

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

На правах рукописи

Шахворостова Надежда Николаевна

**Искажения спектра реликтового излучения
при космологической рекомбинации водорода**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2006

Работа выполнена в Астрокосмическом центре Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор В.Г. Курт

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук А.Г. Дорошкевич
доктор физико-математических наук К.А. Постнов

Ведущая организация:

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе

Защита состоится 29 января 2007 года в 15:00 на заседании Диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

Автореферат разослан 18 декабря 2006 года

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д002.023.01

д.ф.-м.н.

Ю.А. Ковалев

Общая характеристика работы

Актуальность работы. С открытием А.Пензиасом и Р.Вилсоном реликтового излучения (РИ) в 1965 году в космологии началась новая эра. До этого момента единственным экспериментальным тестом космологии было явление расширения Вселенной, обнаруженное Э.Хабблом в 1929 году. Реликтовое излучение (или, как его называют в западной литературе, космическое микроволновое фоновое излучение – CMBR) дошло до нас со времен, когда температура Вселенной была очень высокой. Тем самым, факт его существования является прямым свидетельством в пользу горячей модели эволюции Вселенной, предложенной Г.Гамовым в 1946 году (Пензиас и Вилсон, 1965), (Дикке и др., 1965). Согласно этой модели плазма и электромагнитное излучение на ранних стадиях расширения Вселенной имели высокую плотность (10^{20} г/см³ и выше) и температуру (более 10^9 К). Поскольку излучение присутствовало во Вселенной, начиная с самых первых секунд ее жизни, то современный микроволновый фон – это целая кладовая, в которой “зашифрованы данные” о ранних стадиях эволюции Вселенной. Этим и обусловлен огромный интерес к изучению свойств РИ, стимулирующий развитие теории и эксперимента, направленных на расшифровку “генетического кода Вселенной” по образному выражению Ю.Н.Парийского. За открытие реликтового излучения А.Пензиас и Р.Вилсон получили Нобелевскую премию в 1978 году.

По данным космического аппарата COBE (COsmic Background Explorer), работавшего на орбите с 1989 по 1992 год, спектр реликтового излучения с точностью 10^{-4} соответствует чернотельному распределению Планка с температурой в современную эпоху $T_0 = 2.725 \pm 0.001$ К (Фиксен и Мэйзер, 2002). Этот факт свидетельствует о том, что в прошлом имело место полное термодинамическое равновесие между плазмой и фотонами. Теоретически было показано (Зельдович и Новиков, 1975), что это равновесие должно было соблюдаться, начиная с самых ранних этапов расширения Вселенной вплоть до температуры, соответствующей порогу рождения электрон-позитронных пар $T_{e^+e^-} \sim 2m_e c^2/k \approx 10^{10}$ К, что соответствует красному смещению $z \sim 5 \cdot 10^9$.

Космическое микроволновое фоновое излучение равномерно заполняет пространство и по плотности энергии превосходит все другие фоновые излучения. Реликтовое излучение является основной составляющей яркости неба в диапазоне от метровых до субмиллиметровых длин волн. Плотность фотонов РИ в современную эпоху составляет $n_{\text{ph}} = 411$ см⁻³, что соответствует плотности энергии 0.25 эВ/см³. Максимум функции Планка при температуре $T_0 = 2.725$ К находится на частоте $\nu_0 = 1.6 \cdot 10^{11}$ Гц.

Одним из важнейших инструментов изучения тепловой истории Вселенной является исследование спектральных искажений реликтового излучения. Эти искажения возникают в результате взаимодействия фотонов микроволнового фона с веществом на различных стадиях эволюции Вселенной. Поскольку состояние вещества с течением времени менялось, то характер формирующихся в ту или иную эпоху искажений спектра фонового излучения был разным. Сопоставление теории образования спектральных искажений с наблюдениями позволяет получать информацию о параметрах, характеризующих состояние материи на различных этапах эволюции Вселенной.

Вплоть до эпохи с красным смещением $z \sim 10^7$ возможные нарушения чернотельного характера спектра РИ должны замываться благодаря двойному комптоновскому рассеянию фотонов на свободных электронах, оставшихся после аннигиляции (Данезе и Де Зотти, 1982). Этот процесс, а также образование и поглощение фотонов при свободно-свободных переходах, происходят со скоростями, существенно превышающими скорость изменения параметров Вселенной вследствие ее расширения, и эффективно разрушают искажения, обусловленные возможным энерговыделением в эпоху с $z \gtrsim 10^7$.

Высокая степень близости спектра РИ к чернотельному распределению накладывает ограничения на возможные источники энерговыделения в ранней Вселенной при $z \lesssim 10^7$. В качестве таких источников в разных работах рассматривались распады нестабильных частиц, аннигиляция частиц, диссипация акустических волн, аккреция вещества на первичные черные дыры и др. Искажения спектра РИ, формирующиеся начиная с $z \sim 10^7$ при наличии источников энерговыделения, а также в результате других неравновесных процессов, можно разделить на несколько классов:

- 1) При $10^5 \lesssim z \lesssim 10^7$ распределение фотонов по энергиям на высоких частотах может описываться не функцией Планка, а бозе-эйнштейновским распределением, характеризуемым безразмерным химическим потенциалом $\mu > 0$ (Зельдович и Сюняев, 1970):

$$F_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{(h\nu+\mu)/kT} - 1)}.$$

В эту эпоху комптоновское рассеяние устанавливает полное кинетическое равновесие между фотонами и электронами. Такие искажения называют μ -искажениями. После обработки данных COBE была получена оценка $\mu < 9 \cdot 10^{-5}$ (Фиксен и др., 1996).

- 2) Комптоновские искажения при рассеянии фотонов на электронах при $10^3 \lesssim z \lesssim 10^5$. В эту эпоху комптоновское рассеяние не устанавливает полного кинетического равновесия между излучением и электронами, а спектр, получающийся в результате этого рассеяния характеризуется параметром y , введенным в работе (Зельдович и Сюняев, 1969):

$$y = \int \frac{k(T_e - T_\gamma)}{m_e c^2} d\tau_e,$$

где T_e , T_γ , τ_e – электронная температура, температура излучения и оптическая толщина по комптоновскому рассеянию соответственно, m_e – масса электрона, k – постоянная Больцмана. Такие искажения называют y -искажениями. После обработки данных COBE была получена оценка $|y| < 1.5 \cdot 10^{-5}$ (Фиксен и др., 1996).

- 3) Искажения спектра РИ во время космологической рекомбинации вещества (гелия и водорода) при красных смещениях $800 \lesssim z \lesssim 6000$. В процессе рекомбинации вещества выделяется энергия в виде фотонов, которые искажают наблюдаемый равновесный фон реликтового излучения. Спектр этих “сверхравновесных” фотонов, называемый рекомбинационным спектром, является предметом исследования в настоящей работе.
- 4) Искажения за счет свободно-свободных переходов в эпоху реионизации при $z \lesssim 10^3$. В эту эпоху комптоновское рассеяние уже не эффективно, так как плотность вещества невелика. Поэтому излучаемые при таких переходах фотоны не термализуются и должны исказить спектр РИ (Зельдович и Сюняев, 1969, 1980).
- 5) Тепловой эффект Сюняева-Зельдовича: комптоновские искажения спектра при рассеянии РИ на горячем межгалактическом газе и на горячем газе скоплений галактик с температурой $T_e \sim 10^7$ при $z \lesssim 10$. Этот эффект проявляет себя на угловых масштабах порядка одной минуты дуги и был зарегистрирован в ряде экспериментов (Карлстром и др., 2002).

В данной работе рассматривается третий тип искажений спектра реликтового излучения, сформировавшихся в эпоху рекомбинации водорода. По мере расширения Вселенной температура вещества и излучения уменьшается,

и примерно через 100 тысяч лет после начала расширения плазма начинает рекомбинировать. Эта эпоха является ключевой в плане формирования интересующих нас искажений РИ и начинается при красном смещении $z \sim 6000$, когда $T \sim 5 \cdot 10^4$ К. В это время начинается фаза рекомбинации HeII, которая переходит в фазу рекомбинации HeI около $z \sim 3000$, а затем, уже при $z \sim 1800$, начинает рекомбинировать водород.

К концу эпохи рекомбинации при $z \sim 1000$ температура вещества и излучения падает до $T \sim 2000 - 3000$ К, и излучение “отрывается” от вещества. Момент отделения излучения от вещества называют эпохой последнего рассеяния или эпохой просветления. С этого момента излучение распространяется в пространстве свободно, поскольку вещество становится прозрачным для излучения. Фотоны достигают наблюдателя при $z = 0$, подвергаясь по пути только красному смещению. Именно эти фотоны мы и наблюдаем как реликтовое излучение.

Фотоны, образующиеся в процессе рекомбинации плазмы, частично доживают до современной эпохи и являются “избыточными” по отношению к равновесному реликтовому фону, тем самым искажая его. Спектр таких фотонов называется космологическим рекомбинационным спектром водорода. Расчеты этого спектра производились в различных работах, начиная с 1968 года, когда впервые была построена теория космологической рекомбинации водорода (Зельдович и др., 1968; Пиблс, 1968). Обзор посвященных этой теме работ, можно найти, например, в статье (Рубино-Мартин и др., 2006).

Измерения длины волны, интенсивности и формы рекомбинационных линий позволят получить информацию о температуре плазмы, о барионной плотности вещества, о красном смещении, соответствующем эпохе рекомбинации, и о продолжительности этой эпохи. С точки зрения эксперимента, основная трудность состоит в том, что рекомбинационный спектр является очень слабым по сравнению с основным тепловым фоном. Это является прямым следствием того, что отношение числа фотонов равновесного реликтового излучения к числу рекомбинирующих атомов велико: $n_\gamma/n_B \sim 10^9$. Однако возможности наблюдательной техники в настоящее время растут, так что задача является актуальной. Обнаружение рекомбинационных искажений РИ станет, во-первых, еще одним свидетельством существования фазы рекомбинации вещества в ранней Вселенной. И, во-вторых, будет получен еще один независимый метод оценки барионной плотности во Вселенной, поскольку космологический рекомбинационный спектр водорода напрямую зависит от этой величины.

Здесь уместно упомянуть о других способах оценки барионной плотности вещества, которые уже ранее использовались. Самый очевидный способ состоит в анализе содержания барионов в различных объектах и структурах во Вселенной: звездах, звездных остатках, планетах, газовых и пылевых облаках, межгалактической среде. Однако точность этого метода невелика в силу того, что трудно оценить количество тех или иных объектов, например, звездных остатков, слабых звезд и коричневых карликов. Анализ содержания барионов этим способом изложен в работе (Фукужита и др., 1998).

Другой способ оценки доли барионов заключается в анализе пространственного спектра анизотропии реликтового излучения $C(l)$. Так как вид этого спектра, положение пиков и их величина определяются, в частности, возмущениями плотности и скорости вещества в эпоху рекомбинации водорода, то по спектру анизотропии можно судить о содержании барионов во Вселенной (Ху и Сугияма, 1995). В то же время, этот пространственный спектр очень сильно зависит и от других космологических параметров: плотности темной материи Ω_D , определяющей скорость расширения Вселенной, космологической постоянной Ω_Λ и др. Таким образом, для хорошего отождествления Ω_B по спектру анизотропии РИ необходимо решать сложную многопараметрическую задачу.

Что касается измерения Ω_B по наблюдению космологического рекомбинационного спектра водорода, то в данном случае наблюдаемые интенсивности рекомбинационных линий напрямую зависят от содержания барионов, поскольку фактически количество излученных в процессе рекомбинации плазмы фотонов пропорционально количеству протонов, образующих водород. При этом конечный спектр слабо зависит от других космологических параметров. Если отношение доли гелия к доле водорода во Вселенной известно, то из наблюдений космологического рекомбинационного спектра водорода можно определить полное содержание барионов Ω_B .

Таким образом, исследование спектральных искажений реликтового излучения, формирующихся в эпоху рекомбинации, является очень хорошим инструментом для определения различных космологических параметров Вселенной.

Цели и задачи диссертационной работы:

- 1) Вычисление космологического рекомбинационного спектра водорода с учетом зависимости населенностей состояний атома водорода от углового квантового числа l . Расчет интенсивностей и профилей линий, оценка искажений за счет бальмеровского, пашеновского и двухфотонного континуумов водорода.

- 2) Исследование зависимости космологического рекомбинационного спектра водорода от космологических параметров. Оценка точности измерения интенсивности реликтового излучения, необходимой для определения барионной плотности Ω_B по космологическому рекомбинационному спектру водорода.
- 3) Вычисление кинетики рекомбинации водорода (зависимости степени ионизации плазмы от красного смещения).
- 4) Вычисление скоростей элементарных процессов в плазме с учетом углового квантового числа l . Реализация точного и асимптотических алгоритмов и их сравнение.
- 5) Исследование влияния ударных переходов между подуровнями тонкой структуры атома водорода $2s \leftrightarrow 2p$ на населенности состояний атома водорода, на скорость рекомбинации и на космологический рекомбинационный спектр водорода.

Личный вклад автора в совместные работы. Работы [1] и [2] из списка публикаций по теме диссертации были выполнены в соавторстве. В работе [1] автором были получены аналитические выражения для интенсивностей космологических рекомбинационных линий водорода, возникающих в процессе рекомбинации плазмы в ранней Вселенной. Автором были выполнены все численные расчеты и получен результирующий космологический рекомбинационный спектр.

В работе [2] автору принадлежит создание программы, реализующей численные расчеты скорости ударных переходов между подуровнями тонкой структуры атома водорода $2s$ и $2p$. Автор также произвел численные оценки влияния ударных переходов на населенности состояний атома водорода, на кинетику рекомбинации и космологический рекомбинационный спектр водорода. Кроме того, автор участвовал в интерпретации полученных результатов.

Научная новизна работы. Все основные результаты диссертации, выносимые на защиту, являются новыми и получены впервые. Они отражают решения поставленных задач, приведенных выше, и суммированы в разделе “Заключение” настоящей диссертации.

Научная и практическая ценность работы. Проведенные теоретические расчеты космологического рекомбинационного спектра водорода могут быть использованы при планировании наблюдений фонового излучения с целью обнаружения космологического рекомбинационного спектра водорода, а в бу-

дущем – для интерпретации наблюдаемых искажений спектра реликтового излучения в области длин волн $\lambda \approx 0.3 \div 3$ мм и определении таких параметров, как продолжительность эпохи рекомбинации водорода и диапазон соответствующих ей красных смещений, температура и плотность плазмы в эту эпоху. Кроме того, сопоставление проведенных расчетов с наблюдениями позволит определить очень важный космологический параметр – долю барионов во Вселенной Ω_B . В данной работе оценена точность измерения интенсивности реликтового излучения, необходимая для определения Ω_B по космологическому рекомбинационному спектру водорода. Кроме того, определен диапазон длин волн, в котором наблюдения космологического рекомбинационного спектра водорода с целью измерения Ω_B являются наиболее перспективными.

Для того, чтобы как можно точнее определять космологические параметры, в том числе Ω_B , из наблюдений космологического рекомбинационного спектра водорода, необходима достаточно точная теория этого спектра, включающая учет максимально возможного числа влияющих на него эффектов.

В настоящей работе проведено исследование одного из таких эффектов, связанного с ударными переходами между подуровнями тонкой структуры атома водорода $2s$ и $2p$. Было показано, что эти ударные переходы не приводят к равновесной заселенности указанных подуровней, что влияет на соотношение между скоростями переходов $2p \rightarrow 1s$ и $2s \rightarrow 1s$, приводящих к необратимой рекомбинации атомов водорода в основное состояние. Также было найдено, что рассматриваемые ударные переходы практически не влияют на скорость рекомбинации водорода и на интенсивность рекомбинационной линии $H\alpha$. Все эти выводы пополняют детальную картину рекомбинации водорода.

Программные процедуры, реализующие расчет скоростей радиационных процессов в плазме с учетом углового квантового числа l , включены в библиотеку по расчету космологического рекомбинационного спектра водорода SPDCBR (Бургин, 2003с), находящуюся в свободном доступе. Эти процедуры могут быть использованы не только в рассматриваемой задаче, но и в других астрофизических задачах, имеющих дело с элементарными процессами в плазме.

Программные коды, реализующие вычисления космологического рекомбинационного спектра водорода и кинетики рекомбинации водорода, снабжены необходимыми комментариями и интерфейсом и могут быть использованы в дальнейших исследованиях в рамках рассматриваемой задачи.

Апробация результатов. Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, достаточно обоснованы в диссертации и положенных в ее основу публикациях. Результаты обсуждались на следующих семинарах и конференциях:

- 1) Отчетные сессии Астрокосмического центра ФИАН в 2004, 2005, 2006 годах.
- 2) Конференция “Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики”, Москва, 2006 год.
- 3) Семинар отдела теоретической астрофизики Физико-Технического института им. Иоффе, Санкт-Петербург.
- 4) 33-я и 35-я Международная студенческая конференция “Физика Космоса”, Екатеринбург, 2004 и 2006 годы.
- 5) Конференция “Астрономия 2006: традиции, настоящее и будущее”, Санкт-Петербург, 2006 год.
- 6) Астрофизический семинар Астрокосмического центра ФИАН, Москва.
- 7) International WE Heraeus Summerschool: “Physics with Cosmic Accelerators”, Bad Honnef, Germany, 2004.

Основные результаты, выносимые на защиту

- 1) Вычислен космологический рекомбинационный спектр водорода с учетом зависимости населенностей уровней атома водорода от орбитального квантового числа l . Показано, что учет зависимости от l существенно изменяет величину и форму искажений спектра реликтового излучения по сравнению с результатами, полученными в предположении равновесного распределения по подуровням тонкой структуры.
- 2) Изучено влияние ударных переходов $2s \leftrightarrow 2p$ на населенности состояний $2s$ и $2p$ в эпоху космологической рекомбинации водорода. Показано, что ударные переходы $2s \leftrightarrow 2p$ не приводят к равновесному распределению по подуровням с разным значением орбитального квантового числа l . Показано, что опубликованное ранее (Ху и др., 1995) утверждение о полной термализации распределения атомов водорода в состоянии $n = 2$ по подуровням тонкой структуры неверно.
- 3) Изучено влияние ударных переходов $2s \leftrightarrow 2p$ на интенсивность рекомбинационной линии $H\alpha$. Показано, что относительное изменение интенсивности космологической линии $H\alpha$ вследствие ударных переходов не превышает 10^{-3} .

Содержание работы

Работа состоит из Введения, трех глав и Заключения. Объем работы составляет 116 страниц, в том числе 27 рисунков и 5 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 86 наименований.

Во **Введении** представлен краткий обзор спектральных свойств реликтового излучения, перечислены основные типы спектральных искажений реликтового излучения с краткими характеристиками. Более подробно рассмотрены рекомбинационные искажения, связанные с взаимодействием фонового излучения с веществом в эпоху рекомбинации плазмы. Описана актуальность исследований рекомбинационных искажений с точки зрения определения ряда космологических параметров из наблюдений этих искажений. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы, раскрыта ее новизна, научная и практическая ценность, личный вклад автора, апробация работы, публикации по теме диссертации, ее структура и объем.

В **Главе 1** рассмотрена рекомбинация вещества в ранней Вселенной (п. 1.1). Наиболее подробно анализируется механизм рекомбинации водорода (§1.1.3). Основными процессами, определяющими скорость изменения степени ионизации водородной плазмы с течением времени, являются двухфотонный распад состояния $2s$ атома водорода и выход $L\alpha$ -квантов из профиля линии в результате доплеровской диффузии и красного смещения. Поскольку скорости упомянутых процессов меньше характерной скорости изменения параметров плазмы, имеет место затягивание рекомбинации водорода по сравнению с равновесным законом Саха.

Сделан обзор работ, в которых вычислялась кинетика рекомбинации, проведено сравнение методов, использовавшихся в этих работах, и полученных результатов (п. 1.2). Впервые расчеты кинетики провели Зельдович и др. (1968) и Пиблс (1968), которые решали некоторые приближенные уравнения рекомбинации, после чего в ряде работ различных авторов производились разнообразные уточнения этих приближенных уравнений. Переход к решению системы статистического равновесия населенностей 60 уровней атома водорода был сделан Грачевым и Дубровичем (1991), а в 2005 году эти же авторы проделали аналогичные расчеты и для рекомбинации гелия HeI (Дубрович и Грачев, 2005). Наиболее полные расчеты на сегодняшний момент осуществили Сигер и др. (1999, 2000). Авторы решали систему дифференциальных уравнений, описывающих эволюцию распределения атомов водорода и гелия по уровням энергии. Было учтено 300 уровней водорода, 200 уровней HeI, 100 уровней HeII. Кроме того, Сигер и др. (1999, 2000) написали про-

граммный код RECFAST, воспроизводящий кинетику рекомбинации на базе упрощенной трехуровневой модели атома водорода. Соответствие с полными расчетами тех же авторов достигалось за счет введения в уравнение для степени ионизации плазмы некоторого подгоночного параметра.

В п. 1.3 предложен метод вычисления кинетики рекомбинации водорода, основанный на квазистационарном приближении (Бернштейн и др., 1977), и проведено сравнение полученных результатов с кодом RECFAST. Суть квазистационарного метода состоит в том, что вместо системы дифференциальных уравнений решается система уравнений баланса населенностей дискретных уровней с главным квантовым числом $n \geq 2$. Действительно, релаксация распределения атомов, находящихся в возбужденном состоянии, происходит за характерное время порядка времени разрешенных переходов между этими уровнями – $t_{\text{rel}} \sim 10^{-8}$ сек. В то же время, характерное время изменения скоростей процессов, связывающих рассматриваемый ансамбль атомов с основным состоянием атома и континуумом, составляет порядка характерного времени расширения Вселенной $t_{\text{exp}} \sim 10^5$ лет. Поэтому отношение $t_{\text{rel}}/t_{\text{exp}}$ оказывается настолько малым, что можно считать распределение атомов по уровням с $n \geq 2$ стационарным.

Предложенный метод описан в §1.3.1, а его главным отличием является то, что вычисляются не населенности уровней, а их небольшие отличия от равновесных значений по отношению к континууму, что позволило минимизировать вычислительные погрешности. Метод расчета этих отклонений предложен в работе (Бургин, 2003а). Такой подход позволяет избежать численных ошибок и, тем самым, дает возможность использовать упомянутый метод вычисления кинетики в задаче расчета космологического рекомбинационного спектра водорода, крайне чувствительного к тонким эффектам. Подобный метод также использовался в работе (Холупенко и др., 2005) при расчетах искажений спектра реликтового излучения.

Чувствительность спектра к тонкостям численных расчетов проявила себя при использовании пакета RECFAST в рассматриваемой задаче. В задаче о формировании конечного рекомбинационного спектра решающую роль играют малые отклонения населенностей уровней атомов от равновесных. В самом деле, при полном равновесии все переходы между состояниями в атоме компенсируют друг друга, и избыточные фотоны не образуются. В коде RECFAST в самом начале рекомбинации кинетика вычисляется по формуле Саха, а при $z \approx 1550$ производится сшивка решения по Саха и решения модифицированного дифференциального уравнения для изменения степени ионизации. В результате отклонения населенностей от равновесных до момента $z \approx 1550$

равны нулю (рекомбинация идет по закону Саха), а после прохождения этой точки резко становятся ненулевыми. В результате в рекомбинационном спектре появляются детали, не имеющие никакого отношения к реальности, т.е. имеющие чисто вычислительную природу.

С точки зрения кинетики рекомбинации и расчетов анизотропии реликтового излучения этот скачок не играет никакой роли, поскольку в упомянутых задачах важны абсолютные населенности состояний атомов, так что RECFAST вполне успешно решает эти задачи. Однако при вычислении космологического рекомбинационного спектра водорода возникла необходимость создания собственного кода по расчету кинетики рекомбинации, который не содержал бы подобных особенностей. В §1.3.2 приводятся результаты численных расчетов и проводится их сравнение с кодом RECFAST.

В п. 1.4 рассмотрены методы расчета скоростей радиационных процессов в плазме с учетом зависимости населенностей состояний атома от орбитального квантового числа l , проведено сравнение результатов, полученных разными методами. В п. 1.5 суммируются основные результаты Главы 1.

В Главе 2 рассмотрены искажения спектра реликтового излучения, образующиеся в эпоху рекомбинации водорода. В п. 2.1 проводится аналогия между рассматриваемой задачей о формировании космологического рекомбинационного спектра водорода и задачей об образовании спектра газовых туманностей. Проведено сравнение физических условий в космологической плазме и в газовых туманностях, делается акцент на принципиальные отличия, не позволяющие в полной мере применить теорию спектров газовых туманностей к рассматриваемой в диссертации задаче. В п. 2.2 анализируются искажения в коротковолновой части спектра реликтового излучения за счет излучения в линии $L\alpha$ (§2.2.1) и двухфотонного излучения при распаде состояния $2s$ (§2.2.2). Сделан обзор работ (§2.2.3), в которых вычислялись интенсивность и форма этих искажений, проведено сравнение результатов. При этом внимание акцентировалось на методах расчета и физических предположениях, используемых в различных работах.

В результате многократных актов поглощения и излучения в расширяющейся Вселенной фотоны $L\alpha$ смещаются в область более низких частот и в конечном итоге выходят из крыла линии (§2.2.1). Тем самым эти фотоны уже не могут возбудить нейтральный атом водорода из основного состояния на уровень $n = 2$, процесс “убегания” $L\alpha$ -квантов становится одним из механизмов рекомбинации водорода, а смещенные фотоны являются одним из источников искажений спектра РИ. Так как длина волны $L\alpha$ равна примерно $\lambda_0 \approx 0.12$ мк, а пик скорости выхода $L\alpha$ -квантов из профиля линии соответ-

ствуется красному смещению $z \approx 1400$ (Сигер и др., 2000), то в современную эпоху пик линии $L\alpha$ расположен на длине волны $\lambda = \lambda_0 \cdot 1400 = 170$ мк. Впервые $L\alpha$ -искажения были вычислены в работах Зельдовича и др. (1968) и Пиблса (1968).

Кроме излучения в линии $L\alpha$, равновесный фон реликтового излучения также искажается за счет двухфотонного излучения при распаде состояния $2s$ (§2.2.2). При переходе $2s \rightarrow 1s$ излучаются два фотона с частотами ν и ν' такими, что $\nu + \nu' = \nu_{L\alpha}$. Поскольку скорость двухфотонного поглощения $1s \rightarrow 2s$ в эпоху рекомбинации водорода намного меньше скорости двухфотонного излучения $2s \rightarrow 1s$, большая часть фотонов остается нескомпенсированной и образует искажения реликтового фона. Расчет 2γ -искажений выполнялся в работах (Бошан и Билтзингер, 1998; Вон и др., 2006; Рубино-Мартин и др., 2006).

Основной трудностью в будущих наблюдениях искажений в коротковолновой области будет являться проблема вычитания космического инфракрасного фона из полного сигнала. ИК-фон наиболее интенсивен как раз в диапазоне длин волн, куда попадают рассмотренные выше искажения реликтового излучения.

В п. 2.3 подробно рассмотрены спектральные искажения реликтового излучения за счет излучения избыточных фотонов в субординатных линиях водорода (Дубрович, 1975). В §2.3.1 описана схема формирования избыточных фотонов при переходах между уровнями атома водорода. В §2.3.2 раскрывается физический смысл величин, используемых при расчетах искажений из-за излучения в субординатных линиях водорода.

Для характеристики эффективности образования избыточных фотонов в линии $i \rightarrow j$ удобно использовать величину, впервые введенную в работе (Бернштейн и др., 1977) и называемую КПД (коэффициентом полезного действия) или эффективностью соответствующего перехода: $\eta_{ij} = Z_{ij}/Z_{21}$, где Z_{ij} – скорость нескомпенсированных переходов с уровня i на уровень j , которая обычно выражается в единицах $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$, а Z_{21} – соответственно скорость нескомпенсированных переходов со второго на первый уровень. Физический смысл этой величины заключается в следующем: η_{ij} – это среднее число фотонов, излучаемых при переходе $i \rightarrow j$ в расчете на один акт нескомпенсированной рекомбинации в основное состояние.

В §2.3.3 рассмотрены искажения в длинноволновой части спектра реликтового излучения в метровом и дециметровом диапазонах (Дубрович и Столяров, 1995; Дубрович и Грачев, 2004; Холупенко и др., 2005). Основное преимущество этого диапазона с точки зрения наблюдений состоит в отсут-

ствии фонового ИК-излучения. Кроме того, эти искажения относятся к рэлей-джинсовской области спектра реликтового излучения, и относительное изменение температуры равновесного фона может достигать $\Delta T/T \sim 10^{-7} \div 10^{-4}$.

В п. 2.4 произведен расчет рекомбинационных искажений с учетом тонкой структуры атома водорода. В §2.4.1 приведены качественные аргументы и численные результаты в пользу утверждения о том, что учет расщепления уровней атома водорода на подуровни по орбитальному квантовому числу l существенно влияет на конечный рекомбинационный спектр. Оказывается, что при детальном рассмотрении динамики переходов с учетом l в результате нескомпенсированных переходов в основное состояние атома водорода фотоны различных частот будут не только излучаться, но и поглощаться из равновесного фонового излучения. Другими словами, на определенных частотах интенсивность реликтового излучения будет несколько меньше, чем равновесная интенсивность, в то время как на других частотах появятся уярчения фона. Кроме того, учет тонкой структуры изменяет величины η_{ij} по модулю, причем для основных линий ($H\alpha$, $P\alpha$, $H\beta$) эффективность соответствующих переходов существенно возрастает.

В §2.4.2 предложен метод расчета искажений спектра реликтового излучения, основанный на использовании понятия эффективности радиационных переходов в атоме водорода с учетом l . Выражение для скорости нескомпенсированных переходов между различными уровнями интегрировалось по всей эпохе рекомбинации. В результате было получено аналитическое выражение для монохроматической плотности избыточных фотонов $N_\nu(\nu)$ в современную эпоху и для изменения интенсивности реликтового излучения, обусловленного этими фотонами:

$$\frac{\Delta I_\nu}{B_\nu} = \frac{ch\nu N_\nu}{4\pi B_\nu}.$$

В §2.4.3 подробно описаны численные расчеты космологического рекомбинационного спектра, сделанные в данной работе. Описаны и обоснованы введенные аппроксимации для двухфотонного, бальмеровского и пашеновского континуумов (§§2.4.3.1 – 2.4.3.3). В §2.4.4 приведены результаты численных расчетов. На рисунке 1 изображен результирующий космологический рекомбинационный спектр водорода для плоской Λ CDM-модели, параметры которой указаны на рисунке. Показан вклад отдельных линий и континуумов. Видно, что линия $H\beta$ находится в поглощении, и этот факт является принципиально новым по сравнению с предыдущими работами.

Таким образом, показано, что при рассмотрении процесса рекомбинации водорода с учетом углового квантового числа l интенсивность и форма ре-

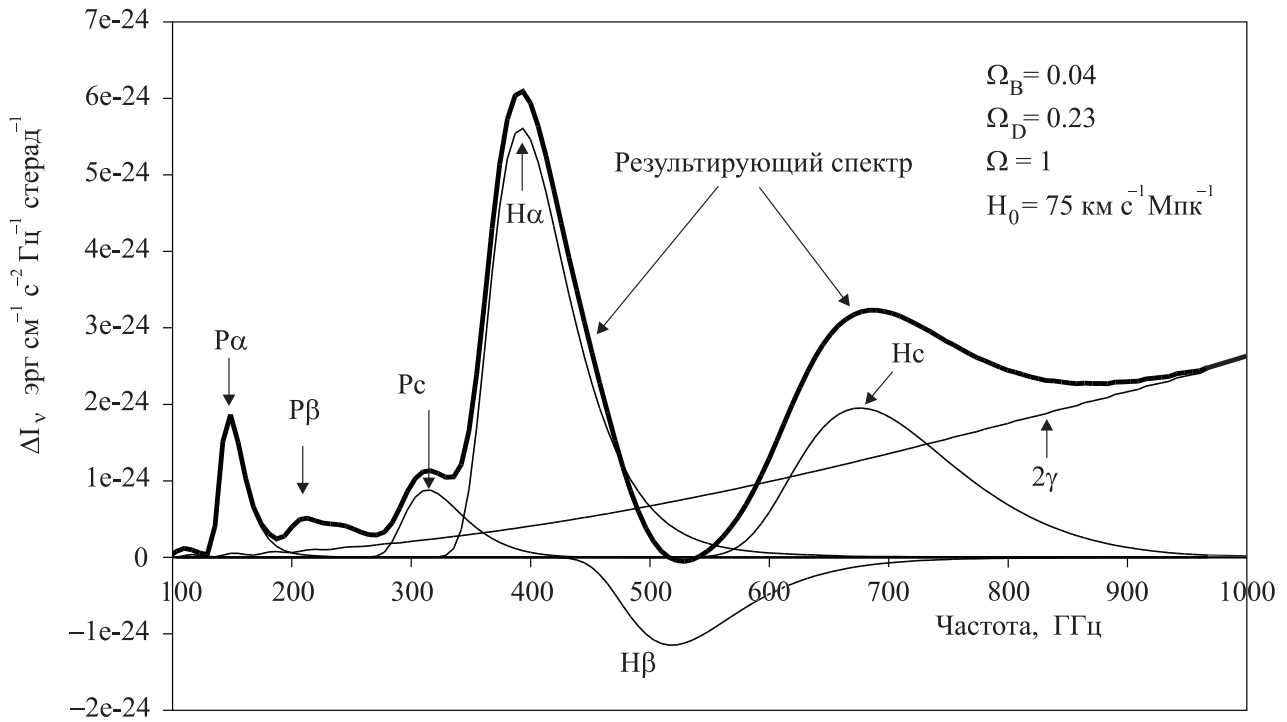


Рис. 1: Результирующий космологический рекомбинационный спектр водорода. Показан вклад отдельных линий и континуумов. Космологические параметры Λ CDM-модели, в рамках которой был вычислен спектр, указаны на рисунке.

комбинационных линий изменяется существенным образом по сравнению с расчетами без учета l . Полученные результаты сравниваются с результатами последних работ (Рубино-Мартин и др., 2006) по данной теме в §2.4.4.

Оценена интенсивность космологических рекомбинационных линий водорода. Из рисунка 1 видно, что наиболее интенсивной линией является $H\alpha$, $I(H\alpha) \approx 6 \times 10^{-24}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{Гц}^{-1} \text{стерад}^{-1}$.

Также в §2.4.4 исследована зависимость космологического рекомбинационного спектра водорода от космологических параметров, в частности от доли барионов Ω_B . Показано, что наиболее отчетливо зависимость от Ω_B проявляется в диапазонах длин волн $0.6 \lesssim \lambda \lesssim 0.8$ мм, $1.5 \lesssim \lambda \lesssim 2$ мм. Отсюда можно сделать вывод, что будущие наблюдения космологического рекомбинационного спектра водорода целесообразно проводить именно в этих диапазонах длин волн.

В п. 2.5 суммируются основные результаты Главы 2.

В Главе 3 рассмотрено приближение l -равновесия и применимость этого приближения к различным задачам, касающимся эпохи рекомбинации водо-

рода (п. 3.1). В этом приближении зависимость населенностей возбужденных состояний от углового квантового числа l соответствует равновесному распределению, т. е. при фиксированном главном квантовом числе $n > 1$ населенность $N(n, l) \propto 2l + 1$.

Близость зависимости населенности от l к равновесной является прямым следствием того, что связанные состояния с $n > 1$ в эпоху рекомбинации близки к равновесию относительно континуума. Качественно это объясняется тем, что процессы, приводящие к установлению равновесия для состояний с $n > 1$ (переходы между возбужденными состояниями, фотоионизация и фоторекомбинация), происходят с гораздо большей скоростью, чем некомпенсированные переходы в основное состояние, которые являются основной причиной того, что точное равновесие между возбужденными связанными состояниями и континуумом не устанавливается.

Однако, как указано в (Грачев и Дубрович, 1991; Бурдюжа и Чекмезов, 1994), населенности подуровней уровня $n = 2$ не находятся в равновесии друг с другом. А правила отбора по l для разрешенных переходов приводят к тому, что и при $n > 2$ распределение отличается от l -равновесного. Таким образом, возможность считать распределение по l равновесным не является очевидной и требует обоснования.

При расчетах интенсивностей субординатных линий в космологическом рекомбинационном спектре отличия населенностей от равновесных имеют определяющее значение. Вариации данных величин могут привести даже к смене знака эффекта, так что в этой задаче изменение величины даже слабых отклонений от равновесия с континуумом может оказать существенное влияние на конечный результат.

В работе (Ху и др., 1995) утверждается, что ударные переходы между подуровнями уровня $n = 2$ приводят к термализации распределения по l . Очевидно, что если скорость ударных переходов достаточно велика, то распределение по l может быть очень близким к равновесному.

Таким образом, в Главе 3 проведен количественный анализ влияния столкновительных переходов между состояниями $2s$ и $2p$ водорода в космологической плазме на населенности этих состояний и, как следствие, на скорости некомпенсированных переходов в субординатных линиях и вызываемые этими переходами искажения спектра реликтового излучения.

В п. 3.2 описана модель атома, в рамках которой производились расчеты, а также основные физические предположения и уравнения. В §3.2.3 вычислена скорость ударных переходов между подуровнями тонкой структуры $2s$ и $2p$. В п. 3.3 даны аналитические выражения, характеризующие влияние рассмат-

риваемых переходов на населенности подуровней 2s и 2p и эффективность переходов η_{ij} . В п. 3.4 даны результаты численных расчетов. В п. 3.5 суммируются полученные результаты. Показано, что столкновительные переходы между подуровнями 2s и 2p не приводят к равновесному соотношению между населенностями указанных подуровней и практически не влияют на интенсивности рекомбинационных линий и на скорость рекомбинации водорода.

Основные результаты Главы 1 опубликованы в работе [3], Главы 2 — в работе [1], Главы 3 — в работе [2] из списка публикаций по теме диссертации, приведенного ниже.

В **Заключении** обсуждаются результаты и суммируются основные положения, выносимые на защиту диссертации.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- 1) Дубрович В.К., **Шахворостова Н.Н.**, “Абсорбционные линии водорода в спектре реликтового излучения”, Письма в *Астрономический журнал*, 2004, т. 30, № 8, с. 563.
- 2) Бургин М.С., Кауц В.Л., **Шахворостова Н.Н.**, “О влиянии ударных переходов на космологический рекомбинационный спектр водорода”, Письма в *Астрономический журнал*, 2006, т. 32, № 8, с. 1.
- 3) **Шахворостова Н.Н.**, “О кинетике космологической рекомбинации водорода”, Труды 35-й Международной студенческой научной конференции “Физика Космоса”, Екатеринбург, 2006, с. 280.

Список литературы

- Бернштейн И.Н., Бернштейн Д.Н., Дубрович В.К. // *Астрон. журн.*, **54**, 727 (1977).
- Бошан и Билтзингер (Boschan P., Biltzinger P.) // *Astron. Astrophys.*, **336**, 1 (1998).
- Бургин М.С. // *Астрон. журн.*, **80**, 771 (2003a).
- Бургин М.С. // Частное сообщение (2003b).
- Бургин М.С. // Библиотека по расчету космологического рекомбинационного спектра водорода SPDCBR, <http://tanatos.asc.rssi.ru/RUNC/SPDCBR> (2003c).
- Бурдюжа В.В., Чекмезов А.Н. // *Астрон. журн.*, **71**, 341 (1994).
- Вон и др. (Wong W.Y., Seager S., Scott D.) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **367**, 1666 (2006).
- Грачев С.И., Дубрович В.К. // *Астрофизика*, **34**, 249 (1991).
- Данезе и Де Зотти (Danese L., De Zotti G.F.) // *Astron. Astrophys.*, **107**, 39 (1982).
- Дикке и др. (Dicke R.H., Peebles P.J.E., Roll P.G., Wilkinson D.T.) // *Astrophys. J.*, **142**, 414 (1965).
- Дубрович В.К. // *Письма в Астрон. журн.*, **1**, N 10, 3 (1975).
- Дубрович В.К., Столяров В.А. (Dubrovich V.K., Stolyarov V.A.) // *Astron. Astrophys.*, **302**, 635 (1995).
- Дубрович В.К., Грачев С.И. // *Письма в Астрон. журн.*, **30**, 723 (2004).
- Дубрович В.К., Грачев С.И. // *Письма в Астрон. журн.*, **31**, 403 (2005).
- Зельдович Я.Б., Курт В.Г., Сюняев Р.А. // *ЖЭТФ*, **55**, 278 (1968).
- Зельдович и Сюняев (Zeldovich Ya.B., Sunyaev R.A.) // *Astrophys. and Space Sci.*, **4**, 285 (1969).
- Зельдович и Сюняев (Zeldovich Ya.B., Sunyaev R.A.) // *Astrophys. and Space Sci.*, **7**, 20 (1970).
- Зельдович Я.Б., Сюняев Р.А. // *Письма в Астрон. журн.*, **6**, 545 (1980).
- Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. // *Строение и эволюция Вселенной*, М.: Наука (1975).
- Карлстром и др. (Carlstrom J.E., Holder G.P., Reese E.D.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **40**, 643 (2002).

- Насельский П.Д., Новиков Д.И., Новиков И.Д. // *Реликтовое излучение Вселенной* (М.: Наука, 2003).
- Пензиас и Вилсон (Penzias A.A., Wilson R.W.) // *Astrophys. J.*, **142**, 419 (1965).
- Пиблс (Peebles P.J.E.) // *Astrophys. J.*, **153**, 1 (1968).
- Рубино-Мартин и др. (Rubino-Martin J.A., Chluba J., Sunyaev R.A.) // *astro-ph/0607373* (2006).
- Сигер и др. (Seager S., Sasselov D.D., Scott D.) // *Astrophys. J.*, **523**, L1 (1999).
- Сигер и др. (Seager S., Sasselov D.D., Scott D.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **128**, 407 (2000).
- Фиксен и др. (Fixsen D.J., Cheng E.S., Gales J.M., Mather J.C., Shafer R.A., Wright E.L.) // *Astrophys. J.*, **473**, 576 (1996).
- Фиксен и Мэйзер (Fixsen D.J., Mather J.C.) // *Astrophys. J.*, **581**, 817 (2002).
- Фукужита и др. (Fukugita M., Hogan C.J., Peebles P.J.E.) // *Astrophys. J.*, **503**, 518 (1998).
- Ху и др. (Hu W., Scott D., Sugiyama N., White M.) // *Phys. Rev. D*, **52**, 5498 (1995).
- Ху и Сугияма (Hu W., Sugiyama N.) // *Astrophys. J.*, **444**, 489 (1995).
- Холупенко и др. (Kholupenko E.E., Ivanchik A.V., Varshalovich D.A.) // *Gravitation and Cosmology*, **11**, 161 (2005).
- Члуба и Сюняев (Chluba J., Sunyaev R.A.) // *Astron. Astrophys.*, **446**, 39 (2006).
- Члуба и Сюняев (Chluba J., Sunyaev R.A.) // *astro-ph/0608120* (2006a).
- Члуба и др. (Chluba J., Rubino-Martin J.A., Sunyaev R.A.) // *astro-ph/0608242* (2006).