

ment of high-energy electromagnetic cascade showers initiated by relativistic electrons and gamma-rays in hot photon gas. - Preprint EFI-676(67)-85, Yerevan, 1985.

4. Агаронян Ф.А., Варданян В.В., Кириллов-Угрюмов В.Г. Релятивистские электронно-фотонные ливни в ядрах активных галактик и квазаров. - *Астрофизика*, 1984, т. 20, с. 223.
5. Агаронян Ф.А., Варданян В.В. Генерация релятивистских электронно-фотонных ливней в поле электромагнитного излучения. - Препринт ВФИ-827(54)-85, Ереван, 1985.
6. Agharonyan F.A., Kirillov-Ugryumov V.G., Vardanian V.V. Formation of relativistic electron-photon showers in compact X-ray sources. - *Astrophys. Space Sci.*, 1985, v. 115, p. 201.
7. Agharonyan F.A., Vardanian V.V. On the origin of soft gamma-rays from Cyg X-1. - *Astrophys. Space Sci.*, 1985, v. 115, p. 31.

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ВАРДАНЯН Валерий Владимирович

УДК 539.12.01;524.1:524.7

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННЫХ ЛИВНЕЙ
В СРЕДЕ С Г. ЛТНЫМ ФОТОННЫМ ПОЛЕМ

(01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц)

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 1985

Работа выполнена в Московском ордена Трудового Красного Знамени инженерно-физическом институте.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Кириллов-Угрюмов В.Г.

Научный консультант: кандидат физико-математических наук, Агаронян Ф.А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Иваненко И.П.

кандидат физико-математических наук Павлов Г.Г.

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н.Лебедева АН СССР

Защита диссертация состоится 20.01.1986 г. в 16 час. на заседании специализированного совета К.053.03.05 в Московском инженерно-физическом институте по адресу: ПИ5409, Москва, Каширское шоссе, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан "19" 12 1985 г.

Просим прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации. Желающих принять участие в работе совета просим звонить по тел. ПИ4-89-98.

Ученый секретарь
Специализированного Совета И.В.Евсеев

Л-97794 Подписано к печати 06.12.85 Тираж 100 экз. Зач № 3087
Типография МИФИ, Москва, Каширское шоссе, 31.

Актуальность проблемы. Бурное развитие астрофизики высоких энергий выявило существование в космическом пространстве условий, экстремальных с точки зрения земных. Сюда можно отнести условия формирования высокотемпературной ($kT \sim 100$ кэВ) плазмы, возникновения сверхсильных ($B \sim 10^{13}$ гаусс) магнитных полей, ускорения частиц до сверхвысоких ($E \gtrsim 10^{18}$ эВ) энергий и т.п. Выяснение причин возникновения подобных экстремальных ситуаций позволит ответить на многие волнующие астрофизиков вопросы о природе окружающего мира и будет несомненным прогрессом в области астрофизики.

Характерным примером экстремальных условий может быть также ситуация, при которой плотность фотонов электромагнитного излучения превосходит плотность электронно-ионной компоненты в рассматриваемой среде, то есть когда среда занята плотным фотонным полем. Примером проявления подобной ситуации служит поле реликтового излучения, заполняющее с плотностью ~ 400 фот/см³, по всей вероятности, все окружающее пространство. Такое положение может также возникнуть вблизи широкого класса релятивистских объектов (магнитосферы пульсаров, аккреционные диски нейтронных звезд и черных дыр, ядра активных галактик и квазаров и т.п.), в областях, занятых радиационно-доминированной плазмой. Казалось бы, что в таких условиях гамма-кванты высоких энергий не могут покинуть источник низкочастотного излучения, в случае, если средняя длина их пробега меньше размера активной области источника, из-за поглощения гамма-квантов фотонами поля, $\gamma + \omega \rightarrow e + e$. Однако тот факт, что кинетика распространения гамма-квантов и электронов высоких энергий в такой среде носит каскадный характер, делает осуществимой эту возможность. В самом деле, про взаимодействвав с фотоном поля, гамма-квант образует электронно-позитронную пару, один из компонентов которой, рассеиваясь комптоновски на фотоне, вновь образует высокоэнергичный гамма-квант и т.д. Таким образом, из-за формирования электромагнитного ливня в среде с плотным фотонным полем, выход из нее гамма-излучения высоких энергий становится реальным. Кроме того, рассматриваемую область будут покидать каскадные гамма-кванты с энергией, недостаточной для образования электронно-позитронных пар. Полученный вывод важен для изучения релятивистских объектов, поскольку открывает возможность их исследования с помощью гамма-

астрономических наблюдений.

В настоящее время зарегистрировано гамма-излучение от ряда внегалактических источников — от радиогалактики Cen A, от N-галактики 3C120, от сейфертовских галактик NGC 415I и MCG8-II-II, от квазара 3C273 и возможно от квазара O24I+622. Примечательным является то, что эти объекты являются также сильными рентгеновскими источниками. Анализ показывает, что средняя длина пробега гамма-квантов в поле рентгеновских фотонов этих источников значительно меньше их характерного размера. Следовательно, при распространении гамма-квантов в пределах источников в них неизбежно формируется электромагнитный каскадный ливень. Таким образом, если области генерации рентгеновского и гамма-излучения совпадают, то наиболее естественным является предположение, что наблюдаемое от перечисленных источников гамма-излучение сформировано каскадными гамма-квантами. Эти кванты являются как бы посредниками между физическими процессами, обеспечивающими существование высокоэнергичной иницирующей электромагнитный каскад компоненты и наблюдателем. В силу этого она несет нам важнейшую информацию о природе высокоэнергичной компоненты и изучение их характеристик является необходимым этапом для расшифровки этой информации.

Электромагнитный каскадный ливень, формируемый в поле реликтового излучения, рассматривался ранее некоторыми авторами (С. Бонометто и др., 1971 г.; И. Вдовчик и др., 1972 г.; В. Березинский и др., 1973 г.). Однако всестороннему последовательному изучению это явление не подвергалось. Определенный прогресс был достигнут в вычислениях равновесных спектров каскадных гамма-квантов, да и то лишь в специальных случаях, что не позволяет составить целостную картину явления. В то же время, описанная схема развития электромагнитного каскада в компактных рентгеновских источниках требует более детального изучения этого явления и, в частности, исследования спектров каскадных частиц на различных глубинах. Такое требование связано с тем, что каскадные спектры существенно зависят от глубины проникновения ливня и следовательно могут быть отличными для разных источников. Задача вычисления этих спектров осложняется еще и присутствием в поле рентгеновского излучения электронно-ионной компоненты и возможно магнитного поля.

Целью работы является изучение процесса формирования электронно-фотонных ливней в среде с плотным фотонным полем и исследование спектральных характеристик электронов и гамма-квантов, образованных в результате развития каскадного ливня. Такое исследование предпринято для выяснения природы гамма-излучения, регистрируемого от некоторых компактных рентгеновских источников, и, в частности, проверки предположения о каскадном происхождении этого излучения.

Научная новизна. Впервые показано, что в поле рентгеновского излучения компактных рентгеновских источников неизбежно генерируется электромагнитный каскад, иницируемый высокоэнергичной компонентой, также регистрируемой от этих источников.

Рассмотрен процесс формирования электронно-фотонных ливней в среде с плотным фотонным полем и вычислены спектральные характеристики каскадных частиц на различных глубинах проникновения ливня.

Получены аналитические решения системы релятивистских кинетических уравнений для функций распределения каскадных частиц и разработана программа моделирования электромагнитного каскада с помощью метода Монте-Карло.

Выдвинуто предположение о каскадном происхождении гамма-излучения, наблюдаемого от компактных рентгеновских источников. В рамках этого предположения рассчитаны спектры гамма-излучения компактных рентгеновских источников NGC 415I, MCG8-II-II, QSO O24I+622, 3C273, Сур X-I и области центра Галактики.

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты по спектральным характеристикам каскадных гамма-квантов и электронов могут быть использованы для определения параметров высокоэнергичной иницирующей электромагнитный каскад компоненты и выяснения природы ее образования. В частности, регистрация каскадного гамма-излучения позволит изучать высокоэнергичные процессы в компактных рентгеновских источниках и в источниках гамма-квантов сверхвысоких энергий.

Ценность разработанной программы моделирования электромагнитного каскада заключается в возможности ее использования для изучения спектральных характеристик каскадных частиц в широком энергетическом диапазоне при произвольных пространственных и энергетических распределениях как частиц плазмы-мишени, так и

иницирующих частиц.

Метод аналитического решения релятивистских кинетических интегральных уравнений электронно-фотонных ливней, формируемых в поле монохроматического излучения, при значениях $\beta = 4E\omega / mc^2 \gg 1$ (E, ω — энергии каскадных частиц и фотонов поля, m — масса электрона, c — скорость света), определяет теоретическую ценность рассматриваемой задачи.

Практическая ценность аналитического решения релятивистских кинетических уравнений в ультрарелятивистском пределе определяется возможностью избежать моделирования электронно-фотонного ливня при изучении спектральных характеристик каскадных частиц, требующего в этом случае больших массивов данных и большого количества статистических испытаний.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на 18-ой международной конференции по космическим лучам (Бангалор, 1983), на сессии ОЯФ АН СССР (МИФИ, 1984), а также на научных семинарах в МИФИ, ФИАН, ВФИ, ДФТИ и опубликованы в 7 печатных работах.

Автор защищает следующие положения, обоснованные в диссертации:

1. При распространении электронов и/или гамма-квантов высоких энергий в среде с плотным фотонным полем, ими генерируется электромагнитный каскад, обусловленный, главным образом, процессами обратного комптоновского рассеяния и фоторождения электронно-позитронной пары. Такой каскад с неизбежностью формируется в ряде компактных рентгеновских источников, в поле рентгеновского излучения.

2. Кинетика распространения электронов и гамма-квантов высоких энергий в поле электромагнитного излучения существенно зависит от переменной $\beta = 4E\omega / mc^2$. В случае, когда $\beta \gg 1$ система релятивистских кинетических уравнений разрешается аналитически и спектры каскадных электронов и гамма-квантов вычисляются в явном виде для различных значений глубины проникновения ливня $t = 45 \tau_0^2 n_\omega R$ (τ_0 — классический радиус электрона, n_ω — плотность фотонов поля, R — глубина проникновения).

Анализ решения показывает, что гамма-кванты и электроны могут распространяться на расстояния, значительно превышающие их среднюю длину пробега в фотонном поле. При $t > 1$ решения

слабо зависят от типа (электрон или гамма-квант) инициирующей каскад частицы.

3. При значениях $\beta \gg 1$, а также при учете присутствия электронно-ионной компоненты в среде для определения спектральных характеристик каскадных частиц необходимо использовать численные методы решения.

Метод моделирования электромагнитного каскада позволяет вычислять спектры частиц на различных глубинах t , при различных значениях параметров среды и инициирующих каскад частиц. При $t \gg 1$ значительная часть энергии, инициирующей каскад частицы переходит к гамма-квантам в область энергий с $\beta < 1$. В этом случае происходит также наиболее эффективное образование электронно-позитронных пар, хотя их выход из активной области с релятивистскими энергиями затруднен.

Спектры каскадных частиц при $\beta \gg 1$ слабо зависят от типа инициирующей частицы.

4. Наблюдаемое от компактных рентгеновских источников гамма-излучение образовано, по всей вероятности, гамма-квантами, сформированными электромагнитным каскадом, который возникает в результате взаимодействия высокоэнергичных частиц с фотонами рентгеновского поля. Расчеты по определению спектров каскадных гамма-квантов для конкретных компактных рентгеновских источников подтверждают это предположение.

Решение обратной задачи восстановления характеристик высокоэнергичной компоненты по наблюдаемому гамма-излучению позволяет судить об инициирующей электромагнитный каскад компоненте.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка цитируемой литературы, включающего в себя 116 наименований. Общий объем работы составляет 138 страниц машинописного текста, 23 рисунка и 1 таблица.

Содержание работы. В работе отдельно обоснована важность и актуальность тематики в целом и конкретно поставленной задачи в частности. Дано описание структуры диссертации и изложены основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой части работы обсуждается явление формирования электромагнитного каскада в фотонном поле при распространении в нем гамма-квантов и/или электронов высоких энергий.

Рассматриваются основные электромагнитные процессы, обеспечивающие формирование каскада в фотонном поле. Имми являются обратное комптоновское рассеяние и фоторождение электронно-позитронной пары. На основе анализа выражений для вероятностей взаимодействия электронов и гамма-квантов с изотропным фотонным полем сделан вывод о каскадном характере распространения высокоэнергичных частиц. Это связано, в частности, с тем, что вычисленная в работе вероятность комптоновского рассеяния оказывается величиной того же порядка, что и вероятность фоторождения электронно-позитронной пары при больших значениях β . Следовательно, образованный в результате фоторождения электрон (позитрон) на расстоянии, сравнимом с расстоянием, на котором была образована электронно-позитронная пара, вновь образует гамма-квант и т.д. Такой характер взаимодействия релятивистских частиц с фотонным полем и приводит к формированию в нем электронно-фотонных ливней.

Явление электромагнитного каскадного ливня анализируется на примере его формирования в поле реляктивного излучения. Обсуждение проводится в виде обзора опубликованных по данной тематике работ. Особое внимание уделено астрофизическому аспекту рассматриваемого явления. Затрагиваются также физические особенности формирования каскада в поле электромагнитного излучения. В частности, явление эффективного проникновения ливня вглубь рассматриваемой среды. Обсуждается влияние магнитного поля и поля низкочастотного излучения на эффективность генерации каскада, а также влияние релятивистских поправок к элементарным процессам на описанную схему развития электромагнитного каскада. Критический обзор позволяет сделать вывод о необходимости последовательного изучения этого явления.

В работе приводятся также обоснование практической ценности решения задачи определения характеристик электромагнитных ливней для изучения физических процессов, происходящих в компактных рентгеновских источниках. Показана неизбежность формирования в них электромагнитного каскада и некорректность утверждения о невозможности выхода из этих источников высокоэнергичных гамма-квантов. Подчеркнута необходимость вычисления спектров каскадных частиц на различных глубинах проникновения t .

Второй этап работы посвящается решению системы кинетических уравнений для функций распределения электронов и гамма-квантов,

описывающих распространение электронно-фотонных ливней в поле электромагнитного излучения.

Дается характеристика кинетики распространения электронов и гамма-квантов высоких энергий в фотонном поле. Показано, что спектральные характеристики каскадных частиц существенно зависят от параметров β_e и β_γ . При $\beta_e \leq 4$ энергетические потери электронов носят непрерывный характер, благодаря чему кинетика распространения электронов может быть описана линейными дифференциальными уравнениями. При $\beta_e > 4$, из-за "катастрофического" характера потерь, для описания кинетики распространения электронов необходимо использовать интегральные уравнения. Кроме того, при $\beta_\gamma > 4$ становится возможным образование электронно-позитронных пар в фотон-фотонных столкновениях, что приводит к каскадному распространению электронов и гамма-квантов. Особо подчеркнута отличительная черта рассматриваемого каскада от электромагнитного каскада, формируемого в веществе. Обсуждается теоретическая и практическая ценность аналитического решения каскадных уравнений.

Приводится вывод системы релятивистских кинетических уравнений электромагнитного каскада. Уравнения получены в предположении отсутствия электромагнитного поля и электронно-ионной компоненты в активной области развития каскада. Рассматривается стационарный случай, причем пренебрегается взаимодействиями между вторичными частицами, что справедливо, когда плотность ливневых частиц не превосходит плотность фотонов поля N_ω . При выводе кинетических уравнений предполагалось также, что энергия монохроматических фотонов поля $\omega < 0.5 mc^2$, а энергия каскадных частиц $E \gg mc^2$. Система кинетических уравнений оказывается зависящей только от переменных β и t , однако ее аналитическое решение при произвольных значениях β невозможно. Система кинетических уравнений разрешается для случая $\beta \gg 1$. При вычислениях в логарифмическом приближении она имеет вид:

$$\beta \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \varepsilon \ln \beta = 2 \int_0^{1-\beta} \frac{\Gamma(\beta/z)}{1-z} dz$$

$$\beta \frac{\partial \Gamma}{\partial t} + 2\Gamma \ln \beta = \int_0^{1-\beta} \frac{\varepsilon(\beta/z)}{1-z} dz$$

где \mathcal{E} и Γ - функции распределения электронов и гамма-квантов на глубине t .

Для решения этой системы используется метод двойного интегрального преобразования. Для переменной t - преобразование Лапласа, а для переменной b - преобразование Меллина. В результате для иницирующей высокоэнергичной частицы с $b = b_0$ равновесные спектры электронов и гамма-квантов имеют вид:

$$\Gamma(x) = \mathcal{E}(x)/2 = \frac{1}{4} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^{-(S_k+1)}}{\psi^k(S_k+2)}$$

где S_k находятся из уравнения

$$\psi(S_k+2) + C_e = 0, \quad (\psi(s) - \psi - \text{функция})$$

C_e - константа Эйлера)

а спектры на различных глубинах

$$\Gamma(x, \tau) = \mathcal{E}(x, \tau)/2 = \frac{1}{3b_0 \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{x^{-(s+1)} e^{-\tau(C_e + \psi(s+2))}}{\sqrt{-\tau} \psi''(s+2)} (1 + \alpha(s)/\tau)$$

где S определяется из уравнения $\ln x = -\tau \psi'(s+2)$
Здесь

$$x = b/b_0, \quad \tau = \frac{4t}{3b_0}, \quad \alpha(s) = -\frac{1}{8} \frac{\psi'''(s+2)}{[\psi''(s+2)]^2} + \frac{5}{24} \frac{[\psi''''(s+2)]^2}{[\psi''(s+2)]^3}$$

Области определения решений: $40/b_0 \leq x \leq 1 - 1/b_0, \tau > 1$.

Полученные спектры каскадных частиц справедливы при развитии каскада в среде с соотношением электронно-ионной и фотонной компонент $n_e/n_w \ll \mathcal{H}/\alpha$.

Следующий этап работы посвящается вопросам моделирования электромагнитного каскада в радиационно-доминированной плазме и обсуждению полученных методом моделирования Монте-Карло результатов. Приведена общая схема моделирования электромагнитного ливня в среде с соотношением электронно-ионной и фотонной компонент $n_e/n_w \leq \mathcal{H}/\alpha$. При моделировании каскада считается, что плазма-мишень является стационарной и учитываются следующие электромагнитные процессы:

- фоторождение электронно-позитронных пар в фотон-фотонных столкновениях,

- обратное комптоновское рассеяние электронов на фотонах плазмы,
- тормозное излучение и аннигиляция электронов и позитронов при взаимодействиях с частицами плазмы,
- рассеяние нетермолизированных электронов на тепловых электронах плазмы,
- комптоновское рассеяние и образование пар гамма-квантами на электронах и ионах плазмы.

Обсуждается блок-схема моделирования и рассмотрены ее основные этапы. Подчеркнута практическая ценность разработанного метода изучения характеристик частиц электромагнитного каскада, позволяющего получать результаты при любых наиболее общих предположениях относительно характеристик частиц плазмы-мишени и иницирующих каскад частиц.

В работе подробно рассмотрены физические процессы, поддерживающие каскад в радиационно-доминированной плазме. Приведены формулы вычисления характеристик частиц, возникающих при формировании электронно-фотонного ливня. Они необходимы при моделировании каскада для вычисления энергетических и угловых характеристик вторичных частиц.

Подробно анализируются результаты численных расчетов спектральных и временных характеристик частиц каскадного ливня. Важнейшим параметром, характеризующим развитие электромагнитного каскада является оптическая толщина активной области по фоторождению электронно-позитронных пар, τ_ϕ . При $\tau_\phi < 1$ область является прозрачной для гамма-квантов и, следовательно, эффективность образования электронно-фотонных ливней ничтожна. С увеличением оптической толщины τ_ϕ спектры гамма-излучения в области $E < E_c = (mc^2)^2/\omega$ (ω - характерная энергия рентгеновских фотонов) стандартизируются, а в области $E \geq E_c$ - резко укрупняются. В дальнейшем спектр несколько уплощается, что связано с утечкой высокоэнергичных гамма-квантов. При $\tau_\phi = 10$ более 70% энергии иницирующей частицы перерабатывается в фотоны с энергией $\leq E_c$, для которых источник является прозрачным, и примерно 20% - в выходящие из источника релятивистские электроны и позитроны. Спектр гамма-квантов полностью стандартизируется при экстремально больших значениях оптической толщины τ_ϕ . При $\tau_\phi = 100$ спектры гамма-квантов имеют степенной характер с дифференциальным показателем $\alpha = 1,5$ до энергии E_c и резко обрываются

выше этой энергии. При таких больших значениях τ_{ϕ} происходит наиболее эффективное образование электронов и позитронов. Число электронно-позитронных пар, образованных при экстремальных значениях оптической толщи $K_{\text{нар}} \sim 6,4$. Генерация и утечка релятивистских электронов и позитронов наиболее эффективно осуществляется при значениях оптической толщи $\tau_{\phi} \sim 1-10$. Основным параметром, характеризующим взаимодействие высокоэнергичных частиц с электронно-ионной компонентой является оптическая толщина по томсоновскому рассеянию τ_T . При $\tau_T \gg 1$ в спектре гамма-квантов появляется особенность вблизи энергии $E \sim mc^2$ из-за аннигиляции термолизовавшихся позитронов с электронами среды. При рассмотрении явления формирования каскадного ливня необходимо учитывать ограничение на плотность энергии магнитного поля, при котором справедлива рассмотренная картина развития электромагнитного каскада.

Заключительная часть работы посвящается рассмотрению формирования электронно-фотонных ливней в конкретных компактных рентгеновских источниках и в источниках рентгеновского излучения, возникающего в результате комптонизации низкочастотного излучения в аккреционной плазме.

Вычисляются спектры каскадных гамма-квантов, образованных в результате формирования электронно-фотонных ливней в ядрах активных галактик и квазаров. Предполагается, что высокоэнергичная компонента формируется в активной области рентгеновского излучения и инициирует электромагнитный каскад в этой области. Вычисления проводятся для различных размеров активной области и из сравнения наблюдаемых спектров с расчетными определяются реальные значения этих размеров для источников NGC 4151, MCG8-II-II, 3C273 и GSO 0241+622. Для сейфертовских галактик эта величина порядка $10^{14}-10^{15}$ см, а для квазаров порядка $10^{16}-10^{17}$ см.

Отдельно рассмотрен галактический центр как источник каскадных частиц, образуемых в поле рентгеновского излучения высокоэнергичной инициирующей компонентой. Выдвигается предположение о каскадном происхождении позитронов, формирующих затем узкую аннигиляционную линию. Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными, если принять размер активной области равным $3 \cdot 10^7$ см, а мощность инжекции инициирующих релятивистских электронов порядка $3 \cdot 10^{38}$ эрг/с. Эти значения R и L_0 могут

быть объяснены в рамках модели развития каскада в горячей внутренней зоне аккреционного диска вокруг черной дыры с массой $M = (20-50)M_{\odot}$.

Подробно изучен процесс формирования электронно-фотонных ливней в поле комптонизованного излучения аккреционной плазмы. Рассмотрены пределы применимости результатов, получаемых при изучении электромагнитных ливней в рамках линейного приближения. Показано, что при высоких значениях параметров компактности $\mathcal{R}_x = \frac{L_x/L_{Ed}}{R/R_g}$ и $\mathcal{R}_0 = \frac{L_0/L_{Ed}}{R/R_g}$ существенными становятся нелинейные столкновения вторичных частиц, образованных каскадным ливнем. Исследуется рентгеновский источник Cyg X-1. Выдвигается предположение о нетепловой природе избытка гамма-излучения в области $E > 300$ кэВ. Это гамма-излучение может быть образовано каскадными квантами, возникающими при распространении электронов высоких энергий в поле комптонизованного рентгеновского излучения. Рассмотрены модели сферической и дисковой аккреции в источнике Cyg X-1.

В приложения А приведены математические обоснования некоторых утверждений, используемых при решении системы релятивистских кинетических уравнений электромагнитного каскада. Показана справедливость приближенной формулы для равновесных спектров каскадных частиц. Обоснован метод перевала, применяемый для определения дифференциальных спектров частиц.

В приложения В описаны методы моделирования характеристик фотонов поля для некоторых распределений, а также методы моделирования процессов фоторождения, обратного комптоновского рассеяния и аннигиляции.

Основные результаты диссертационной работы

I. Рассмотрено явление электромагнитного каскада, возникающего в областях, занятых плотным фотонным полем, имеющих, в частности, место в компактных рентгеновских источниках. Показано, что кинетика распространения высокоэнергичных электронов и гамма-квантов с энергией $E > (mc^2)^2/\omega$ в плотном фотонном поле носят каскадный характер.

II. Выведена система релятивистских кинетических интегральных уравнений, описывающих распространение электронов и гамма-квантов с $E \gg mc^2$ в монохроматическом фотонном поле с $\omega < \frac{mc^2}{2}$.

В результате решения системы получены равновесные энергетические спектры электронов и гамма-квантов и спектры каскадных частиц на различных глубинах t при условии $\ln b \gg 1$. Они свидетельствуют об эффективном проникновении частиц высоких энергий вглубь рассматриваемой среды, об идентичности спектров электронов и гамма-квантов и их независимости от типа иницирующей частицы.

Найденные спектры каскадных частиц формируются при распространении электронно-фотонных ливней в среде с соотношением электронно-ионной и фотонной компонент $n_e/n_w \ll \mathcal{F}/\alpha$.

III. Разработана программа моделирования электромагнитного каскада, иницируемого высокоэнергичными частицами в радиационно-доминированной плазме. Она позволяет определять спектральные характеристики каскадных частиц в широком энергетическом диапазоне, на различных глубинах, для любых пространственных и энергетических распределений как частиц среды, так и иницирующих каскад частиц.

IV. В результате численных расчетов спектров электронов и гамма-квантов получены следующие выводы.

I. В случае, когда можно пренебречь электронно-ионной компонентой среды, спектры электронов и гамма-квантов зависят от переменной \mathcal{C} . При $\mathcal{C} \gg 40$ рассчитанные методом моделирования спектры гамма-квантов совпадают с аналитически полученными спектрами.

2. С увеличением оптической толщины τ_ϕ спектры выходящего из активной области гамма-излучения стандартизируются. При $\mathcal{C}_r < 4$ формируется степенной спектр гамма-квантов, а при $\mathcal{C}_r \gg 4$ спектр резко укрупняется. Для экстремальных значений $\tau_\phi \gg 1$ показатель спектрального распределения гамма-квантов в области $\mathcal{C}_r < 4$ близок к значению $\alpha = 1,5$. При больших значениях оптической толщины происходит также наиболее значительное образование электронно-позитронных пар. Однако их эффективная утечка из активной области осуществляется при значениях оптической толщины $\tau_\phi \sim 1-10$.

3. Если в среде присутствует электронно-ионная компонента ($\tau_T \gg 1$), то в спектре гамма-квантов появляется особенность при энергии $\sim mc^2$, связанная с аннигиляцией позитронов, образованных каскадным ливнем.

4. При значениях $\tau_\phi > 1$ спектры электронов и гамма-кван-

тов слабо зависят от типа иницирующей электромагнитный каскад частицы. Отличия наблюдаются лишь при значениях энергий, близких к энергии иницирующей частицы.

5. Присутствие магнитного поля в среде уменьшает эффективность генерации электронно-фотонных ливней, а при отношениях плотностей энергии $W_x/W_{mag} \ll 60$ (для характерных значений $\omega = 0,02 mc^2$, $E_e = 200 mc^2$) электромагнитные ливни вообще не генерируются.

У. Доказана неизбежность формирования электронно-фотонных ливней, генерируемых высокоэнергичной компонентой в компактных рентгеновских источниках. Гипотеза о каскадной природе электронов и гамма-квантов в ядрах активных галактик и квазаров, а также в области центра нашей Галактики, естественным образом объясняет происхождение:

а) наблюдаемого излома в мягкой области гамма-спектра ядер активных галактик и квазаров;

б) высокоэнергичных гамма-квантов, регистрируемых от ядер активных галактик и квазаров;

в) источника позитронов, формирующих аннигиляционную линию в области центра Галактики.

VI. Рассчитаны спектры каскадных гамма-квантов, формируемые при развитии каскада в поле комптонизованного излучения. Рассмотрены пределы применимости полученных результатов и показано, что при значениях параметров компактности $\mathcal{R}_x > 10^{-3}$ и $\mathcal{R}_o > 10^{-2}$ становится эффективным нелинейный этап развития каскада. Результаты расчетов использованы для объяснения нетепловой природы избытка гамма-излучения в области $E > 300$ кэВ, наблюдаемого от рентгеновского источника Cyg X-1.

Список работ по теме диссертации

1. Aharonian F.A., Vardanian V.V. The development of the electromagnetic cascade showers initiated by high-energy electrons and gamma-rays in the hot photon gas.- In: Proc. 18 th Intern Cosmic Ray Conf., India, Bangalore, 1983, v.1, p.153.
2. Aharonian F.A., Kirillov-Ugryumov V.G., Vardanian V.V. Relativistic electron-photon showers in compact X-ray sources.- Preprint EFI-677(67)-83, Yerevan, 1983.
3. Aharonian F.A., Kirillov-Ugryumov V.G., Vardanian V.V. Develop-