизация программ, проведение расчётов, сбор как экспериментальных данных, так и расчётов других авторов, используемых для сравнения с результатами настоящей работы. Автор принимал активное участие в написании статей.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 4 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК [1,5-7]:

1. *Синеговский С.И., Сороковиков М.Н.* Рождение очарованных частиц в модели кварк-глюонных струн и оценка их вклада в потоки атмосферных нейтрино // Известия ВУЗов. Физика. — 2017. — т. 60, № 7. — с. 91.
2. *Сороковиков М.Н., Синеговский С.И.* Прямые атмосферные нейтрино в модели кварк-глюонных струн // Труды Международной байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, Россия). — Иркутск : Редакционно-издательский отдел ИСЗФ СО РАН, 09.2017. — с. 72.
3. *Синеговский С.И., Сороковиков М.Н.* «Прямые» атмосферные нейтрино в модели кварк-глюонных струн // Препринт ОИЯИ P2-2018-4. — Дубна : Издательский отдел ОИЯИ, 2018. — 23 с.
4. *Sinegovsky S.I., Sorokovikov M.N.* The atmospheric neutrino flux from decays of charmed particle // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1181, no. 1. — P. 012055.
5. *Sinegovsky S.I., Sorokovikov M.N.* Prompt atmospheric neutrinos in the quark-gluon string model // The European Physical Journal C. — 2020. — Vol. 80, no. 1. — P. 34. — arXiv:1812.11341.
6. *Сороковиков М.Н.* и др. Кросс-энергия и анизотропия потоков «прямых» атмосферных нейтрино и мюонов // Письма в ЭЧАЯ. — 2023. — т. 20, 1(246). — с. 19.

7. *Sorokovikov M.N. et al. Spectra and Angle Distributions of Atmospheric Neutrinos and Muons from the Decay of Charm Particles // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2024. — Vol. 88, no. 3. — P. 431.*

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 1 приложения. Полный объем диссертации составляет 105 страниц, включая 40 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 132 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируются цели, ставятся задачи работы, излагаются научные новизна и ценность диссертационной работы. Представлены выносимые на защиту результаты и вклад автора в их получении.

В **первой главе** дана характеристика феноменологической модели адронных взаимодействий – модели кварк-глюонных струн, которая 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. Неупругие процессы в МКГС определяются обменом реджеонами (планарные диаграммы в топологическом разложении) с интерсептом $\alpha_R(0) < 1$, а также обменом надкритическими померонами (цилиндрические диаграммы) с интерсептом $\alpha_P(0) = 1 + \Delta$, где $\Delta > 0$. При высоких энергиях вклад цилиндрических диаграмм доминирует благодаря фактору $(s/s_0)^\Delta$, в то время как вклад планарных диаграмм убывает как $(s/s_0)^{\alpha_R(0)-1} \propto (s/s_0)^{-1/2}$.

Для расчета сечений рождения очарованных адронов – D^+ -, D^- -, D^0 -, \bar{D}^0 -мезонов и Λ_c^+ -барионов в pp - и $p\bar{p}$ -соударениях необходимо знать функции распределения кварков соударяющихся частиц и функции фрагментации кварков и дикварков. Инклюзивные сечения рождения очарованных адронов определяются сверткой функций распределения валентных (и морских) кварков и дикварков соударяющихся частиц с функциями фрагментации кварков (дикварков) в очарованный адрон. Эти функции выражаются через интерсепты $\alpha_R(0)$ траекторий Редже, включая $\alpha_\psi(t)$ -траекторию, на которой расположены связанные состояния $c\bar{c}$ -кварков. В главе приведены функции фрагментации и функции распределения, используемые для расчёта сечений в настоящей работе. Функции содержат свободные параметры, которые не могут быть вычислены в рамках МКГС, и их значения находят из сравнения с экспериментальными данными.

В главе выполнен расчёт сечений рождения очарованных адронов в pp - и πp - взаимодействиях для различных энергий сталкивающихся частиц. Представлено сравнение расчётных сечений с результатами экспериментов как на встречных пучках, так и на неподвижных мишенях. Показано, что свободный параметр МКГС a_1 слабо влияет на рождение нелидирующих частиц, а в случае рождения лидирующих адронов сечения различаются в несколько раз (вплоть до ~ 1 порядка) при использовании крайних значений этого параметра. Более сильный эффект на сечения, вне зависимости от типа рождённой частицы, оказывает интерсепт малоизученной Реджевской $c\bar{c}$ -траектории $\alpha_\psi(0)$ (рис. 1). В настоящее время эксперимен-

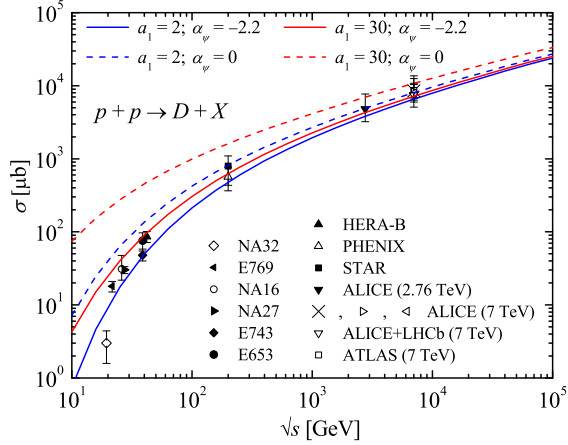


Рис. 1 — Полное сечение рождения D -мезонов в pp -соударениях. Расчёты МКГС: $\alpha_\psi(0) = -2,2$ (сплошные линии), $\alpha_\psi(0) = 0$ (штриховые линии); $a_1 = 2$ (синие линии), $a_1 = 30$ (красные линии). Символы — экспериментальные данные из работ [5–8; 19–27].

тально неизвестно точное значение интерсепта и приходится использовать значения, которые отвечают двум разным предположениям о функциональной зависимости траектории — линейная ($\alpha_\psi(0) = -2,2$) и нелинейная ($\alpha_\psi(0) = 0$). Сравнение рассчитанных сечений рождения очарованных адронов с данными экспериментов на низких энергиях, а также с измерениями полного сечения на БАК указывают на предпочтительность значения $\alpha_\psi(0) = -2,2$. С другой стороны, затрудняют определённый выбор интерсепта данные по дифференциальным сечениям рождения D -мезонов эксперимента ЛНСб [9–11], полученные при энергиях в с.д.м. $\sqrt{s} = 5, 7$ и 13 ТэВ в интервале быстрот $2 \leq y \leq 4,5$, который соответствует значениям фейнмановской переменной $x \lesssim 10^{-3} - 10^{-2}$. Тем не менее, мы рассматриваем $\alpha_\psi(0) = -2,2$ как более предпочтительное значение, в пользу которого также говорит наблюдаемый (и естественный) паттерн: более

тяжёлые кварки имеют меньшее значение интерсепта Редже-траектории. Следует отметить, что в силу кинематически доминирующего вклада периферических процессов в развитие адронного каскада, индуцированного космическими лучами в атмосфере, малые фейнмановские x дают незначительный вклад в интегралы, определяющие потоки атмосферных мюонов и нейтрино.

Во **второй главе** обсуждается адронный каскад частиц в атмосфере, порождённый взаимодействием первичных космических лучей с ядрами воздуха. Дана краткая историческая справка развития методов решений уравнений атмосферного каскада.

Представлен аналитический метод решения уравнений адронного каскада в атмосфере [18; 28], лежащий в основе расчётов настоящей работы, с перечислением основных физических приближений, используемых в нём. Указана модификация метода, опирающаяся на новые нуклонные «Z-факторы» (величина, непосредственно связанная с эффективным пробегом поглощения), которые были получены в уточнённом методе решения кинетических уравнений переноса нуклонов и мезонов космических лучей в атмосфере при высоких энергиях, развитом в работах [29–31]. Неопределённость в расчётах потоков прямых атмосферных лептонов, обусловленная применением разных «Z-факторов», полученных в двух моделях адрон-ядерных взаимодействий – Кимеля-Мохова [32–34] и QGSJET II-03 [35–37], выражена слабо – различия в интенсивности потоков не превосходят 10% (рис. 2). Это позволяет ограничиться нуклонными спектрами, рассчитанными только в одной модели.

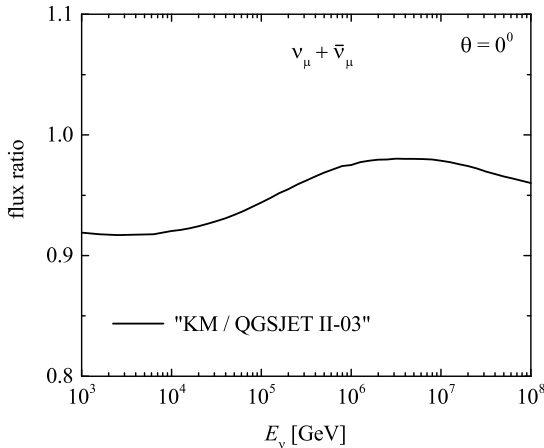


Рис. 2 — Влияние на потоки прямых нейтрино в МКГС нуклонного каскада в атмосфере, рассчитанного при помощи двух различных моделей адрон-ядерных взаимодействий – КМ и QGSJET II-03.

Расчёт потоков прямых атмосферных лептонов требует знания сечений рождения очарованных частиц в столкновениях адронов с ядрами атмосферы. В главе представлен способ, по которому выполняется пересчёт сечений рождения очарованных адронов в нуклон-нуклонных взаимодействиях на нуклон-ядерные.

В **третьей главе** представлены результаты расчётов потоков атмосферных мюонных нейтрино и мюонов от распадов очарованных частиц, сечения рождения которых получены в МКГС.

Влияние интерсепта реджевской $s\bar{c}$ -траектории на потоки прямых лептонов оказывается более существенным, чем влияние параметра a_1 : замена со значения $\alpha_\psi(0) = 0$ на $\alpha_\psi(0) = -2,2$ приводит к уменьшению потока в среднем в три раза. При энергиях $E_\nu \geq 1$ ПэВ, где в потоках атмосферных нейтрино доминирует вклад от распада очарованных частиц, расчёт настоящей работы приводит к менее интенсивному потоку прямых нейтрино, чем результат расчёта дипольной модели ERS [38], которая используется в качестве базовой при обработке данных в эксперименте IceCube (рис. 3).

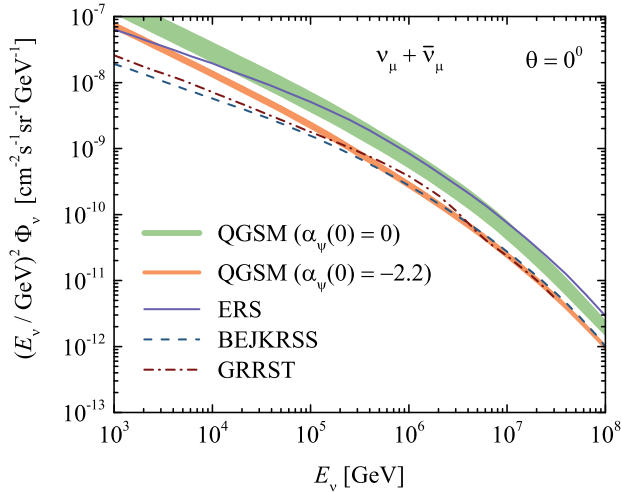


Рис. 3 — Сравнение вертикальных потоков прямых атмосферных нейтрино, рассчитанных для моделей: МКГС с более предпочтительным значением интерсепта $\alpha_\psi(0) = -2,2$ (оранжевая полоса), МКГС с $\alpha_\psi(0) = 0$ (зелёная полоса), модель цветного диполя ERS [38] (сплошная линия), КХД-модели BEJKRSS [39] (штриховая) и GRRST [40] (штрихпунктир). Все расчёты выполнены со спектром космических лучей TIG.

С созданием гигантских детекторов нейтринных телескопов, таких как Baikal-GVD, IceCube, ANTARES и KM3NeT, достигнут значительный

прогресс в экспериментальных исследованиях потоков атмосферных нейтрино и мюонов. Однако, несмотря на многолетние усилия, спектр прямых атмосферных лептонов до сих пор надёжно не измерен. Установлено лишь экспериментальное ограничение «сверху» – верхний предел на потоки прямых нейтрино (на уровне доверительной вероятности 90%), полученный в эксперименте IceCube при анализе данных, накопленных за шесть лет [2]. Рассчитанный в настоящей работе поток прямых атмосферных нейтрино не противоречит этому пределу.

В эксперименте традиционно «жёсткую» компоненту атмосферных лептонов пытаются обнаружить по энергетическому спектру, ориентируясь на область значений энергий выше т.н. «кросс-энергии» – энергии, при которой прямые нейтрино и мюоны дают вклад в потоки, сопоставимый с вкладом (π, K) -нейтрино и мюонов. Анализ показывает, что диапазон кросс-энергий довольно широк и зависит как от моделей, предсказывающих потоки (π, K) -лептонов, так и от вида спектра. В настоящей работе были рассчитаны не только дважды дифференциальные (по энергии и зенитному углу) потоки прямых лептонов, но также интегральные по энергии и усреднённые по зенитному углу. Интегрирование по энергии приводит к выполаживанию спектра атмосферных нейтрино и мюонов (рис. 4). Причем ужесточение сильнее проявляется именно для прямых лептонов, которые имеют более жёсткий дифференциальный спектр. Этот эффект приводит к наименьшей кросс-энергии среди других вариантов потоков – 150 ТэВ (нейтрино) и ~ 1 ПэВ (мюоны). Поэтому интегральный спектр формально эффективней других видов спектров в задаче выделения прямой компоненты атмосферных лептонов из экспериментальных данных. Различная угловая зависимость двух компонент атмосферных лептонов приводит к разным изменениям спектров прямых и (π, K) -лептонов при усреднении по зенитному углу. Слабая анизотропия прямых лептонов дает сравнительно небольшой рост потока (до 40%), тогда как поток анизотропных (π, K) -лептонов увеличивается в $\sim 2,5$ раза. Поэтому максимальная кросс-энергия достигается в усреднённых по углу спектрах: ~ 3 ПэВ (нейтрино) и 16 ПэВ (мюоны).

Кросс-энергия является полезной, но не единственной меткой, позволяющей в эксперименте обнаружить превышение сигнала над ожидаемым от атмосферных (π, K) -лептонов. В главе представлена перспективная возможность обнаружить прямые лептоны в эксперименте при энергиях, много ниже кросс-энергии, опираясь на совместный анализ спектральных характеристик и зенитно-углового распределения (π, K) -компоненты и общего потока – суммы (π, K) -лептонов с прямыми лептонами. Такую характеристику мы назвали «зенитно-угловым усилением», или «степенью анизотропии» потока. Она интересна тем, что очень чувствительна, как показал анализ, к дополнительным, даже малым, вкладам новых источников атмосферных лептонов, слабо зависящих от зенитного угла, таким, прежде

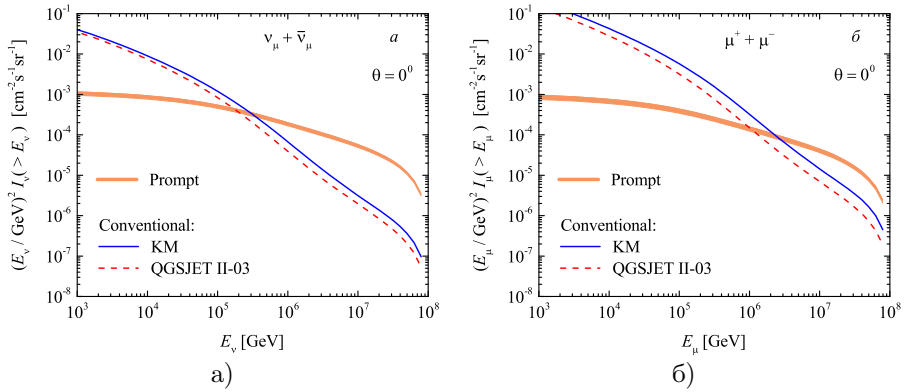


Рис. 4 — Интегральные спектры атмосферных нейтрино (а) и мюонов (б) вблизи вертикали. Спектры (π , K)-лептонов рассчитаны в моделях – КМ (сплошная линия) и QGSJET II-03 (штриховая). Спектр прямых нейтрино (узкая полоса) – расчет настоящей работы в МКГС (для $\alpha_\psi(0) = -2,2$). В качестве модели КЛ используется параметризация НЗа.

всего, как нейтрино и мюоны от распада очарованных частиц. В области энергий, значительно меньших кросс-энергии дифференциальных и интегральных спектров атмосферных лептонов, кривая степени анизотропии заметно деформируется (рис. 5). Эта деформация (уменьшение степени анизотропии) является следствием вклада дополнительного источника – прямых нейтрино и мюонов. Максимум кривой зенитно-углового усиления интегральных спектров расположен при энергиях 20 ТэВ (нейтрино) и 40 ТэВ (мюоны), а для дважды дифференциальных потоков при энергиях 50 ТэВ (нейтрино) и 100 ТэВ (мюоны) – в десятки раз ниже, чем кросс-энергии соответствующих спектров. После максимума степень анизотропии спадает на протяжении широкого интервала энергий (до ~ 10 ПэВ). Такая характерная энергетическая зависимость степени анизотропии суммарного спектра, резко отличающаяся от степени анизотропии (π , K)-компоненты – фактор, который при достаточной точности экспериментальных измерений спектра и углового распределения атмосферных лептонов может быть использован для обработки данных на нейтринных телескопах.

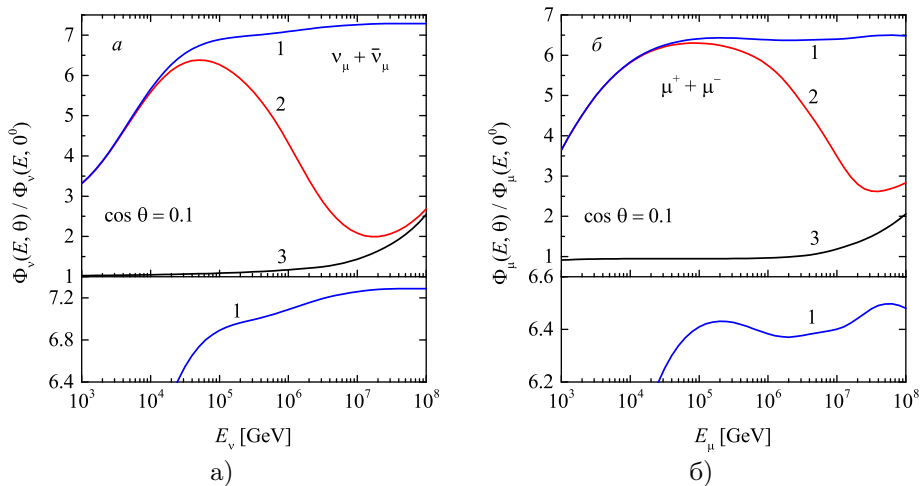


Рис. 5 — Зенитно-угловое усиление дифференциальных потоков атмосферных нейтрино (а) и мюонов (б), рассчитанное для зенитного угла $\theta \approx 84,3^\circ$ ($\cos(\theta) = 0,1$): 1 – (π, K) -лептоны (КМ), 2 – суммарный спектр КМ + QGSM, 3 – прямые лептоны (QGSM). Панели внизу – (π, K) -лептоны с лучшим разрешением.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Рассчитаны дифференциальные и полные сечения рождения очарованных D -мезонов и Λ_c^+ -барионов в pp - и $p\bar{p}$ -взаимодействиях в феноменологической модели кварк-глюонных струн. Исходя из сравнения с ускорительными данными, значение интерсепта $c\bar{c}$ -траектории Редже $\alpha_\psi(0) = -2,2$ рассматривается как предпочтительное, в отличие от $\alpha_\psi(0) = 0$.
2. Рассчитаны энергетические спектры и зенитно-угловые распределения прямых атмосферных мюонных нейтрино и мюонов на уровне моря от распадов очарованных адронов в интервале энергий $10^3 - 10^8$ ГэВ. Существенное влияние на потоки прямых лептонов оказывает интерсепт реджевской $c\bar{c}$ -траектории. Обновленная версия МКГС с $\alpha_\psi(0) = -2,2$ приводит к уменьшению потока прямых нейтрино в 3 раза по сравнению с результатом прежнего расчета, который был выполнен для интерсепта $\alpha_\psi(0) = 0$. В области энергий $E_\nu \geq 1$ ПэВ, где доминируют атмосферные нейтрино от распада очарованных частиц, новый расчет с использованием модели кварк-глюонных струн дает заметно более

- низкий поток прямых нейтрино по сравнению с дипольной моделью ERS, которая используется в качестве базовой при обработке данных в эксперименте IceCube.
3. Рассчитанный в МКГС поток прямых нейтрино не противоречит верхнему пределу, полученному в эксперименте IceCube.
 4. Минимальная кросс-энергия потоков прямых и обычных лептонов достигается при использовании интегральных по энергии спектров, (π, K) -компонента которых рассчитана в модели QGSJET II-03, и составляет 150 ТэВ (нейтрино) и ~ 1 ПэВ (мюоны), а максимальная кросс-энергия ~ 3 ПэВ (нейтрино) и 16 ПэВ (мюоны) достигается в усреднённых по углу спектрах, для которых (π, K) -лептоны рассчитаны в модели КМ.
 5. Различный характер зенитно-угловой зависимости прямых и (π, K) -лептонов существенно влияет на зенитно-угловое усиление атмосферных лептонов, которое оказывается чувствительно к квазиизотропной компоненте – лептонам прямой генерации. Максимум зенитно-углового усиления атмосферных лептонов расположен при энергиях в десятки раз ниже, чем кросс-энергии спектров вблизи вертикали: для интегральных потоков максимум находится на энергии 20 ТэВ (нейтрино) и 40 ТэВ (мюоны), а для дифференциальных потоков энергия максимума составляет 50 ТэВ (нейтрино) и 100 ТэВ (мюоны). Зенитно-угловое усиление предоставляет возможность обнаружения потоков прямых нейтрино и мюонов в экспериментальных данных в энергетическом диапазоне, в котором компонента спектра обычных лептонов доминирует над вкладом прямых лептонов в суммарном атмосферном потоке.
 6. При энергиях больше 10 ТэВ спектры атмосферных нейтрино, измеренные в эксперименте IceCube, являются более анизотропными, чем расчётные потоки, и нейтрино прямой генерации не проявляются в данных. Тем не менее, при энергиях больше 1 ТэВ рассчитанные зенитно-угловые усиления атмосферных нейтрино не противоречат измерениям IceCube (с учётом погрешностей). Расчёты зенитно-углового усиления атмосферных мюонов плохо описывают экспериментальное усиление, полученное на основе измерений IceCube. Учёт вклада в генерацию прямых мюонов распадов нефлейворных мезонов, оценённого с помощью модели SIBYLL 2.3с, не приводит к заметному улучшению описания экспериментальных данных.

Список литературы

1. *Aartsen M. G.* [et al.]. Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector // *Science*. — 2013. — Vol. 342, no. 6161. — P. 1242856. — arXiv:1311.5238.
2. *Aartsen 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. — Vol. 833, no. 1. — P. 1. — arXiv:1607.08006.
3. *Aartsen M. G.* [et al.]. Characteristics of the Diffuse Astrophysical Electron and Tau Neutrino Flux with Six Years of IceCube High Energy Cascade Data // *Phys. Rev. Lett.* — 2020. — Vol. 125, no. 12. — P. 121104. — arXiv:2001.09520.
4. *Allakhverdyan V. A.* [et al.]. Diffuse neutrino flux measurements with the Baikal-GVD neutrino telescope // *Phys. Rev. D.* — 2023. — Vol. 107, no. 4. — P. 042005.
5. *Abelev B.* [et al.]. Measurement of charm production at central rapidity in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV // *Journal of High Energy Physics*. — 2012. — Vol. 2012, no. 7. — P. 191. — arXiv:1205.4007.
6. *Adam J.* [et al.]. 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. — Vol. 94, no. 5. — P. 054908. — arXiv:1605.07569.
7. *Acharya S.* [et al.]. Measurement of D-meson production at mid-rapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *Eur. Phys. J. C.* — 2017. — Vol. 77, no. 8. — P. 550. — arXiv:1702.00766.
8. *Aad G.* [et al.]. Measurement of $D^{*\pm}, D^{\pm}$ and D_s^{\pm} meson production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector // *Nuclear Physics B.* — 2016. — Vol. 907. — P. 717. — arXiv:1512.02913.
9. *Aaij R.* [et al.]. Measurements of prompt charm production cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 5$ TeV // *Journal of High Energy Physics*. — 2017. — Vol. 2017, no. 6. — P. 147. — arXiv:1610.02230.
10. *Aaij R.* [et al.]. Prompt charm production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *Nucl. Phys. B.* — 2013. — Vol. 871, no. 1. — P. 1. — arXiv:1302.2864.
11. *Aaij R.* [et al.]. Measurements of prompt charm production cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // *Journal of High Energy Physics*. — 2016. — Vol. 2016, no. 3. — P. 159. — Erratum: *JHEP* 05, 074 (2017). arXiv:1510.01707.

12. *Kaidalov A. B., Ter-Martirosyan K. A.* Multiple production of hadrons at high-energies in the model of quark-gluon strings // *Sov. J. Nucl. Phys.* — 1984. — Vol. 39. — P. 979.
13. *Kaidalov A. B., Piskunova O. I.* Production of charmed particles in the quark-gluon string model // *Sov. J. Nucl. Phys.* — 1986. — Vol. 43. — P. 994.
14. *Kaidalov A. B.* Pomeranchuk singularity and high-energy hadronic interactions // *Physics-Uspekhi.* — 2003. — Vol. 46, no. 11. — P. 1121.
15. *Kaidalov A. B., Piskunova O. I.* Inclusive spectra of baryons in the Quark-Gluon Strings Model // *Z. Phys. C.* — 1986. — Vol. 30. — P. 145.
16. *Shabelski Y. M.* Secondary particle spectra in πp and pp collisions in the Quark-Gluon String model // *Sov. J. Nucl. Phys.* — 1986. — Vol. 44. — P. 117.
17. *Lykasov G. I., Arakelyan G. G., Sergeenko M. N.* The quark gluon string model: soft and semihard hadronic processes // *Phys. Part. Nucl.* — 1999. — Vol. 30. — P. 343.
18. *Bugaev E. V.* [et al.]. Prompt leptons in cosmic rays // *Nuovo Cim. C.* — 1989. — Vol. 12, no. 1. — P. 41.
19. *Barlag S.* [et al.]. Production of D, D^* and D_s mesons in 200 GeV/c π^-, K^- and p -Si interactions // *Z. Phys. C.* — 1988. — Vol. 39. — P. 451.
20. *Alves G. A.* [et al.]. 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. — Vol. 77. — P. 2388.
21. *Aguilar-Benitez M.* [et al.]. D meson branching ratios and hadronic charm production cross sections // *Phys. Lett. B.* — 1984. — Vol. 135. — P. 237.
22. *Aguilar-Benitez M.* [et al.]. Charm hadron properties in 400 GeV/c pp interactions // *Z. Phys. C.* — 1988. — Vol. 40. — P. 321.
23. *Ammar R.* [et al.]. D-meson production in 800-GeV/c pp interactions // *Phys. Rev. Lett.* — 1988. — Vol. 61. — P. 2185.
24. *Kodama K.* [et al.]. Charm meson production in 800 GeV/c proton-emulsion interactions // *Phys. Lett. B.* — 1991. — Vol. 263. — P. 573.
25. *Zoccoli A.* [et al.]. Charm, beauty and charmonium production at HERA-B // *Eur. Phys. J.* — 2005. — Vol. 43, no. 1. — P. 179.
26. *Adare A.* [et al.]. Measurement of high- p_T single electrons from heavy-flavor decays in $p+p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV // *Phys. Rev. Lett.* — 2006. — Vol. 97, no. 25. — P. 252002. — arXiv:hep-ex/0609010.

27. *Adamczyk L.* [et al.]. Measurements of D^0 and D^* production in p+p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV // Phys. Rev. D. — 2012. — Vol. 86, no. 7. — P. 072013. — arXiv:1204.4244.
28. *Vall A. N., Naumov V. A., Sinegovsky S. I.* Hadronic component of high-energy cosmic rays and growth of the inelastic cross-sections // Sov. J. Nucl. Phys. — 1986. — Vol. 44. — P. 806.
29. *Наумов В. А., Синеговская Т. С.* Элементарный метод решения уравнений переноса нуклонов космических лучей в атмосфере // ЯФ. — 2000. — т. 63. — с. 2020.
30. *Naumov V.A., Sinegovskaya T.S.* Atmospheric proton and neutron spectra at energies above 1 GeV // Proc. of the 27th International Cosmic Ray Conference (Hamburg, Germany). — 08/2001. — P. 4173–4176.
31. *Синеговская Т. С.* Механизмы генерации атмосферных мюонов и нейтрино высоких энергий : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.02. — Иркутск: ИГУ, 1999. — 132 с.
32. *Калиновский А. Н., Мохов Н. В., Никитин Ю. П.* Прохождение частиц высоких энергий через вещество. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 248 с.
33. *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. — т. 17, № 10. — с. 17.
34. *Кимель Л. Р., Мохов Н. В.* Дифференциальные сечения адрон-ядерных взаимодействий и некоторые результаты расчета межъядерных каскадов // Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. М: Атомиздат. — 1975. — т. 14. — с. 41.
35. *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. — Vol. 52, no. 3. — P. 17.
36. *Ostapchenko S.* QGSJET-II: towards reliable description of very high energy hadronic interactions // Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.) — 2006. — Vol. 151, no. 1. — P. 143. — arXiv:hep-ph/0412332.
37. *Ostapchenko S. S.* Hadronic Interactions at Cosmic Ray Energies // Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.) — 2008. — Vol. 175/176. — P. 73. — arXiv:hep-ph/0612068.
38. *Enberg R., Reno M. H., Sarcevic I.* Prompt neutrino fluxes from atmospheric charm // Phys. Rev. D. — 2008. — Vol. 78, no. 4. — P. 043005. — arXiv:0806.0418.

39. *Bhattacharya A.* [et al.]. Prompt atmospheric neutrino fluxes: perturbative QCD models and nuclear effects // Journal of High Energy Physics. — 2016. — Vol. 2016, no. 11. — P. 167. — arXiv:1607.00193.
40. *Gauld R.* [et al.]. The prompt atmospheric neutrino flux in the light of LHCb // Journal of High Energy Physics. — 2016. — Vol. 2016, no. 2. — P. 130. — arXiv:1511.06346.