

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

На правах рукописи

Иванчик Александр Владимирович

СПЕКТРОСКОПИЯ КВАЗАРОВ и КОСМОЛОГИЯ
Исследования физических условий и химического состава вещества,
существовавших на ранних стадиях эволюции Вселенной

(01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург
2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
“Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук”
и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
“Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”

- Научный консультант: – доктор физико-математических наук,
академик РАН Д. А. Варшалович
- Официальные оппоненты: – доктор физико-математических наук,
профессор Ю. Н. Гнедин (ГАО РАН)
– доктор физико-математических наук,
профессор В. Г. Ключкова (САО РАН)
– доктор физико-математических наук,
профессор М. В. Сажин (ГАИШ МГУ)
- Ведущая организация: – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований РАН, Москва

Защита состоится 31 мая 2012 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета
Д 002.205.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки “Физико-
технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук” по адресу:
194021, С.-Петербург, Политехническая ул. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе
Автореферат разослан “27” апреля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:
кандидат физико-математических наук

_____ А. М. Красильщиков

Общая характеристика диссертации

Актуальность работы Диссертационная работа посвящена вопросам, находящимся на стыке современной космологии и физики элементарных частиц, чем и обусловлена ее актуальность. Исследование различных стадий эволюции Вселенной возможно путем сравнения наблюдательных данных и результатов моделирования характерных процессов, протекавших в исследуемую космологическую эпоху. Так, сравнение распространенности химических элементов во Вселенной (^4He , D , ^7Li) с предсказаниями теории первичного нуклеосинтеза позволяет получить представления о самых ранних минутах рождения Вселенной.

Один из методов изучения ранних этапов эволюции Вселенной основан на анализе абсорбционных спектров квазаров – самых мощных из известных на сегодняшний день квазистационарных источников энергосвечения во Вселенной. Абсорбционные спектры квазаров, формирующиеся в процессе распространения света от квазара к наблюдателю, по существу, являются пространственно-временными “фотографиями” Вселенной и содержат уникальную информацию о физических свойствах и химическом составе межзвездной и межгалактической среды в разные космологические эпохи. Набор космологических задач, решаемых с помощью анализа спектров квазаров, очень широк – это и исследование крупномасштабной структуры Вселенной, и изучение физических свойств межзвездного и межгалактического вещества, и проблема эволюции химического состава вещества и многие другие.

В последнее время одними из интереснейших объектов исследования стали молекулярные облака, находящиеся на больших красных смещениях $z \sim 2 - 3$. Относительная заселенность энергетических уровней атомов, ионов и молекул этих облаков чрезвычайно чувствительна к физическим условиям окружающей среды (объемная плотность n , кинетическая температура T_{kin} , интенсивность и спектр радиационного фона и др.). Спектральный анализ абсорбционных систем, содержащих молекулы H_2 и HD , атомы и ионы других элементов (C I , O I , Si II , Fe II и др.), позволяет получать уникальную информацию о свойствах межзвездной среды. Наблюдения таких систем стали возможными благодаря введению в строй крупных наземных оптических телескопов (Кеск, VLT, и др.), а также орбитальных обсерваторий (HST и др.) на которых достигаются рекордные для столь слабых объектов (зв. величина $V \sim 16 - 18$) спектральное разрешение $R \gtrsim 50000$ и отношение сигнала к шуму $S/N \gtrsim 100$.

Наступающая эпоха прецизионной космологии нуждается в определении различных космологических параметров с все большей и большей точностью. Результаты представленной работы также направлены на достижение этих целей.

Цель работы – исследование физических условий и химического состава вещества, существовавших на ранних стадиях эволюции Вселенной, путем анализа спектров квазаров с большими красными смещениями $z \sim 2 - 3$.

- Исследование физических условий и химического состава вещества в облаках молекулярного водорода H_2 , существовавших 10–12 млрд. лет назад и находящихся на космологических расстояниях.
- Определение распространенности молекул HD и H_2 в абсорбционных системах молекулярного водорода, с целью оценки относительной плотности барионной материи во Вселенной, Ω_b .
- Исследование возможного космологического изменения фундаментальных физических констант, в частности отношения масс протона и электрона μ .

Научная новизна работы

Впервые идентифицированы линии молекул HD в оптических спектрах квазаров с большими красными смещениями $z \sim 2 - 3$. Они соответствуют абсорбционным системам молекулярного водорода, существовавшим 10–12 млрд. лет назад. Являясь наряду с молекулами H_2 ключевыми хладагентами межзвездной и межгалактической среды в ранней Вселенной, молекулы HD также могут играть важную роль в процессах звездообразования и формирования первых конденсированных структур вещества во Вселенной [21, 28].

Впервые в космологически удаленной молекулярной системе идентифицированы линии переходов молекул HD, идущих с возбужденного вращательного уровня $J = 1$. По видимому, единственный случай отождествления абсорбционной линии молекулы HD, идущей с $J = 1$, в нашей Галактике представлен в работе [41]. Относительная населенность вращательных уровней молекулы HD позволяет оценить новым независимым способом объемную концентрацию в межзвездном облаке.

Предложен независимый способ определения одного из ключевых космологических параметров – относительного содержания барионной материи во Вселенной Ω_b – на основе оценки распространенности первичного дейтерия, получаемой из отношения лучевых концентраций молекул HD/ H_2 .

Впервые обнаружен эффект неполного покрытия области формирования излучения в квазаре космологически удаленным абсорбционным облаком, проявляющийся в наличии остаточного потока в центре насыщенных абсорбционных линий. Показана необходимость учета данного эффекта для построения адекватной физической модели межзвездного облака.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Детальные исследования абсорбционных систем, содержащихся в спектрах высокого разрешения квазаров *Q 0347-382*, *Q 0405-443*, *Q 1232+082*, *Q 1439+112*, *Q 0812+320*, *Q 1331+170*.
 - (а) Обнаружение четырех абсорбционных систем с большими красными смещениями, содержащих линии молекул HD. Определение лучевых концентраций молекул HD и H₂ в этих системах.
 - (б) Обнаружение остаточного потока излучения в центре насыщенных абсорбционных линий молекулярного водорода H₂. Интерпретация данного эффекта в рамках модели неполного покрытия абсорбционным облаком области формирования эмиссионного излучения квазара. Демонстрация важности учета обнаруженного эффекта для адекватного построения физической модели молекулярного облака.
2. Определение независимым способом относительного содержания барионной материи во Вселенной Ω_b с использованием оригинальной численной модели первичного нуклеосинтеза и оценки распространенности первичного дейтерия, получаемой из отношения лучевых концентраций молекул HD/H₂, наблюдаемых в облаках межзвездной среды, существовавших 10–12 млрд. лет назад.
3. Оценка скорости возможного изменения отношения масс протона и электрона посредством анализа электронно-колебательно-вращательных абсорбционных линий H₂ и HD в спектрах квазаров *Q 0347-382*, *Q 0405-443*, *Q 1439+112*.

Научная и практическая значимость

1. Полученные оценки физических условий и химического состава межзвездного вещества, существовавшего в ранней Вселенной, важны для точного определения космологических параметров и детального понимания процессов, протекавших на ранних стадиях эволюции Вселенной.
2. Предложенный независимый способ определения барионной плотности Вселенной Ω_b и оценка этой же величины из анализа анизотропии реликтового излучения потенциально (при дальнейшем увеличении точности) могут служить мощным инструментом в исследовании возможной физики за пределами Стандартной Модели (наличие дополнительных релятивистских степеней свободы, стерильные нейтрино, распады долгоживущих суперсимметричных частиц или их аннигиляция, изменение барион-фотонного отношения и др., [2, 7, 9]).

3. В результате прецизионных измерений длин волн абсорбционных линий H_2 в спектрах квазаров и их анализа было показано, что точность астрофизических измерений относительного положения длин волн H_2 становится сравнимой с точностью лабораторных длин волн, существовавшего на тот момент атласа лаймановских и вернеровских полос молекулярного водорода [5]. Поэтому, для дальнейшего продвижения в решении задач, связанных с прецизионным измерением положений линий H_2 , необходимы новые более точные лабораторные измерения длин волн молекулярного водорода. Осознание этого факта стимулировало развитие прецизионной лазерной спектроскопии ультрафиолетового диапазона, в результате чего точность определения лабораторных длин волн H_2 возросла на порядок [33].
4. Показана необходимость учета эффекта неполного покрытия при построении синтетического спектра абсорбционной системы H_2 . Поскольку эффект проявляется как дополнительный поток в центре насыщенных абсорбционных линий H_2 на уровне 4–10%, то такие линии легко могут быть восприняты (что и происходило ранее), как несколько перекрывающихся ненасыщенных линий H_2 , что в свою очередь приводит к совершенно другой модели абсорбционной системы, в частности, лучевые концентрации H_2 без учета эффекта неполного покрытия могут отличаться на три порядка.
5. При определении космологических параметров из анализа анизотропии реликтового излучения по данным, полученным на спутнике WMAP в процессе семилетних наблюдений [16], использовался численный код расчета первичной рекомбинации водородно-гелиевой плазмы RECFAST 1.5 [36], в котором был принят во внимание рассмотренный эффект – влияние нейтральной фракции водорода $H\text{I}$ на первичную рекомбинацию гелия $\text{He II} \rightarrow \text{He I}$ [A18, A20].
6. Полученные оценки на скорость возможного космологического изменения отношения масс протона и электрона $\mu = m_p/m_e$ могут служить жестким критерием отбора теорий, в рамках которых предсказываются космологические изменения констант во времени или отклонения их значений в различных пространственных областях.

Апробация работы и публикации.

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены в период с 1999 по 2011 г. и изложены в 33 статьях, список которых приведен в конце автореферата. Результаты работы неоднократно докладывались на семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе (С.-Петербург), С.-Петербургского государственного университета (СПбГУ), С.-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ), на общегородских астрономических семинарах в Институте прикладной астрономии РАН (С.-Петербург), на семинарах Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ (Москва), а также представлялись на отечественных и международных конференциях:

“III Всероссийское совещание “Прецизионная физика и фундаментальные физические константы” (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург, 2010), “Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2010” (САО РАН, 2010), “International conference “UV Universe-2010”. (St.-Petersburg, 2010), “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2007,2009)” (ИКИ РАН, Москва, 2007, 2009), “7th International Workshop “Ultra Cold & Cold Neutrons. Physics & Sources”.” (Санкт-Петербург, 2009), “Всероссийское совещание по прецизионной физике и фундаментальным физическим константам” (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 2009), “XVI Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy” (Irkutsk State Technical University, Baikal, 2009), “Всероссийское совещание по квантовой метрологии и фундаментальным физическим константам” (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург, 2008), “In search of variation of fundamental couplings and mass scales” (Perimeter Institute, Canada, 2008), “Atomic Clocks and Fundamental Constants ACFC 2007” (Physikzentrum Bad Honnef, Germany, 2007), “Международная зимняя школа по физике полупроводников 2007” (Зеленогорск, 2007) “Precision physics of simple atomic systems – PSAS 2006” (Venice International Institute, Italy, 2006), “Hydrogen atom II: Precision Physics of Simple Atomic Systems PSAS 2000” (Italy, 2000).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержит 147 страниц текста, в том числе 29 рисунков и 9 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 170 наименований.

Основное содержание работы

Во **введении** сформулированы цели и задачи диссертации, обоснованы актуальность работы и ее новизна, приведены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена описанию общих представлений об оптическом спектре квазара и механизмах его формирования, способах наблюдения и анализа спектров квазаров. Детально описаны исследования молекулярных абсорбционных систем, наблюдаемых в этих спектрах, определение физических условий и химического состава вещества межзвездных облаков, существовавших 10–12 млрд. лет назад и ассоциируемых с исследуемыми абсорбционными системами.

В п. 1.1 описано современное представление о квазарах как об активных ядрах далеких галактик, огромная энергетика которых обеспечивается аккрецией вещества родительской галактики на сверхмассивную черную дыру массой $10^6 - 10^9$ солнечных масс. Преобразование гравитационной энергии падающего вещества определяет светимость квазара, которая может в 10 000 раз превосходить светимость нашей Галактики и при этом квазары в оптике выглядят звездообразными, практически точечными источниками. Квазары остаются оптически неразрешимыми объектами благодаря гигантскому космологическому расстоянию, на котором они находятся и тому, что область формирования излучения в десятки миллионов раз меньше линейных размеров самой галактики, в центре которой квазар находится.

Первоначально открытые как радиоисточники, сейчас квазары наблюдаются во всех диапазонах электромагнитного излучения от радио- до гамма-лучей. Однако до сих пор одним из наиболее информативных диапазонов наблюдений остается оптический. Это связано с тем, что ультрафиолетовые переходы с основного на первые возбужденные уровни атомов, ионов и молекул, формирующие спектральные детали на фоне континуального излучения, в результате космологического красного смещения попадают в оптический диапазон и могут наблюдаться наземными обсерваториями.

На Рис. 1 представлен характерный оптический спектр квазара. В качестве примера выбран наиболее исследованный в данной работе спектр квазара Q 1232+082. На фоне практически плоского континуального спектра (проведенного пунктирной линией) видны мощные широкие эмиссионные линии, формирующиеся в самом квазаре, в окрестности сверхмассивной черной дыры. Ширины этих линий могут достигать сотен ангстрем, что соответствует скоростям вплоть до 10 000 км/с. Центральная эмиссионная линия водорода $\text{Ly } \alpha$, по которой определяется красное смещение квазара z_{em} , делит его спектр на две части – “синюю”, находящуюся левее линии $\text{Ly } \alpha$ с меньшими длинами волн, и “красную”, правее и с большими длинами волн.

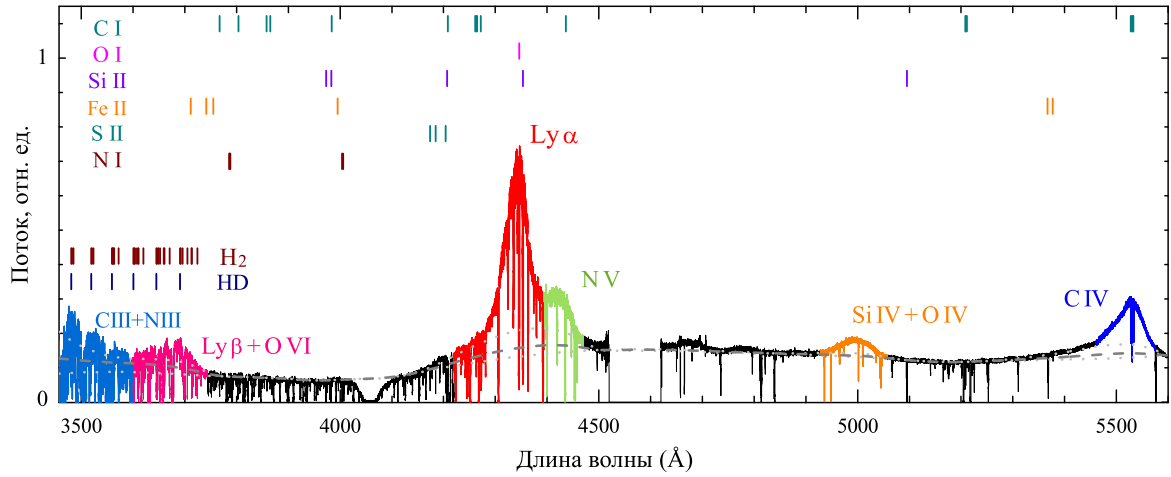


Рис. 1: Спектр квазара Q 1232+082, полученный на 8.2-метровом телескопе VLT с использованием спектрографа высокого разрешения UVES [24]. Эмиссионные линии в спектре квазара подписаны и выделены различными цветами. Положения абсорбционных линий различных атомов и ионов, а также молекул H_2 и HD, принадлежащих исследуемой абсорбционной системе $z_{\text{abs}} = 2.3377$, показаны вертикальными штрихами.

В заключение этого раздела представлен список исследовавшихся квазаров и описание конкретных условий их наблюдений. В основном спектры квазаров были получены в рамках наблюдательных программ различными независимыми астрофизическими группами, при этом часть дополнительных экспозиций были сняты в рамках совместных французско-российских научных программ (с участием диссертанта):

Наблюдения квазара Q 1232+082 проводились в рамках заявки “**Measure of the HD/ H_2 molecular ratio at high redshift**” на 8.2-метровом телескопе VLT/UVES (2003 г., период 69.A-0061(A), Service Mode, UT2-Kueyen, PI/CoI: Petitjean, Ivanchik, Ledoux, Rodriguez, Srianand, Varshalovich).

Наблюдения квазара Q 0405–443 проводились в рамках заявки “**Constraining the long term time variation of the ratio of the electron to proton masses, m_e/m_p** ” на 8.2-метровом телескопе VLT/UVES (2004 г., период 70.A-0017(A) UT2-Kueyen, PI/CoI: Petitjean, Rodriguez, Boisse, Ivanchik, Srianand, Varshalovich).

В п. 1.2 представлен краткий исторический обзор наблюдений молекул H_2 и HD в нашей Галактике. Упомянуты внеатмосферные наблюдения на спутнике “Коперник” (НАСА, США 1972 г.) и современные наблюдения специальной космической миссией FUSE (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer, 1999-2007 г.), одной из основных целей которой являлось исследование распространенности дейтерия.

В п. 1.3 представлен краткий исторический обзор наблюдений молекул H_2 и HD во внегалактических объектах. Так, в 1985 г. Левшаков и Варшалович [18], проанализировав спектр квазара *PKS 0528-250*, обнаружили в нем абсорбционную систему H_2 с красным смещением $z = 2.811$. Следующая (вторая) абсорбционная система H_2 с $z = 1.97$ была обнаружена только через 12 лет в 1997 г. Ге и Бечтольдом [11] в спектре квазара *Q 0013-004*. Столь малое количество и небыстрое обнаружение абсорбционных систем молекулярного водорода связано с тем, что для их идентификации необходимы спектры высокого разрешения и высокие отношения сигнала к шуму. Удовлетворяющие этим требованиям спектры стало возможным получать с вступлением в строй больших оптических телескопов (таких как 10-метровый Кекк и 8.2-метровый VLT) и существенной модификацией светоприемной аппаратуры (замена фотопластин на ПЗС(ССD)-матрицы).

Впервые линии молекул дейтерированного водорода HD на больших красных смещениях $z=2.33771$ были идентифицированы в спектре квазара Q 1232+082 [A5]. После дополнительных измерений спектра этого квазара на 8.2-метровом телескопе VLT, нами было определено относительное содержание молекул HD в обнаруженном облаке. Отношение лучевых концентраций молекул $N(\text{HD})/N(\text{H}_2)$ оказалось равным $(7.1_{-2.2}^{+3.7}) \times 10^{-5}$ [A29]. Полученное значение существенно превосходит аналогичные значения в нашей Галактике $(0.4 \div 4.0) \times 10^{-6}$ [17, 29]. К настоящему времени линии HD обнаружены уже в шести из 20 известных абсорбционных систем молекулярного водорода (см., например, [A31]).

В п. 1.4 обсуждаются особенности энергетической структуры уровней H, H_2 , HD, определяющие роли этих элементов в процессах звездообразования и формирования первых структур плотности межзвездной среды. Также обсуждаются наблюдательные проявления, связанные с особенностями энергетической структуры уровней H_2 , HD.

В п. 1.5 представлен детальный анализ абсорбционной системы H_2 с красным смещением $z = 2.33771$, которая была идентифицирована Ге и Бехтольдом в 1999 г. в спектре квазара Q 1232+082, полученном с использованием орбитальной обсерватории им. Хаббла (HST) [12]. В дальнейшем спектр этого квазара с более высоким разрешением был снят на спектрографе VLT/UVES [25].

Нами была инициирована программа дополнительных наблюдений квазара Q 1232+082, что позволило увеличить отношение сигнала к шуму более чем в два раза. Используя имеющиеся и новые экспозиции, мы выполнили независимый детальный анализ спектра этого квазара, в результате которого были получены оценки относительной распространенности молекул HD в ранней Вселенной [A29]. Также по-

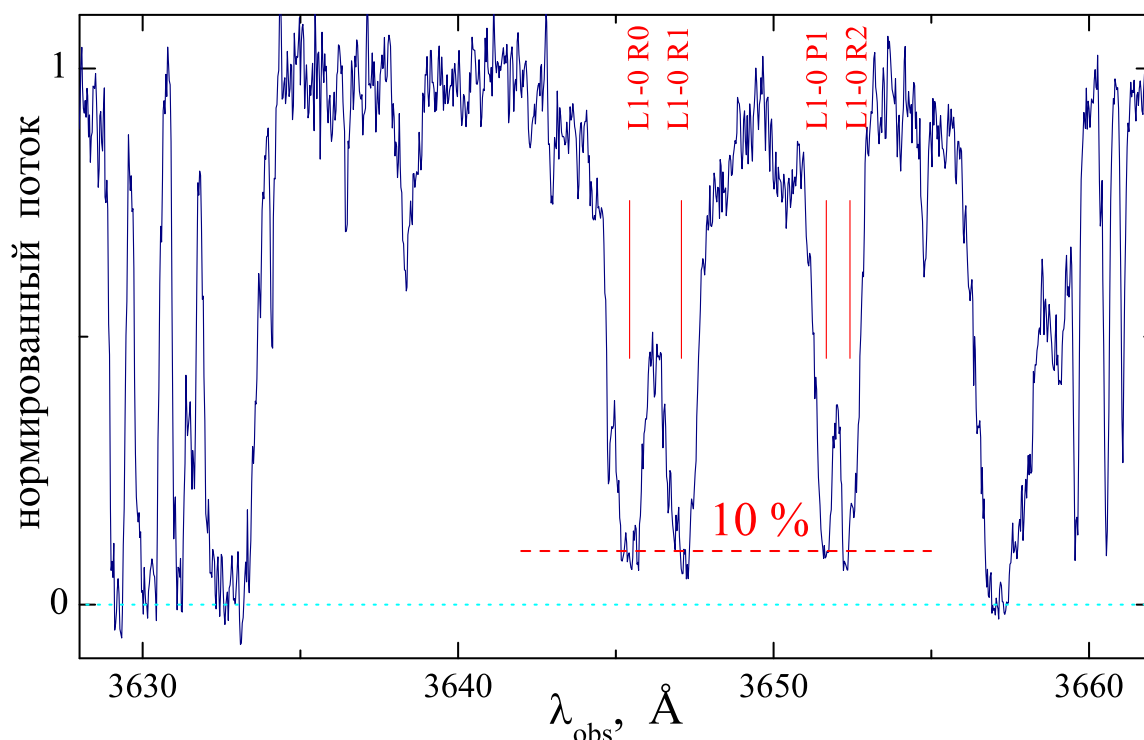


Рис. 2: Участок спектра квазара Q 1232+082 с абсорбционными линиями L 1-0 лаймановской полосы молекулярного водорода с красным смещением $z_{\text{abs}} = 2.33771$. Сильно насыщенные линии H_2 имеют ненулевой поток в центрах линий, в то время как несколько расположенных рядом насыщенных линий $\text{Ly-}\alpha$ доходят до нуля. Это свидетельствует о неполном покрытии области формирования излучения квазара абсорбционным облаком молекулярного водорода.

Этот анализ выявил некоторые интересные особенности исследуемой абсорбционной системы $z_{\text{abs}} = 2.33771$. Первая состоит в том, что часть излучения от квазара проходит мимо поглощающего облака, и это приводит к тому, что даже сильно насыщенные линии, с проявляющимся фойтовским профилем, имеют не равную нулю интенсивность в центре (см. Рис. 2). Детальный анализ ионизационной структуры облака также выявил дополнительные аргументы в пользу гипотезы неполного покрытия [A33]. Вторая особенность состоит в том, что линии, соответствующие возбужденным вращательным уровням H_2 существенно уширены по сравнению с линиями основных уровней H_2 , а также в сравнении с линиями HD и CI [A24]. Оба этих эффекта важны для построения адекватной физической модели межзвездных облаков и правильного определения лучевых концентраций элементов абсорбционной системы, поэтому они и их интерпретация подробно представлены в этом пункте.

В п. 1.6 представлен детальный, независимый анализ абсорбционной системы молекулярного водорода в спектре квазара Q 0812+320, ранее обнаруженной в работе [13]. Спектр квазара Q 0812+032 был получен на 10-метровом Keck I телескопе с использованием эшелле-спектрометра HIRES [35]. Нами была выполнена редукция и сложение этих экспозиций при помощи специально разработанного Бэрлоу (Т. Barlow) для спектрометра Keck/HIRES пакета программ MAKEE.

Линии молекулярного водорода в этой системе показывают наличие двух подсистем с красными смещениями $z_A = 2.626443(2)$ и $z_B = 2.626276(2)$, соответствующим относительному сдвигу ~ 14 км/с. Также в этой системе были отождествлены линии молекулы HD и, в отличие от работы [32] где авторы идентифицировали только 6 линий HD, соответствующих переходу с основного состояния ($J = 0$), нам удалось обнаружить 9 линий HD ($J = 0$). Более того, впервые для внегалактического объекта удалось идентифицировать линии, соответствующие первому возбужденному вращательному уровню ($J = 1$), что позволило оценить независимым способом объемную плотность в этом межзвездном облаке [A31].

В п. 1.7 представлен детальный анализ спектра квазара Q 1331+170, измеренного в диапазоне длин волн $2280 - 3370 \text{ \AA}$, который практически не пропускает атмосфера. Спектр был снят по программам 7271 в 1999 г. и 9172 в 2002–2003 гг. (рук. Бечтольд (J. Bechtold)) на орбитальной обсерватории им. Хаббла (HST). Благодаря этому удалось идентифицировать линии молекулярного водорода в абсорбционной системе с $z = 1.777$, попадающие в указанный ультрафиолетовый диапазон длин волн [8]. Общее суммарное время экспозиций составило 14.5 часов, что позволило получить отношение сигнала к шуму $S/N \sim 7$ при разрешении $R \sim 25000$. В результате детального анализа спектра квазара были идентифицированы линии HD в этой абсорбционной системе.

В п. 1.8 описывается новый метод определения локальной степени молекуляризации исследуемых облаков межзвездного газа. На практике нужно четко разделять интегральную и локальную степень молекуляризации облака. Для водорода они определяются соответственно

$$f_{\text{H}_2}^{\text{int}} = \frac{2N(\text{H}_2)}{N(\text{HI}) + 2N(\text{H}_2)}, \quad f_{\text{H}_2}^{\text{loc}} = \frac{2n(\text{H}_2)}{n(\text{HI}) + 2n(\text{H}_2)}, \quad (1)$$

где N , n – лучевая и объемные концентрации, соответственно. До сих пор в литературе указывается именно интегральная степень молекуляризации облаков $f_{\text{H}_2}^{\text{int}}$. Однако для понимания физических процессов протекающих в облаке важна именно локальная степень молекуляризации, характеризующая как количество частиц, так и их

состав. И если $f_{\text{H}_2}^{\text{int}}$ является величиной наблюдаемой, то значение $f_{\text{H}_2}^{\text{loc}}$ оценить не так и просто. Обнаружение систем, содержащих молекулы HD с заселенными уровнями $J = 0$ и $J = 1$, а также наличие в них нейтрального углерода CI, позволяет по относительным заселенностям этих элементов определять как объемную концентрацию газа, так и его степень молекуляризации. В двух исследуемых нами облаках, где были обнаружены переходы в линиях HD с $J = 1$, оцененная степень молекуляризации облаков оказалась близка к 1.

В п. 1.9 представлено развитие метода определения температуры реликтового излучения $T_{\text{СМВ}}(z)$ в ранние космологические эпохи. Метод основан на определении относительной заселенности уровней тонкого расщепления нейтрального углерода CI, линии которого наблюдаются в молекулярных облаках, находящихся на больших красных смещениях. Обнаруженные нами системы, в которых одновременно наблюдаются линии молекулы HD с заселенными уровнями $J = 0$ и $J = 1$, позволяют, потенциально, более точно определять $T_{\text{СМВ}}(z)$, поскольку появился дополнительный источник информации о локальной объемной плотности газа в облаке. Полученные оценки согласуются со стандартной зависимостью изменения температуры реликта: $T_{\text{СМВ}}(z) = T_0(1 + z)$.

Глава 2 посвящена проблеме первичного дейтерия. Определение относительной распространенности первичного дейтерия необходимо для оценки одного из ключевых параметров космологии – барионной плотности Вселенной Ω_b . По современным представлениям барионная плотность не превышает 5% от всего вещества заполняющего Вселенную.

Актуальность этой проблемы значимо возрастает в современную эпоху прецизионной космологии. С одной стороны, детально разработанная теория первичного нуклеосинтеза и наблюдения распространенности легких элементов (D, He, Li) приводят к оценке Ω_b на уровне $(4.3 \pm 0.2)\%$ [26], с другой стороны, имеется независимая оценка Ω_b , получаемая из анализа анизотропии реликтового излучения, – $(4.6 \pm 0.3)\%$ [16]. Тот факт, что эти оценки прекрасно согласуются в пределах ошибок, хотя и относятся к различным космологическим эпохам, позволяет говорить о потрясающем успехе Стандартной Космологической Модели.

В п. 2.2 представлены основные положения теории первичного нуклеосинтеза. Эпоха первичного нуклеосинтеза, на сегодняшний день, является самой ранней стадией эволюции Вселенной, для которой возможно сравнение теоретических предсказаний с наблюдениями. Относительное содержание образовавшихся в процессе первичного нуклеосинтеза реликтовых ядер можно рассчитать, поскольку скорости

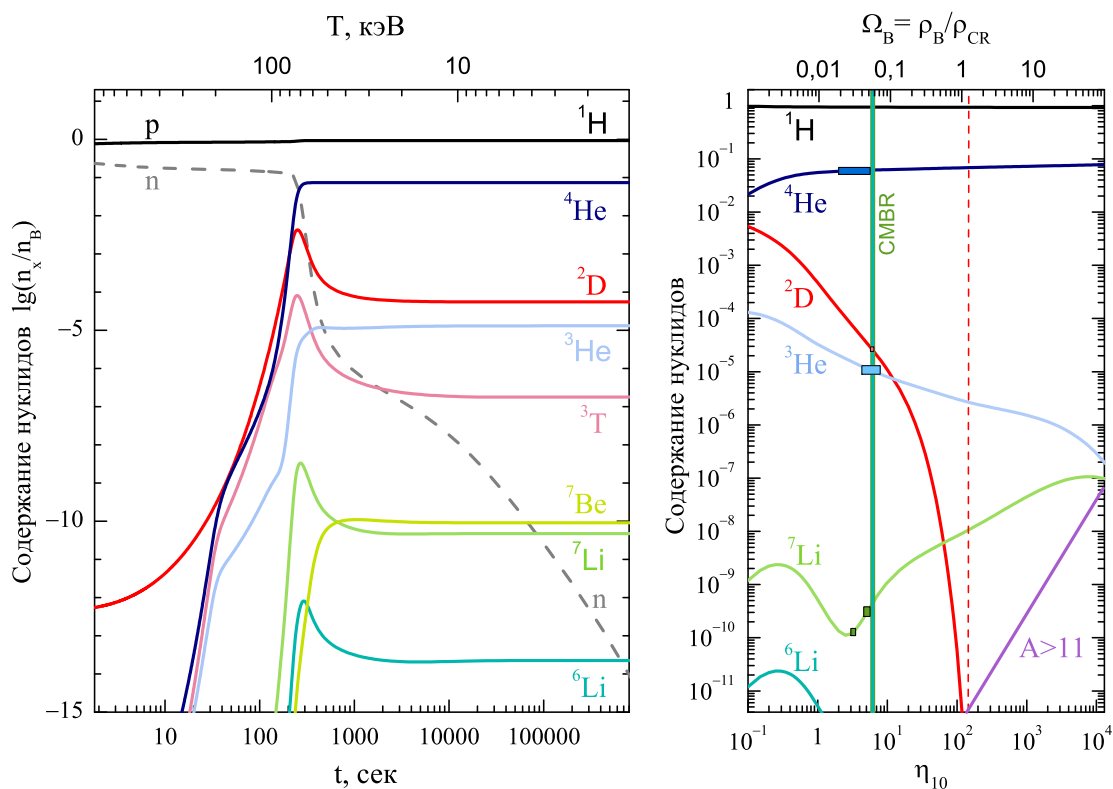


Рис. 3: Результаты расчета модели первичного нуклеосинтеза с использованием оригинальной численной модели, представленной в работах [3] и [A4]. Слева представлена зависимость распространенности легких элементов как функции времени, отсчитываемого от момента Большого Взрыва. Справа приведены содержания легких элементов в конце процессов первичного нуклеосинтеза как функция отношения концентраций барионов и фотонов n_b/n_γ (или Ω_b – верхняя шкала). Вертикальной полосой и прямоугольниками показаны результаты оценок Ω_b , получаемых из анализа анизотропии реликтового излучения и изменения распространенности изотопов.

всех соответствующих реакций хорошо известны. Единственным свободным параметром расчета является относительная концентрация барионов. Этот параметр можно определить путем сравнения результатов расчета с данными астрономических наблюдений по содержанию реликтовых ядер (см. Рис. 3).

В п. 2.3 описан основной метод оценки первичной распространенности дейтерия и его проблемы. До последнего времени относительное содержание D/H определяли только по атомным линиям HI и DI в спектрах поглощения квазаров. Однако такие измерения наталкиваются на ряд трудностей. Оптические спектры DI и HI практически одинаковы, лишь длины волн их линий сдвинуты на 0.027%. При этом концентрации этих атомов различаются на 4-5 порядков. Поэтому, если лучевая кон-

Таблица 1: Абсорбционные системы HD/H₂ в спектрах квазаров.

Квазар	z_{abs}	N(H ₂)	N(HD)	N(HD)/2N(H ₂)	Ссылка
*Q 1232+082	2.33771	19.68±0.09	15.53 ^{+0.17} _{-0.11}	(3.55 ^{+1.85} _{-1.10}) × 10 ⁻⁵	[A29]
*Q 0812+320	2.62644	19.93±0.04	15.70 ^{+0.04} _{-0.04}	(2.97 ^{+0.55} _{-0.55}) × 10 ⁻⁵	[A31]
	2.62638	18.82±0.37	12.98±0.22	1.45 × 10 ⁻⁶	
*Q 1331+170	1.77637	19.43±0.10	14.83±0.15	2.51 × 10 ⁻⁵	[A31]
	1.77670	19.39±0.11	14.61±0.20	1.66 × 10 ⁻⁵	
*Q 1439+113	2.41837	19.68±0.10	14.87±0.03	1.55 × 10 ⁻⁵	[A22]
J 1237+064	2.68956	19.21±0.13	14.48±0.05	1.86 × 10 ⁻⁵	[23]
†J 2123-005	2.05933	17.64±0.15	13.84±0.20	1.58 × 10 ⁻⁴	[20]

* Абсорбционные системы, в обнаружении которых диссертант является соавтором.

† Результаты анализа спектра данного квазара неоднозначны.

центрация HI мала, то линии DI вообще не видны. Если же лучевая концентрация водорода слишком велика, то линии HI насыщены, уширены и наплывают на линии DI (блендируют их). Более того, линии, идентифицированные как линии DI, в принципе могут быть порождены небольшим облаком HI,двигающимся относительно исследуемого облака со скоростью ~ 80 км/с, тем более, что на луче зрения действительно находится большое количество таких облаков,двигающихся с разными скоростями (так называемый “Ly- α лес”). Возможно, этими причинами объясняется существенный разброс полученных таким методом значений [26]. Более того, одни из первых оценок D/H давали значение, на порядок превышающее современные оценки этой величины [27, 37], что лишний раз подчеркивает сложности, с которыми сталкивается упомянутый метод.

Таких трудностей с идентификацией линий не возникают, если измерять относительное содержание не атомов DI и HI, а молекул HD и H₂, поскольку их спектры существенно различаются, а большинство узких абсорбционных линий не перекрываются.

В п. 2.4 представлены обнаруженные к настоящему моменту системы HD/H₂ (см. Таблицу 1). К настоящему моменту обнаружено 6 абсорбционных систем, содержащих молекулы HD. Только в двух из них (отмеченных жирным шрифтом, Таблица 1) измеренная лучевая концентрация превосходит значение $\text{Log}N(\text{HD}) > 15$, что может означать полную самоэкронировку этих систем и, как следствие, полную молекуляризацию водорода в них, что приводит к установлению универсального соотношения

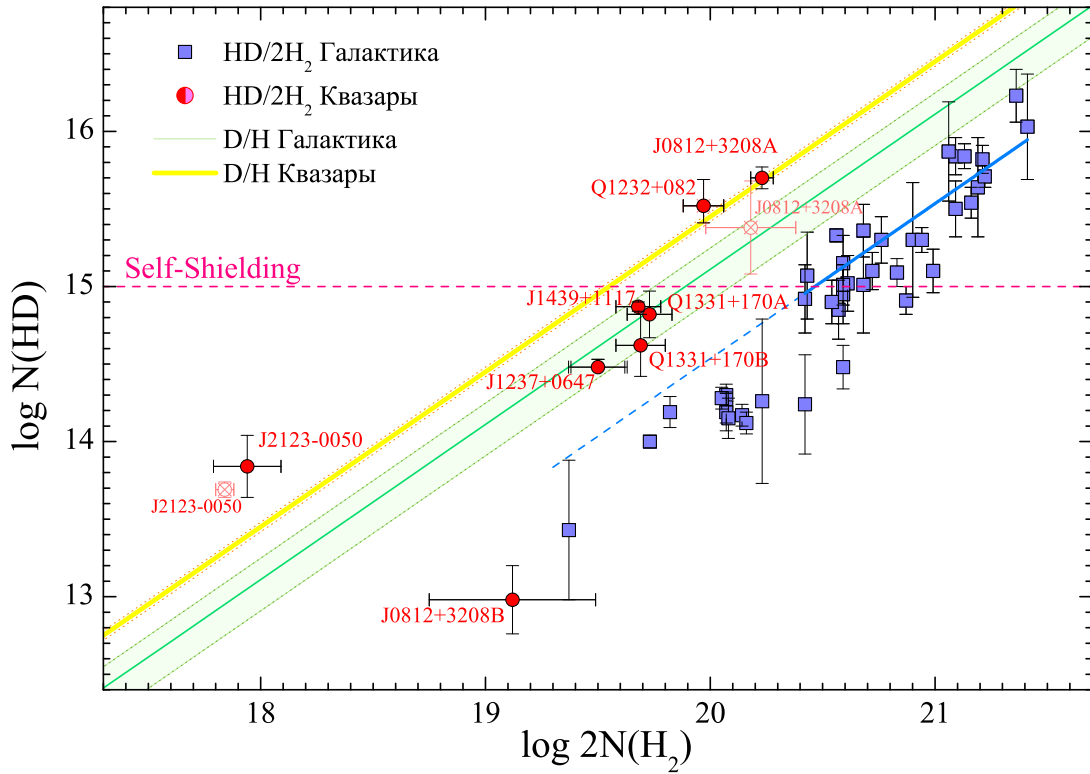


Рис. 4: Данные измерений лучевых концентраций молекул HD и H_2 . Измерения HD и H_2 в спектрах квазаров показаны кружками. Наклонными прямыми показаны лучевые концентрации, соответствующие средним значениям отношений D/H и HD/2H₂, для галактических [17, 29] и внегалактических систем [26, 19]. Квадратиками приведены измерения HD и H_2 для нашей Галактики [17, 29]. Горизонтальной пунктирной прямой отмечен уровень лучевой концентрации HD, превышение которой приводит к самоэкранировке молекул и увеличению степени молекуляризации газа. Две системы HD находятся выше этого уровня и могут быть использованы для оценок первичной распространенности дейтерия.

$D/H=HD/2H_2$ и возможности оценки первичной распространенности дейтерия.

На Рис. 4 показаны лучевые концентрации HD, H_2 , измеренные в межзвездных облаках нашей Галактики и абсорбционных системах квазаров. Наклонными прямыми показаны лучевые концентрации, соответствующие средним значениям отношений D/H и $HD/2H_2$, для галактических [17, 29] и внегалактических систем [26, 19]. В нашей Галактике отношение D/H , измеряемое по лучевым концентрациям атомарных линий DI и HI [19], систематически меньше среднего значения, полученного из анализа спектров квазаров [26]. В принципе, это может быть объяснено выгоранием дейтерия в звездах. Также видно, что между величинами D/H и $HD/2H_2$, измеряемыми в нашей Галактике, имеется существенное различие. Это может быть связано с тем, что в отличие от H_2 , молекулы HD не всегда экранированы от ультрафиолетового излучения, и поэтому дейтерий в меньшей степени молекуляризован. Еще одним объяснением недостатка молекулярной фракции HD может являться сложная химия молекулярных облаков, где дейтерий может эффективно входить в другие, более сложные молекулы, H_2O , NH_3 , HCN, полиароматические углеводороды и др. Особенности учета химии молекулярных облаков обсуждаются в п. 2.4.

В **заключение** этой главы отмечается, что анализ изученных молекулярных систем позволяет говорить об обнаружении космологического эволюционного эффекта – увеличения относительного содержания HD/H_2 в эпохи около 12 млрд. лет назад, по сравнению с величинами, измеряемыми в нашей Галактике в современную эпоху.

На основе независимого метода получена оценка барионной плотности Вселенной $\Omega_b = (4.1 \pm 0.5)\%$ [A31], которая согласуется с оценкой, полученной по результатам анализа анизотропии реликтового излучения $\Omega_b^{CMBR} = (4.6 \pm 0.3)\%$ [16].

Глава 3 посвящена еще одной проблеме, решаемой с помощью анализа спектров квазаров, – проблеме возможного космологического изменения фундаментальных физических констант.

Фундаментальные физические постоянные – важнейшие элементы современной физической картины мира. В стандартных моделях, описывающих строение материи на минимально доступных на сегодняшний день масштабах, а также строение и эволюцию всей Вселенной на максимально доступных наблюдениям расстояниях, инвариантность физических законов в различных пространственно-временных областях кажется фактом довольно очевидным. Более того, иногда это утверждение формулируется как принцип. Однако “странность” фундаментальных констант состоит в том, что они входят в известные законы природы без всякого объяснения их численных значений, и это было предметом раздумий многих выдающихся уче-

ных, таких как Эддингтон, Зоммерфельд, Борн и др. (см. исторический обзор [4]). По-видимому, первыми, кто высказал идею возможного изменения фундаментальных физических констант в процессе эволюции Вселенной были Милн (1935 г.) [22] и Дирак (1937 г.) [10]. В п. 3.1 представлена история развития проблемы непостоянства фундаментальных констант – от “гипотезы больших чисел”, предложенной Дираком, до теорий объединения фундаментальных взаимодействий с теоретически мотивированными идеями о непостоянстве фундаментальных физических констант (см. например, обзор Узана, 2011 г., [34]).

В п. 3.2 представлено современное состояние проблемы с непостоянством фундаментальных физических констант, которое можно охарактеризовать следующими положениями: (i) эффективные константы связи, характеризующие силы взаимодействий, меняются с энергией взаимодействия, (ii) константы могут меняться со временем в процессе космологической эволюции, (iii) значения констант могут не совпадать в разных пространственных областях.

Параграф 3.3 посвящен описанию экспериментальных и наблюдательных методов, используемых для исследования проблемы пространственно-временного отклонения фундаментальных констант, которые подразделяются на:

локальные тесты, связанные с лабораторными измерениями, геофизическими методами, с наблюдениями физических явлений в Солнечной системе и в Галактике, и **космологические тесты**, основанные на изучении спектров внегалактических объектов (квазаров, гамма-всплесков), а также на исследовании процессов происходивших, на ранних стадиях эволюции Вселенной, таких как первичная рекомбинация и первичный нуклеосинтез.

Параграф 3.4 посвящен определению верхнего предела на возможное космологическое изменение отношения масс протона и электрона $\mu = m_p/m_e$. Подробно разбирается метод определения возможного космологического отклонения $\mu = m_p/m_e$, предложенный в 1975 г. Томпсоном [30] и развитый в 1993 г. Варшаловичем и Левшаковым [1]. Метод основан на анализе длин волн молекулярного водорода, измеряемых в абсорбционных системах с большими красными смещениями. Энергии, соответствующие электронному, колебательному и вращательному возбуждению молекулы H_2 имеют существенно разные зависимости от приведенной массы молекулы. Поэтому сравнение длин волн различных электронно-колебательно-вращательных молекулярных линий, наблюдаемых в спектрах квазаров, с соответствующими лабораторными значениями, позволяет обнаружить изменение величины μ .

Количественный анализ такого рода вариаций можно провести, если для каждой из измеряемых линий известны величины K_i – коэффициенты чувствительности

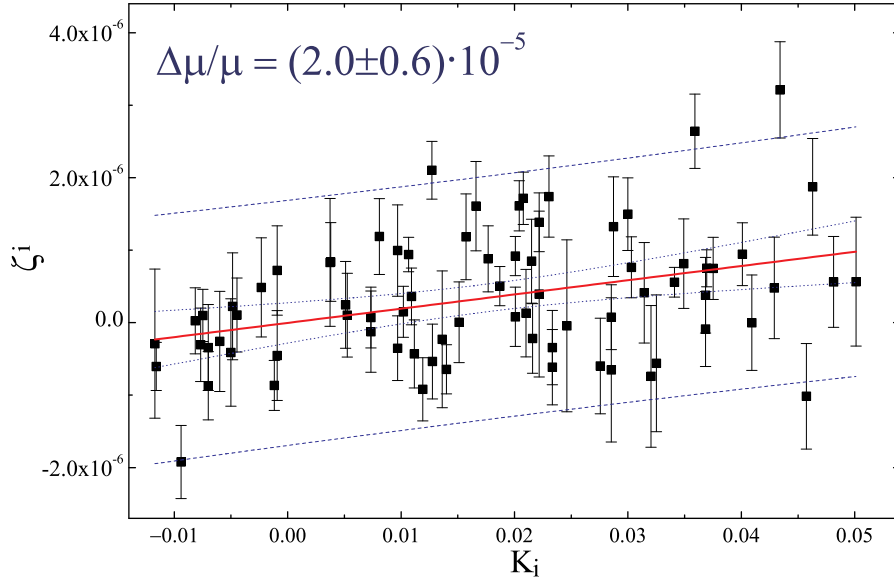


Рис. 5: Результат корреляционного анализа. По вертикальной оси отложены относительные отклонения приведенных красных смещений ζ_i , полученных из анализа i -ой линии, по горизонтальной оси отложены соответствующие им коэффициенты чувствительности K_i . Сплошная прямая - наилучший линейный фит.

длины волны λ_i по отношению к изменению величины μ . Формальное определение K_i можно записать в следующей форме:

$$K_i \equiv \frac{d \ln \lambda_i}{d \ln \mu} \quad (2)$$

Таким образом, если значение величины μ в раннюю космологическую эпоху z , когда формировался спектр поглощения квазара, отличалось от современного, то длина волны λ_i , наблюдаемая в этом спектре, была бы сдвинута в соответствии со следующим выражением:

$$\lambda_i = \lambda_i^0 (1 + z) \left(1 + K_i \frac{\Delta\mu}{\mu} \right). \quad (3)$$

Здесь, λ_i^0 – лабораторная длина волны i -го перехода. При этом красное смещение абсорбционной системы $z = z_{abs}$ приводит к одинаковому сдвигу всех линий, в то время как сдвиг, связанный с отклонением $\Delta\mu/\mu$, – индивидуален и пропорционален коэффициенту чувствительности конкретной линии K_i .

Таким образом, для определения возможного космологического отклонения $\Delta\mu/\mu$ необходимо иметь: (i) спектры квазаров, с абсорбционными системами H₂, (ii) лабораторные значения длин волн λ_i^0 , (iii) коэффициенты чувствительности K_i .

Нами были проанализированы две абсорбционные системы с $z_{abs} = 2.5947$ и $z_{abs} = 3.0249$ в спектрах квазаров $Q\ 0405-443$ и $Q\ 0347-382$, соответственно. Общее число отождествленных и принятых для анализа линий составило 82. Были изменены красные смещения всех этих линий. На Рис. 5 представлены их приведенные значения в соответствии с формулой

$$\zeta_i = \frac{z_i^{obs} - z_{abs}}{1 + z_{abs}} \quad (4)$$

В результате выполненного корреляционного анализа была получена оценка на возможное космологическое изменение отношения масс протона и электрона [A14, A16]:

$$\Delta\mu/\mu = (2.0 \pm 0.6) \times 10^{-5} \quad (5)$$

Полученная в 2005-2006 гг. оценка до сих пор остается актуальной, несмотря на восемь, выполненных позднее (2008-2011 гг.), независимых оценок. На рис. 6 представлен современный статус проблемы возможного космологического изменения отношения масс протона и электрона. Приведены результаты работ, в которых анализировались системы молекулярного водорода, наблюдаемые в спектрах квазаров с большими красными смещениями $z \sim 2-3$. Красной звездочкой показан результат полученный в 2005-2006 гг. [A14, A16]. Черные квадратики показывают результаты независимых групп [14, 31, 39, 40] двух квазаров $Q\ 0405-443$ и $Q\ 0347-382$, использовавшихся в наших работах. Голубые кружочки показывают оценки, выполненные по спектрам других квазаров [6, 14, 15, 20, 38]. Серая вертикальная полоса показывает 2σ -уровень перекрытия результатов.

В п. 3.5 обсуждаются результаты, представленные в этой главе, и перспективы дальнейших исследований проблемы возможного космологического изменения фундаментальных физических констант.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы, приведен список работ, опубликованных по теме диссертации, и список цитируемой литературы.

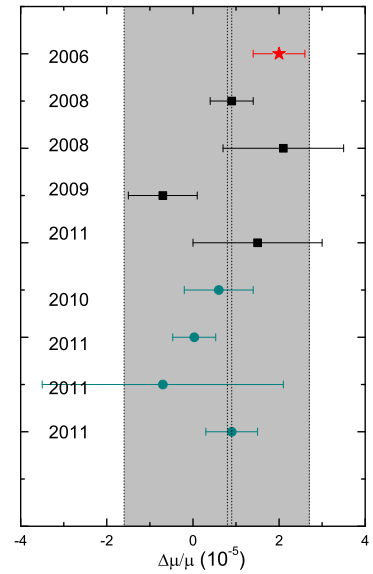


Рис. 6: Современный статус оценки возможного космологического изменения μ .

Основные выводы и результаты работы:

1. Выполнены исследования физических условий и химического состава вещества абсорбционных систем с большими красными смещениями $z \sim 2 - 3$, наблюдавшихся в спектрах высокого разрешения квазаров
Q 0347-382, Q 0405-443, Q 1232+082, Q 1439+112, Q 0812+320, Q 1331+170.
Впервые обнаружен и детально исследован эффект неполного покрытия квазара *Q 1232+082* ($z_{\text{em}} = 2.57$) космологически удаленным от квазара абсорбционным облаком ($z_{\text{abs}} = 2.34$). Эффект проявляется в наличии остаточного потока излучения в абсорбционном спектре объекта. Показано, что неучет этого эффекта приводит к существенно заниженной оценке лучевой концентрации молекул H_2 в межзвездном облаке и построению неадекватной физической модели абсорбционной системы.
2. Впервые отождествлены линии молекул HD в межзвездных облаках, находящихся на космологических расстояниях ($z_{\text{abs}} = 2.33771$, *Q 1232+082*). На сегодняшний день диссертант является соавтором открытия четырех из шести идентифицированных систем HD/ H_2 . Анализ известных систем позволяет говорить об обнаружении космологического эволюционного эффекта – увеличения относительного содержания HD/ H_2 в эпохи около 12 млрд. лет назад, по сравнению с величинами, измеряемыми в нашей Галактике в современную эпоху.
3. Предложен независимый метод оценки относительного содержания первичного дейтерия D/H, на основе оценки относительной распространенности молекул HD/ H_2 в облаках, существовавших на ранних стадиях эволюции Вселенной. На основе этого метода получена независимая оценка барионной плотности Вселенной $\Omega_b = (4.1 \pm 0.5)\%$, которая согласуется с оценкой, полученной по результатам анализа анизотропии реликтового излучения $\Omega_b^{\text{CMBR}} = (4.6 \pm 0.3)\%$.
4. Получена оценка возможного космологического изменения отношения масс протона и электрона $\mu = m_p/m_e$ для эпох, соответствующих $z \sim 2 - 3$:
$$\Delta\mu/\mu = (2.0 \pm 0.6) \times 10^{-5}.$$
Полученная в 2005-2006 гг. оценка до сих пор остается актуальной, несмотря на восемь, выполненных позднее (2008-2011 гг.), независимых оценок.

Публикации по теме диссертации

- A1. Д.А. Варшалович, А.В. Иванчик, А.Ю. Потехин
*“Фундаментальные физические константы:
одинаковы ли их значения в различных областях пространства-времени?”*
Журнал Технической Физики, т. 69, No. 9, с. 1-5, 1999
- A2. D.A. Varshalovich, A.Y. Potekhin, A.V. Ivanchik
“Testing cosmological variability of fundamental constants”.
"X-ray and Inner-shell Processes-18th International AIP Conference,
Eds. R.W. Dunford et al., v. 506, pp. 503-511, 2000
- A3. A.V. Orlov, A.V. Ivanchik, D.A. Varshalovich
*“Primordial Nucleosynthesis:
Effects of possible variations of fundamental physical constants”.*
Astron. & Astrophys. Transactions, v. 19 (3-4), p. 375-384, 2000
- A4. А.В. Иванчик, А.В. Орлов, Д.А. Варшалович
*“Влияние возможного отклонения значений фундаментальных
физических констант на первичный нуклеосинтез”.*
Письма в Астрономический Журнал, т. 27, с. 723-734, 2001
- A5. Д.А. Варшалович, А.В. Иванчик, П. Петижан, Р. Шриананд, С. Леду
“Молекулярные линии HD в абсорбционной системе с красным смещением $z=2.3377$ ”.
Письма в Астрономический Журнал, т. 27, с. 803-806, 2001
- A6. D.A. Varshalovich, A.Y. Potekhin, A.V. Ivanchik
“Problems of cosmological variability of fundamental physical constants”.
Physica Scripta, v. T95, p. 76-80, 2001
- A7. D. Varshalovich, A. Potekhin, A. Ivanchik
“Puzzle of the constancy of fundamental constants”.
Comments on Modern Physics 2(5), D223-D232, 2001
- A8. А.В. Иванчик, Э. Родригес, П. Петитжан, Д.А. Варшалович
*“Меняются ли фундаментальные константы
в процессе космологической эволюции?”*
Письма в Астрономический журнал, т. 28, с. 483-488, 2002
- A9. A. Ivanchik, P. Petitjean, E. Rodriguez, D. Varshalovich
*“Does the proton-to-electron mass ratio $\mu = m_p/m_e$ vary
in the course of cosmological evolution?”*
Astrophysics and Space Science, v. 283, pp. 583-588, 2003

- A10. D. Varshalovich, A. Ivanchik, A. Orlov, A. Potekhin, P. Petitjean
“Current status of the Problem of Cosmological Variability of Fundamental Physical Constants”.
 Lecture Notes in Physics, v. 627: Precision Physics of Simple Atomic Systems.
 Eds. S Karshenboim & V. Smirnov, pp. 199-209, 2003
- A11. D.A. Varshalovich, A.V. Ivanchik, A.Y. Potekhin
“Astrophysical Testing Cosmological Variability of Fundamental Constants”.
 Proceedings of the III Sakharov Conference on Physics,
 World Scientific, v. 1, pp. 486-491, 2003
- A12. P. Petitjean, A. Ivanchik, R. Srianand, B. Aracil, D. Varshalovich,
 H. Chand, E. Rodriguez, C. Ledoux, P. Boisse
“Time dependence of the proton-to-electron mass ratio”.
 Comptes Rendus Physique, v. 5(3), pp. 411-415, APR, 2004
- A13. E.E. Kholupenko, A.V. Ivanchik and D.A. Varshalovich
“CMBR distortion concerned with recombination of the primordial hydrogen plasma”.
 Gravitation and Cosmology, Vol. 11, No.1-2(41-42), pp. 161-165, 2005
- A14. A. Ivanchik, P. Petitjean, D. Varshalovich, B. Aracil, R. Srianand,
 H. Chand, C. Ledoux, and P. Boisse
*“A new constraint on the time dependence of the proton-to-electron mass ratio.
 Analysis of the Q 0347-383 and Q 0405-443 spectra”*.
 Astronomy & Astrophysics, v. 440, No.1, pp. 45-52, 2005
- A15. В.В. Мешков, А.В. Столяров, А.В. Иванчик, Д.А. Варшалович
*“Неадиабатический ab initio расчет коэффициентов чувствительности
 $X^1\Sigma^+_g \rightarrow B^1\Sigma^+_u; C^1\Pi_u$ систем H_2 к изменению отношения
 масс протона и электрона”*.
 Письма в ЖЭТФ, т. 83, вып. 8, с. 363-366, 2006
- A16. E. Reinhold, R. Buning, U. Hollenstein, A. Ivanchik, P. Petitjean, and W. Ubachs
*“Indication of a Cosmological Variation of the Proton-Electron Mass Ratio
 Based on Laboratory Measurement and Reanalysis of H_2 Spectra”*.
 Phys.Rev.Lett., v. 96, p. 151101, 2006
- A17. Е.Е. Холупенко, А.В. Иванчик
“Двух-фотонные переходы в процессе рекомбинации водорода во Вселенной”.
 Письма в Астрономический Журнал, т. 32, No. 12, с. 883-892, 2006
- A18. E.E. Kholupenko, A.V. Ivanchik, and D.A. Varshalovich
“Rapid He II \rightarrow He I recombination and radiation arising from this process”.
 MNRAS, v. 378, L39-L43, 2007

- A19. P. Petitjean, C. Ledoux, R. Srianand, P. Noterdaeme, A. Ivanchik
“Molecular Hydrogen at High Redshift and the Variation with Time of the Electron-to-proton Mass Ratio, $\mu = m_e/m_p$ ”.
 Precision Spectroscopy in Astrophysics. Eds. by N.C. Santos et al.,
 Garching, Germany, pp. 73-76, 2008
- A20. Е.Е. Холупенко, А.В. Иванчик, Д.А. Варшалович
“Рекомбинация первичной гелиевой плазмы HeII-HeI с учетом влияния нейтрального водорода.”
 Письма в Астрономический Журнал, т. 34, No. 11, с. 803-818, 2008
- A21. A. Ivanchik, D. Varshalovich, and P. Petitjean
“Current status of astronomical observations on possible cosmological variations of the proton-to-electron mass ratio $\mu = m_p/m_e$ ”.
 Eur. Phys. J., Special Topics, v. 163, pp.191-196, 2008
- A22. P. Noterdaeme, P. Petitjean, C. Ledoux, R. Srianand, and A. Ivanchik
“HD molecules at high redshift. A low astration factor of deuterium in a solar-metallicity DLA system at $z = 2.418$ ”.
 Astronomy and Astrophysics, v. 491, pp. 397-400, 2008
- A23. Д.А. Варшалович, А.В. Иванчик, П. Петижан
“Современное состояние астрономических наблюдений по проблеме возможного космологического изменения отношения масс протона и электрона”.
 Труды Института прикладной астрономии РАН, вып. 18, с. 92-93, 2008
- A24. С.А. Балашев, Д.А. Варшалович, А.В. Иванчик
“Направленное излучение и фотодиссоционные области в облаках молекулярного водорода”.
 Письма в Астрономический Журнал, т. 35, No. 3, с. 171-188, 2009
- A25. P.Petitjean, P.Noterdaeme, R.Srianand, C.Ledoux, A.Ivanchik, and N.Gupta
“Searching for places where to test the variations of fundamental constants”.
 Memorie della Societa Astronomica Italiana, v. 80, pp. 859-863, 2009
- A26. P.Petitjean, R.Srianand, H.Chand, A.Ivanchik, P.Noterdaeme, N.Gupta
“Constraining Fundamental Constants of Physics with Quasar Absorption Line Systems”.
 Space Science Reviews, v. 148, pp. 289-300, 2009
- A27. Д.А. Варшалович, А.В. Иванчик, С.А. Балашев, П. Петижан
“Первичный нуклеосинтез дейтерия и содержание молекул HD/H2 в межзвездных облаках, существовавших 12 млрд. лет назад”.
 Успехи физических наук, т. 180, No. 4, с. 415-419, 2010
- A28. Е.Е. Kholupenko, A.V. Ivanchik, and D.A. Varshalovich
“Effect of radiative feedbacks for resonant transitions during cosmological recombination”.
 Phys. Rev. D 81, pp.083004(1-9), 2010

- A29. A.V. Ivanchik, P. Petitjean, S.A. Balashev, R. Srianand, D.A. Varshalovich, C. Ledoux, and P. Noterdaeme
“HD molecules at high redshift: the absorption system at $z=2.3377$ towards Q 1232+082”.
MNRAS, v. 404, pp. 1583-1590, 2010
- A30. P. Petitjean, P. Noterdaeme, R. Srianand, C. Ledoux, A. Ivanchik, N.Gupta
“Searching for places where to test the variations of fundamental constants”.
Proceedings of the International Astronomical Union
Highlights of Astronomy, Volume 5, p. 317, 2010
- A31. С.А. Балашев, А.В. Иванчик, Д.А. Варшалович
“Молекулярные облака HD/H₂ в ранней Вселенной. Проблема первичного дейтерия”.
Письма в Астрономический Журнал, т. 36, No. 11, с. 803-815, 2010
- A32. E.E. Kholupenko, A.V. Ivanchik, S.A. Balashev and D.A. Varshalovich
“Advanced three-level approximation for numerical treatment of cosmological recombination”.
MNRAS, v. 417, pp. 2417-2425, 2011
- A33. S.A. Balashev, P. Petitjean, A.V. Ivanchik, C. Ledoux, R. Srianand, P. Noterdaeme and D.A. Varshalovich
“Partial coverage of the broad-line region of Q1232+082 by an intervening H₂-bearing cloud”.
MNRAS, v. 418, pp. 357-369, 2011

Литература, цитируемая в автореферате.

- [1] Варшалович Д.А., Левшаков С.А., *Письма в ЖЭТФ* **58**, 237 (1993)
- [2] Горбунов Д.С., Рубаков В.А., “Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва.”, М.: Издательство ЛКИ (2008)
- [3] Орлов А.В., Варшалович Д.А., Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН No.1719 (1998)
- [4] Томилин К.А., “Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах”, М.: Физматлит (2006)

- [5] Abgrall H., Roueff E., Launay F., et al., *J. Mol. Spec.* **157**, 512 (1993)
- [6] Bagdonaite J., Murphy M., Kaper L., et al., *MNRAS* DOI:10.1111/j.1365-2966.2011.20319.x (2011)
- [7] Coc A., *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **611**, 224, (2009)
- [8] Cui J., Bechtold J., Ge J., et al., *ApJ* **633**, 649 (2005)
- [9] Cyburt R.H., Fields B.D., Olive K.A., *J. of Cosmology and Astroparticle Phys.* **11**, 012 (2008)
- [10] Dirac P.A.M., *Nature* **139**, 323 (1937)
- [11] Ge J., Bechtold J., *ApJ Lett.* **477**, L73 (1997)
- [12] Ge J., Bechtold J., *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* **156**, 121 (1999)
- [13] Jorgenson R.A., Wolfe A.M., Prochaska J.X., et al., *ApJ* **704**, 247 (2009)
- [14] King J.A., Webb J.K., Murphy M.T., et al., *PRL* **101**, 251304 (2008)
- [15] King J.A., Murphy M.T., Ubachs W., et al., *MNRAS* **417**, 3010 (2011)
- [16] Komatsu E., Smith K.M., Dunkley J., et al., *ApJ Suppl.* **192**, article id. 18 (2011)
- [17] Lacour S., et al., *Astron.&Astrophys.* **430**, 967 (2005)
- [18] Levshakov S.A., Varshalovich D.A., *MNRAS* **212**, 517 (1985)
- [19] Linsky J.L., et al., *ApJ* **647**, 1106 (2006)
- [20] Malec A.L., Buning R., Murphy M.T., et al., *MNRAS* **403**, 1541 (2010)
- [21] McGreer I.D., G.L. Bryan G.L., *ApJ* **685**, 8 (2008)
- [22] Milne E.A., “Relativity, gravitational and world structure”, Oxford, Clarendon Press, 292 (1935)

- [23] Noterdaeme P., Petitjean P., Ledoux C., et al., *Astron.&Astrophys.* **523**, A80 (2010)
- [24] D’Odorico S., Cristiani S., Dekker H., et al., *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Ed. by J. Bergeron, **4005**, 121 (2000)
- [25] Petitjean P., Srianand R., Ledoux C., *Astron.&Astrophys.* **364**, L26 (2000)
- [26] Pettini M., Zych B.J., Murphy M.T., et al., *MNRAS* **391**, 1499 (2008)
- [27] Rugers M., Hogan C.J., *ApJ Lett.* **459**, L1 (1996)
- [28] Shchekinov Yu.A., Vasiliev E.O., *MNRAS* **368**, 454 (2006)
- [29] Snow T.P., et al., *ApJ* **688**, 1124 (2008)
- [30] Thompson R., *Astrophysical Letters* **16**, 3 (1975)
- [31] Thompson R., Bechtold J., Black J., *ApJ* **703**, 1648 (2009)
- [32] Tumlinson J., Malec A.L., Carswell R.F., et al., *ApJL* **718**, L156 (2010)
- [33] Ubachs W., Reinhold E., *PRL* **92**, 101302 (2004)
- [34] Uzan J.-P., *Living Reviews in Relativity* **14** (2011)
- [35] Vogt S.S., Allen S.L., Bigelow B.C., et al., *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Ed. by D.L. Crawford & E.R. Craine, **2198**, 362 (1994)
- [36] Wong Y.W., Moss A., Scott D., *MNRAS* **386**, 1023 (2008)
- [37] Webb J.K. et al., *Nature* **388**, 250 (1997)
- [38] F. van Weerdenburg, Murphy M., Malec A., et al., *PRL* **106** 180802 (2011)
- [39] Wendt M. & Reimers D., *Eur. Phys. J. Special Topics* **163**, 197 (2008)
- [40] Wendt M. & Molaro P., *Astron.&Astrophys.* **526**, A96 (2011)
- [41] Wright E.L., Morton D.C., *ApJ* **227**, 483 (1979)