

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Г А Р Я К А
АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ

УДК 537.591:001.1

ДИФУЗИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В АТМОСФЕРЕ
ПРИ СКВИЛНГОВЫХ МОДЕЛЯХ МНОЖЕСТВЕННОГО РОЖДЕНИЯ

01.04.02 - теоретическая и математическая физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Е р е в а н - 1982

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Ереванском Физическом институте

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор А.Ц.Аматуни,
доктор физико-математических наук,
профессор Э.А.Мамиджян

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Р.М.Муралян (ФрПИ),
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
В.И.Яковлев (ФИАН им.П.Н.Лебедева)

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
ядерной физики МГУ

Защита состоится "22" февраля 1983г. в 14 часов на заседа-
нии Специализированного Совета Д.034.03.01 по присуждению
ученой степени доктора физико-математических наук при Ерван-
ском Физическом институте (375036, г.Ереван, ул.Маржарян, 2)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФрПИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1983г.

Ученый секретарь

Официальный представитель Совета
кандидат физ.-мат. наук

В.А.Шаломов

В.А.Шаломов

Диссертация посвящена теоретико-расчетному исследованию прохождения космических лучей в атмосфере для ряда моделей сечения и инклюзивного спектра. Рассмотрены энергетические спектры одиночных адронов и лептонов в атмосфере в случае логарифмического роста сечения и скейлинга для инклюзивной плотности распределения спектры адронов и лептонов в ШАЛ для моделей "квазискейлингового" типа.

Актуальность темы. Изучение космических лучей всегда служило важным источником проникновения в фундаментальные свойства микромира при высоких энергиях.

Характерной особенностью ряда важнейших экспериментов в космических лучах нацеленных на изучение природы сильных взаимодействий при энергиях выше 10^3 ГэВ является отсутствие прямой связи между измеряемыми величинами и характеристиками процесса множественного рождения. Речь идет об экспериментах по изучению пространственно-энергетических характеристик космических лучей в глубине атмосферы. К ним относится исследование потоков "одиночных" адронов и лептонов, изучение статистически связанных семейств гамма-квантов и адронов высокой энергии и комплексное изучение компонент ШАЛ. Для получения качественных и количественных выводов о поведении сечений и спектров рождения частиц при взаимодействиях высокой энергии на основе данных указанных экспериментов необходим теоретический анализ прохождения космического излучения через атмосферу. Основой такого анализа служит расчет характеристик космического излучения либо

методом решения системы уравнений диффузии различных компонент, либо моделирование ливня методом Монте-Карло.

Хорошо известное решение уравнений диффузии нуклонов и пионов в случае постоянного сечения и скейлинга для инклюзивного сечения сыграло большую роль в установлении эффекта лидирующей частицы и слабой зависимости коэффициента упругости от энергии. Несомненно представляет интерес нахождение аналитических решений для случаев зависящего от энергии сечения, решений имеющих простую структуру, позволяющую сделать наглядный качественный анализ.

Необходимым шагом в анализе данных ШАЛ является расчет средних характеристик ливней заданной энергии методом численного решения системы уравнений диффузии его компонент. При этом важным моментом является выбор модели множественного рождения, положенного в основу расчета. До настоящего времени выполнено большое количество работ, где применялись модели скейлингового типа с логарифмически зависящей от энергии средней множественностью и модели с нарушением скейлинга и степенным ростом средней множественности. Появление с одной стороны новых экспериментальных данных на ускорителях при более высоких энергиях и развитие теоретических предсказаний о характере процессов множественного рождения при высокой энергии с другой, требует их учета в новых расчетах. В частности представляется актуальным проведение расчетов с применением моделей с растущим сечением, логарифмическим ростом инклюзивной плотности распределения в центральной области по скорости и средней множественностью $\langle n \rangle \sim \ln^2 E$.

Расчеты средних характеристик ШАЛ имеют то преимущество, что требуют в качестве исходных данных лишь энергетическую зависимость сечений и одночастичные инклюзивные распределения в модели, т.е. наиболее общие характеристики процесса множественного рождения.

Цели и задачи работы формулируются следующим образом:

1. Нахождение аналитического решения уравнений диффузии потоков одиночных нуклонов и пионов в случае логарифмического роста сечения с энергией, скейлинга для инклюзивной плотности распределения и степенного первичного спектра.

2. Исследование полученного решения при условии малости коэффициента пропорциональности сечения логарифму энергии. Вывод приближенных соотношений для потоков адронов и оценка точности приближения.

3. Получение следствий из приближенного решения для потоков гамма-квантов и мюонов высокой энергии.

4. Построение алгоритма для численного решения системы уравнений диффузии компонент ШАЛ и методов оценки точности решения.

5. Получение одномерных каскадных кривых и энергетических спектров компонент ШАЛ заданной энергии инициированных нуклонами и ядрами для моделей с растущим сечением взаимодействия и ростом инклюзивной плотности распределения в области пиконизации.

6. Сравнение расчетных данных с результатами других расчетов, а также экспериментальных работ с целью определения согласия выбранной модели с данными измерений ШАЛ.

7. Исследование влияния отбора ШАЛ по N_e на характеристики ливней в случае смешанного химического состава первичного космического излучения.

Научная новизна работы. В диссертации впервые получено аналитическое решение уравнений диффузии нуклонов и пионов в атмосфере в случае логарифмически растущего с энергией сечения взаимодействия и скейлинга для инклюзивной плотности распределения, имеющее удобную для качественного анализа структуру. Показано, что в рассмотренном случае пробег поглощения зависит от энергии и глубины атмосферы и что эта зависимость факторизуется. Приближенные формулы для спектров при получены на основе общего решения.

Дано приближенное аналитическое описание спектров адронов при наличии ограничения на плотность ливневого сопровождения, основанное на учете доминирующей роли ливневых частиц от последнего акта взаимодействия лидирующего адрона в атмосфере.

Предложен алгоритм численного решения системы уравнений диффузии для компонент ШАЛ основанный на применении многогруппового метода и разностной схемы решения многогрупповой системы уравнений. Предложенная разностная схема не является стандартной, а построена с учетом особенностей указанной системы уравнений, что позволило обеспечить высокую скорость и точность расчетов. Впервые выполнены расчеты средних каскадных кривых и энергетических спектров компонент ШАЛ в атмосфере на основе моделей с растущим сечением и логарифмически растущей в центральной области по быстрой инклюзивной плотности распределения.

Практическая ценность. Полученное в диссертации решение уравнений диффузии нуклонов и пионов может быть применено при анализе данных экспериментов по изучению спектров одиночных адронов в атмосфере. Описание спектров при наличии ограничения на плотность ливневого сопровождения может быть применено для анализа данных установки "ПИОН" ЕрФИ и аналогичных установок других лабораторий.

Расчеты характеристик ШАЛ будут применяться при разработке проекта комплекса "АНИ", анализа данных, а также применяться при проведении моделирования ШАЛ по гибридной схеме. На основе имеющихся программ будут выполняться расчеты с использованием новых моделей для инклюзивных спектров.

Апробация работы. Результаты, полученные в диссертации докладывались на семинарах ЕрФИ, рабочих совещаниях "АНИ" (Нор-Амберд, 1980; Зименки, 1981), на Всесоюзной конференции по космическим лучам (Самарканд, 1981), 7-ом Европейском симпозиуме по космическим лучам (Ленинград, 1980), 17-ой Международной конференции по космическим лучам (Париж, 1981) и на XIX Международной конференции по физике высоких энергий (Токио, 1978).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано девять работ, список которых приводится в конце автореферата.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения. Содержит 90 страниц машинописного текста, 7 таблиц, 14 рисунков и список литературы из 84 наименований.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность проблем, изученных в работе, сформулированы задачи исследования и кратко излагается содержание диссертации.

В первой главе получено аналитическое решение системы уравнений диффузии потоков одиночных нуклонов и пионов космического излучения в атмосфере в случае логарифмического роста сечения и скейлинга для инклюзивной плотности распределения

§1 носит вводный характер. В нем приведена система уравнений диффузии нуклонов и пионов в одномерном приближении в общем виде и ее решение в случае скейлинга при постоянном сечении. §2 посвящен решению уравнения диффузии нуклонов. Предположено, что пробег поглощения нуклонов в атмосфере в рассмотренном случае является факторизуемой функцией глубины и пробега взаимодействия. Получено и решено дифференциальное уравнение для неизвестной функции глубины и таким образом доказана справедливость сделанного предположения и построен явный вид выражения для энергетического спектра нуклонов в атмосфере. В §3 рассматривается случай, когда часть роста сечения происходит за счет процесса дифракционной диссоциации. Решение получено тем же способом, что и в §2. Показано, что рост сечения за счет дифракционной диссоциации не приводит к укрупнению спектра нуклонов в атмосфере по сравнению с первичным. В §4 решается уравнение для пионов высокой энергии ($E \gg C_{\pi}$). Показано, что если первичный энергетический спектр потока адронов имеет вид $E^{-\gamma} \ln E$, то спектр в глубине атмосферы можно найти дифференцируя по γ выражение для энергетического спек-

тра потока с первичным спектром $E^{-\gamma}$. На основе этого построено выражение для спектра пионов.

Во второй главе рассмотрены следствия из общего решения первой главы для спектров адронов и лептонов в случае, когда $g_{\nu} \sim g_{\pi} \ll 1$, а также некоторые вопросы описания спектров адронов при наличии ограничения на плотность ливневого сопровождения.

В §1 рассмотрены спектры нуклонов и пионов в случае, когда $g_{\nu} \sim g_{\pi} \ll 1$. Выведены различные приближенные выражения для спектров и оценена их точность. Показано, что при $g_{\nu} \sim g_{\pi} \ll 1$ учет членов первого порядка по g позволяет получить точность лучшей 5% для величины спектра на уровне моря. §2 посвящен анализу энергетического спектра мюонов высокой энергии на основе приближенного выражения для спектров пионов. Получено, что с точностью до экспоненциально малых членов, энергетический спектр мюонов в глубине атмосферы имеет показатель на единицу больший, чем показатель первичного степенного спектра и не растет с глубиной. В §3 проведен анализ энергетического спектра гамма-квантов и электронов на основе приближенных выражений для спектров нуклонов и пионов и с использованием результатов теории электронно-фотонных ливней. Спектр электромагнитной компоненты укрупняется с глубиной, подобно спектру адронов. В §4 рассмотрены вопросы сравнения решений уравнений с данными эксперимента, в частности, при наличии ограничения сверху на плотность ливневого сопровождения вблизи точки регистрации адрона. При физически обоснованном предположении, что в плотность сопровождения в этом случае доминирующий вклад вносят электроны ливня от последнего сильного взаимодействия лидирующего адрона, получены выражения для пределов интегриро-

вания уравнения диффузии. Показано, что в пределе больших энергий доля пионов и проваимодействовавших нуклонов в отобранном потоке степенным образом падает. Из сравнения с данными установки "ПИОН" сделан вывод, что при энергиях ≤ 2 ТэВ такой предел еще не достигнут.

В третьей главе изучены средние одномерные энергетические спектры адронов и лептонов в ШАД заданной энергии на основе решения системы уравнений диффузии компонент ливня в атмосфере для ряда моделей инклюзивного спектра аналитическим и численными методами.

в §1 приведена система уравнений диффузии адронов в одномерном приближении. Для двух упрощенных моделей инклюзивного спектра найдено аналитическое решение уравнения диффузии. При этом учтены адроны только одного сорта и пренебрежены процессы распада. Для модели мультипериферического типа с $\langle n \rangle \sim \ln E$ интегральный энергетический спектр имеет следующий асимптотический вид

$$h(>E, z) \sim \exp(-z + 2\sqrt{az} \ln(E_0/E))$$

Для модели с логарифмически растущей плотностью распределения в области пионизации получено

$$h(>E, z) \sim \exp(-z + \sqrt{z}^{1/3} (\ln E_0/E)^{2/3})$$

Предположено аппроксимировать экспериментальные энергетические спектры адронов выражениями типа

$$h(>E, z) \sim \exp(\alpha \ln^{\beta}(E_0/E))$$

В §2 обсуждаются модели для сечения взаимодействия и инклюзивных спектров. В соответствии с данными экспериментов сечение

параметризуется в виде

$$\sigma(E) = \sigma_0 (1 + g \ln E + h \ln^2 E)$$

Рассмотрены результаты применения реджевской схемы, а также дуальной партонной схемы и идеи квантовой хромодинамики к описанию инклюзивных спектров. Приведена параметризация инклюзивных спектров, использованных при проведении численных расчетов. Инклюзивные спектры экстраполированы в область высоких энергий на основе моделей с $\langle n \rangle \sim \ln E$ и $\langle n \rangle \sim \ln^2 E$ и асимптотическим скейлингом по переменной $x_R = E^*/E_0^*$. В §3 описан алгоритм численного решения системы уравнений диффузии компонент ШАД, а также способы оценки точности решения. Схема численного решения сочетает два приближенных метода: многогрупповой, когда интегродифференциальное уравнение заменяется системой дифференциальных уравнений и разностный - для решения аппроксимирующей системы дифференциальных уравнений. Использованный разностный метод учитывает особенности данной системы уравнений. Проверка точности численного решения проведена двумя "прямыми" методами. Во-первых, численное решение сравнивалось с точным аналитическим для моделей §1. Во втором методе точность решения оценивалась по точности выполнения закона сохранения энергии ливня.

В §4 приведены и обсуждаются данные численного расчета для каскадной кривой по числу электронов. Для "стандартной" модели скейлинга с постоянным сечением расчеты проведены с учетом и без распада пионов. Распад пионов пренебрежимо мало сказывается на каскадной кривой при $E_0 \geq 10^7$ ГэВ. При меньших энергиях он приводит к уменьшению глубины и величины максимума каскадной

кривой. Скорость удлинения ливня ("elongation rate") определяемая как $\partial z^{\max} / \partial \log E$, постоянна в интервале первичных энергий $10^4 - 10^9$ ГэВ. Однако она больше, чем $2.3t_0$ значения следующего из теоремы о скорости удлинения примерно на 5 г/см^2 . Рост сечения сильного взаимодействия приводит к уменьшению скорости удлинения. Данные по каскадной кривой и глубине максимума приведены в таблицах 3.1 - 3.4 и рисунках 3.2 - 3.6. Видно, что при отборе на данной глубине атмосферы ливней по числу электронов N_e , при малых N_e будут преимущественно отбираться ливни, вызванные первичным протоном, с ростом N_e будет возрастать доля ливней, вызванных ядрами. В §5 приведены и обсуждаются расчетные данные по мюонной компоненте ШАЛ. Из данных таблицы 3.5 видно, что доля начальной энергии несомой мюонами уменьшается с ростом начальной энергии и она растет с ростом атомного веса первичного ядра. Приведен энергетический спектр мюонов на глубине 700 г/см^2 . Спектр крутопадающий, приближенно степенной с показателем -1.5 . Приведена зависимость полного числа мюонов с энергией больше 5 ГэВ от начальной энергии и атомного веса. С учетом отбора ливней по N_e , построена зависимость N_μ от N_e в случае смешанного первичного химического состава. В §6 приведены и обсуждаются расчетные данные по адронной компоненте ШАЛ. Приведен энергетический спектр адронов на глубине 700 г/см^2 при различных первичных энергиях. Этот же спектр приведен в виде функции отношения энергии нуклона к энергии первичного ядра. Спектры адронов в случае первичных ядер мягче, чем в случае первичного протона. Расчетные данные для протона лежат примерно на 25-30% выше, чем данные эксперимента.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Получено аналитическое решение уравнений диффузии одиночных адронов в атмосфере в случае логарифмического роста сечения и скейлинга для инклюзивной плотности распределения.
2. Показано, что укрупнение спектра адронов в глубине атмосферы по сравнению с первичным происходит лишь за счет роста сечения недифракционных процессов.
3. Показано, что при $g_N \sim g_\pi \ll 1$ не происходит практически укрупнения спектра высокоэнергичных мюонов ($E \gg C_\pi$) в отличие от спектра адронов, в согласии с существующими экспериментальными данными.
4. Получены спектры одиночных адронов при наличии ограничения на плотность ливневого сопровождения в приближении, основанном на учете доминирующей роли ливневых частиц от последнего сильного взаимодействия. Результаты согласуются с экспериментальными данными установки "ПИОН".
5. Получено в компактном виде аналитическое решение уравнения диффузии адронов в ШАЛ при наличии одного типа адронов для двух простых моделей инклюзивного спектра.
6. Построен алгоритм численного решения системы уравнений диффузии компонент ШАЛ, основанный на разностной схеме решения многогрупповой системы уравнений. Исследована точность решения "прямыми методами", благодаря чему обеспечена 5% точность численного решения в широком диапазоне энергий и глубин.
7. Получены расчетные данные для спектров адронов и мюонов в ШАЛ, а также полного числа электронов в атмосфере для моделей с $\langle n \rangle \sim \ln E$ и $\langle n \rangle \sim \ln^2 E$ и первичных ядер с

$A = 1, 4, 10, 26, 56$, в диапазоне энергий $10^5 \pm 10^8$ ГэВ.

8. Проведено сравнение полученных данных с результатами других расчетных работ и с экспериментом. Данные по каскадной кривой по числу электронов согласуются с результатами работ, где получена относительно меньшая скорость удлинения ливня.

9. Показано, что в случае смешанного химического состава первичного космического излучения, зависимость N_{μ} от N_e более крутая, чем в случае ядер одного типа, экспериментальные данные могут быть удовлетворительно описаны моделью с и с первичным химическим составом $\langle A \rangle \sim 16$.

IV. ПУБЛИКАЦИИ

1. Garyaka A.P. Energy spectrum of nucleons in atmosphere in the case of logarithmic rise of inelastic interaction cross section.- Ереван, 1978, - 8 стр. (Препринт/Ереванский физич.ин-т: ЕФИ-327(52)-78).

2. Гаряка А.П. Решение уравнений диффузии космических лучей в атмосфере при логарифмическом росте сечения. - Ереван, 1982, - 1 стр. (Препринт/Ереванский физич.ин-т: ЕФИ-603(90)-82)

3. Garyaka A.P., Mamidjanian E.A. Characteristics of leading nucleons in hadron-nucleus interactions and neutron and proton fluxes at mountain altitudes.- Ереван, 1978, - 15 стр. (Препринт /Ереванский физич.ин-т: ЕФИ-328(53)-78).

4. Авакян В.В., Гаряка А.П., Мамиджанян Э.А. К описанию спектров адронов космического излучения в глубине атмосферы при ограниченном ливневом сопровождении. - Ереван, 1982, - 8стр. (Препринт/Ереванский физич.ин-т: ЕФИ-590(77)-82).

5. Бояджян Н.Г., Гаряка А.П., Мамиджанян Э.А. Применение многогруппового метода расчета в исследованиях по широким атмосферным ливням. ЯФ, 1981, т.34, вып.2, с.119-124.

6. Boyadjian N.G., Garyaka A.P., Mamidjanian E.A. Numerical solution of the diffusion equation for hadrons in EAS of given energy in the case of various models of multiple production. Proc. 17th ICRC(International Cosmic Ray Conference), Paris, 1981, vol. 6, p.280-283.

7. Garyaka A.P. Behaviour of hadron energy spectra in EAS in atmospheric depth at different multiple production models. Proc. 17th ICRC, Paris, 1981, V.6, p.292-294.

8. Бояджян Н.Г., Гаряка А.П., Даллакян П.Ю., Мамиджанян Э.А. Зависимость средних энергетических спектров компонент и числа электронов ШАЛ в одномерном приближении. Сб. Вопросы атомной науки и техники; серия Техника физического эксперимента, вып.3/12/, Харьков, 1982, стр.55-60.

9. Бояджян Н.Г., Гаряка А.П., Даллакян П.Ю., Мамиджанян Э.А. Зависимость средних характеристик ШАЛ от параметров модели элементарного акта. Изв.АН СССР Сер.физ. 1982, т.46, стр.1833-1834.

Тех. редактор А.С.Абрамян

Заказ 633

ВФ - 04215

Тираж 170

Формат издания 60x84/16

Подписано к печати 13.01.83 г.

Издано Отделом научно-технической информации
Ереванского физического института Ереван 36, Маркаряна 2