

На правах рукописи

Сазонов Сергей Юрьевич

**Взаимодействие реликтового излучения,
рентгеновского излучения квазаров и ядер
активных галактик с межгалактическим и
межзвездным газом**

01.03.02 Астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва, 2006

Работа выполнена в Институте космических исследований РАН

Официальные оппоненты:

академик РАН, доктор физико-математических наук,
профессор Парийский Юрий Николаевич

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук,
профессор Черепашук Анатолий Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор Гнедин Юрий Николаевич

Ведущая организация: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
(г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится 26 мая 2006 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 при Институте космических исследований РАН по адресу: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 25 апреля 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.113.02
кандидат физико-математических наук

А.Ю. Ткаченко

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Тема взаимодействия излучения с веществом в экстремальных (по земным меркам) условиях занимает одно из центральных мест в современной астрофизике, в том числе в исследованиях внегалактических объектов. Большой интерес связан со скоплениями галактик, которые являются огромными ($\sim 10^{13}$ – $10^{14} M_{\odot}$) резервуарами горячего ($\sim 10^8$ К) газа. Этот газ не только сам является мощным источником рентгеновского излучения, но и взаимодействует (главным образом посредством комптоновского рассеяния) с внешними и внутренними полями излучения, в первую очередь с реликтовым фоном микроволнового излучения. Другой класс объектов, привлекающий огромное внимание – активные ядра галактик (АЯГ) и квазары, которые за счет аккреции вещества на центральные массивные черные дыры выбрасывают наружу огромное количество энергии в виде электромагнитного излучения (от радиоволн до гамма-лучей) и тем самым оказывают сильное влияние на окружающую межзвездную и межгалактическую среду. Только в последние 10–15 лет наблюдения скоплений галактик и АЯГ стали выходить на уровень, необходимый для экспериментального исследования эффектов, связанных с распространением излучения через вещество. С помощью обсерваторий следующего поколения можно будет получить гораздо более детальную информацию, представляющую ценность для внегалактической астрофизики и космологии. Подготовка к будущим экспериментам включает в себя создание соответствующей теоретической базы. Представленная работа – шаг в этом направлении.

Эффект Сюняева–Зельдовича

Более 30 лет назад Зельдович и Сюняев предсказали, что спектр микроволнового реликтового излучения Вселенной должен искажаться в направлении скоплений галактик в результате обратного комптоновского рассеяния небольшой доли фотонов в горячем межгалактическом газе. При этом на длинах волн больше 1.4 мм интенсивность фона должна уменьшаться, а на более коротких длинах волн – наоборот увеличиваться. Это явление получило название теплового эффекта Сюняева–Зельдовича. Вскоре было осознано, что если дополнить микроволновые наблюдения эффекта Сюняева–Зельдовича измерениями рентгеновского излучения горячего газа тех же скоплений, то, в принципе, можно напрямую определять расстояния до далеких скоплений, а следовательно и постоянную Хаббла. В последние годы стало ясно, что эффект Сюняева–Зельдовича может служить одним из мощнейших инструментов при решении задач космологии.

В течение первых примерно двадцати лет после предсказания эффект Сюняева–Зельдовича был зарегистрирован всего от нескольких скоплений галактик, причем во всех случаях наблюдения проводились на миллиметровых и сантиметровых длинах волн, и поэтому в соответствии с ожиданиями наблюдался декремент интенсивности фона. Однако, в 90-е годы прошлого века и особенно в последние годы, благодаря технологическому прогрессу и многолетним усилиям нескольких групп исследователей, наблюдения эффекта Сюняева–Зельдовича перешли на качественно

более высокий уровень, а именно были получены карты распределения декремента интенсивности фона для порядка сотни скоплений, а в нескольких случаях был обнаружен инкремент интенсивности фона на длинах волн около 1 мм. Причем прогресс был связан с развитием двух методов наблюдений: с помощью одноантенных радиотелескопов и с помощью радиоинтерферометрии.

Достигнутый успех дополнительно подстегнул интерес к эффекту Сюняева–Зельдовича. Это привело к тому, что уже на ближайшие годы запланированы специальные обзоры больших площадей на небе, такие как обзор четырех тысяч квадратных градусов Телескопом на южном полюсе (South Pole Telescope), в которых на основе эффекта будут обнаружены тысячи скоплений галактик. Огромным преимуществом таких обзоров по сравнению с любыми другими (например, рентгеновскими) является то, что для заданной массы скопления детектируемость эффекта Сюняева–Зельдовича практически не зависит от красного смещения, что дает возможность получать практически неискаженную статистику скоплений галактик от $z \sim 2$ до современной эпохи, а следовательно и сведения о крупномасштабной структуре Вселенной и космологических параметрах. Кроме наземных обзоров большие ожидания связаны также с космической обсерваторией Planck Surveyor, на которой будет выполнен обзор всего микроволнового неба в нескольких частотных полосах с достаточно хорошим угловым разрешением (~ 5 угл. мин). В результате сигнал, связанный с эффектом Сюняева–Зельдовича, будет обнаружен от порядка десяти тысяч скоплений.

Ожидается, что уже в ближайшие годы станет возможным детектирование кинематического эффекта Сюняева–Зельдовича в скоплениях галактик, амплитуда которого примерно на порядок ниже, чем у теплового эффекта. Это даст уникальную возможность измерять пекулярные скорости скоплений (вдоль луча зрения) относительно микроволнового фона. Следующим шагом должно стать обнаружение поляризованного микроволнового излучения от скоплений галактик. Этот эффект, также предсказанный Сюняевым и Зельдовичем, не только несет дополнительную информацию о пекулярных движениях скоплений, но и позволяет измерять квадрупольную компоненту фонового излучения на красных смещениях, отличных от нуля.

Межгалактический газ – носитель информации об эволюции галактик

Скопления галактик интересны также тем, что в удерживаемом в их глубоких потенциальных ямах горячем газе за многие миллиарды лет накоплена информация об эволюции галактик скопления. Ее доносят до нас измерения рентгеновского излучения межгалактического газа. В частности, по измеренным распределениям обилия химических элементов (металлов) и температуры газа можно судить о процессах звездообразования в галактиках и о том, насколько эффективно и каким образом происходил обмен веществом и энергией между галактиками и межгалактическим газом. В последнее время стало также ясно, что такой обмен происходил не только в связи с формированием звездного населения галактик, но и в результате аккреционного роста сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик.

В последние годы в области рентгеновских наблюдений скоплений галактик

происходил значительный прогресс, аналогичный отмеченному выше в области микроволновых наблюдений. Основную роль в этом сыграл вывод на орбиту в конце прошлого века обсерваторий Chandra (НАСА) и XMM им. Ньютона (Европейского космического агентства). На этих обсерваториях установлены оснащенные ПЗС-матрицами рентгеновские телескопы косоугольного падения, которые позволяют получать изображения с высоким угловым разрешением и спектры с умеренным разрешением. Кроме того, на телескопах установлены дифракционные решетки для получения спектров высокого разрешения от сравнительно ярких объектов.

Важнейшим открытием обсерваторий Chandra и XMM стало то, что в так называемых течениях охлаждения в центральных областях скоплений галактик высаживается как минимум на порядок меньше холодного газа, чем считалось ранее. По всей видимости, горячий газ не успевает охладиться, несмотря на достаточную излучательную способность (для измеренных плотности и температуры), в основном из-за того, что в него регулярно поступает огромная энергия (в среднем $\sim 10^{44}$ эрг/с) из ядра гигантской эллиптической галактики в центре скопления. Рентгеновские телескопы позволили разглядеть некоторые подробности этого процесса подогрева газа, в частности понижение яркости рентгеновского излучения на месте радиолобов размером в десятки килопарсек из-за выдавливания оттуда горячего газа расширяющейся релятивистской плазмой.

Однако, как это обычно бывает, открытия обсерваторий Chandra и XMM оставили больше вопросов, чем дали ответов. Так, нынешние измерения обилия металлов в скоплениях галактик вызывают много споров, которые в основном связаны с тем, что ПЗС-матрицы не позволяют разрешать некоторые важнейшие бленды рентгеновских линий, например вблизи 1 кэВ. Аналогично, для того, чтобы детально исследовать процессы обмена веществом и энергией галактик и их центральных черных дыр с межгалактическим газом нужна информация о турбулентных и макроскопических движениях газа, которая, в принципе, может быть получена только с помощью тонкой рентгеновской спектроскопии. Наконец, исследования были пока ограничены самыми близкими скоплениями, так как эффективной площади современных телескопов не достаточно для изучения свойств межгалактического газа далеких скоплений, в которых процессы формирования галактик и массивных черных дыр происходили более активно.

На многие из поставленных вопросов должны ответить рентгеновские обсерватории следующего поколения, такие как планируемые Constellation-X и XEUS. Одной из главных задач этих обсерваторий станет детальное исследование свойств горячего межзвездного и межгалактического газа в галактиках и скоплениях галактик с помощью пространственно разрешенной тонкой рентгеновской спектроскопии. При этом будут использоваться калориметры, обеспечивающие энергетическое разрешение $\sim 1-2$ эВ в стандартном рентгеновском диапазоне ($\sim 1-10$ кэВ), установленные в фокусе гигантских рентгеновских телескопов с эффективной площадью порядка 1 кв. м, что на два порядка превышает эффективную площадь дифракционных спектрометров на обсерваториях Chandra и XMM. Это позволит разрешать бленды рентгеновских линий, в том числе триплеты гелиоподобных ионов, измерять профили линий и строить изображения протяженных источников в отдельных линиях. Стоит также отметить, что чувствительность рентгеновских

телескопов планируется протянуть в жесткий рентгеновский диапазон, как минимум до 40 кэВ (с умеренным энергетическим разрешением). Это позволит снимать широкополосные спектры объектов, в первую очередь АЯГ.

Анализ и интерпретация данных наблюдений будущих обсерваторий потребует учета ряда эффектов, связанных с переносом излучения в межгалактическом газе. В частности, известно, что сильнейшие рентгеновские линии, излучаемые горячим газом скоплений, могут иметь значительную оптическую толщину по резонансному рассеянию. Это должно приводить к перераспределению поверхностной яркости по скоплению и искажению профилей линий. Непринятие во внимание этого эффекта может существенно исказить оценки обилия химических элементов в межгалактическом газе. Аналогичный эффект ожидается, как будет показано в данной работе, если ядро центральной галактики скопления светило на уровне квазара в относительно недавнем прошлом (порядка миллиона лет назад) – часть этого излучения должна была перехватываться в рентгеновских резонансных переходах горячим газом на расстояниях порядка Мпк от ядра и в результате приходиться к нам лишь сейчас. Обнаружение этого эффекта может дать уникальную информацию о долговременной переменности АЯГ. Отметим также недавние сообщения о значительном прогрессе, достигнутом в разработке рентгеновских поляриметров. Это вселяет надежду, что такие приборы вскоре появятся в составе обсерваторий. Эффекты, связанные с резонансным рассеянием в межгалактическом газе, должны быть особенно заметны в поляризованном излучении.

Обратное воздействие квазаров на межзвездную среду

Как было отмечено выше, существуют косвенные и прямые свидетельства того, что процесс аккреции вещества на массивные черные дыры, сидящие в центре гигантских доминирующих галактик скоплений, сопровождается выделением колоссальной энергии, в основном механической, которая оказывает сильное влияние на окружающий межгалактический газ. В таких ситуациях, однако, мы имеем дело с черными дырами, рост которых, по-видимому, в основном давно закончился, а в современную эпоху аккреция на них продолжается, но со средним темпом, составляющим лишь небольшую долю от критического (эддингтоновского) значения для данной массы черной дыры. Более того, сами гигантские эллиптические галактики очень старые, т.е. процесс звездообразования в них в основном закончился более 10^{10} лет назад.

В то же время, огромный интерес в последнее время связан с открытием сильной корреляции между массой близких эллиптических галактик, а также балджей спиральных галактик с массой их центральных черных дыр – так называемое соотношение Магорриана (корреляция оказывается несколько лучше, если в место массы галактики/балджа использовать звездную дисперсию скоростей). Более того, из Слоуновского цифрового обзора неба (SDSS), следует, что темп аккреции на массивные черные дыры, усредненный по большому количеству галактик, разбитых на узкие интервалы по красному смещению, пропорционален среднему темпу звездообразования в этих галактиках. Эти факты говорят о том, что формирование звездного населения галактик и рост массивных черных дыр происходили примерно

параллельно по ходу эволюции Вселенной (только с космологической точки зрения, так как наблюдательный материал допускает возможность, что между этими процессами была задержка порядка или меньше миллиарда лет).

Одно из наиболее популярных объяснений наблюдаемой тесной связи между массивными черными дырами и балджами галактик состоит в том, что после накопления путем аккреции определенной (критической) массы черная дыра способна разбросать межзвездную среду вокруг нее, что приведет к остановке как ее собственного роста, так и звездообразования в родительской галактике. То, каким именно образом и на каком этапе эволюции произошло такое “обратное воздействие” активно дискутируется. Интересно, что сравнительно мало внимания получил механизм, связанный с нагревом газа в поле рентгеновского излучения аккрецирующей массивной черной дыры. И это несмотря на то, что галактики типа M87 во всей видимости прошли через стадию квазара в своей юности, т.е. их центральные черные дыры когда-то светили на уровне, близком к эддингтоновскому (болометрическая светимость порядка 10^{47} эрг/с), и при этом существенная часть энергии выделялась в виде жесткого рентгеновского излучения. Как будет показано в данной работе, нагрев межзвездного газа в таком поле излучения посредством обратного комптоновского рассеяния и фотоионизации может быть очень значительным. Более того, нельзя исключить того, что и в нынешнюю эпоху время от времени происходят мощные вспышки АЯГ в ядрах эллиптических галактик, сопровождаемые сильным радиационным разогревом межзвездного газа.

Рентгеновские обзоры активных ядер галактик

Важнейшую роль в исследовании аккреции на массивные черные дыры играют глубокие рентгеновские обзоры, которые позволяют получить информацию о функции светимости АЯГ, ее эволюции с красным смещением и соотношении объектов первого и второго типа (излучение первых до нас беспрепятственно, а вторых проникает через толщу газа и пыли в ядре активной галактики).

До сих пор практически все рентгеновские обзоры проводились на энергиях ниже 10 кэВ (с максимумом чувствительности детекторов ниже 5 кэВ). В таких обзорах происходит сильная селекция в пользу объектов первого типа и практически не регистрируются АЯГ, рентгеновские спектры которых характеризуются сильным поглощением (оптическая толщина колонки поглощения порядка или больше единицы по томсоновскому рассеянию). Однако, такие объекты должны составлять заметную часть всей популяции АЯГ и вносить существенный вклад в космический рентгеновский фон. Более того, глубокие обзоры покрывают очень маленькие площадки на небе (обычно меньше 1 кв. град) и поэтому в основном дают информацию об АЯГ на красных смещениях $z \gtrsim 0.3$. Важнейшим открытием, сделанным по результатам глубоких рентгеновских обзоров, стало то, что популяция АЯГ быстро эволюционировала на красных смещениях $z < 1$, а именно характерная светимость АЯГ уменьшалась примерно по закону $(1 + z)^4$, т.е. происходил постепенный переход от объектов типа квазаров к объектам типа сейфертовских галактик. Так же быстро уменьшалось и суммарное энерговыделение АЯГ на

единицу объема, т.е. средний темп аккреции на массивные черные дыры. Однако, по данным глубоких обзоров практически невозможно сказать, продолжалась ли эта эволюция на малых красных смещениях ($z \lesssim 0.3$).

Существенно дополнить данные глубоких рентгеновских обзоров обещают сравнительно неглубокие обзоры всего неба в жестких рентгеновских лучах (выше 20 кэВ), которые выполняются в настоящее время обсерваториями ИНТЕГРАЛ и Swift. Эти обзоры позволят впервые получить практически неискаженную статистику близких АЯГ, включая объекты, оптическое и мягкое рентгеновское излучение которых практически полностью поглощено. Важным промежуточным шагом к обзорам в жестких рентгеновских лучах стал недавний обзор, выполненный нами по данным обсерватории XTE им. Росси в диапазоне 3–20 кэВ.

Кроме сбора статистической информации об АЯГ, приборы обсерватории гамма-лучей ИНТЕГРАЛ, 25% данных которых принадлежат российским ученым, позволяют измерять широкополосные рентгеновские спектры ярчайших близких АЯГ и в частности искать завалы комптонизационных спектров на энергиях выше 100 кэВ. Эта информация не только важна для понимания физики аккреции на массивные черные дыры, но и требуется для исследования взаимодействия излучения АЯГ с окружающей межзвездной средой (см. выше).

Цель работы

Подготовка к будущим микроволновым и рентгеновским наблюдениям скоплений галактик включает в себя создание соответствующей теоретической базы. Например, описание спектральных искажений микроволнового фона в направлении скоплений галактик до недавних пор ограничивалось нерелятивистскими формулами. Интерпретация результатов будущих экспериментов несомненно потребует учета релятивистских поправок, связанных с высокой температурой межгалактического газа. Аналогично, ранее практически не исследовались различные эффекты, связанные с диффузией излучения в резонансных рентгеновских линиях, наблюдаемых от горячего газа скоплений галактик. Одной из основных целей данной работы является кардинальное улучшение данной ситуации, заключающееся в проведении детальных аналитических и численных расчетов таких эффектов.

Смежной целью работы является всестороннее рассмотрение механизма обратного воздействия аккреционного роста массивных черных дыр на окружающий межзвездный газ посредством комптоновского и фотоионизационного нагрева и оценка возможной роли этого процесса в совместной эволюции галактик и их центральных черных дыр. В рамках исследования статистических свойств активных ядер галактик и их жесткого рентгеновского излучения привлекаются данные обсерваторий RXTE и ИНТЕГРАЛ.

Научная новизна

В данной работе впервые получены аналитические формулы для ядра кинетического уравнения и индикатриссы рассеяния в общей задаче о комптоновском рассеянии низкочастотного и рентгеновского излучения в слабoreлятивистской максвелловской

плазме.

Впервые описаны релятивистские поправки к кинематическому эффекту Сюняева–Зельдовича, основная из которых пропорциональна $(v/c)(kT_e/m_e c^2)$, где v – пекулярная скорость скопления, а T_e – температура межгалактического газа. Впервые показано, что среди поляризационных эффектов Сюняева–Зельдовича в обычных условиях должен доминировать сигнал, индуцированный квадрупольной компонентой микроволнового фона; рассчитана зависимость амплитуды этого эффекта от направления на скопление галактик.

Впервые рассчитана поляризация излучения в резонансных рентгеновских линиях, формируемых в горячем газе скоплений галактик. Также впервые выполнены оценки ограничений на рентгеновскую светимость ядер галактик в прошлом, которые могут быть получены по наблюдениям излучения, рассеянного на окружающем межгалактическом газе, в том числе в резонансных линиях.

Предложена уникальная возможность определения угла коллимации космических гамма-всплесков с помощью наблюдений их рентгеновского излучения, рассеянного на окружающем молекулярном и атомном газе. Открытие малоэнергичного гамма-всплеска GRB 031203 обсерваторией ИНТЕГРАЛ позволило впервые заявить с уверенностью о существовании многочисленного класса слабых гамма-всплесков.

Впервые сформулирована и решена задача о спектре излучения среднего квазара во Вселенной и показано, что комптоновский и фотоионизационный нагрев в поле излучения таких источников способен приводить к высвобождению межзвездного газа из потенциальных ям гигантских эллиптических галактик. Как следствие этого, показано, что наблюдаемая в локальной Вселенной корреляция между звездной дисперсией скоростей в галактических балджах и массой черных дыр в их ядрах могла возникнуть в результате радиационного обратного воздействия аккреции на массивные черные дыры.

Построен каталог активных ядер галактик, отобранных по рентгеновскому потоку в сравнительном жестком рентгеновском диапазоне 3–20 кэВ. На его основе получена самая точная на сегодняшний день рентгеновская функция светимости близких АЯГ. Впервые явно показано, что распределение АЯГ по внутренней колонке поглощения сильно отличается для объектов со сравнительно малой и большой светимостью. Представлены первые результаты обзора всего неба в жестких рентгеновских лучах обсерватории ИНТЕГРАЛ.

Практическая ценность работы

Разработанный аналитический аппарат для описания комптоновского рассеяния в слаборелятивистском режиме может применяться при решении самых разнообразных астрофизических и физических задач, связанных с комптонизацией излучения.

Полученные аналитические выражения для релятивистских поправок к эффекту Сюняева–Зельдовича и различных эффектов, связанных с резонансным рассеянием в рентгеновских линиях в межгалактическом газе, могут использоваться при анализе будущих микроволновых и рентгеновских наблюдений скоплений галактик.

Построенный широкополосный спектр излучения среднего квазара во Вселенной и результаты расчетов нагрева газа в поле излучения таких источников могут

использоваться и уже используются в качестве стандартов при исследовании разнообразных эффектов, связанных с воздействием квазаров на окружающую среду.

Подборка близких активных ядер галактик, обнаруженных во время обзора неба на высоких галактических широтах обсерватории RXTE, может использоваться и уже используется при исследовании различных статистических свойств локальной популяции активных галактик, в том числе путем кросс-корреляции данного каталога с обзорами неба, проводимыми в других областях электромагнитного спектра.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Аналитическое описание ядра кинетического уравнения и индикатриссы рассеяния в задаче о комптоновском рассеянии низкочастотного и рентгеновского излучения в слаборелятивистском режиме.
2. Аналитическое описание релятивистских поправок порядка $(v/c)(kT_e/mc^2)$, $(v/c)^2$ и т.д. к эффекту Сюняева–Зельдовича (где v – пекулярная скорость скопления, а T_e – температура межгалактического газа). Численный расчет релятивистских эффектов в виновской части спектра микроволнового фона.
3. Расчет спектрального и углового распределения поляризации космического микроволнового излучения при прохождении через горячий газ скоплений галактик. Распределение по небу поляризационного эффекта, связанного с квадрупольной составляющей микроволнового фона.
4. Метод диагностики горячего газа скоплений галактик, исследования активности ядер галактик в недавнем прошлом и энергетики космических гамма-всплесков по наблюдениям рентгеновского эхо.
5. Исследование космического гамма-всплеска с аномально малой энергией по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ. Возможность существования многочисленного класса слабых гамма-всплесков.
6. Построение широкополосного спектра излучения среднего квазара. Расчет комптоновского и фотоионизационного нагрева межзвездного газа в поле излучения таких источников.
7. Исследование роли радиационного обратного воздействия аккреционного роста массивных черных дыр в установлении наблюдаемой корреляции между звездной дисперсией скоростей в балджах близких галактик и массой черных дыр в их ядрах.
8. Расчет нагрева газа в поле низкочастотного излучения радиогромких квазаров до температур порядка 10^8 – 10^9 К в результате индуцированного комптоновского рассеяния.
9. Построение рентгеновской функции светимости и исследование распределения по колонке внутреннего поглощения локальной популяции активных ядер

галактик по данным обзора неба на высоких галактических широтах в диапазоне энергий 3–20 кэВ обсерватории RXTE.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались регулярно на конференции “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (Москва, 2001, 2002, 2003, 2005), а также на XIX-ом Техаском симпозиуме (Париж, Франция, 1998), симпозиуме “CMB and Cosmology: Where Are We?” (Рингберг, Германия, 2002), XXV-ой Генеральной ассамблее Международного астрономического союза (Сидней, Австралия, 2003), конференции “The Supernova-Gamma Ray Burst Connection” (Сиэтл, США, 2004), конференции “Growing Black Holes: Accretion in a Cosmological Context” (Гархинг, Германия, 2004), симпозиуме “Gamma Ray Bursts in the Afterglow Era: 4th Workshop” (Рим, Италия, 2004), конференции “Космология и астрофизика высоких энергий (Зельдович-90)” (Москва, 2004), внутреннем научном симпозиуме миссии ИНТЕГРАЛ (ESTEC, Нидерланды, 2005), конференции “Relativistic Astrophysics and Cosmology – Einstein’s Legacy” (Мюнхен, Германия, 2005), неоднократно на семинарах Института космических исследований РАН, в том числе на семинарах Отдела астрофизики высоких энергий, неоднократно на семинарах Института астрофизики общества Макса Планка (Гархинг, Германия), а также на объединенном коллоквиуме Института радиоастрономии общества Макса Планка и Астрономических институтов Боннского университета (Бонн, Германия, 2004).

По теме диссертации опубликовано 25 работ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из пяти частей. В первой части – введение, три главы, во второй части – введение, две главы, в третьей части – введение, три главы, в четвертой части – введение, три главы, в пятой части – введение, две главы. В конце приведен список литературы. Диссертация имеет объем 198 страниц, содержит 80 иллюстраций и 11 таблиц. Список литературы состоит из 330 ссылок.

Содержание работы

Первая часть в основном выполняет подготовительную роль для последующих и посвящена рассмотрению общей задачи о комптоновском рассеянии низкочастотного и рентгеновского излучения в слабoreлятивистской максвелловской плазме. В случае, когда энергии фотонов ($h\nu$) и температура электронов (kT_e) не превышают $\sim 0.1m_e c^2 \sim 50$ кэВ, оказывается возможным выписать ряд полезных аналитических формул в виде поправок к известным нерелятивистским выражениям. В главе 1.1 рассматривается задача об уширении спектральных линий в результате однократного комптоновского рассеяния. Получены аналитические выражения, описывающие ядро интегро-дифференциального кинетического уравнения в случае с заданным углом рассеяния и в случае изотропного поля излучения. С помощью

численных расчетов методом Монте-Карло исследуется область применимости полученных формул.

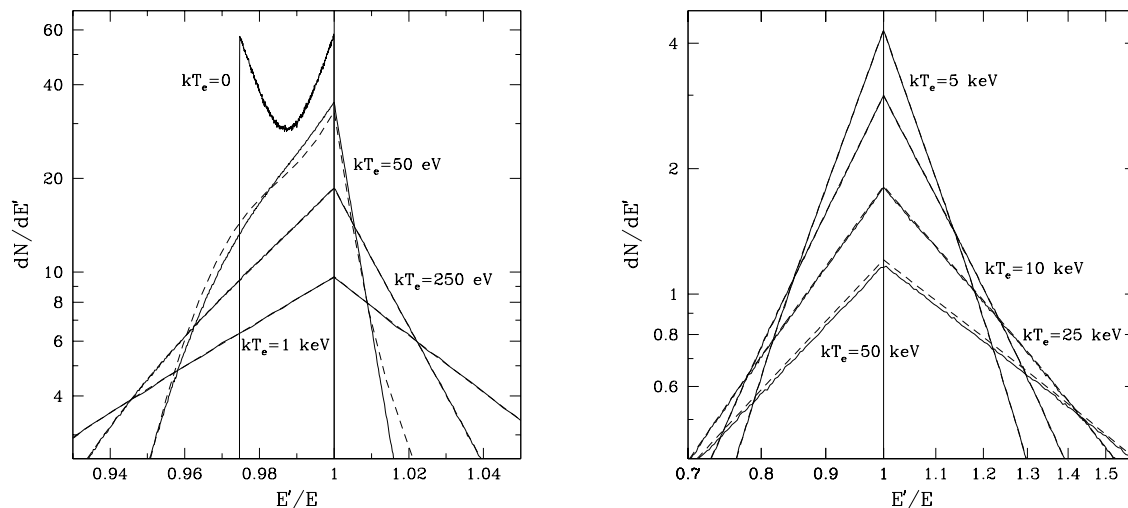


Рис. 1: Спектры, возникающие в результате однократного рассеяния изотропного монохроматического излучения ($h\nu = 6.7$ кэВ) на электронах с различными температурами. Результаты вычислений методом Монте-Карло (сплошные линии) сравниваются с аналитическим приближением (штрихи). В случае $kT_e = 0$ (холодные электроны) показан только результат численного расчета.

В главе 1.2 полученные формулы для ядра интегро-дифференциального кинетического уравнения используются для того, чтобы обобщить на слаборелятивистский режим дифференциальное уравнение Компанейца. Затем из этого уравнения выводится аналитическая формула для расчета скорости комптоновского нагрева/охлаждения в слаборелятивистском режиме. Отдельно выписаны дифференциальное кинетическое уравнение и ядро интегро-дифференциального кинетического уравнения для частного случая, когда основную роль играет индуцированное комптоновское рассеяние.

В главе 1.3 рассматривается индикатрисса комптоновского рассеяния в слаборелятивистской и ультрарелятивистской плазмах. Получен ряд аналитических формул. Как пример приложения к реальным астрофизическим ситуациям, исследуются отличия альbedo однократного рассеяния горячей рассеивающей атмосферы от альbedo холодной атмосферы.

Вторая часть посвящена теоретическому рассмотрению различных эффектов Сюняева–Зельдовича. В главе 2.1 вначале выполняются численные расчеты теплового и кинематического эффектов для различных температур горячего газа и peculiar скоростей скоплений галактик. Исследуется, на сколько заметными становятся отклонения от нерелятивистских оценок с ростом температуры. Показано,

что поток субмиллиметрового излучения от горячих скоплений галактик должен быть существенно больше, чем ожидается на основе стандартной формулы Сюняева–Зельдовича. Это должно облегчить детектирование скоплений в далекой виновской области спектра микроволнового фона. Затем выводятся аналитические выражения для релятивистских поправок порядка $(v/c)(kT_e/m_e c^2)$, $(v/c)^2$ и т.д. (здесь v – пекулярная скорость скопления) к эффекту Сюняева–Зельдовича.

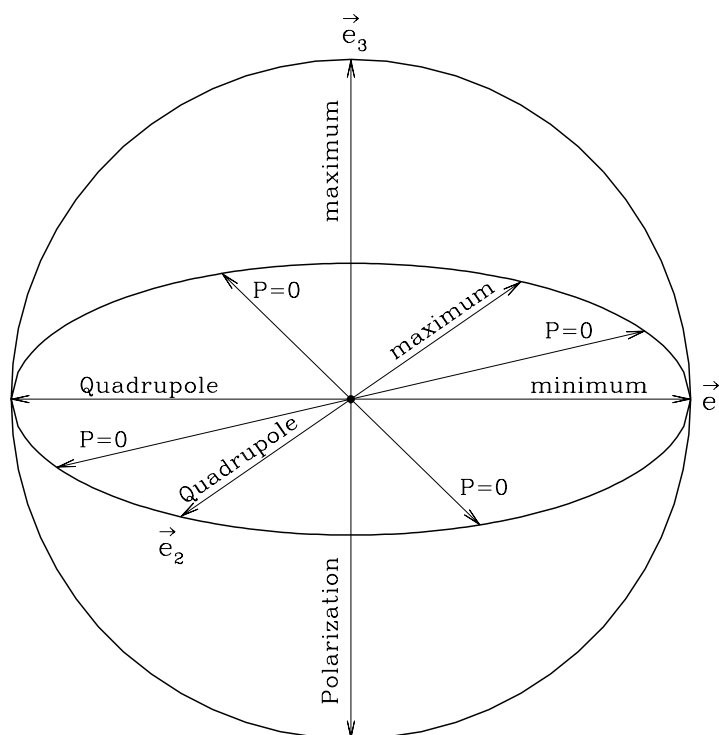


Рис. 2: Распределение по небу поляризационного эффекта в скоплениях галактик, связанного с квадрупольной компонентой микроволнового фона. Максимальная амплитуда поляризации достигается в направлениях $\pm\vec{e}_3$, перпендикулярных плоскости, в которой лежат минимумы ($\pm\vec{e}_1$) и максимумы ($\pm\vec{e}_2$) фонового квадруполья. В этой же плоскости лежат четыре направления, в которых эффект обращается в нуль.

В главе 2.2 подробно рассматриваются различные эффекты, которые могут приводить к поляризации космического микроволнового излучения в направлении скоплений галактик. Показано, что в реальных условиях обычно будет доминировать поляризованный сигнал, индуцированный квадрупольной компонентой микроволнового фона. Исследуется зависимость амплитуды эффекта от направления на скопление – показано, что на небе есть два широких максимума эффекта и четыре

направления, в которых он обращается в нуль. В максимуме ожидается поляризация порядка $0.1(\tau/0.02) \mu\text{K}$, где τ – оптическая толщина скопления по Томсону. Так как эффект мал, обсуждается стратегия будущих измерений фонового квадруполя, заключающаяся в суммировании слабых сигналов от большого количества скоплений в нескольких заданных направлениях на небе. Описана принципиальная возможность измерения эволюции квадруполя с красным смещением. Выполняется детальный расчет спектрального и углового распределения поляризованного микроволнового излучения для различных моделей скоплений галактик с учетом всех остальных эффектов.

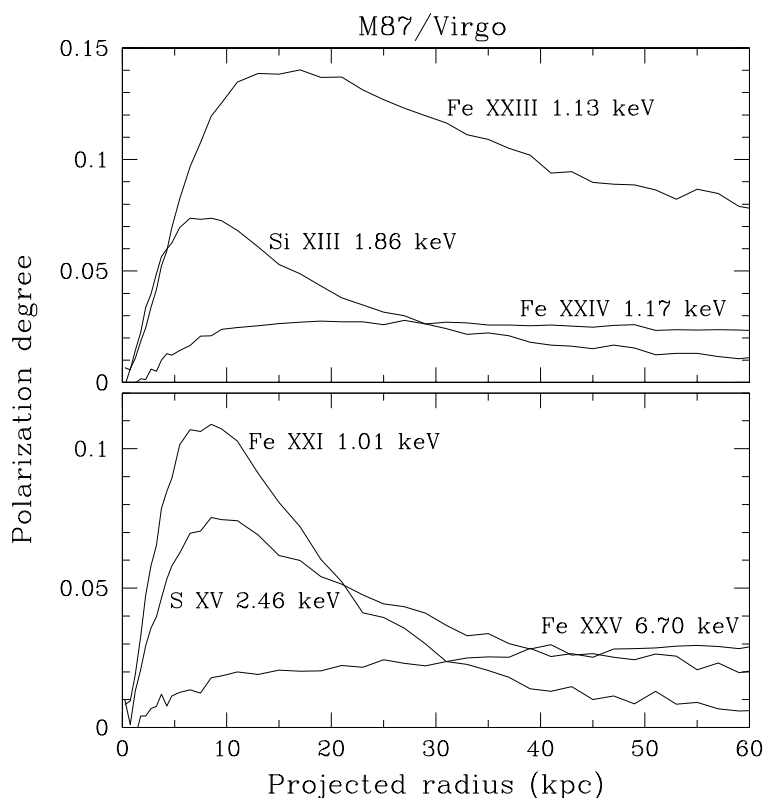


Рис. 3: Степень поляризации излучения в резонансных рентгеновских линиях, формируемых в межгалактическом газе, в зависимости от проекционного расстояния до центра скопления Девы.

В третьей части предложен метод диагностики горячего газа скоплений галактик и исследования активности ядер галактик с помощью измерений рентгеновского излучения, рассеянного в межгалактической или межзвездной среде. В главе 3.1 рассматривается возможность использования рентгеновской поляриметрии для исследования роли резонансного рассеяния в формировании профилей поверхностной яркости линейчатого рентгеновского излучения скоплений

галактик с целью определения химического состава и характерных скоростей движения межгалактического газа. Представлены результаты расчетов степени поляризации излучения в сильнейших резонансных рентгеновских линиях сначала для простейших аналитических моделей распределения плотности газа, а затем и для нескольких реальных скоплений галактик. В важнейших резонансных линиях ожидается значительная поляризация на уровне порядка 10%. Исследуются требования, которым должен удовлетворять будущий рентгеновский поляриметр – показано, что измеренная степень поляризации может сильно упасть в случае, если резонансные линии не будут разрешены на общем спектре.

В главе 3.2 исследуется уникальная возможность получения сведений об активности ядер центральных доминирующих галактик скоплений в сравнительно недавнем прошлом (примерно в течение последнего миллиона лет) с помощью измерений их рентгеновского излучения, отраженного от межгалактического газа на расстояниях в сотни килопарсек от центра скопления. Обсуждаются преимущества использования резонансных рентгеновских линий при исследовании близких объектов, таких как галактика M87 в центре скопления Девы. Показано, что относительный вклад рассеянного излучения АЯГ в поток резонансной линии обычно должен быть больше в 3–10 раз, чем в случае рентгеновского континуума в районе данной линии. Отмечается, что если ставится цель исследовать долговременную переменность далеких квазаров, окруженных межгалактическим газом, то имеет смысл искать следы рассеянного излучения квазара в рентгеновском континууме на энергиях $E \gg kT/(1+z)$, на фоне экспоненциального завала спектра теплового излучения горячего газа.

В главе 3.3 рассматривается концептуально очень похожая задача, которая правда не относится напрямую к теме диссертации, а именно исследуется возможность получения ограничений на характерный угол коллимации и, соответственно, полную энергию космических гамма-всплесков по наблюдениям рентгеновского эхо. Рассматривается подкрепленная рядом фактов гипотеза, что гамма-всплески происходят в молекулярных облаках. В этом случае к нам в течение нескольких месяцев, а может быть и лет после всплеска должно приходиться рентгеновское излучение, связанное с самим всплеском или его ранним послесвечением, после рассеяния на газе облака. Показано, что по кривой блеска рассеянного излучения и измеренному (на основе рентгеновского спектра всплеска) значению колонки поглощения вдоль луча зрения можно определить угол коллимации всплеска. Обнаружение такого эхо от ярчайших гамма-всплесков оказывается на пределе возможностей ныне действующих обсерваторий Chandra и XMM. В этой же главе описываются результаты наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ уникального малоэнергичного гамма-всплеска GRB 031203 и обсуждается возможность существования многочисленного класса подобных слабых гамма-всплесков.

В четвертой части рассматривается задача о нагреве межзвездной среды в поле излучения квазаров. В главе 4.1 на основе наблюдательного материала о космическом рентгеновском фоне, суммарном излучении АЯГ в инфракрасном диапазоне, космической плотности массивных черных дыр в локальной Вселенной и спектрах отдельных квазаров строится широкополосный спектр излучения “среднего” квазара.

Показывается, что излучение таких источников способно ионизировать и нагревать окружающую среду до равновесной комптоновской температуры $\sim 2 \times 10^7$ К, которая превышает вириальные температуры гигантских эллиптических галактик. Причем это значение относится и к квазарам второго типа, ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское излучение которых перехватывается плотным тором из пыли и газа и перерабатывается в инфракрасное излучение. Это объясняется тем, что комптоновский нагрев связан в основном с жестким рентгеновским излучением, а комптоновское охлаждение определяется полной светимостью квазара. Затем выполняется численный расчет фотоионизационного нагрева газа в поле излучения среднего квазара.

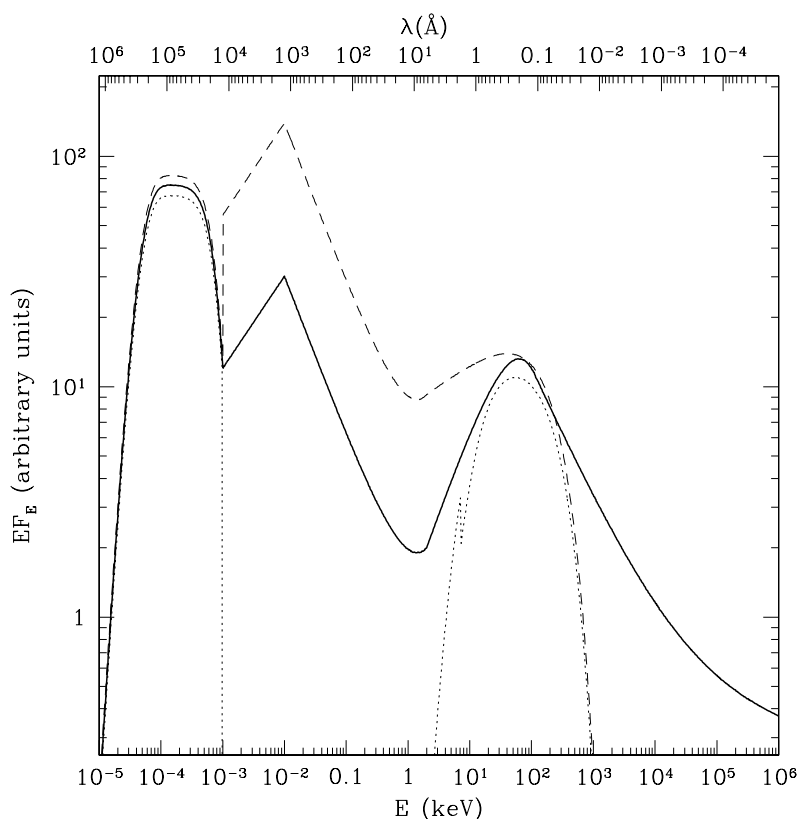


Рис. 4: *Сплошная линия:* Широкополосный спектр среднего квазара во Вселенной. *Штриховая линия:* Спектр среднего квазара первого типа. *Пунктирная линия:* Спектр среднего квазара второго типа (ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское излучение которого поглощено в ядре квазара).

В главе 4.2 вначале выполняется энергетическая оценка воздействия излучения типичного квазара на аккреционный поток в зоне гравитационного влияния черной дыры и на межзвездную среду в радиусе нескольких килопарсек. Исследуются стабильность аккреционного течения типа Бонди в условиях подогрева газа

излучением квазара и условия, необходимые для того, чтобы радиационный нагрев мог привести к высвобождению межгалактического газа из потенциальной ямы галактики. Вслед за этим обсуждается возможная роль обратного воздействия квазаров посредством излучения в установлении наблюдаемой корреляции между массами галактических сфероидов и их центральных черных дыр. Показано, что корреляция могла возникнуть в ходе эволюции уже после того, как основная часть газа эллиптической протогалактики превратилась в звезды, а именно когда массовая доля газа в центральных областях упала до $\sim 1\%$. Охлаждение газа уже не могло противодействовать нагреву в поле излучения центральной черной дыры, что привело к выбросу значительного количества остающегося газа и практически к остановке аккреции на черную дыру и звездообразования в галактике. Эти полуаналитические выкладки затем подкрепляются численными расчетами в рамках простой однозонной модели эволюции галактики, в которой учитывается возврат массы и энергии звездами и сверхновыми.

В главе 4.3 рассматривается задача о нагреве газа посредством индуцированного комптоновского рассеяния в низкочастотном поле излучения мощных внегалактических радиоисточников, измеренные значения яркостных температур которых достигают 10^{11} – 10^{12} К. Если внутри таких источников (джетов) присутствует в некотором количестве нерелятивистский ионизованный газ, он должен нагреваться в результате индуцированного комптоновского рассеяния радиоизлучения. Если при этом нагреву противодействует охлаждение за счет обратного комптоновского рассеяния того же радиоизлучения, то плазма может быть разогрета до умеренно релятивистских температур $T \sim 10^8$ – 10^9 К, но не сильнее. Получено несколько простых приближенных выражений, описывающих темп индуцированного комптоновского нагрева слабoreлятивистских электронов в изотропном поле излучения и стационарную температуру электронов.

В **пятой части** исследуются статистические свойства близких АЯГ по данным обзоров всего неба в рентгеновских и жестких рентгеновских лучах. В главе 5.1 представлен каталог из 95 АЯГ, зарегистрированных в диапазоне энергий 3–20 кэВ на галактических широтах $|b| > 10^\circ$ обсерваторией RXTE (обзор XSS). На основе этой подборки исследуются статистические свойства локальной популяции АЯГ, включая рентгеновскую функцию светимости и распределение по внутренней колонке поглощения. Сравнение полученной функции светимости на $z \approx 0$ с соответствующими функциями на больших красных смещениях (по данным глубоких рентгеновских обзоров) показывает, что сильная эволюция АЯГ продолжается по настоящее время. Найдено, что отношение поглощенных ($10^{22} < N_{\text{H}}(\text{атомов водорода}/\text{см}^2) < 10^{24}$) и непоглощенных ($N_{\text{H}} < 10^{22}$) источников составляет 2:1 среди АЯГ с малой рентгеновской светимостью ($L_{\text{X}} < 10^{43.5}$ эрг/с) и менее 1:5 в случае АЯГ с большей светимостью. В оригинальном каталоге XSS присутствует около 30 неотожествленных источников, которые вносят существенную систематическую погрешность в результаты данного статистического анализа. Часть этих источников к настоящему времени удалось отождествить; в главе представлено несколько примеров отождествления с использованием данных обсерваторий RXTE, Swift и ИНТЕГРАЛ.

В главе 5.2 описывается текущий обзор всего неба на энергиях выше 20 кэВ

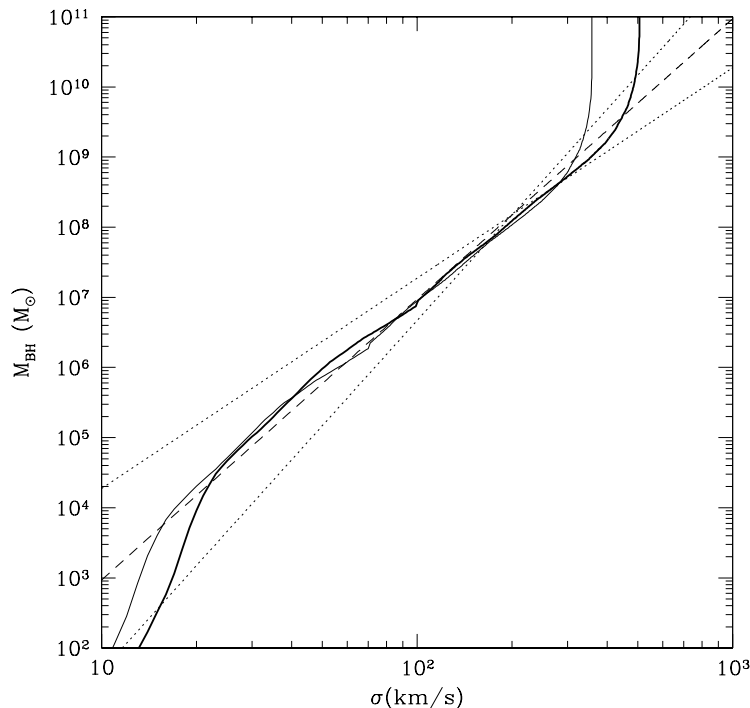


Рис. 5: Толстой сплошной линией показана теоретическая зависимость между массой центральной черной дыры (M_{BH}) и звездной дисперсией скоростей (σ) в эллиптической галактике, возникающая в результате радиационного обратного воздействия черной дыры. Штриховой линией показана реально измеренная в диапазоне от 10^6 до нескольких на $10^9 M_{\odot}$ зависимость ($M_{\text{BH}} \propto \sigma^4$), продолженная в сторону низких и высоких масс. Для сравнения пунктирными линиями показаны зависимости $M_{\text{BH}} \propto \sigma^3$ и $M_{\text{BH}} \propto \sigma^5$.

обсерватории ИНТЕГРАЛ. Представлены результаты отождествления с помощью обсерватории Chandra пяти жестких рентгеновских источников, открытых в ходе обзора, с близкими АЯГ ($z = 0.025-0.055$). Измеренные рентгеновские спектры свидетельствуют о наличии большого количества холодного газа ($N_{\text{H}} = 10^{22}-10^{24} \text{ см}^{-2}$) на луче зрения во всех пяти АЯГ. Также представлены результаты анализа жесткого рентгеновского (20–200 кэВ) спектра сейфертовской галактики первого типа GRS 1734–292, расположенной в направлении центра Галактики. Для продолжения спектра в область низких энергий используются данные обсерваторий ГРАНАТ и ASCA. Полученный широкополосный рентгеновский спектр похож на ранее опубликованные спектры других близких сейфертовских галактик и описывается степенной зависимостью без видимого завала до 100 кэВ.

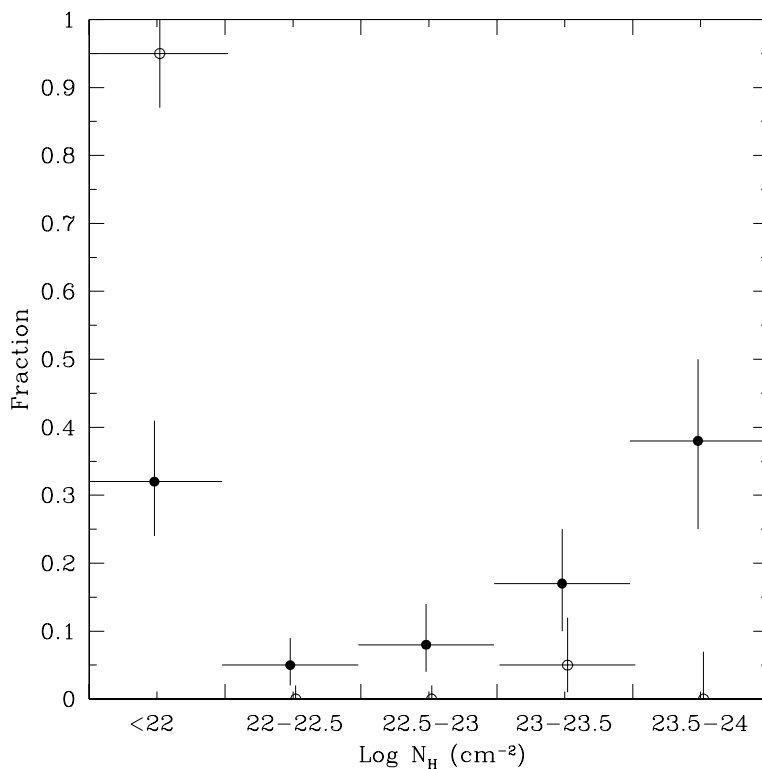


Рис. 6: Распределение по внутренней колонке поглощения АЯГ со светимостью $L_X < 10^{43.5}$ эрг/с (сплошные кружки) и $> 10^{43.5}$ эрг/с (открытые кружки). По данным обзора неба в диапазоне энергий 3–20 кэВ обсерватории RXTE.

Основные выводы и результаты диссертационной работы

Мы стоим на пороге эпохи детальных экспериментальных исследований различных тонких эффектов, возникающих при взаимодействии излучения с межгалактическим газом в скоплениях галактик, которые обещают предоставить богатый материал по космологии, крупномасштабной структуре Вселенной, свойствах межгалактического газа, эволюции галактик и массивных черных дыр в их ядрах. Одним из основных результатов диссертации является детальное моделирование нескольких таких эффектов, результаты которого можно будет использовать при планировании и анализе данных будущих микроволновых и рентгеновских наблюдений скоплений галактик.

В диссертации была также впервые раскрыта тема обратного воздействия аккреционного роста массивных черных дыр на окружающий межзвездный газ посредством комптоновского и фотоионизационного нагрева в поле излучения черной дыры. Было показано, что этот механизм мог при выполнении определенных условий привести к возникновению наблюдаемой корреляции между массами галактических

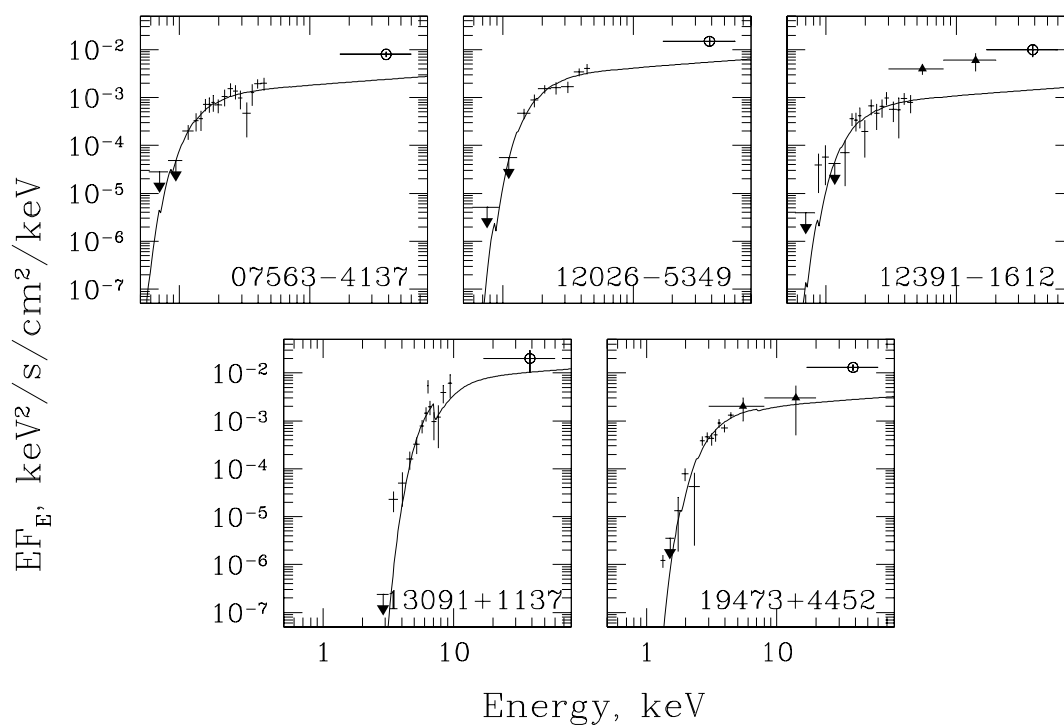


Рис. 7: Широкополосные рентгеновские спектры пяти АЯГ, открытых в ходе обзора всего неба в жестких рентгеновских лучах обсерватории ИНТЕГРАЛ и отождествленных с помощью обсерватории Chandra.

балджей и их центральных черных дыр. Накопленный к настоящему времени наблюдательный материал не позволяет судить о том, этот или какой-то другой процесс (а может быть их комбинация), играл в действительности решающую роль в совместной эволюции галактик и их центральных черных дыр. Требуются новые данные и, в частности, как можно больше статистической информации об активных ядрах галактик и квазарах. Важным шагом в этом направлении можно считать представленные в диссертации результаты исследования статистических свойств локальной популяции АЯГ по данным наиболее глубоких на сегодня обзоров всего неба в жестких рентгеновских лучах.

Более подробно, результаты диссертации, полученные при определяющем личном вкладе диссертанта, включают:

1. Получены аналитические выражения для ядра кинетического уравнения и угловой диаграммы рассеяния, возникающих при рассмотрении задачи о комптоновском рассеянии низкочастотного и рентгеновского излучения в слаборелятивистском максвелловском газе. Согласно проведенным численным расчетам, полученные формулы применимы в диапазоне энергий фотонов и температур газа примерно до 50 кэВ.

2. Получены аналитические выражения для релятивистских поправок порядка $(v/c)(kT_e/mc^2)$, $(v/c)^2$ и т.д. к эффекту Сюняева-Зельдовича (здесь v – пекулярная скорость скопления, T_e – температура межгалактического газа). Показано, что в далекой виновской области спектра микроволнового фона необходимо использовать точные результаты численных расчетов.
3. Показано, что среди различных поляризационных эффектов Сюняева-Зельдовича обычно будет доминировать сигнал, индуцированный квадрупольной компонентой микроволнового фона. Описана зависимость амплитуды этого поляризационного эффекта от положения скопления на небе. Предложена стратегия будущих измерений квадрупольной компоненты фона, состоящая в суммировании слабых сигналов от большого количества скоплений в нескольких заданных направлениях на небе.
4. Выполнены аналитические и численные оценки степени поляризации в резонансных рентгеновских линиях, формируемых в горячем газе скоплений галактик. Измерения поляризованного излучения позволяют напрямую оценить роль резонансного рассеяния в искажении профилей поверхностной яркости линейчатого рентгеновского излучения скоплений и могут помочь в определении химического состава и характерных скоростей движения межгалактического газа. Показано, что будущий рентгеновский поляриметр должен обладать спектральным разрешением ПЗС-матрицы.
5. Сделаны оценки ограничений на рентгеновскую светимость ядра центральной доминирующей галактики скопления в сравнительно недавнем прошлом (порядка миллиона лет), которые могут быть получены по наблюдениям излучения, рассеянного на окружающем межгалактическом газе. Описаны две возможные стратегии наблюдений с помощью рентгеновских телескопов следующего поколения. Одна заключается в том, чтобы искать рассеянное излучение АЯГ в рентгеновском континууме на энергиях $E \gg kT_e/(1+z)$, а другая – в использовании с той же целью ярких резонансных рентгеновских линий. Первый подход особенно перспективен при исследовании долговременной переменности далеких квазаров, а второй – в случае близких объектов, например, если мы хотим узнать об активности в недавнем прошлом галактики M87 в центре скопления Девы.
6. В предположении, что гамма-всплески происходят в плотных молекулярных облаках, показано, что кривая блеска рассеянного в облаке рентгеновского излучения гамма-всплеска, полученная в первые месяцы-годы после события, позволяет определить угол коллимации, а следовательно и полную энергию всплеска. При этом детектирование эффекта в случае ярчайших всплесков оказывается на пределе возможностей действующих рентгеновских обсерваторий Chandra и XMM им. Ньютона.
7. Открыт гамма-всплеск (GRB 031203) с вполне обычными профилем и спектром, но с аномально малой энергией. Факт обнаружения такого события на сравнительно малом расстоянии от нас ($z \approx 0.1$), вместе с аналогичным случаем

GRB 980425, позволяет говорить о том, что существует многочисленный класс слабых гамма-всплесков.

8. На основе наблюдательного материала о космическом рентгеновском фоне, суммарном излучении АЯГ в инфракрасном диапазоне, космической плотности массивных черных дыр в локальной Вселенной и спектрах отдельных квазаров построен спектр излучения “среднего” квазара. Показано, что газ в поле излучения таких объектов может быть разогрет до $kT \approx 2 \times 10^7$ К, что превышает вириальные температуры гигантских эллиптических галактик.
9. Показано, что наблюдаемая в локальной Вселенной корреляция между звездной дисперсией скоростей в галактических балджах и массой черных дыр в их ядрах могла возникнуть в результате разогрева в поле излучения центрального квазара и выброса значительной массы газа из галактик на сравнительно раннем этапе их эволюции, когда звездный балдж был уже практически полностью сформирован.
10. Решена задача о нагреве газа в поле низкочастотного излучения радиогромких квазаров до температур порядка 10^8 – 10^9 К в результате индуцированного комптоновского рассеяния. Такой разогретый тепловой газ может в принципе присутствовать в джетах АЯГ.
11. По данным обзора неба на $|b| > 10^\circ$ в диапазоне энергий 3–20 кэВ обсерватории RXTE получена подборка ярких АЯГ, на основе которой построены рентгеновская функция светимости и распределение по колонке поглощения локальной популяции АЯГ. Показано, что доля сильно поглощенных объектов быстро падает с увеличением светимости.
12. Представлены первые результаты продолжающегося обзора всего неба в жестких рентгеновских лучах обсерватории ИНТЕГРАЛ. Пять новых источников отождествлены с близкими АЯГ с помощью обсерватории Chandra. Поставлен нижний предел ~ 100 кэВ на энергию завала в спектре мощной сейфертовской галактики GRS 1734–292.

Публикации по теме диссертации

1. Сазонов С.Ю., Сюняев Р.А. “Искажения спектра реликтового излучения при взаимодействии с горячим газом движущегося скопления галактик” // 1998. Письма в *Астрономический Журнал* 24, 643
2. Sazonov S.Y., Sunyaev R.A. “Cosmic Microwave Background Radiation in the Direction of a Moving Cluster of Galaxies with Hot Gas: Relativistic Corrections” // 1998. *Astrophys. J.* 508, 1
3. Sazonov S.Y., Sunyaev R.A. “Microwave polarization in the direction of galaxy clusters induced by the CMB quadrupole anisotropy” // 1999. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 310, 765
4. Сазонов С.Ю., Сюняев Р.А. “Асимметрия комптоновского рассеяния на релятивистских электронах с изотропным распределением скоростей: астрофизические проявления” // 2000. Письма в *Астрономический Журнал* 26, 574
5. Sazonov S.Y., Sunyaev R.A. “The Profile of a Narrow Line after Single Scattering by Maxwellian Electrons: Relativistic Corrections to the Kernel of the Integral Kinetic Equation” // 2000. *Astrophys. J.* 543, 28
6. Sazonov S.Y., Sunyaev R.A. “The angular function for the Compton scattering in mildly and ultra relativistic astrophysical plasmas” // 2000. *Astron. Astrophys.* 354, L53
7. Сазонов С.Ю., Сюняев Р.А. “Нагрев газа внутри радиоисточников до слабoreлятивистских температур под действием индуцированного комптоновского рассеяния” // 2001. Письма в *Астрономический Журнал* 27, 563
8. Sazonov S.Y., Churazov E.M., Sunyaev R.A. “Polarization of resonance X-ray lines from clusters of galaxies” // 2002. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 333, 191
9. Sazonov S.Y., Sunyaev R.A., Cramphorn C.K. “Constraining the past X-ray luminosity of AGN in clusters of galaxies: The role of resonant scattering” // 2002. *Astron. Astrophys.* 393, 793
10. Churazov E., Sunyaev R., Sazonov S.Y. “Polarization of X-ray emission from the Sgr B2 cloud” // 2002. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 330, 817
11. Sazonov S.Y., Sunyaev R.A. “Observing scattered X-ray radiation from gamma-ray bursts: A way to measure their collimation angles” // 2003. *Astron. Astrophys.* 399, 505
12. Sazonov S.Y., Revnivtsev M.G., Lutovinov A.A., Sunyaev R.A., Grebenev S.A. “Broadband X-ray spectrum of GRS 1734–292, a luminous Seyfert 1 galaxy behind the Galactic Center” // 2004. *Astron. Astrophys.* 421, L21

13. Sazonov S.Y., Lutovinov A.A., Sunyaev R.A. "An apparently normal gamma-ray burst with an unusually low luminosity" // 2004. *Nature* 430, 646
14. Sazonov S.Y., Revnivtsev M.G. "Statistical properties of local active galactic nuclei inferred from the RXTE 3-20 keV all-sky survey" // 2004. *Astron. Astrophys.* 423, 469
15. Revnivtsev M., Sazonov S.Y., Jahoda K., Gilfanov M. "RXTE all-sky slew survey. Catalog of X-ray sources at $|b| > 10^\circ$ " // 2004. *Astron. Astrophys.* 418, 927
16. Sazonov S.Y., Ostriker J.P., Sunyaev R.A. "Quasars: the characteristic spectrum and the induced radiative heating" // 2004. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 347, 144
17. Cramphorn C.K., Sazonov S.Y., Sunyaev R.A. "Scattering in the vicinity of relativistic jets: A method for constraining jet parameters" // 2004. *Astron. Astrophys.* 420, 33
18. Sazonov S.Y., Ostriker J.P., Ciotti L., Sunyaev R.A. "Radiative feedback from quasars and the growth of massive black holes in stellar spheroids" // 2005. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 358, 168
19. Sazonov S.Y., Churazov E.M., Revnivtsev M.G., Vikhlinin A.A., Sunyaev R.A. "Identification of 8 INTEGRAL hard X-ray sources with Chandra" // 2005. *Astron. Astrophys.* 444, L37
20. Churazov E., Sazonov S.Y., Sunyaev R., Forman W., Jones C., Böhringer H. "Supermassive black holes in elliptical galaxies: switching from very bright to very dim" // 2005. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 363, L91
21. Sazonov S.Y., Ostriker J.P., Ciotti L., Sunyaev R.A. "Radiative feedback from quasars and the growth of supermassive black holes" // 2005. *Материалы конференции "Growing black holes: accretion in a cosmological context"*, eds. A. Merloni, S. Nayakshin, R.A. Sunyaev, ESO astrophysics symposia (Berlin: Springer), p. 386
22. Ciotti L., Ostriker J.P., Sazonov S.Y. "A physically motivated toy model for the BH-spheroid coevolution" // 2005. *Материалы конференции "Growing black holes: accretion in a cosmological context"*, eds. A. Merloni, S. Nayakshin, R.A. Sunyaev, ESO astrophysics symposia (Berlin: Springer), p. 68
23. Revnivtsev M., Sazonov S. "Statistical properties of local AGNs inferred from the RXTE 3-20 keV all-sky survey" // 2005. *Материалы конференции "Growing black holes: accretion in a cosmological context"*, eds. A. Merloni, S. Nayakshin, R.A. Sunyaev, ESO astrophysics symposia (Berlin: Springer), p. 468
24. Sunyaev R., Sazonov S. "Hard X-ray and gamma ray spectroscopy" // 2005. *Материалы конференции "High-energy spectroscopic astrophysics"*, Saas-Fee Advanced Course 30, eds. M. Güdel, R. Walter (Berlin: Springer), p. 199

25. Сазонов С.Ю., Лутовинов А.А., Р.А. Сюняев, Чуразов Е.М. “Ограничения на позднее рентгеновское излучение от маломощного гамма-всплеска третьего декабря 2003 г.: данные обсерватории ИНТЕГРАЛ”// 2006. Письма в *Астрономический Журнал* 32, 333