

На правах рукописи

КОЧАНОВ Алексей Александрович

СПЕКТРЫ И ЗЕНИТНО-УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
МЮОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ КАК РЕШЕНИЕ
ЗАДАЧИ О ПРОХОЖДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

01.04.02 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2008

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Космические лучи, взаимодействуя с атмосферой Земли, порождают адронный каскад – цепочку реакций, в которых рождаются пионы, каоны и более тяжелые барионы и мезоны – источники мюонов и нейтрино. Рождаясь в верхних слоях атмосферы, мюоны несут информацию о спектре и составе первичных космических лучей и деталях взаимодействия адронов с ядрами при энергиях, недоступных на действующих ускорителях. В традиционной постановке задачи об атмосферных мюонах сопоставление рассчитанных спектров и зенитно-угловых распределений атмосферных мюонов с измерениями дает возможность косвенно изучать характеристики первичных космических лучей при заданной модели рождения адронов или исследовать адрон-ядерные взаимодействия при известном энергетическом спектре и составе первичных космических лучей.

Несмотря на существующий уже более 30 лет интерес к задаче исследования высокоэнергетических мюонов, генерируемых при прохождении космических лучей через атмосферу Земли, и значительное число теоретических работ на эту тему, до сих пор сохраняется заметное различие предсказаний потока атмосферных мюонов полученных разными группами авторов. Считалось, что различия эти в основном обусловлены выбором параметризации спектра и состава первичных космических лучей и, в меньшей степени, выбором модели адронных взаимодействий. Казалось, спектр и состав ПКЛ являются источником наибольшей неопределенности потоков вторичных космических лучей, а детали адронных взаимодействий в меньшей степени сказываются на расчетных потоках, поскольку все адронные модели так или иначе привязаны к эксперименту. Однако при продвижении в область высоких энергий фактор адронных взаимодействий гипотетически может возрасти в силу различного поведения полных неупругих сечений и сечений рождения частиц, измеренных лишь в сравнительно узкой области энергий. В частности, до сих пор не выяснена роль нарушения фейнманов-

ского скейлинга инклюзивных сечений рождения частиц в адрон-ядерных соударениях.

В настоящее время актуальность исследования атмосферных мюонов (АМ) и нейтрино смещается в область высоких и очень высоких энергий: именно с этой областью энергий связаны ожидание нейтринного сигнала от астрофизических источников на действующих и сооружаемых гигантских детекторах – нейтринных телескопах (НТ200+, AMANDA, IceCube, KM3Net и др.), а неустранимым фоном задачи являются атмосферные нейтрино (АН). Поскольку АН рождаются в тех же цепочках распадов, что и АМ, то нормировку спектров АН могут обеспечить измерения потоков атмосферных мюонов на разных уровнях атмосферы, если точность этих измерений достаточно высока, а точность теоретических предсказаний – не ниже экспериментальной. Кроме того, потоки атмосферных мюонов могут служить естественным инструментом калибровки глубоководных и подземных нейтринных телескопов.

Громоздкость задачи заставляет разных авторов прибегать к различного рода упрощениям и огрублениям. В большинстве расчетов использовалась степенная форма спектра ПКЛ, параметры которой получают из анализа данных разных экспериментов. Другим часто используемым приближением является приближение фейнмановского скейлинга инклюзивных сечений рождения адронов. Существуют однако указания на сильные нарушения этой масштабной инвариантности при конечных энергиях в центральной области рождения частиц, и заметное – в области фрагментации налетающей частицы. В последнее время, появились новые измерения спектра и состава ПКЛ, выполненные с высокой точностью в достаточно широкой области энергий, и достигнут заметный прогресс в разработке высокоэнергетических моделей адрон-ядерных взаимодействий (QGSJET, SIBYLL, NEXUS, EPOS и других), которые всесторонне проверяются в экспериментах по регистрации широких атмосферных ливней. Получены также новые измерения потоков АМ на разных уровнях атмосферы, и прежде всего – это спектры мюонов, измеренные в экспериментах BESS-TeV, L3+Cosmic, CosmoALEPH, а также новые данные по зарядовому отноше-

нию мюонов высоких энергий, полученные с помощью подземного детектора MINOS. В свете новых экспериментальных данных важно понять, какова надежность расчета характеристик потоков вторичных космических лучей, каковы неопределенности расчетов потоков АМ, обусловленные, во-первых, ошибками измерений спектра и состава ПКЛ, используемых в качестве начальных условий для уравнений адронного каскада в атмосфере, а во-вторых, различием предсказаний поведения спектров рождения частиц в разных моделях адронных взаимодействий при высоких энергиях. Практически задача сводится к расчетам спектров нуклонов и мезонов космических лучей на разных уровнях атмосферы, а также спектров и зенитно-угловых распределений и зарядового отношения мюонов вблизи уровня моря с использованием новых данных о спектре и составе ПКЛ и набора современных моделей адрон-ядерных взаимодействий при высоких энергиях.

Цель работы

Основной целью работы является исследование согласованности спектра первичных космических лучей и потоков вторичных космических лучей – адронов и мюонов, измеренных на разных уровнях атмосферы. Основой анализа являются расчеты адронного каскада, выполненные для ряда современных моделей адрон-ядерных взаимодействий при высоких энергиях и новейших измерений, моделей и параметризаций элементных энергетических спектров космических лучей.

Научная новизна

- Развита метод решения уравнений адрон-ядерного каскада, позволяющий рассчитать потоки нуклонов, мезонов и мюонов высоких энергий для общего случая нестепенного характера первичного спектра, нарушения скейлинга сечений рождения частиц и растущих с энергией полных неупругих сечений адрон-ядерных столкновений.

- Исследована роль факторов неопределенности спектра и состава первичного космического излучения, нарушения фейнмановского скейлинга инклюзивных сечений, различия в выходе пионов и каонов в адрон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях в процессах генерации атмосферных адронов и мюонов.
- Высокая точность новых измерений спектра и состава первичных космических лучей, использованных в настоящем расчете, позволила существенно уменьшить неопределенности расчета потока мюонов: данные по первичному спектру находятся в хорошем согласии с результатами мюонных экспериментов в области энергий до 50 ТэВ, разброс предсказаний потока мюонов, полученный для большинства используемых в расчете адронных моделей, оказался сопоставимым с ошибками мюонных измерений – (10-15) %.

Научная и практическая ценность

Разработанный метод решения уравнений адронного каскада является эффективным инструментом расчета адронного каскада и потоков атмосферных мюонов высоких энергий в общем случае нестепенного характера первичного спектра, нарушения скейлинга сечений рождения частиц и растущих с энергией полных неупругих сечений нуклон- и мезон-ядерных столкновений. К достоинствам метода можно отнести быструю сходимость и умеренные требования к вычислительным ресурсам. Быстрая сходимость вычислительной схемы позволила существенно по сравнению с моделированием по методу Монте-Карло повысить скорость и точность расчета потоков адронов и мюонов космических лучей в атмосфере Земли, что дает основание считать разработанный код действенным инструментом исследования адрон-ядерных взаимодействий и спектра первичных космических лучей в широком интервале энергий.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на Международной конференции по космическим лучам (30th ICRC, Merida, Mexico, 2007), на Всероссийской конференции по космическим лучам (29-я ВККЛ, ФИРАН, Москва, 2006), на Международных Байкальских научных школах по фундаментальной физике (БШФФ-2005, 2006, 2007, ИГУ-ИСЗФ СО РАН, Иркутск), на летних Байкальских школах по физике элементарных частиц и астрофизике (БШФЭЧА-2005, 2006, 2007, ИГУ-ОИЯИ, п. Большие Коты), на семинарах кафедры теоретической физики и Института прикладной физики ИГУ.

Результаты, выносимые на защиту

- Метод решения уравнений нуклон-мезонного каскада, который позволяет с заданной точностью выполнить расчет потоков вторичных космических лучей для общего случая произвольно падающего энергетического спектра космического излучения, нескейлингового поведения сечений рождения адронов и растущих с энергией полных неупругих сечений адрон-ядерных столкновений.
- Результаты расчета энергетических спектров и зенитно-угловых распределений мюонов в широком интервале энергий $10-10^7$ ГэВ для ряда современных моделей адрон-ядерных взаимодействий с использованием непосредственно данных измерений спектров первичных космических лучей, включая и область за “коленом” спектра.
- Вывод о согласованности измеренных на эксперименте потоков атмосферных мюонов в области энергий до 40 ТэВ с новейшими прямыми измерениями спектра и состава первичных космических лучей.
- Вывод о согласованности прямых измерений первичного спектра в области до 50 ТэВ (ATIC-2) с данными, полученными методом регистрации ШАЛ в интервале энергии 1–100 ПэВ (эксперимент ГАММА), включающем излом первичного спектра .

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ в отечественных и зарубежных изданиях.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложения и списка литературы из 172 наименований. Общий объём диссертации – 99 страниц, включая 7 таблиц и 24 рисунка.

Краткое содержание работы

Во **Введении** обсуждается современное состояние проблемы, отражена актуальность исследуемой темы, сформулированы цели, подходы и методы решения поставленных задач, излагается краткое содержание работы.

В первой главе дан обзор существующих подходов к решению задачи об атмосферных мюонах. В § 1.1 приведены характеристики аналитических и численных расчетов потоков атмосферных мюонов, выполненных разными авторами в разные годы, начиная с теоретических работ Г.Т. Зацепина и В.А.Кузьмина [1], Л.В. Волковой [2], Л.В. Волковой, Г.Т. Зацепина и Л.А. Кузьмичева [3], Э.В. Бугаева и др. [4] и заканчивая моделированием по методу Монте-Карло. В § 1.2 обсуждаются вычислительные трудности, с которыми сталкиваются современные схемы расчета при высоких энергиях, основанные на применении метода Монте-Карло.

Во второй главе обсуждается современное состояние проблемы измерений спектра и состава первичных космических лучей и приведены данные по спектру и составу первичных космических лучей, необходимые для численных расчетов. В интервале энергий $50 \leq E_0 \lesssim 50$ ТэВ использованы новые экспериментальные данные элементных спектров космических лучей, измеренные в баллонном эксперименте АТИС-2 (рис. 1), при энергиях первичной частицы $E_0 = 1 - 100$ ПэВ использовался спектр, восстановленный в эксперименте ГАММА.

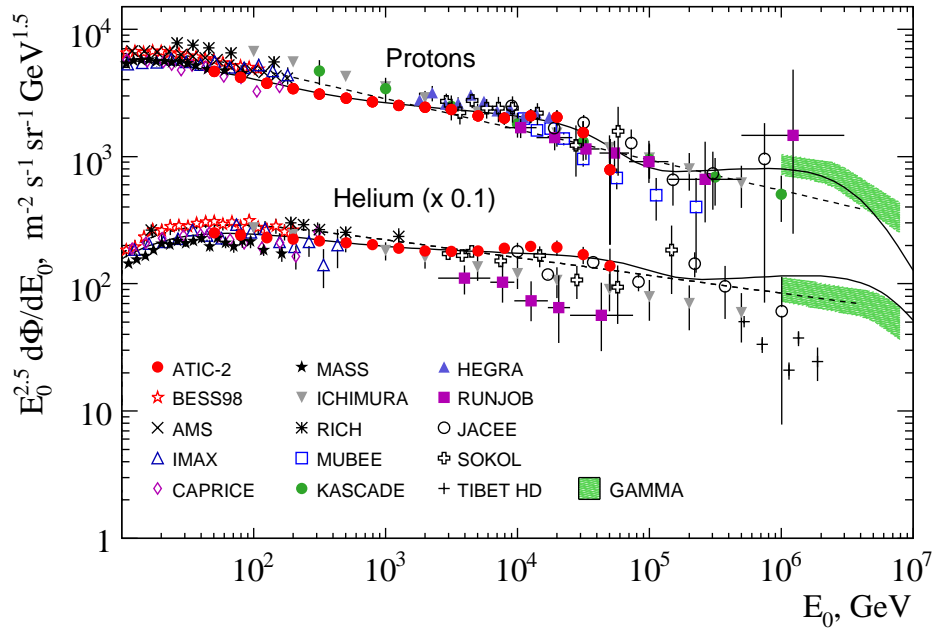


Рис. 1: Дифференциальный спектр протонов и ядер гелия по данным баллонных, спутниковых и наземных измерений

Для экстраполяции этих данных в область $E > 100$ ТэВ использовалась модель В.И. Зацепина и Н.В. Сокольской (ЗС) (сплошные линии на рис. 1). В модели ЗС предполагается существование трех классов источников галактических космических лучей – взрывов сверхновых и новых различного типа, которые производят степенные по импульсу спектры с разными максимальными жесткостями и с различными спектральными индексами. Опираясь существенным образом на данные АТИС, модель позволяет согласованно описать экспериментальные данные по спектрам космических лучей, полученными в прямых измерениях, и сделать переход в область сверхвысоких энергий, где измерения ведутся методом широких атмосферных ливней (ШАЛ). При энергиях $10^3 - 10^5$ ТэВ приводятся новые данные установки ГАММА, полученные методом ШАЛ. Кроме того, в расчетах были использованы известные параметризации спектра и состава первичных космических лучей – Гайссера и Хонды (Т. Gaisser, М. Honda) (штриховые линии), А.Д. Ерлыкина, Н.П. Крутиковой и Ю.М.Шабельского, а также С.И. Никольского, Й.Н. Стаменова и С.З.Ушева.

В третьей главе рассматривается адронный каскад в атмосфере Земли при высоких энергиях. Для расчета потоков вторичных космических лучей необходимо знать полные неупругие сечения взаимодействия адронов с ядрами воздуха и дифференциальные сечения генерации частиц. В § 3.1 рассматриваются современные модели адронных взаимодействий при высоких энергиях, которые всесторонне тестируются в экспериментах с космическими лучами и реализованы в кодах CORSIKA, CONEX, AIRES, CORS и др. Это две модификации модели кварк-глюонных струн QGSJET01, QGSJET II-03, модель мини-струй SIBYLL 2.1, кварк-партонные модели NEXUS 3.97 и EPOS 1.6. Кроме этого, приводится параметризация Кимеля и Мохова инклюзивных сечений рождения адронов, параметры которой были получены на основе анализа данных экспериментов на ускорителях по взаимодействию нуклонов и мезонов с протонами и ядрами при < 1.5 ТэВ. Дается сравнительный анализ инклюзивных спектров рождения нуклонов, π -, K -мезонов в рамках этих моделей и обсуждаются вопросы, связанные с нарушением фейнмановского скейлинга как в центральной области (где набирается рост полных неупругих сечений с энергией), так и в области фрагментации налетающей частицы.

В § 3.2 и § 3.3 излагается метод решения уравнений ядерного каскада в атмосфере Земли. Для расчета нуклонной компоненты вторичных космических лучей используется \mathcal{Z} -факторный метод (В.А. Наумов и Т.С. Синеговская) [5, 6], идея которого заключается в сведении системы линейных интегро-дифференциальных уравнений переноса к нелинейному интегральному уравнению для так называемого \mathcal{Z} -фактора – величины, непосредственно связанной с эффективным пробегом поглощения.

Задача вычисления дифференциальных энергетических спектров нуклонов $N(E, h)$ на глубине h сводится к решению системы уравнений:

$$\frac{\partial N^\pm(E, h)}{\partial h} = -\frac{N^\pm(E, h)}{\lambda_N(E)} + \frac{1}{\lambda_N(E)} \int_0^1 \Phi_{NN}^\pm(x, E) N^\pm(E/x, h) \frac{dx}{x^2}, \quad (1)$$

$$N^\pm(E, h) = p(E, h) \pm n(E, h),$$

$$\Phi_{NN}^{\pm}(x, E) = \frac{E}{\sigma_{pA}^{in}(E)} \left[\frac{d\sigma_{pp}(E, E_0)}{dE} \pm \frac{d\sigma_{pn}(E, E_0)}{dE} \right]_{E_0=E/x},$$

где $\lambda_N(E) = 1/[N_0\sigma_{pA}^{in}(E)]$ – пробег нуклона до взаимодействия; $d\sigma_{ab}/dE$ – дифференциальное сечение инклюзивной реакции $a + A \rightarrow b + X$; E_0 и E – энергия первичной и вторичной частиц. Граничные условия системы: $N^{\pm}(E, 0) = p_0(E) \pm n_0(E)$.

Решение системы имеет вид: $N^{\pm}(E, h) = N^{\pm}(E, 0) \exp\left[-\frac{h(1-Z_{NN}^{\pm}(E, h))}{\lambda_N(E)}\right]$. Подставляя его в уравнение (1), нетрудно получить интегральное уравнение на Z -факторы:

$$Z_{NN}^{\pm}(E, h) = \frac{1}{h} \int_0^h dh' \int_0^1 \eta_{NN}^{\pm}(x, E) \Phi_{NN}^{\pm}(x, E) \exp[-h' D_{NN}^{\pm}(x, E, h')] dx,$$

$$D_{NN}^{\pm}(x, E, h) = \frac{1 - Z_{NN}^{\pm}(E/x, h)}{\lambda_N(E/x)} - \frac{1 - Z_{NN}^{\pm}(E, h)}{\lambda_N(E)}, \quad \eta_{NN}^{\pm}(x, E) = \frac{N^{\pm}(E/x, 0)}{x^2 N^{\pm}(E, 0)}.$$

Это уравнение решается методом последовательных приближений. Так, в нулевом приближении $Z_{NN}^{\pm(0)}(E, h) = 0$, и $D_{NN}^{\pm(0)}(x, E, h) = 1/\lambda_N(E/x) - 1/\lambda_N(E)$. В последующих приближениях находим

$$Z_{NN}^{\pm(n)}(E, h) = \frac{1}{h} \int_0^h dh' \int_0^1 \eta_{NN}^{\pm}(x, E) \Phi_{NN}^{\pm}(x, E) \exp[-h' D_{NN}^{\pm(n-1)}(x, E, h')] dx$$

$$D_{NN}^{\pm(n)}(x, E, h) = \frac{1 - Z_{NN}^{\pm(n)}(E/x, h)}{\lambda_N(E/x)} - \frac{1 - Z_{NN}^{\pm(n)}(E, h)}{\lambda_N(E)}.$$

Нетривиальная структура Z -факторов видна на рис. 2 и обусловлена

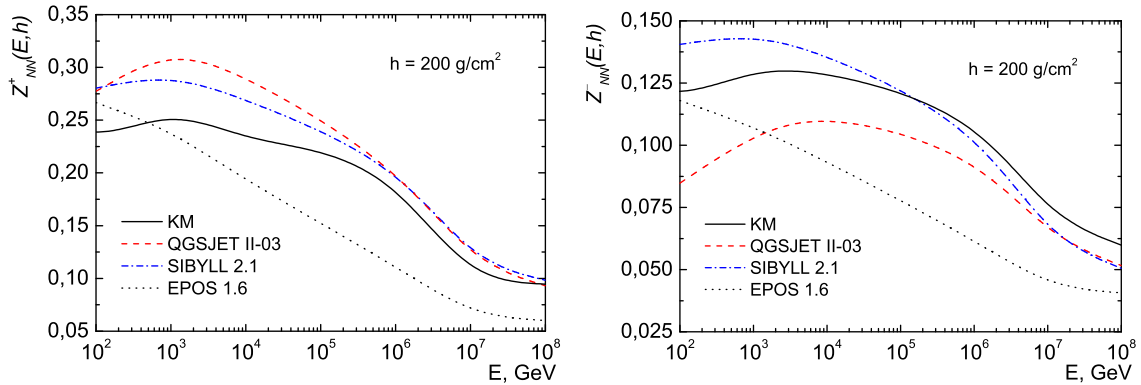


Рис. 2: Z_{NN}^{\pm} как функция энергии на глубине $h = 200 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$.

нестепенным характером первичного спектра АТЭС-2, зависимостью полных неупругих сечений от энергии и нескейлинговым поведением инклюзивных сечений рождения адронов.

В § 3.4 получено решение системы уравнений для π^\pm - и K -мезонов. Уравнения переноса π -мезонов с учетом процессов их регенерации и неупругой перезарядки имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi(E, h, \vartheta)}{\partial h} &= -\frac{\pi(E, h, \vartheta)}{\lambda_\pi(E)} - \frac{m_\pi \pi(E, h, \vartheta)}{p\tau_\pi \rho(h, \vartheta)} \\ &+ \sum_i G_{i\pi}^{\text{int}}(E, h, \vartheta) + \sum_K G_{K\pi}^{\text{dec}}(E, h, \vartheta) + \\ &+ \frac{1}{\lambda_\pi(E)} \int_{E_\pi^{\text{min}}}^\infty \frac{1}{\sigma_{\pi A}^{\text{in}}(E)} \frac{d\sigma_{\pi\pi}(E_0, E)}{dE} \pi(E_0, h, \vartheta) dE_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\lambda_\pi(E) = 1/N_0 \sigma_{\pi A}^{\text{in}}(E)$ – пробег пиона до взаимодействия. $G_{i\pi}^{\text{int}}$ и $G_{K\pi}^{\text{dec}}$ – функции генерации пионов в реакциях $i+A = \pi^\pm + X$ ($i = p, n, K^\pm, K^0, \bar{K}^0$) и в распадах каонов. Вводя пионные \mathcal{Z} -факторы

$$\mathcal{Z}_{\pi\pi}^\pm(E, h, \vartheta) = \int_0^1 \Phi_{\pi\pi}^\pm(E, x) \frac{\Pi^\pm(E/x, h, \vartheta)}{\Pi^\pm(E, h, \vartheta)} \frac{dx}{x^2}$$

где $\Pi^\pm(E, h, \vartheta) = \pi^+(E, h, \vartheta) \pm \pi^-(E, h, \vartheta)$,

$$\Phi_{\pi\pi}^\pm(E, x) = \frac{E}{\sigma_{\pi A}^{\text{in}}(E)} \left[\frac{d\sigma_{\pi^+\pi^+}(E_0, E)}{dE} \pm \frac{d\sigma_{\pi^+\pi^-}(E_0, E)}{dE} \right]_{E_0=E/x},$$

перепишем систему (2) в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi^\pm(E, h, \vartheta)}{\partial h} &= -\frac{\Pi^\pm(E, h, \vartheta)}{\lambda_\pi(E)} - \frac{m_\pi \Pi^\pm(E, h, \vartheta)}{p\tau_\pi \rho(h, \vartheta)} + G_{N\pi}^\pm(E, h, \vartheta) + \\ &+ \frac{1}{\lambda_\pi(E)} \mathcal{Z}_{\pi\pi}^\pm(E, h, \vartheta) \Pi^\pm(E, h, \vartheta). \end{aligned}$$

Уравнения с неизвестными \mathcal{Z} -факторами пионов решаются итерациями, пренебрегая в нулевом приближении процессами регенерации и перезарядки пионов, т. е. полагая $\mathcal{Z}_{\pi\pi}^{\pm(0)}(E, h) = 0$. В первом и последующих прибли-

жениях эти процессы уже учтены:

$$\begin{aligned} \Pi^{\pm(n)}(E, h, \vartheta) &= \int_0^h dt G_{N\pi}^{\pm}(E, t, \vartheta) \\ &\times \exp \left[- \int_t^h dz \left(\frac{1 - \mathcal{Z}_{\pi\pi}^{\pm(n)}(E, z, \vartheta)}{\lambda_{\pi}(E)} + \frac{m_{\pi}}{p\tau_{\pi}\rho(z, \vartheta)} \right) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где \mathcal{Z} -фактор в $(n+1)$ -м приближении определяется потоком пионов в n -м приближении ($n = 0, 1, \dots$):

$$\mathcal{Z}_{\pi\pi}^{\pm(n+1)}(E, h, \vartheta) = \int_0^1 \Phi_{\pi\pi}^{\pm}(E, x) \frac{\Pi^{\pm(n)}(E/x, h, \vartheta)}{x^2 \Pi^{\pm(n)}(E, h, \vartheta)} dx. \quad (4)$$

Решение уравнений переноса каонов в атмосфере получено аналогично решению для пионного каскада. С помощью полученных формул можно воспроизвести аналитические результаты ряда работ, в которых учитывался (в рамках той или иной модели) рост полных неупругих сечений взаимодействий пионов и каонов с ядрами воздуха (см., например [7]).

В § 3.5 с помощью полученных решений вычисляются спектры вторичных адронов и адронные отношения (π/N и K/π) на разных уровнях атмосферы с использованием всех рассматриваемых моделей адрон-ядерных взаимодействий. Исследуется согласие полученных результатов с данными старых и новых измерений. На рис. 3 представлено сравнение расчета дифференциального спектра всех адронов на уровне гор с данными экспериментов Памир и EASTOP. Расчет здесь выполнен с использованием спектра Гайссера и Хонды и моделей адронных взаимодействий SIBYLL, QGSJET II, EPOS и др.

В **четвертой главе** получено решение уравнения генерации и переноса мюонов в атмосфере Земли и приведены результаты расчетов энергетических спектров и зенитно-угловых распределений атмосферных мюонов на уровне моря. Функции генерации мюонов рассчитаны с использованием результатов третьей главы. В § 4.2 приведены результаты расчета дифференциального спектра мюонов вблизи вертикали на уровне моря в интервале энергий (10 – 10^5) ГэВ (рис. 4 и 5). Предсказанные спектры находятся

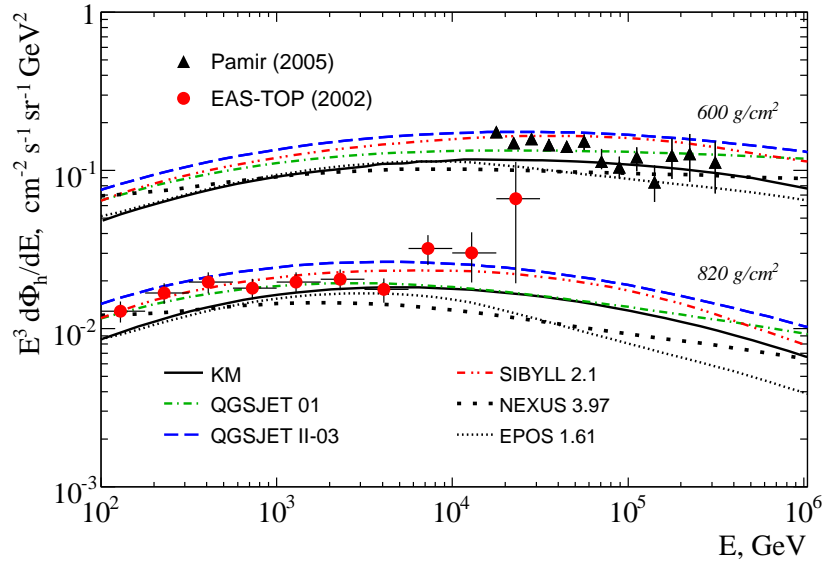


Рис. 3: Энергетические спектры адронов на разных уровнях атмосферы.

в хорошем согласии с данными прямых измерений L3+Cosmic, CAPRICE, BESS-TeV и др., а также данными, полученными на подземных установках Баксан, МГУ, MACRO, LVD и др. Расчет выполнен с использованием элементных спектров первичных космических лучей, измеренных в экспериментах ATIC-2 и GAMMA для различных моделей адрон-ядерных взаимодействий: Кимеля-Мохова – полоса, ширина которой отражает статистические ошибки измерений ATIC-2 и GAMMA; QGSJET II, SIBYLL и EPOS – линии на рис. 4. Кроме того, линиями на рис. 5 представлены результаты расчета с использованием модели первичного спектра Зацепина-Сокольской, демонстрирующие согласованность прямых измерений первичного спектра в эксперименте ATIC-2 и высокоэнергетических данных GAMMA, полученных методом ШАЛ.

Максимальный разброс предсказаний потока мюонов, обусловленный выбором модели адронных взаимодействий, составляет $\sim 30\%$, и уменьшается до 10% (что сопоставимо с неопределенностью измерений первичного спектра ATIC-2), если исключить из рассмотрения модель QGSJET II. Последняя приводит к очевидно заниженному потоку мюонов на вертикали (см. рис. 4 и 5).

Полные потоки атмосферных мюонов с учетом распадов очарованных

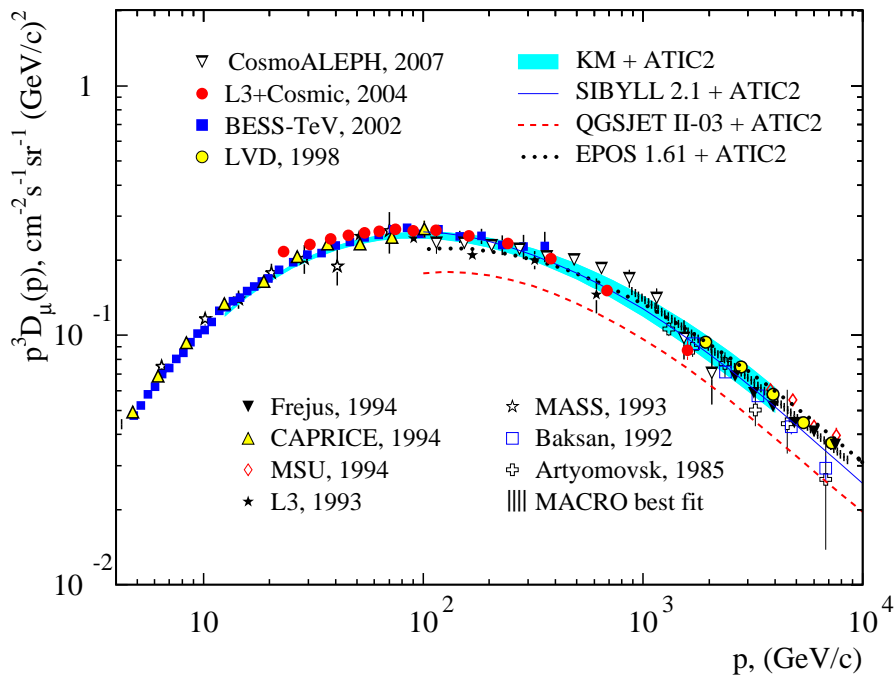


Рис. 4: Энергетический спектр мюонов вблизи вертикали на уровне моря.

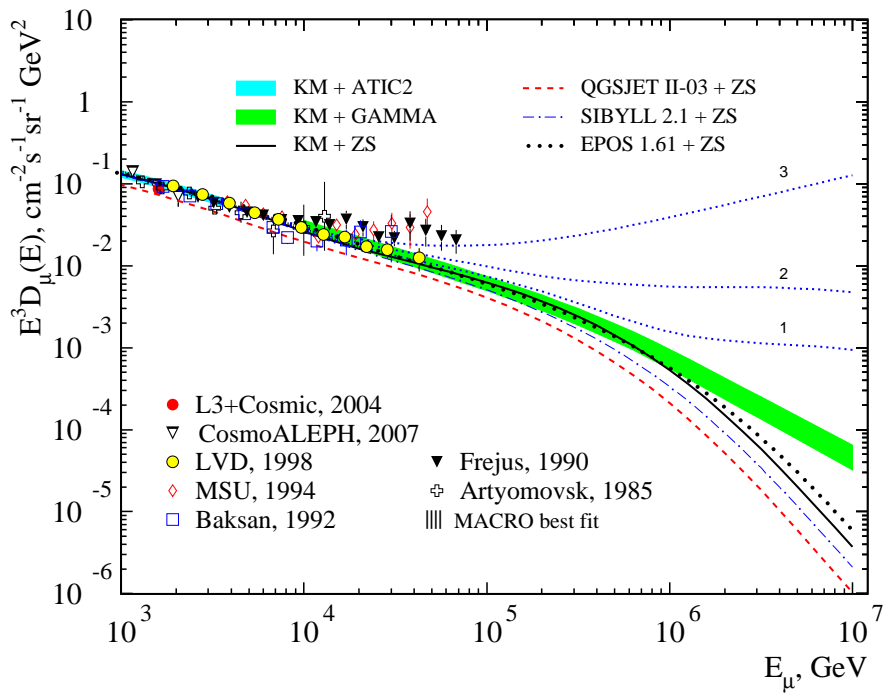


Рис. 5: То же, что и на рис. 4 при очень высоких энергиях.

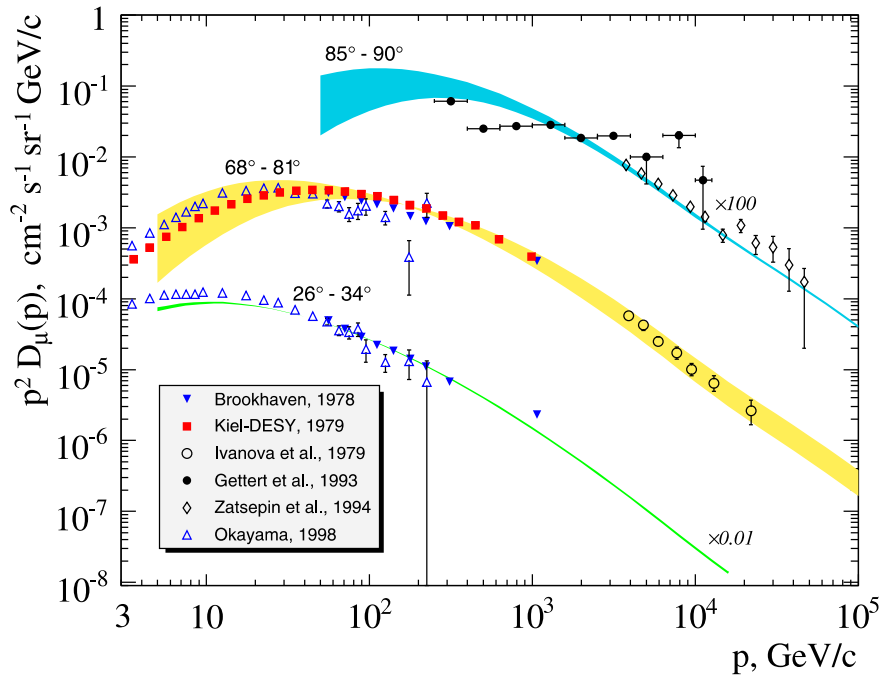


Рис. 6: Спектры мюонов для наклонных направлений.

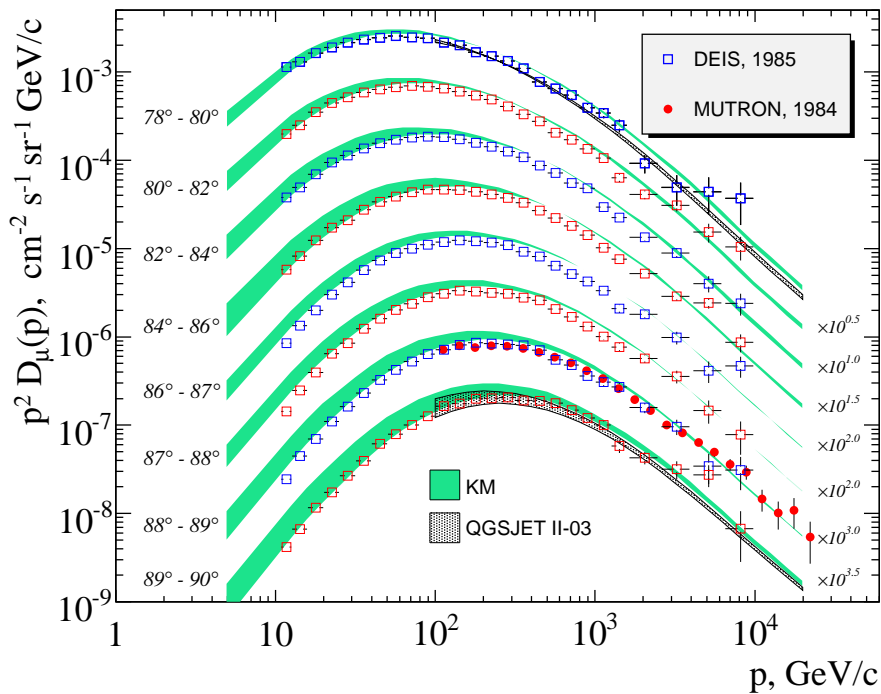


Рис. 7: Спектры мюонов вблизи горизонтального направления и данные DEIS и MUTRON.

адронов (мюоны “быстрой генерации”), рассчитанных для для трех моделей рождения чарма, показаны на рис. 5 пунктирными линиями: 1 – модель кварк-глюонных струн (А.Б.Кайдалов и О.И.Пискунова; Э.В.Бугаев и др.), 2 – рекомбинационная кварк-партоновой модель (Э.В.Бугаев и др.), 3 – модель Л.В.Волковой и др. Очевидно, что вклад мюонов быстрой генерации не может быть извлечен из экспериментов при энергиях до 70 ТэВ и остается источником самой большой неопределенности потоков атмосферных мюонов в области до излома первичного спектра.

Согласованное описание потока мюонов на вертикали и при больших зенитных углах позволило бы подтвердить применимость новых моделей адронных взаимодействий при высоких энергиях и достоверность данных по спектру и составу первичного космического излучения.

В § 4.3 приведены результаты расчета дифференциальных спектров мюонов на уровне моря для наклонных направлений. На рис. 6 показано сравнение расчета угловых спектров мюонов с экспериментальными данными BNL, Kiel-DESY, РЭК МГУ и др. Расчеты выполнены в широком интервале энергий 5–10⁵ ГэВ для нескольких интервалов зенитных углов 26° – 34°, 68° – 81° и 85° – 90°.

Результаты расчета потоков мюонов для околоразнональных направлений отдельно представлены на рис. 7 в сравнении с измерениями выполненными с помощью магнитных спектрометров DEIS и MUTRON. Предсказания модели QGSJET II показаны только для двух интервалов углов 78°-80° и 89°-90°. Показано, что в отличие от вертикального направления, модель QGSJET II неплохо описывает данные мюонных экспериментов для больших зенитных углов. Для горизонтальных направлений предсказания моделей практически неотличимы.

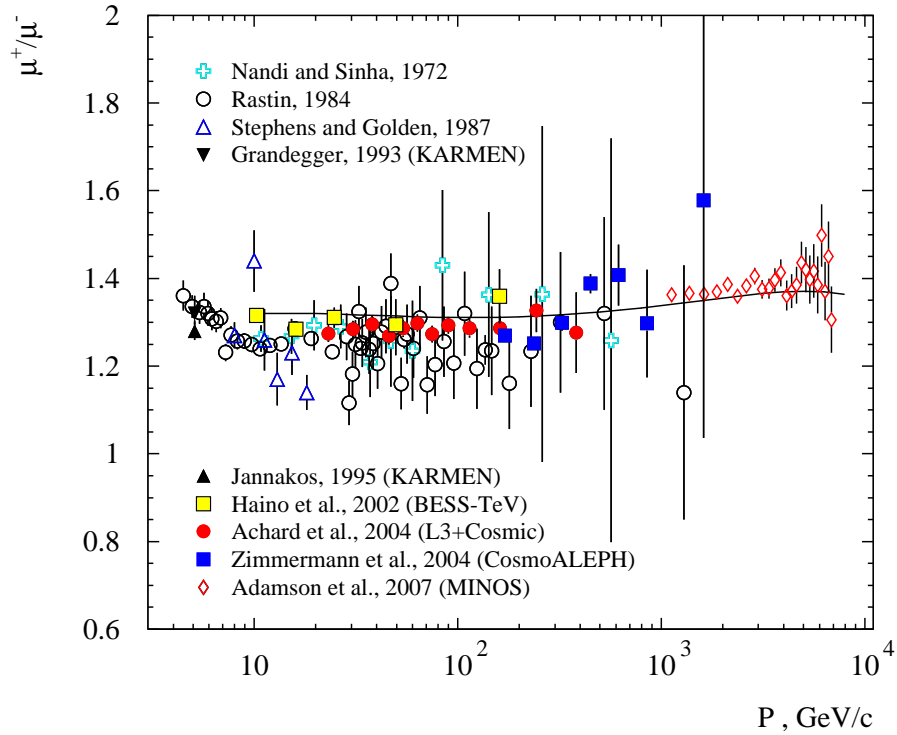


Рис. 8: Зарядовое отношение потоков мюонов на уровне моря для $\vartheta = 0^\circ$.

Еще одним тестом выполненного исследования является зарядовое μ^+/μ^- отношение на уровне моря. Поведение зарядового отношения потоков мюонов μ^+/μ^- определяется как соотношением протонов и нейтронов в первичном излучении, так и сечениями рождения пионов и каонов. Расчет μ^+/μ^- -отношения на уровне моря для вертикали с использованием элементных спектров первичного космического излучения АТИС-2 и модели Кимеля и Мохова представлен на рис. 8. Отметим хорошее согласие настоящего расчета с новыми данными по зарядовому отношению, полученными в экспериментах BESS-TeV, CosmoALEPH, MINOS и др. Статистические и систематические ошибки ранних измерений настолько велики, что извлечь из них количественную информацию кажется проблематичным.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложении приведены таблицы данных по пяти основным группам ядер первичных космических лучей, измеренных в эксперименте АТИС-2.

Основные результаты работы

- Развита методика решения уравнений адрон-ядерного каскада, высоких энергий для общего случая нестепенного характера первичного спектра, нарушения фейнмановского скейлинга инклюзивных сечений рождения частиц, произвольно растущих с энергией полных неупругих сечений адрон-ядерных столкновений.
- Рассчитаны атмосферные потоки нуклонов, мезонов, мюонов, а также зенитно-угловые распределения мюонов в интервале энергий $10-10^7$ ГэВ для нескольких параметризаций спектра первичных космических лучей с использованием различных моделей адрон-ядерных взаимодействий.
- Рассчитанное π/N -отношение на уровне моря чувствительно в большей мере к модели адронных взаимодействий, чем к модели спектра и состава ПКЛ: для моделей EPOS и SIBYLL оно максимально при $E = 10$ ТэВ (~ 2 и ~ 1.5), а для QGSJET01 и II минимально, что непосредственно приводит к предсказанию самого низкого потока атмосферных мюонов, противоречащего данным последних мюонных экспериментов. Относительный дефицит нуклонов в модели EPOS компенсируется отчасти высоким выходом пионов. K/π -отношение также является модельно зависимым: для моделей KM и QGSJET II эти величины близки (10% и 13% соответственно), тогда как NEXUS и EPOS приводят к заметно большим значениям 20 – 25% (при $E = 10$ ТэВ на глубине эффективной генерации мюонов ~ 200 г/см²) и как следствие – к меньшему угловому усилению потока мюонов при $E < 50$ ТэВ.
- Энергетические спектры мюонов для различных зенитных углов на уровне моря, рассчитанные с использованием непосредственно данных измерений спектра первичных космических лучей находятся в хорошем согласии с данными прямых измерений L3+Cosmic, CAPRICE, BESS-TeV, МГУ, MUTRON, DEIS и др., и данными, полученными на подземных установках MACRO, LVD и др.

- Расчет зарядового отношения мюонов на уровне моря, продемонстрировал хорошее согласие с новыми данными полученными на экспериментах BESS-TeV, CosmoALEPH, MINOS и др.
- Наиболее чувствительными к деталям адронных взаимодействий оказались дифференциальные энергетические спектры мюонов вблизи вертикального направления, где максимальное отклонение около (30%) от экспериментальных данных в интервале энергий 100 ГэВ–10 ТэВ дает расчет с использованием модели QGSJET II. Для околоризонтальных потоков предсказания различных моделей практически неотличимы.
- Разный характер нарушения фейнмановского скейлинга в области фрагментации налетающей частицы приводит с ростом энергии к изменению характера поведения спектров мюонов и возрастающему различию предсказаний изучаемых моделей адрон-ядерных взаимодействий.
- Вклад в потоки атмосферных мюонов от распадов очарованных адронов (мюоны “быстрой генерации”) не может быть извлечен из экспериментов при энергиях до 70 ТэВ и остается источником самой большой неопределенности потоков атмосферных мюонов в области до излома первичного спектра.

Публикации автора по теме диссертации

- [1] Кочанов А. А., Синеговская Т. С., Синеговский С. И., Мезонный каскад в атмосфере, неопределенности расчета потоков мюонов высоких энергий и данные прямых измерений // Ядерная физика. — 2007. — Т. 70. — №11. — С. 1963–1974.
- [2] Кочанов А. А., Синеговская Т. С., Синеговский С. И., Неопределенности потоков атмосферных мюонов высоких энергий и спектр первичных космических лучей // Известия вузов. Физика. — 2007. — Т. 50. — №9. — С. 41–46.

- [3] Kochanov A. A., Panov A. D., Sinegovskaya T. S., Sinegovsky S. I., Calculation of the atmospheric muon flux motivated by the ATIC-2 experiment // Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference, Merida, 3–11 July 2007 г. — Mexico: UNAM, 2007. — 0521.
- [4] Kochanov A. A., Sinegovskaya T. S., Sinegovsky S. I., High-energy cosmic ray fluxes in the Earth atmosphere: calculations vs experiments // arXiv:0803.2943v1 [astro-ph] <<http://arxiv.org/abs/0803.2943>> (направлена в журнал Astroparticle Physics).
- [5] Кочанов А. А., Синеговская Т. С., Синеговский С. И., Исследование согласованности потока атмосферных мюонов высоких энергий и спектра первичных космических лучей по данным новых экспериментов // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Материалы X конференции молодых ученых «Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы», Иркутск, 17–22 сент. 2007 г. — Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2007. — С. 270–273.
- [6] Кочанов А. А., Синеговская Т. С., Синеговский С. И., Спектр первичных космических лучей и потоки адронов высоких энергий в атмосфере Земли // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Материалы IX конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде», Иркутск, 11–16 сент. 2006 г. — Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2006. — С. 195–199.
- [7] Кочанов А. А., Синеговская Т. С., Синеговский С. И., Энергетический спектр и зарядовое отношение атмосферных мюонов высоких энергий // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Материалы IX конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде», Иркутск, 11–16 сент. 2006 г. — Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2006. — С. 200–203.

- [8] Кочанов А. А., Синеговская Т. С., Синеговский С. И., Генерация пионов в адронных каскадах, инициируемых космическими лучами высоких энергий в атмосфере Земли // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Материалы VIII конференции молодых ученых «Астрофизика и физика околоземного космического пространства», Иркутск, 12–17 сент. 2005 г. — Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2005. — С. 202–204.

Список цитируемой литературы

- [1] Зацепин Г. Т., Кузьмин В. А. Угловые распределения μ -мезонов высокой энергии и механизм их генерации // ЖЭТФ. — 1960. — Т. 39. — С. 1677–1685.
- [2] Волкова Л. В. Расчет потоков и угловых распределений атмосферных мюонов высокой энергии на уровне моря // Препринт ФИАН. — 1969. — № 72.
- [3] Волкова Л. В., Зацепин Г. Т., Кузьмичев Л. А. Спектр мюонов космических лучей на уровне моря – спектр нуклонов первичного космического излучения // ЯФ. — 1979. — Т. 29. — С. 1252–1264.
- [4] Bugaev E. V. et al. Atmospheric muon flux at sea level, underground and underwater // Phys. Rev. — 1998. — Vol. D58. — Pp. 054001; hep-ph/9803488.
- [5] Наумов В. А., Синеговская Т. С. Элементарный метод решения уравнений переноса нуклонов космических лучей в атмосфере // ЯФ. — 2000. — Т. 63. — С. 2020.
- [6] Naumov V. A., Sinegovskaya T. S. Atmospheric proton and neutron spectra at energies above 1-GeV // Proc. of 27th ICRC. — Vol. 1. — Hamburg, Germany: 2001. — Pp. 4173; hep-ph/0106015.

- [7] Валл А.Н., Наумов В.А., Синеговский С.И. Адронная компонента космических лучей высоких энергий и рост неупругих сечений // ЯФ. — 1986. — Т. 44. — С. 1240.