

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. ИОФФЕ

На правах рукописи

БАЛАШЕВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**Межзвёздные облака молекулярного водорода
на ранних стадиях эволюции Вселенной**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

Санкт-Петербург
2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН.

Научный руководитель кандидат физико-математических наук,
доцент Иванчик А.В.

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
профессор Гнедин Ю.Н.
(Главная астрономическая
обсерватория РАН)
доктор физико-математических наук,
профессор Панчук В.Е.
(Специальная астрофизическая
обсерватория РАН)

Ведущая организация Государственный астрономический
институт им. Штернберга, МГУ, Москва

Защита состоится «2» июня 2011 г. в 15³⁰ на заседании диссертационно-
го совета Д 002.205.03 при Учреждении Российской академии наук Физико-
техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН
по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской
академии наук Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан «29» апреля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук  Красильщиков А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Диссертационная работа посвящена исследованию межзвёздных облаков молекулярного водорода, находящихся на космологических расстояниях, соответствующих красным смещениям $z \sim 2 - 3$. Эти облака существовали 10–12 млрд. лет назад в галактиках и протогалактиках, формировавшихся на ранних стадиях эволюции Вселенной [1]. Они исследуются посредством анализа абсорбционных систем, идентифицируемых в спектрах квазаров [2]. Детектирование таких систем стало возможным только пару десятилетий назад, с введением в строй оптических телескопов нового поколения (VLT, Keck, HST).

Наблюдения и анализ таких систем позволяют изучать эволюцию химического состава вещества в межзвёздных облаках молекулярного водорода – обогащение межзвёздной среды тяжёлыми элементами и пылью [2, 3]. Измерения относительной населённости вращательных уровней H_2 и HD, а также ионизационной структуры облаков, позволяют определять характерные физические условия в таких системах – кинетическую температуру, плотность частиц газа, степень ионизации, интенсивность фона ультрафиолетового излучения, турбулентность, давление и др.

Абсорбционные линии молекулярного водорода находятся в ультрафиолетовом диапазоне спектра ($\lambda \approx 1100 \div 900 \text{ \AA}$). Однако, вследствие космологического красного смещения наблюдаемых систем $z \sim 2 - 3$, эти линии сдвигаются в оптический диапазон, что позволяет получать спектры абсорбционных систем молекулярного водорода на больших оптических телескопах, где спектральное разрешение выше, чем у орбитальных обсерваторий ультрафиолетового диапазона, на которых облака молекулярного водорода наблюдаются в Галактике. Это предоставляет уникальную возможность исследовать некоторые особенности переноса излучения в облаках молекулярного водорода [4].

Существует ряд актуальных космологических задач, которые можно решать с помощью анализа межзвёздных облаков молекулярного водорода на больших красных смещениях. Одна из них – определение плотности барионной материи во Вселенной по измерению отношения распространённости изотопа водорода – дейтерия [5]. Другая задача – оценка значения температуры реликтового излучения [6] в ранние эпохи ($z \sim 2 - 3$), что на сегодняшний день является единственным доступным методом такой оценки.

Не менее актуальной является проблема звездообразования, в особенности, на ранних этапах эволюции Вселенной [7]. Для количественного моделирования темпов звездообразования и определения функции масс звёзд важен корректный расчёт обилия наиболее распространённых во Вселенной молекул H_2 и HD, являющихся основными хладагентами в веществе с составом, близким к первичному [8]. Это требует учёта химической эволюции межзвёздных облаков и влияния на неё изменения параметров межзвёздной среды в процессе эволюции Вселенной.

Цели работы

- Исследование физических условий и химического состава вещества в облаках молекулярного водорода, находящихся на космологических расстояниях, соответствующих красным смещениям $z \sim 2 - 3$.

- Определение распространённости молекул HD и H₂ в абсорбционных системах молекулярного водорода с целью оценки относительной плотности барионной материи во Вселенной.
- Исследование особенностей переноса излучения в облаках молекулярного водорода, в частности (i) эффекта уширения распределения молекул по скоростям на возбуждённых вращательных уровнях H₂; и (ii) эффекта неполного покрытия области формирования широких эмиссионных линий квазара абсорбционной системой.
- Исследование химической эволюции облака HD/H₂ с целью определения относительной распространённости молекул HD и H₂ в процессе молекуляризации облака.

Научная новизна

Результаты диссертации являются новыми и оригинальными. Идентифицированы линии поглощения молекул HD в абсорбционных системах H₂, наблюдаемых в спектрах квазаров Q 0812+3208 и Q 1331+170. Это позволило увеличить статистику абсорбционных систем HD/H₂ в спектрах квазаров с 4 до 8 систем. Впервые в астрофизических наблюдениях были идентифицированы линии переходов, идущих с возбуждённого вращательного уровня J=1 молекулы HD. Это позволило оценить объёмную концентрацию в облаке новым способом, на основе относительной населённости вращательных уровней J=1/J=0 молекулы HD.

Новым способом получена оценка плотности барионной материи во Вселенной на основе определения относительной распространённости дейтерия D/H по относительной распространённости молекул HD и H₂ в облаках молекулярного водорода.

Предложено новое объяснение эффекта уширения распределения по скоростям на возбуждённых вращательных уровнях молекулярного водорода, наблюдающегося как в облаках молекулярного водорода нашей Галактики, так и на больших красных смещениях.

Впервые для космологически удалённых от квазара абсорбционных систем обнаружен эффект неполного покрытия области широких эмиссионных линий квазара абсорбционной системой. Спектроскопический анализ позволил новым методом оценить размер области эмиссионных линий квазара.

Разработана модель химической эволюции HD/H₂ облака. Определены вариации относительной распространённости молекул HD и H₂ в процессе молекуляризации облака.

Достоверность результатов Достоверность результатов обеспечена использованием современных методов обработки и анализа оптических спектров, современных вычислительных программ по расчёту переноса излучения в облаках молекулярного водорода и химической эволюции облаков молекулярного водорода, а также сравнением результатов, где это возможно, с результатами других авторов, а численных расчётов - с аналитическими приближениями и предельными случаями.

Научная и практическая ценность Полученные оценки физических условий и отличия в химическом составе облаков HD/H₂ на больших красных смещениях в сравнении с наблюдениями в нашей Галактике важны для понимания эволюции состава вещества и физических условий во Вселенной.

Новый независимый способ оценки плотности барионной материи во Все-

ленной служит жёстким критерием отбора космологических моделей.

Представлен новый способ, дающий независимую оценку размера области формирования широких эмиссионных линий в квазаре, на основе определения фактора покрытия квазара удалённой абсорбционной системой.

Результаты расчёта переноса излучения в линиях радиативной накачки могут быть использованы для корректного сопоставления результатов моделирования фотодиссоционных областей с наблюдательными данными.

Результаты расчётов химической эволюции облака HD/H₂ можно использовать для оценки систематической ошибки при определении отношения изотопов D/H по распространённости молекул HD и H₂. Эти результаты также могут быть использованы для моделирования процессов звездообразования, требующих знания функции охлаждения вещества, которая зависит от распространённости молекул HD и H₂.

Основные положения, выносимые на защиту

1. (а) Идентификация молекул HD в основном состоянии J=0 в двух абсорбционных системах H₂ на большом красном смещении – системе $z_{abs}=2.6264$ в спектре квазара Q0812+3208 и в системе $z_{abs}=1.777$ в спектре квазара Q1331+170.
- (б) Идентификация абсорбционных линий переходов, идущих с возбуждённого вращательного уровня молекулы HD (J=1), в абсорбционной системе $z_{abs}=2.6264$ в спектре квазара Q0812+3208.
2. Определение плотности барионной материи во Вселенной по отношению изотопов D/H, получаемому из распространённости молекул HD/H₂, идентифицируемых в облаках молекулярного водорода на больших красных смещениях.
3. Детальный анализ абсорбционной системы $z_{abs}=2.3377$ в спектре квазара Q1232+082: определение распространённости тяжёлых элементов, ионизационной структуры, распространённости молекул HD и H₂, физических условий в облаке. Определение фактора покрытия квазара Q1232+082 абсорбционной системой. Определение размеров области формирования широких эмиссионных линий квазара новым независимым способом.
4. Расчёт переноса направленного ультрафиолетового излучения в резонансных линиях радиативной накачки молекулярного водорода с учётом неравновесного распределения по скоростям на вращательных уровнях H₂.
5. Моделирование химической эволюции молекулярного облака HD/H₂ с целью определения относительного содержания молекул HD и H₂ в процессе образования облака.

Апробация работы и публикации Результаты, вошедшие в диссертацию, получены в период с 2008 по 2010 годы и опубликованы в четырёх статьях в реферируемых журналах и в тезисах пяти конференций. Результаты докладывались на всероссийских конференциях: “Астрофизика высоких энергий” НЕА 2008 (Москва, 2008), НЕА 2009 (Москва, 2009), НЕА 2010 (Москва, 2010) и “Всероссийская астрономическая конференция” (Нижний Архыз, 2010), на дне науки в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (Санкт-Петербург, 2010), на мини-коллоквиуме “Физика галактик, межгалактической среды и релятивистских объектов” (Москва, 2010), на конференции “Прецизионная физика и фундаментальные физические константы” (Санкт-Петербург, 2010) и на семинарах сектора теоретиче-

ской астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Структура и объём диссертации Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержит 137 страниц текста, в том числе 46 рисунков и 8 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 183 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность проведённых исследований, сформулированы цель и научная новизна работы, достоверность результатов, их практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

Первая Глава посвящена анализу наблюдательных данных по абсорбционным системам молекулярного водорода на больших красных смещениях ($z \sim 2 - 3$). Приведен выполненный нами анализ трёх абсорбционных систем в спектрах квазаров Q 1232+082, Q 0812+3208 и Q 1331+170, содержащих молекулы HD и H₂, результаты которого были опубликованы в работах [A2, A3, A4, A7, A8].

В параграфе 1.1 представлен краткий обзор наблюдений абсорбционных систем молекулярного водорода на больших красных смещениях. Указаны основные задачи наблюдения молекулярного водорода на ранних этапах эволюции Вселенной, а именно: (i) проблема теории первичного звездообразования (молекулы HD и H₂ являются главными хладагентами в первичном веществе); (ii) определение отношения распространённости изотопов D/H в первичном веществе с целью оценки плотности барионной материи во Вселенной; (iii) определение основных физических параметров в облаках молекулярного водорода (кинетической температуры, давления, плотности частиц и др.), на основе измерений населённостей вращательных уровней H₂ и HD. Также обсуждены другие специфические задачи, такие как измерения температуры реликтового излучения в ранние эпохи, соответствующие красным смещениям $z \sim 2$ и исследование особенностей переноса излучения в облаках молекулярного водорода. В §1.1.2 и §1.1.3 даётся краткое описание структуры энергетических уровней молекул H₂ и HD, важное для дальнейшего обсуждения абсорбционных линий, в которых наблюдаются молекулы, и деталей переноса излучения в этих линиях.

В параграфе 1.2 представлен выполненный нами анализ абсорбционной системы молекулярного водорода с красным смещением $z_{abs} = 2.3377$ в спектре квазара Q 1232+082. В §1.2.1 представлены характеристики наблюдений квазара на телескопе VLT с использованием эшелле-спектрографа высокого разрешения UVES [9]. Спектр был получен в рамках совместной российско-французской программы в которой участвовали соавторы диссертанта [A3]. Подпараграф 1.2.2 посвящён анализу абсорбционных линий H₂ и HD и определению лучевых концентраций этих молекул в исследуемой абсорбционной системе. Выполненный нами анализ абсорбционной системы H₂ [A3] выявил две особенности. Первая заключается в том, что часть излучения от квазара, испускаемая областью формирования широких эмиссионных линий, проходит мимо абсорбционной системы. Этот эффект подробно рассмотрен в главе 3. Вторая особенность, рассмотренная в главе 4, состоит в том, что наблюдается уширение распределения по скоростям на возбуждённых вращательных уровнях молекулярного водорода. Учёт этих особенностей оказался важным

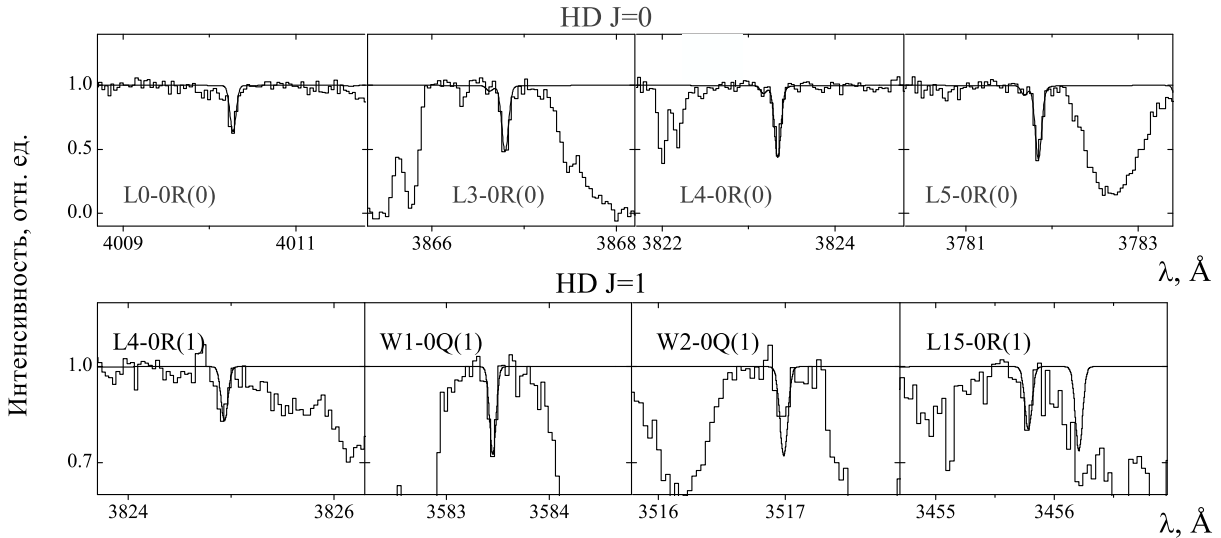


Рис. 1. Некоторые абсорбционные линии молекулы HD, идентифицированные в системе $z_{abs}=2.626$ в спектре квазара Q 0812+3208. На верхних панелях показаны линии переходов, идущих с уровня $J = 0$. На нижних панелях показаны идентифицированные впервые линии переходов с возбуждённого вращательного уровня $J = 1$.

для определения лучевых концентраций молекул H_2 и HD, а вследствие этого, и для определения отношения изотопов D/H, представленного в главе 2. Более детальный анализ абсорбционной системы $z_{abs}=2.3377$ в спектре квазара Q 1232+082, включая линии тяжёлых элементов и др., приведен в главе 3.

Параграф 1.3 посвящён независимому анализу абсорбционной системы молекулярного водорода с красным смещением $z_{abs} = 2.6264$ в спектре квазара Q 0812+3208 [A4]. В §1.3.1 приведены характеристики наблюдений квазара, выполненных на телескопе Keck с использованием эшелле-спектрографа высокого разрешения HIRES [10]. Спектр был обработан диссертантом, используя данные, взятые из архива телескопа Keck. В §1.3.2 представлен выполненный диссертантом анализ абсорбционных линий H_2 и HD, использованный для определения лучевых концентраций этих молекул. Использование новых лабораторных длин волн молекулы HD [11], позволило идентифицировать большее количество линий, чем в аналогичной работе [12], 9 из которых оказались пригодными для спектрального анализа. Это дало возможность получить более точные и статистически надёжные результаты. Некоторые из идентифицированных линий показаны на рис. 1. Данная абсорбционная система имеет наибольшую среди абсорбционных систем, идентифицированных в спектрах квазаров, лучевую концентрацию молекул HD, $\log N(\text{HD}) = 15.71 \pm 0.07$. Впервые в астрофизических наблюдениях идентифицированы линии молекулы HD, идущие с первого возбуждённого вращательного уровня $J=1$, а также линии далеких полос ($\nu > 10$) лаймановской серии молекулы HD $L\nu-0$. Идентификация линий переходов с вращательного уровня $J=1$ молекулы HD, позволила измерить относительную населённость вращательных уровней $N(J = 1)/N(J = 0)$ и получить оценку на объёмную концентрацию газа в облаке HD/ H_2 , представленную в §1.3.3.

В параграфе 1.4 приведён независимый анализ абсорбционной системы молекулярного водорода с красным смещением $z_{abs} = 1.777$ в спектре квазара Q 1331+170. В §1.4.1 представлены характеристики наблюдений квазара на

телескопе HST с использованием эшелле-спектрографа высокого разрешения STIS [13]. Спектр был обработан диссертантом по данным архива телескопа HST. В §1.4.2 представлен выполненный диссертантом независимый анализ абсорбционных линий H_2 и определение лучевых концентраций этих молекул. Также приведены результаты идентификации и анализа линий молекулы HD в этой абсорбционной системе, впервые полученные в нашей работе [A4].

Параграф 1.5 является заключением к главе 1. В нём приводятся данные по абсорбционным системам молекулярного водорода, обнаруженным на больших красных смещениях, указываются основные характеристики наблюдаемых систем (красные смещения, лучевые концентрации компонент и др.).

Вторая Глава посвящена предложенному нами методу определения отношения распространённости изотопов D/H по измеряемому отношению лучевой концентрации молекул HD и H_2 . Отношение изотопов D/H позволяет оценить один из ключевых параметров стандартной космологической ΛCDM модели – плотность барионной материи во Вселенной, Ω_b . Основные результаты, полученные в этой главе, вошли в публикации автора [A2, A3, A4, A7, A8].

Параграф 2.1 является введением, в котором кратко изложена проблема определения Ω_b . Один из методов определения связан с первичным нуклеосинтезом. В теории первичного нуклеосинтеза получено, что содержание лёгких элементов во Вселенной является функцией Ω_b . Поэтому, измерив содержание лёгких элементов, можно определить Ω_b . Наиболее чувствительным к значению Ω_b является относительное содержание дейтерия D/H. В процессе эволюции Вселенной дейтерий только выгорает, поэтому необходимо измерять D/H в облаках с содержанием элементов, близким к первичному. Для этого подходят абсорбционные системы с низким содержанием тяжёлых элементов, идентифицируемые в спектрах квазаров. Один из способов измерения отношения D/H – анализ абсорбционных линий атомов H I и D I в таких системах. Однако этот метод имеет ряд трудностей, связанных со сложностью анализа абсорбционных линий. Подобных проблем не возникает, если измерять относительное содержание молекул HD и H_2 , так как их спектры существенно различаются, а большинство узких абсорбционных линий не перекрываются. Возможность использования этого метода появилась сравнительно недавно, поскольку впервые молекулы HD на больших красных смещениях удалось обнаружить только в 2001 году [14].

В параграфе 2.2 представлен предложенный нами метод определения отношения распространённости изотопов D/H, путём исследования относительной распространённости молекул HD и H_2 . Приведены наблюдательные данные по абсорбционным системам HD/ H_2 в Галактике и на больших красных смещениях, представленные на рис. 2. Нами показано, что в абсорбционных системах на больших красных смещениях отношение лучевых концентраций $N(\text{HD})/2N(\text{H}_2)$ систематически больше, чем в облаках Галактики [A4]. Метод определения отношения изотопов D/H по относительной распространённости молекул HD и H_2 основывается на моделях молекулярных облаков [17], которые указывают на то, что в случае самоэкранировки молекул HD и H_2 от диссоциирующего их ультрафиолетового излучения, почти весь водород находится в H_2 , а весь дейтерий – в HD. Тогда отношение лучевых концентраций $N(\text{HD})/2N(\text{H}_2)$ будет в точности соответствовать отношению изотопов D/H. При характерных в наблюдаемых системах лучевых концентраци-

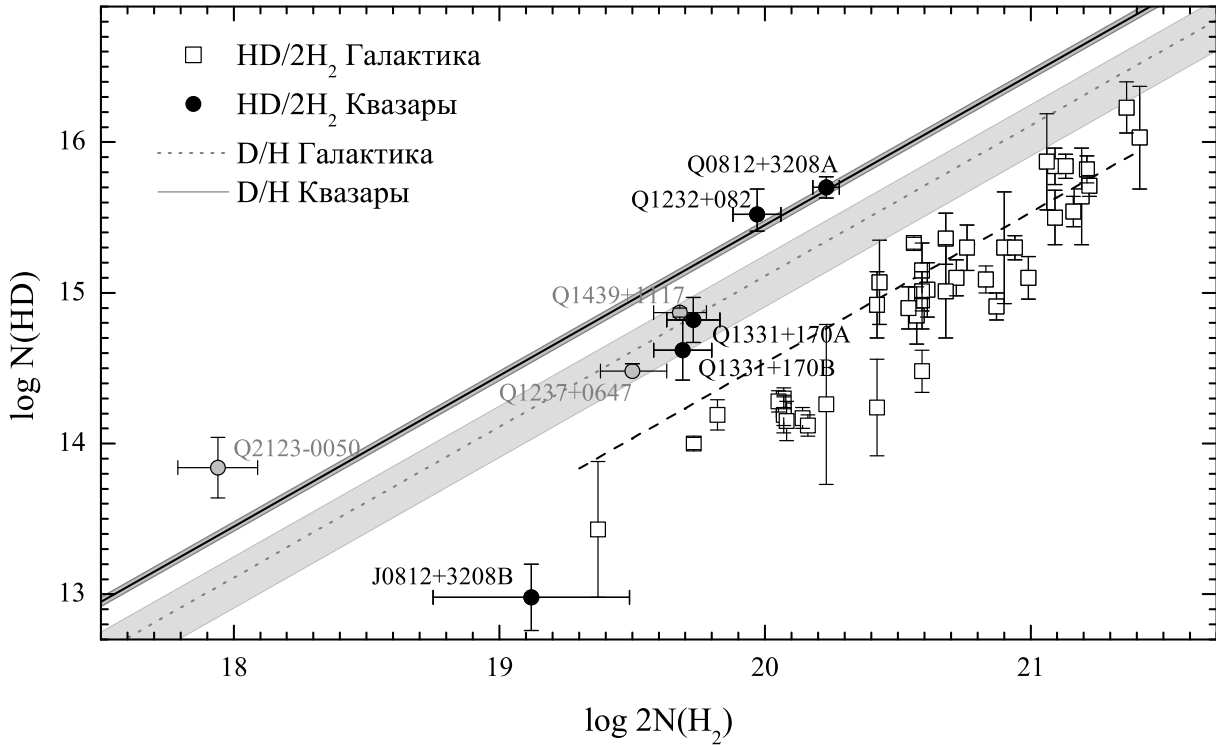


Рис. 2. Данные совместных измерений лучевых концентраций HD и 2H_2 . Кружками показаны измерения HD и H_2 в спектрах квазаров. Тёмными кружками показаны результаты анализа абсорбционных систем в спектрах квазаров Q 1232+082, Q 0812+3208 и Q 1331+170, полученные в работах автора. Квадратами приведены измерения HD и H_2 в Галактике [15], определённое среднее значение D/H для которых показано штриховой линией. Сплошной линией показано среднее отношение D/H, измеряемое в спектрах квазаров по линиям атомов H I и D I, в пределах ошибок, совпадающее со значением, получаемым из анализа анизотропии реликтового излучения. Отношение D/H, измеренное по H I и D I в Галактике [16], показано пунктирной линией. Относительное содержание HD/ 2H_2 , измеряемое в спектрах квазаров, т.е. на большом красном смещении, значительно выше, чем в Галактике, и для систем с высокой лучевой концентрацией HD это значение совпадает со значением отношения D/H, измеряемым по H I и D I.

ях $N_{\text{H}_2} > 10^{18} \text{ см}^{-2}$ молекулярный водород самоэкранирован. Молекул HD на четыре-пять порядков меньше, чем молекул H_2 . Поэтому в наблюдаемых системах молекула HD находится на грани самоэкранировки, наступающей при лучевых концентрациях $\geq 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Как видно на рис. 2, уменьшение отношения $N(\text{HD})/2N(\text{H}_2)$ с уменьшением лучевой концентрации HD, подтверждает высказанные выше соображения. Из всех систем HD/ H_2 на больших красных смещениях только две (в спектрах квазаров Q 1232+082 и Q 0812+3208) имеют $N(\text{HD}) > 10^{15} \text{ см}^{-2}$; анализ этих систем представлен в §1.2 и §1.3, соответственно. Анализ этих систем позволил получить значения отношения изотопов $\text{D}/\text{H} = (3.0 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ и соответствующую ему плотность барионной материи во Вселенной $\Omega_b = 0.0404 \pm 0.0019$, которая в пределах ошибок согласуется со значением $\Omega_b = 0.0455 \pm 0.0028$, полученным из анализа анизотропии реликтового излучения [18].

В параграфе 2.3 дано заключение к главе 2.

В **Третьей Главе** рассматривается неполное покрытие квазара Q 1232+082 абсорбционной системой молекулярного водорода с красным смещением $z_{\text{abs}}=2.3377$. Содержание этой главы опубликовано в работах [A3,A6]. Представлено выполненное нами исследование области формирования широких

эмиссионных линий (BLR - Broad Line Region) квазара методом определения фактора покрытия квазара абсорбционной системой. Выполненный диссертантом анализ абсорбционных линий системы с $z_{abs}=2.3377$ показал, что данная система в некоторых абсорбционных компонентах только частично покрывает область широких эмиссионных линий квазара, в то время как аккреционный диск квазара оказывается покрыт полностью.

В параграфе 3.1 изложено современное представление о структуре активных ядер галактик и существующие методы исследования BLR. Там же описаны существующие наблюдения эффекта неполного покрытия квазаров и определения фактора покрытия. Неполное покрытие означает, что часть излучения от квазара проходит мимо абсорбционной системы, и может быть выражено количественно фактором покрытия $0 \leq f \leq 1$. В §3.1.1 дано определение фактора покрытия и описан метод его измерения из анализа абсорбционных линий. Факторы покрытия определяются по измерению остаточного потока (ОП) в абсорбционных линиях.

В параграфе 3.2 представлен спектральный анализ абсорбционной системы $z_{abs}=2.3377$, в результате которого определены значения факторов покрытия различными абсорбционными компонентами нескольких эмиссионных линий квазара. В §3.2.1 произведена коррекция нулевого уровня потока в спектре для учёта систематической ошибки определения факторов покрытия, связанной с обработкой и сложением экспозиций. В §3.2.2 приведён анализ абсорбционных линий молекулярного водорода. Линии H_2 , принадлежащие основным уровням, сильно насыщены, однако, имеется остаточный поток в центре линий (см. рис. 3). Получена зависимость величины ОП от положения линии в спектре квазара. Установлена корреляция между величиной определяемого ОП в абсорбционных линиях H_2 и положением эмиссионных линий $Ly-\beta$ и $C III$. Величина ОП для абсорбционных линий, попавших на эмиссионные линии в спектре, составляет около 10%, а для линий, лежащих в континууме квазара – не больше 3%. Это указывает на то, что абсорбционная система не полностью покрывает только область квазара, формирующую эмиссионные линии в спектре (т.е. BLR).

Дополнительные аргументы в пользу гипотезы неполного покрытия квазара абсорбционной системой с красным смещением $z_{abs}=2.3377$ представлены в §3.2.3, где рассмотрен анализ абсорбционных линий атомарного углерода $C I$, ассоциированных с системой H_2 . Считается, что $C I$ и H_2 пространственно совмещены в облаке. Положения некоторых из абсорбционных линий $C I$ совпадают с положением эмиссионных линий квазара $C IV$, $Ly-\alpha$, $N V$. Для определения ОП в этих эмиссионных линиях использовалось два метода: метод кривой роста и метод построения синтетического спектра, представленные в §3.2.3.1 и §3.2.3.2, соответственно. В §3.2.4 рассмотрены все остальные абсорбционные линии, которые могут быть ассоциированы с исследуемой системой H_2 . Положения абсорбционных линий $Si II 1304 \text{ \AA}$ и $O I 1304 \text{ \AA}$ совпали с вершиной эмиссионной линии $Ly-\alpha$ и выявили наличие ОП на уровне 7%. Анализ этих линий представлен в §3.2.4.1. В §3.2.4.2 обсуждается возможная идентификация ненулевого ОП и в других абсорбционных линиях, соответствующих $S II$, $N I$ и $Fe II$. Так как области излучения квазара, формирующие континуум, покрываются абсорбционной системой полностью, в то время как BLR квазара оказывается покрыт неполностью, можно определить фактор

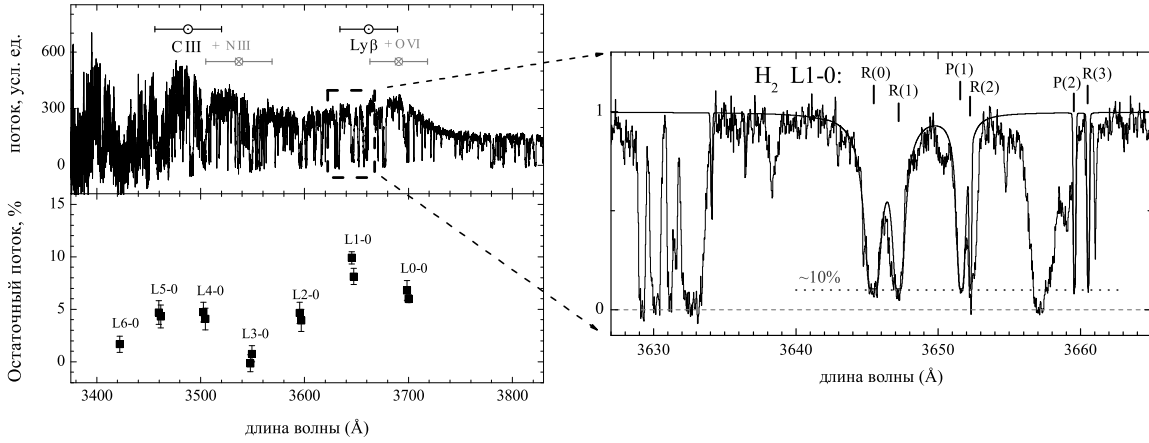


Рис. 3. *Левая верхняя панель:* Участок спектра квазара Q 1232+082, где расположены абсорбционные линии системы H_2 с красным смещением $z_{abs}=2.3377$. Красными кружками и крестами показано оцениваемое положение эмиссионных линий квазара Q 1232+082. Также приведены характерные ширины данных эмиссионных линий, взятые из работы [19]. *Правая панель:* Участок спектра квазара Q 1232+082 с абсорбционными линиями L1-0 лаймановской полосы молекулярного водорода на красном смещении $z_{abs}=2.3377$. Гладкой линией показан синтетический спектр абсорбционной системы H_2 . Сильно насыщенные (демпфированные) линии H_2 не достигают нуля интенсивности в центре линии, в то время как несколько расположенных рядом насыщенных линий Ly- α леса имеют нулевой поток в центре линии. Это свидетельствует о неполном покрытии квазара абсорбционной системой молекулярного водорода. *Левая нижняя панель:* Величина измеряемого остаточного потока (ОП) в абсорбционных линиях H_2 в зависимости от положения линии в спектре. Величина ОП коррелирует с положением эмиссионных линий в спектре квазара, что свидетельствует о том, что существует неполное покрытие области широких эмиссионных линий квазара абсорбционной системой молекулярного водорода.

покрытия отдельно для VLR. Факторы покрытия VLR квазара вычислены и представлены в §3.2.5.

Параграф 3.3 посвящён определению физических условий в абсорбционной системе. В §3.3.1 представлена ионизационная структура абсорбционной системы - показаны профили абсорбционных линий, соответствующие разным элементам различных степеней ионизации. Так как эта система связана с демпфированной Ly- α системой, в ней доминируют компоненты низкой степени ионизации. Ионизационная структура системы указывает на то, что в большинстве элементов можно выделить основную компоненту, которая может быть ассоциирована с молекулярной системой. В §3.3.2 представлено содержание тяжёлых элементов в абсорбционной демпфированной Ly- α системе, которое оказалось в среднем в 30 раз ниже, чем солнечное. Однако, основываясь на наблюдении C II, который жёстко пространственно привязан к H_2 посредством реакций перезарядки, можно заключить, что содержание тяжёлых элементов в компоненте, связанной с облаком молекулярного водорода, может быть близко к солнечному. Определение объёмной концентрации в молекулярной компоненте абсорбционной системы представлено в §3.3.3. В §3.3.3.1 для определения объёмной концентрации, использованы населенности подуровней тонкой структуры C I. Кинетическая температура в облаке определена из отношения ортоводорода к параводороду. Полученное значение объёмной плотности $n_{H_2} = 105^{+27}_{-24} \text{ см}^{-3}$, согласуется с верхним пределом на объёмную концентрацию, полученным в §3.3.3.2, при учёте верхнего предела на населённость вращательного уровня $J=1$ молекулы HD. В §3.3.4

представлено определение объёмной концентрации в нейтральной оболочке облака молекулярного водорода. Для этого использована относительная населённость подуровней тонкой структуры С II. Получено значение объёмной плотности $n_{neutr} = 32_{-21}^{+34} \text{ см}^{-3}$.

В параграфе 3.4 получены основные результаты главы 3. Обсуждаются возможные объяснения эффекта неполного покрытия. Неполное покрытие может обеспечиваться наблюдением неразрешённого двойного квазара (§3.4.1) или гравитационным микролинзированием (§3.4.2). Однако эти объяснения оказываются неудовлетворительными для квазара Q 1232+082, так как неполностью покрыта только область BLR. Поэтому наиболее вероятным объяснением эффекта неполного покрытия, обсуждаемым в §3.4.3, является сравнимость угловых размеров абсорбционной системы и BLR. В таком случае, зная размер абсорбционной системы, можно сделать оценку на размер BLR. Оценка размера эмиссионной линии C IV: $R_{CIV} \sim 0.18_{-0.11}^{+0.08}$ пк представлена в параграфе §3.4.4. В предположении, что газ BLR вириализован это позволило дать оценку на массу сверхмассивной чёрной дыры в квазаре $M_{ВН} = 6.8_{-4.5}^{+4.1} \times 10^8 M_{\odot}$.

Параграф 3.5 является кратким заключением главы 3.

В **Главе 4** предложены и детально рассчитаны два механизма, объясняющие наблюдаемый в межзвёздных облаках эффект уширения распределения частиц по скоростям на возбуждённых вращательных уровнях молекулярного водорода. Данная глава отражена в работе [A1,A5].

Параграф 4.1 является обзорным. В нём перечислены основные наблюдательные данные по эффекту уширения. Эффект уширения состоит в том, что измеряемое в некоторых межзвёздных облаках распределение частиц по скоростям на возбуждённых вращательных уровнях H_2 имеет характерную ширину большую, чем на основных уровнях H_2 . Некоторые авторы наблюдают эффект роста эффективного доплеровского параметра b с увеличением номера вращательного уровня, J . Этот эффект наблюдается как в облаках молекулярного водорода в Галактике [20], так и в облаках на больших красных смещениях [4]. Также в §4.1 дан обзор объяснений эффекта уширения предложенных ранее другими авторами.

В параграфе 4.2 рассмотрен процесс радиативной накачки уровней направленным излучением в рамках трёхуровневой модели. Основные положения рассматриваемой нами модели перечислены в §4.2.1. В §4.2.2 получена формула для распределения частиц по скоростям на уровне, заселяемом радиативной накачкой. Рассчитаны объёмные и лучевые распределения частиц по скоростям на этом уровне в зависимости от глубины проникновения

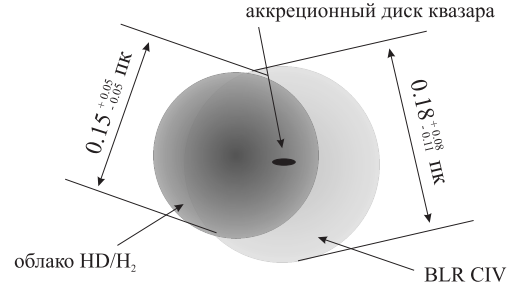


Рис. 4. Схематическое изображение неполного покрытия квазара Q 1232+082 абсорбционной системой на $z_{abs} = 2.3377$. Показаны оцененные размеры абсорбционной системы и области формирования эмиссионной линии C IV, фактор покрытия которой абсорбционной системой составляет около 0.5.

излучения в облако. Нами показано, что уширение распределения по скоростям происходит при насыщении линии переходов, в которых происходит радиативная накачка. В §4.2.3 рассмотрен процесс термализации неравновесного уширенного распределения, сформированного радиативной накачкой. В §4.2.4 получены выражения для профилей линий, которые соответствуют уширенному распределению, полученному в §4.2.3. В §4.2.5 обсуждается влияние полученного эффекта уширения на вид кривой роста абсорбционной линии.

Параграф 4.3 посвящён выполненному диссертантом расчёту эффекта уширения при радиативной накачке, полученному в параграфе 4.2, для структуры энергетических уровней молекулы водорода. В §4.3.1 представлена общая схема расчёта. Особенности расчёта связаны, например, с разделением структуры уровней молекулярного водорода на параводород и ортоводород и наличием колебательно-вращательного каскада в основном электронном состоянии. Для вычисления зависимости распределения частиц по скоростям от глубины проникновения излучения радиативной накачки в облако, необходимо рассматривать уравнения баланса для нескольких нижних вращательных уровней. Нелинейная система уравнений баланса приведена в параграфе §4.3.2 и решалась численно. В §4.3.3 приведены результаты расчёта, представляющие собой зависимости профилей линий лаймановской и вернеровской полос молекулы водорода от глубины проникновения излучения радиативной накачки в облако. Профили этих линий отражают распределение частиц по скоростям на луче зрения и рассчитываются самосогласованно. Показано, что рассмотренного эффекта распространения направленного излучения недостаточно, для объяснения наблюдаемого эффекта уширения. В §4.3.4 обсуждается влияние пыли на перенос излучения радиативной накачки в линиях ультрафиолетового диапазона.

В параграфе 4.4 представлен, предложенный и рассчитанный диссертантом, дополнительный механизм, приводящий к уширению распределения по скоростям на возбуждённых вращательных уровнях H_2 . Этот механизм связан с профилем населённостей вращательных уровней в облаке, формирующимся при переносе излучения в линиях радиативной накачки. Суть механизма состоит в том, что облако можно условно разделить на две области: оболочку и внутреннюю часть. В оболочке линии радиативной накачки лаймановской и вернеровской полос не насыщены и даже при стандартной среднегалактической интенсивности ультрафиолетового излучения возбуждённые вращательные уровни будут существенно заселены. При проникновении излучения в облако линии радиативной накачки начинают насыщаться и скорости фотовозбуждения падают, а следовательно уменьшается населённость возбуждённых вращательных уровней. Это приводит к тому, что внутри облака населёнными оказываются практически только основные уровни. Фактически, населённости основных уровней отражают физические условия внутри облака, а возбуждённых уровней - во внешней его части. В оболочке скорости фотовозбуждения H_2 выше, поэтому выше и скорость фотодиссоциации H_2 . В случае баланса фотодиссоциация H_2 уравновешена образованием H_2 на пыли, при этом освобождается дополнительная энергия около $1 \div 2$ эВ. Также к нагреву среды, при высокой скорости фотовозбуждения H_2 , может приводить столкновительная релаксация в процессе колебательно-

вращательного каскада в основном электронном состоянии H_2 . Поэтому в тех областях, где фотодиссоциация H_2 идет активно, среда может разогреваться и иметь более широкое распределение молекул по скоростям. Такие области называются фотодиссоционными [21]. Наличие фотодиссоционной области учтено посредством феноменологической зависимости доплеровского параметра от глубины проникновения излучения в облако. Показано, что наличие фотодиссоционных областей хорошо объясняет наблюдательные данные по эффекту уширения.

Основные результаты главы 4 обобщены в параграфе 4.5.

Глава 5 посвящена предложена и рассчитана диссертантом модели химической эволюции облака HD/H_2 , которая представлена в работах [A4,A7].

Параграф 5.1 является введением, в нём дан краткий обзор современных моделей межзвёздных облаков и представлена мотивация расчёта химической эволюции облака HD/H_2 . В главе 2 относительная распространённость молекул HD и H_2 в предельном случае полной молекуляризации использовалась для оценки отношения распространённости изотопов D/H . Однако такой подход может быть не вполне обоснованным. Во-первых, молекула HD в большей степени, чем H_2 , подвержена фотодиссоциации ультрафиолетовым излучением. Во-вторых, посредством химического фракционирования дейтерий эффективно может уходить в более сложные молекулы или оседать на пыли. В-третьих, облака HD/H_2 могут не находиться в химическом равновесии.

В параграфе 5.2 перечислены основные положения рассматриваемой модели. Рассмотрено облако с однородной концентрацией и температурой. Считается, что облако состоит из H , He , D , их ионов, электронов и рассматриваются только простые молекулярные компоненты в облаке: H_2 , HD , HD^+ , H_2^+ , H_3^+ , H_2D^+ , HeH^+ , HeD^+ и др. Учтены важные процессы, определяющие эволюцию и структуру облака - фотодиссоциация ультрафиолетовым излучением, ионизация космическими лучами и образование молекул HD и H_2 на пыли. Приведена нелинейная система уравнений для решения поставленной задачи.

Результаты расчётов представлены в параграфе 5.3. Перечислены входные параметры расчётов и диапазоны их типичных значений. В §5.3.1 показаны общие результаты расчётов, которыми являются зависимости концентраций компонент в среде от глубины проникновения УФ излучения в облако и от времени, прошедшего с начала образования облака. Типичные начальные условия задаются в виде однородного облака с низкой степенью молекуляризации. Наибольший интерес в данной модели представляет эволюция отношения распространённости молекул HD и H_2 в процессе молекуляризации облака. Получено, что отношение $N(\text{HD})/2N(\text{H}_2)$ может сильно изменяться в процессе эволюции облака. Характерный вид зависимости $N(\text{HD})/2N(\text{H}_2)$ от времени показан на рис. 5. В статических моделях HD/H_2 облаков [17] получено, что отношение $N(\text{HD})/2N(\text{H}_2)$ должно быть не больше отношения распространённости изотопов D/H . Однако в случае динамической модели показано, что существует период в процессе молекуляризации облака, когда отношение $\text{HD}/2\text{H}_2$ может быть существенно больше отношения D/H . Этот период соответствует характерным динамическим временам облаков $t_{dyn} \sim 10^7$ лет. Это особенно важно для облаков с понижен-

ным, относительно среднегалактического, содержанием пыли, так как скорость молекуляризации H_2 падает при уменьшении содержания пыли. Пока H_2 не полностью молекуляризован, существует эффективный дополнительный канал образования молекулы HD – ионно-молекулярная реакция $\text{H}_2 + \text{D}^+ \rightarrow \text{HD} + \text{H}^+$, которая может обеспечивать эксцесс $N(\text{HD})/2N(\text{H}_2) > \text{D}/\text{H}$.

В §5.3.2 обсуждается влияние основных внешних параметров (интенсивность ультрафиолетового излучения, ионизация космическими лучами и содержание пыли) на рассчитанную эволюцию отношения $N(\text{HD})/2N(\text{H}_2)$. Подпараграф 5.3.3 посвящён обсуждению применимости предложенной модели к наблюдательным данным. Показано, что рассчитанный эффект может объяснять обсуждаемое в главе 2 различие между облаками HD/ H_2 на больших красных смещениях и облаками Галактики, т.к. в облаках на больших красных смещениях наблюдается пониженное содержание тяжёлых элементов, и следовательно пыли. В §5.3.4 получено аналитическое приближение зависимости отношения $N(\text{HD})/2N(\text{H}_2)$ от времени, характерный вид которого показан на рис. 5. В условиях отсутствия фона ультрафиолетового излучения, соответствующих внутренним самоэкранированным областям облака, показано, что отношение $N(\text{HD})/2N(\text{H}_2)$

как функция времени может быть параметризовано величиной $K \sim \frac{\sqrt{\zeta}}{D} n^{-3/2}$, где ζ – интенсивность космических лучей; D – содержание пыли, n – объёмная концентрация газа в облаке. Такое аналитическое приближение находится в хорошем согласии с численными расчётами эволюции молекулярного облака (рис 5).

Итоги главы 5 подведены в параграфе 5.5.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

1. Выполнен анализ абсорбционных систем молекулярного водорода (H_2 и HD) с красными смещениями $z_{abs} = 2.3377$, $z_{abs} = 2.626$ и $z_{abs} = 1.777$ в спектрах квазаров Q 1232+082, Q 0812+3208 и Q 1331+170, соответственно. В двух из них диссертантом (Q 0812+3208 и Q 1331+170) идентифицированы абсорбционные линии молекулы HD. В абсорбционной системе $z_{abs} = 2.626$ квазара Q 0812+3208 впервые в астрофизических наблюдениях идентифицированы абсорбционные линии переходов, идущих с возбуждённого вращательного уровня $J=1$ молекулы HD. Определена объёмная концентрация газа в облаке.

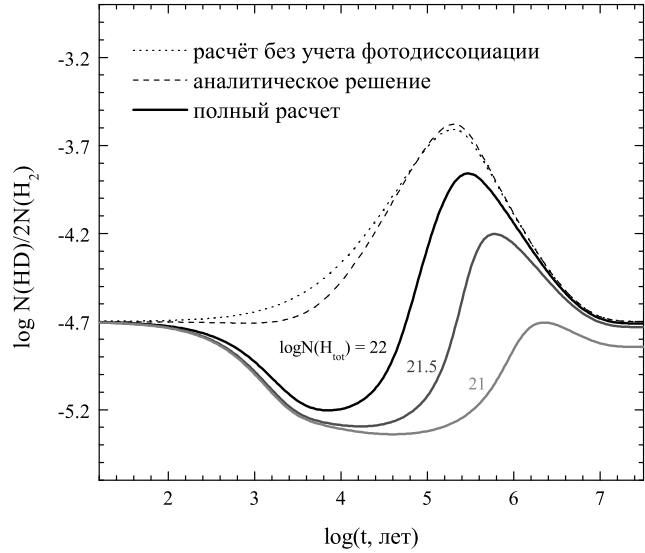


Рис. 5. Отношения концентраций молекул HD и H_2 в модели химической эволюции облака. Жирными линиями показаны результаты расчёта для облаков с лучевыми концентрациями $\log N_{tot}(H) = 21, 21.5$ и 22 . Пунктирной линией показан результат расчёта (для $\log N_{tot}(H) = 21.5$) в отсутствии фотодиссоциации молекул HD и H_2 , что соответствует самоэкранированной части облака. Штриховой линией показано полученное аналитическое приближение.

- ёмная концентрация в этой системе по измеренной населённости уровней $J=0$, $J=1$.
2. Оценено количество барионной материи во Вселенной по отношению распространённости изотопов D/H , полученному из относительной распространённости молекул HD и H_2 . Совместный анализ двух абсорбционных систем HD/H_2 (в квазарах Q 1232+082 и Q 0812+3208) позволил нам определить значение отношения изотопов $D/H = (3.0 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ и соответствующую ему плотность барионной материи во Вселенной $\Omega_b = 0.0405 \pm 0.0019$, что в пределах ошибок согласуется со значением, полученным из анализа анизотропии реликтового излучения.
 3. Исследовано неполное покрытие квазара Q 1232+082 абсорбционной системой с красным смещением $z_{abs}=2.3377$. Нами показано, что области эмиссии квазара, связанные с аккреционным диском, оказываются полностью покрытыми, в то время как области формирования широких эмиссионных линий оказываются покрытыми частично. Диссертантом определены факторы покрытия квазара в различных эмиссионных линиях различными компонентами абсорбционной системы. Определение физических условий в абсорбционной системе позволило нам оценить новым независимым методом размер области формирования широких эмиссионных линий квазара в линии $C\ IV\ R_{C\ IV} \sim 0.18_{-0.11}^{+0.08}$ пк.
 4. Исследован эффект уширения распределения по скоростям молекулярного водорода в возбуждённых вращательных состояниях, наблюдаемый в межзвёздных облаках. Нами показано, что в случае направленного излучения насыщение в линиях радиативной накачки приводит к уширению распределения молекул по скоростям, формируемого процессом радиативной накачки. Диссертантом выполнен расчёт переноса направленного излучения в резонансных линиях радиативной накачки молекулярного водорода и оценен возникающий эффект уширения. Рассчитаны профили населённостей вращательных уровней в облаке, характерный вид которых указывает на то, что возбуждённые вращательные уровни населены преимущественно в оболочке облака, в то время как внутри облака населёнными оказываются преимущественно основные уровни. Это объясняет наблюдаемый в облаках молекулярного водорода эффект уширения дополнительным нагревом облака за счёт фотодиссоционной области в облаке молекулярного водорода, что было предложено диссертантом.
 5. Выполнено предложенное и рассчитанное диссертантом моделирование химической эволюции молекулярного облака HD/H_2 . Показано, что в процессе молекуляризации облака отношение концентраций молекул $N(HD)/2N(H_2)$ может иметь существенные вариации. Показано, что в отличие от статических моделей облаков, где отношение концентраций $N(HD)/2N(H_2)$ меньше или равно отношению распространённости изотопов D/H , существует промежуток времени, сравнимый с характерными динамическими временами жизни облаков, когда отношение $N(HD)/2N(H_2)$ может быть больше отношения D/H . Увеличение отношения $HD/2H_2$ возникает благодаря дополнительному каналу образования молекулы HD – ионно-молекулярной реакции в условиях неполной молекуляризации H_2 . Получена аналитическая аппроксимация зависимости $N(HD)/2N(H_2)$ в процессе молекуляризации облака. Оценено влияние на химическую эво-

люцию облака HD/H₂ изменения содержания пыли, фона ультрафиолетового излучения и космических лучей в процессе космологической эволюции Вселенной.

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1 *Балашев С.А., Варшалович Д.А., Иванчик А.В.* Направленное излучение и фотодиссоционные области в облаках молекулярного водорода // *Письма в Астрономический журнал.* – 2009. – Т. 35. – С.171-188.
- A2 *Варшалович Д.А., Балашев С.А., Иванчик А.В., Петижан П.* Первичный нуклеосинтез дейтерия и содержания молекул HD/H₂ в межзвездных облаках, существовавших 12 млрд. лет назад. // *Успехи физических наук.* – 2010. – Т. 180. – С.415.
- A3 *Ivanchik A.V., Petitjean P., Balashev S.A., Srianand R., Varshalovich D.A., Ledoux C. and Noterdaeme P.* HD molecules at high redshift: the absorption system at $z=2.3377$ toward Q1232+082 // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society.* – 2010. – Vol. 404. – P.1583.
- A4 *Балашев С.А., Иванчик А.В., Варшалович Д.А.* Молекулярные облака HD/H₂ в ранней Вселенной. Проблема первичного дейтерия. // *Письма в Астрономический журнал.* – 2010. – Т. 36. – С.803-815.
- A5 *Балашев С.А., Варшалович Д.А., Иванчик А.В.* Особенности переноса излучения в облаках молекулярного водорода // *Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2008.* Программа и тезисы – Москва, ИКИ РАН, 2008 – С.2-3.
- A6 *Балашев С.А., Варшалович Д.А., Иванчик А.В.* Фактор покрытия квазара Q1232+082 абсорбционной системой с красным смещением $z=2.3377$ // *Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2009.* Программа и тезисы – Москва, ИКИ РАН, 2009 – С.6.
- A7 *Балашев С.А., Варшалович Д.А., Иванчик А.В.* Молекулярные HD/H₂ облака на большом красном смещении // *Всероссийская Астрономическая конференция 2010.* Программа и тезисы – Нижний Архыз, САО РАН, 2010 – С.112.
- A8 *Варшалович Д.А., Иванчик А.В., Балашев С.А.* Отношение изотопов D/H в эпоху прецизионной космологии // *Прецизионная физика и фундаментальные физические константы 2010.* Программа и тезисы – Санкт-Петербург, ФТИ им А.Ф. Иоффе РАН, 2010 – С.23.
- A9 *Иванчик А.В., Варшалович Д.А., Балашев С.А., Клименко В.В., Тагиров Р.В.* Абсорбционные спектры квазаров - пространственно-временные фотографии Вселенной // *Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2010.* Программа и тезисы – Москва, ИКИ РАН, 2010 – С.22.

ЛИТЕРАТУРА, ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ

- [1] Wolfe A. M., Gawiser E., Prochaska J. X. Damped Ly α Systems // *ARAA*. — 2005. — Vol. 43. — Pp. 861–918.
- [2] Molecular hydrogen in high-redshift damped Lyman- α systems: the VLT/UVES database / P. Noterdaeme, C. Ledoux, P. Petitjean, R. Srianand // *Astron. & Astrophys.* — 2008. — Vol. 481. — Pp. 327–336.
- [3] A new comprehensive set of elemental abundances in DLAs. II. Data analysis and chemical variation studies / M. Dessauges-Zavadsky, J. X. Prochaska, S. D’Odorico et al. // *AAP*. — 2006. — Vol. 445. — Pp. 93–113.
- [4] Excitation mechanisms in newly discovered H₂-bearing damped Lyman- α clouds: systems with low molecular fractions / P. Noterdaeme, C. Ledoux, P. Petitjean et al. // *Astron. & Astrophys.* — 2007. — Vol. 474. — Pp. 393–407.
- [5] HD molecules at high redshift: the absorption system at $z = 2.3377$ towards Q 1232+082 / A. V. Ivanchik, P. Petitjean, S. A. Balashev et al. // *Mon. Not. of Royal Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 404. — Pp. 1583–1590.
- [6] The evolution of the cosmic microwave background temperature. Measurements of T_{CMB} at high redshift from carbon monoxide excitation / P. Noterdaeme, P. Petitjean, R. Srianand et al. // *Astron. & Astrophys.* — 2011. — Vol. 526. — Pp. L7+.
- [7] The formation of the first stars and galaxies / V. Bromm, N. Yoshida, L. Hernquist, C. F. McKee // *Nature*. — 2009. — Vol. 459. — Pp. 49–54.
- [8] Abel T., Bryan G. L., Norman M. L. The Formation of the First Star in the Universe // *Science*. — 2002. — Vol. 295. — Pp. 93–98.
- [9] Performance of UVES, the echelle spectrograph for the ESO VLT and highlights of the first observations of stars and quasars / S. D’Odorico, S. Cristiani, H. Dekker et al. // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series / Ed. by J. Bergeron. — Vol. 4005 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*. — 2000. — Pp. 121–130.
- [10] HIRES: the high-resolution echelle spectrometer on the Keck 10-m Telescope / S. S. Vogt, S. L. Allen, B. C. Bigelow et al. // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series / Ed. by D. L. Crawford & E. R. Craine. — Vol. 2198 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*. — 1994. — Pp. 362+.
- [11] Fourier-transform spectroscopy of HD in the vacuum ultraviolet at $\lambda = 87\text{--}112$ nm / T. I. Ivanov, G. D. Dickenson, M. Roudjane et al. // *Molecular Physics*. — 2010. — Vol. 108. — Pp. 771–786.
- [12] Cosmological Concordance or Chemical Coincidence? Deuterated Molecular Hydrogen Abundances at High Redshift / J. Tumlinson, A. L. Malec, R. F. Carswell et al. // *Astrophys. Journal Letters*. — 2010. — Vol. 718. — Pp. L156–L160.
- [13] The Space Telescope Imaging Spectrograph Design / B. E. Woodgate, R. A. Kimble, C. W. Bowers et al. // *PASP*. — 1998. — Vol. 110. — Pp. 1183–1204.
- [14] HD Molecular Lines in an Absorption System at Redshift $z=2.3377$ / D. A. Varshalovich, A. V. Ivanchik, P. Petitjean et al. // *Astronomy Letters*. — 2001. — Vol. 27. — Pp. 683–685.
- [15] A New FUSE Survey of Interstellar HD / T. P. Snow, T. L. Ross, J. D. Destree et al. // *Astrophys. Journal*. — 2008. — Vol. 688. — Pp. 1124–1136.
- [16] What Is the Total Deuterium Abundance in the Local Galactic Disk? / J. L. Linsky, B. T. Draine, H. W. Moos et al. // *Astrophys. Journal*. — 2006. — Vol. 647. — Pp. 1106–1124.
- [17] Le Petit F., Roueff E., Le Bourlot J. D/HD transition in Photon Dominated Regions (PDR) // *Astron. & Astrophys.* — 2002. — Vol. 390. — Pp. 369–381.
- [18] Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation / E. Komatsu, K. M. Smith, J. Dunkley et al. // *Astrophys. Journal Suppl. Ser.* — 2011. — Vol. 192. — Pp. 18+.
- [19] Composite Quasar Spectra from the Sloan Digital Sky Survey / D. E. Vanden Berk, G. T. Richards, A. Bauer et al. // *Astron. Journal*. — 2001. — Vol. 122. — Pp. 549–564.
- [20] Velocity Dispersion of the High Rotational Levels of H₂ / S. Lacour, V. Ziskin, G. Hébrard et al. // *Astrophys. Journal*. — 2005. — Vol. 627. — Pp. 251–262.
- [21] Hollenbach D. J., Tielens A. G. G. M. Photodissociation regions in the interstellar medium of galaxies // *Reviews of Modern Physics*. — 1999. — Vol. 71. — Pp. 173–230.