

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

на правах рукописи

Клименко Вячеслав Витальевич

Исследование физических условий в облаках
молекулярного водорода с большими красными
смещениями

Специальность:

01.03.02 - Астрофизика и звездная астрономия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
Д. А. Варшалович

Санкт-Петербург

2016

Оглавление

| | |
|---|-----------|
| Введение | 6 |
| 1 Абсорбционные системы H_2 в спектрах квазаров обзора SDSS | 16 |
| 1.1 Введение | 16 |
| 1.1.1 Оптические спектры квазаров | 16 |
| 1.1.2 Абсорбционные системы молекулярного водорода | 20 |
| 1.1.3 Статистика наблюдений абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями | 21 |
| 1.2 Спектры квазаров каталога SDSS. Первичный отбор спектров | 24 |
| 1.3 Процедура поиска абсорбционных систем H_2 | 27 |
| 1.3.1 Построение континуума | 27 |
| 1.3.2 Процедура поиска абсорбционных систем H_2 | 29 |
| 1.3.3 Тестирование процедуры поиска | 35 |
| 1.4 Оценка надежности кандидатов | 36 |
| 1.4.1 Моделирование Монте-Карло | 37 |
| 1.4.2 Использование контрольного набора | 39 |
| 1.4.3 Оценка вероятности детектирования H_2 системы в спектре квазара | 45 |
| 1.5 Кандидаты в абсорбционные системы H_2 | 47 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1.6 | Подтверждение кандидатов. Наблюдения с высоким разрешением на телескопе VLT. | 52 |
| 1.6.1 | Высоко насыщенная абсорбционная система H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.786$ в спектре квазара J 0843+0221 | 52 |
| 1.6.2 | Наблюдения кандидатов на телескопе VLT с использованием спектрографа X-shooter | 54 |
| 1.7 | Выводы | 55 |
| 2 | Распространенность молекул HD на больших красных смещениях | 58 |
| 2.1 | Введение | 58 |
| 2.2 | Абсорбционная система H_2 в спектре квазара Q 0528–2508 | 61 |
| 2.2.1 | Данные наблюдений | 61 |
| 2.2.2 | Анализ спектра | 63 |
| 2.2.3 | Система молекулярного водорода | 64 |
| 2.2.4 | Линии молекул HD | 65 |
| 2.3 | Абсорбционная система H_2 в спектре квазара J 2123–0050 | 67 |
| 2.3.1 | Данные наблюдений | 67 |
| 2.3.2 | Анализ спектра | 69 |
| 2.3.3 | Абсорбционная система H_2 | 70 |
| 2.3.4 | Молекулы HD | 71 |
| 2.3.5 | Нейтральный углерод | 74 |
| 2.3.6 | Сравнение результатов анализов системы H_2 | 75 |
| 2.3.7 | Отношение $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$ | 76 |
| 2.4 | Абсорбционная система в спектре квазара J 2100–0641 | 78 |
| 2.4.1 | Данные наблюдений | 78 |
| 2.4.2 | Анализ спектра | 78 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.4.3 | Линии молекул H_2 | 80 |
| 2.4.4 | Линии молекул HD | 80 |
| 2.5 | Статистика измерений отношения $\text{HD}/2\text{H}_2$ | 81 |
| 2.6 | Заключение | 82 |
| 3 | Эффект неполного покрытия для абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями | 86 |
| 3.1 | Введение | 86 |
| 3.2 | Неполное покрытие области формирования континуального излуче- ния квазара Q 0528–2508 абсорбционной системой H_2 | 90 |
| 3.2.1 | Коррекция уровня нулевого потока | 91 |
| 3.2.2 | Остаточный поток в линиях H_2 | 93 |
| 3.2.3 | Зависимость остаточного потока в линиях H_2 от значения λf | 97 |
| 3.2.4 | Анализ абсорбционных линий H_2 с учетом фактора покрытия | 100 |
| 3.2.5 | Сравнение результатов анализов абсорбционной системы H_2 | 102 |
| 3.2.6 | Интерпретация | 103 |
| 3.3 | Неполное покрытие области формирования излучения квазара J 2123–0050 абсорбционной системой H_2 | 106 |
| 3.3.1 | Корректировка уровня нулевого потока | 107 |
| 3.3.2 | Неполное покрытие в линиях H_2 | 107 |
| 3.3.3 | Неполное покрытие в линиях C I | 110 |
| 3.4 | Неполное покрытие области формирования излучения квазара J 2100–0641 абсорбционной системой H_2 | 111 |
| 3.4.1 | Неполное покрытие в линиях H_2 | 111 |
| 3.5 | Заключение | 111 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4 | Анализ физических условий в холодной фазе межзвездной среды в суб-DLA системе с $z_{\text{abs}} = 2.059$ в спектре J 2123–0050 | 115 |
| 4.1 | Введение | 115 |
| 4.2 | Методы определения физических условий в молекулярных облаках | 118 |
| 4.2.1 | Анализ диаграммы населенностей вращательных уровней молекул H_2 | 119 |
| 4.2.2 | Анализ диаграммы населенностей вращательных уровней молекул HD | 122 |
| 4.2.3 | Анализ населенностей уровней тонкой структуры атомов нейтрального углерода | 123 |
| 4.3 | Физические условия в абсорбционной системе H_2 в спектре J 2123–0050124 | |
| 4.3.1 | Анализ компоненты А | 125 |
| 4.3.2 | Анализ компоненты В | 130 |
| 4.3.3 | Дополнительная компонента в линиях C I | 132 |
| 4.3.4 | Моделирование структуры облака с помощью кода Meudon PDR | 133 |
| 4.3.5 | Моделирование облака J 2123–0050 А | 135 |
| 4.3.6 | Моделирование облака J 2123–0050 В | 141 |
| 4.3.7 | Моделирование ионизационной структуры суб-DLA системы с помощью кода CLOUDY | 143 |
| 4.4 | Заключение | 145 |
| 5 | Содержание нейтрального хлора в облаках молекулярного водорода с большими красными смещениями | 147 |
| 5.1 | Введение | 147 |
| 5.2 | Абсорбционный спектр C I | 149 |

| | | |
|-------|--|------------|
| 5.3 | Данные анализа | 149 |
| 5.4 | Спектроскопический анализ | 150 |
| 5.5 | Результаты | 151 |
| 5.5.1 | Модель структуры молекулярного облака | 155 |
| 5.5.2 | Металличность газа в молекулярном облаке | 156 |
| 5.6 | Заключение | 159 |
| | Заключение | 161 |
| | Список литературы | 165 |

Введение

Межзвездная среда (МС) заполняет пространство между звездами и содержит значительно количество массы вещества в галактиках. Структура МС состоит из нескольких фаз: это горячая ионизованная среда с $T \sim 10^6$ К, горячая нейтральная среда с $T \sim 10^4$ К, холодная нейтральная среда с $T \lesssim 100$ К. Также значительная часть газа содержится в диффузных, полупрозрачных и плотных молекулярных облаках. Известно, что фазы МС взаимодействуют друг с другом, а объемное и массовое отношение этих фаз определяет структуру и эволюцию галактик.

Физические условия в МС зависят от ряда параметров: это интенсивность фона ультрафиолетового излучения, интенсивность фона космических лучей, относительное содержание тяжелых элементов в среде (Be, Li, C, N, O, Fe и др.), содержание межзвездной пыли, частота взрывов сверхновых и др. [1, 2]. Значения этих параметров определяются, главным образом, тем, как происходит процесс звездообразования в галактиках. Наблюдения показывают, что в ходе развития Вселенной темп звездообразования менялся и достигал максимального значения при $z \sim 2$ [3]. Известно, что звезды образуются в ядрах плотных молекулярных облаков (с $T \sim 10 - 20$ К), где достигается условие гравитационного коллапса [4]. Исследование МС на больших красных смещениях и, в частности, определение физических условий в диффузных молекулярных облаках в галактиках важно для понимания того, как происходило формирование звезд в ранней Вселенной.

Один из методов анализа различных фаз МС в галактиках с большими красными смещениями – это спектральный анализ УФ линий поглощения атомов, ионов и молекул. Такие линии, ассоциированные с облаками, находящимися на боль-

ших красных смещениях $z > 1.7$, детектируются в оптических спектрах квазаров и спектрах послесвечения гамма-всплесков. Метод имеет ряд преимуществ за счет высокого спектрального разрешения ($R = \lambda/\Delta\lambda \approx 50\,000 - 100\,000$ или $\delta v \approx 3 - 6$ км/с), которое достигается в наблюдениях на крупнейших современных оптических телескопах Very Large Telescope и Keck. Это позволяет в деталях исследовать скоростную структуру, ионизационную структуру и физические условия в компонентах абсорбционных систем. Этот метод существенно отличается от метода исследования галактик с большими красными смещениями с помощью анализа эмиссионных линий CO, C II и др., с помощью которого можно определять интегральные характеристики системы в целом. Абсорбционные системы с лучевой концентрацией $N_{\text{HI}} > 2 \times 10^{20}$ см⁻² называются демпфированными Лайман-альфа системами атомарного водорода (DLAs, [5]). Считается, что DLA системы представляют собой попавшие на луч зрения диски или гало галактик с радиусом несколько десятков тысяч свет. лет [6]. Одним из подтверждений, что вещество в DLA системах относится к МС, является детектирование ассоциированных линий поглощения молекул [7]. Анализ большинства DLA систем позволяет изучать горячую нейтральную фазу МС [8]. Холодная и плотная фаза может быть изучена с помощью анализа абсорбционных линий молекул H₂, HD, CO и атомов C I [9].

Сказанное выше обуславливает актуальность темы диссертации.

Цель работы – исследование физических условий и химического состава вещества в холодной фазе нейтральной межзвездной среды в галактиках с большими красными смещениями.

1. Поиск абсорбционных систем молекулярного водорода с большими красными смещениями $z = 2 - 5$ в спектрах квазаров обзора Sloan Digital Sky Survey (SDSS).
2. Спектроскопический анализ абсорбционных систем молекулярного водорода в спектрах квазаров, полученных с высоким разрешением на крупнейших оптических телескопах VLT и Keck. Определение лучевых концентраций и

распространенностей элементов в абсорбционных системах молекулярного водорода с большими красными смещениями.

3. Определение физических условий в абсорбционных системах молекулярного водорода с большими красными смещениями. Моделирование структуры облаков молекулярного водорода.

Научная новизна

1. Разработан метод поиска абсорбционных систем молекулярного водорода с большими красными смещениями $z = 2-5$ в спектрах квазаров обзора SDSS.
2. Впервые выполнено детектирование неполного покрытия области формирования континуального излучения квазара облаком молекулярного водорода с большим красным смещением.
3. Идентифицирована абсорбционная система H_2 с $z = 3.09$ в спектре квазара J 2100–0641 и ассоциированные с этой системой линии поглощения молекул HD.
4. Определены физические условия в абсорбционной системе H_2 с $z = 2.06$ в спектре квазара J 2123–0050.
5. Выполнен систематический поиск абсорбционных линий нейтрального хлора (Cl I), ассоциированных с абсорбционными системами H_2 с большими красными смещениями. Показано, что отношение Cl I/ H_2 в системах с большими красными смещениями такое же, что и в диффузных атомарных облаках Галактики

Научная и практическая значимость работы

В диссертации представлен новый метод поиска абсорбционных систем молекулярного водорода с большими красными смещениями в спектрах квазаров обзора SDSS. Предложенный метод является эффективной заменой слепого метода поиска абсорбционных систем H_2 в спектрах квазаров высокого разрешения. Это

позволит значительно сократить ценное наблюдательное время крупнейших телескопов для поиска таких систем. Метод был применен к каталогам спектров квазаров SDSS-II Data Release 7 (DR 7) и SDSS-III DR 9, и были отобраны 23 кандидата в абсорбционные системы H_2 с большими красными смещениями. В случае подтверждения присутствия абсорбционных систем H_2 в спектрах кандидатов, число известных абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями увеличится почти в два раза.

Полученные независимые оценки относительной распространенности молекул HD в абсорбционных системах H_2 с большими красными смещениями в спектрах квазаров Q 0528–2508, J 2123–0050 и J 2100–0641 важны для понимания эволюции химического состава вещества и физических условий в галактиках, существовавших в ранней Вселенной.

Показано, что в облаках молекулярного водорода с большими красными смещениями детектируется линейная зависимость между содержанием нейтрального хлора и молекулярного водорода. Абсорбционные линии Cl I можно использовать для определения скоростной структуры абсорбционной системы H_2 .

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов обеспечена использованием современных методов обработки и анализа оптических спектров квазаров. Часть результатов получена с помощью широко признанных в международном научном сообществе пакетов программ других авторов – для расчета равновесных фотоионизационных моделей структуры облаков молекулярного водорода использованы пакеты программ CLOUDY [10] и Meudon PDR [11]. Также, где это возможно, результаты анализа спектров квазаров сравнены с результатами известных работ, а результаты численных расчётов сопоставлялись с аналитическими приближениями и предельными случаями.

Основные положения выносимые на защиту:

1. Разработка метода поиска абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями в спектрах квазаров обзора SDSS. Обнаружение 23 кандидатов

- в абсорбционные системы H_2 с большими красными смещениями.
2. Независимый детальный анализ абсорбционной системы с $z = 2.81$ в спектре квазара Q 0528–2508. Обнаружение остаточного потока в центре насыщенных линий H_2 , образовавшегося в результате неполного покрытия области формирования континуального излучения квазара облаком молекулярного водорода. Определение распространенности молекул HD и H_2 в этой системе, с учетом коррекции спектра на фактор неполного покрытия.
 3. Идентификация абсорбционных линий молекул H_2 и HD с красным смещением $z = 3.09$ в спектре квазара J 2100–0641.
 4. Детальный анализ абсорбционной системы H_2 с $z = 2.06$ в спектре квазара J 2123–0050. Определение скоростной структуры системы, распространенностей молекул HD, H_2 , атомов C I и физических условий в компонентах системы. Построение модели структуры абсорбционной системы H_2 .
 5. Идентификация линий поглощения нейтрального хлора, ассоциированных с системами молекулярного водорода с большими красными смещениями, в спектрах квазаров Q 0528–2508, J 0643–5041, Q 1331+170, J 2123–0050, J 2140–0053. Обнаружение линейной зависимости между лучевыми концентрациями H_2 и C I. Установление универсальности отношения C I/ H_2 в облаках H_2 с большими красными смещениями и в диффузных атомарных облаках Галактики.

Апробация работы

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе, четырех международных и семи всероссийских конференциях и совещаниях: “Workshop on Precision Physics and Fundamental Physical Constants - FFK2013” (Пулково, 2013), “Zeldovich 100 Cosmology and Relativistic Astrophysics” (Москва, 2014), “The role of hydrogen in the evolution of galaxies” (Кучинг, Малайзия, 2014), “International Youth Conference

PhysicA.SPb/2014” (Санкт-Петербург, 2014), “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2011” НЕА 2011 (Москва, 2011), НЕА 2012 (Москва, 2012), НЕА 2013 (Москва, 2013), НЕА 2014 (Москва, 2014), “V Пулковская молодежная астрономическая конференция” (Пулково, 2014), XXXII конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” (Пушино, 2015), НЕА 2015 (Москва, 2015).

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в перечисленных статьях в изданиях, входящих в перечень ВАК:

[A1] Balashev S. A., Klimenko, V. V., Ivanchik A. V., Varshalovich D. A., Petitjean, P., Noterdaeme P. Molecular hydrogen absorption systems in Sloan Digital Sky Survey // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2014. Vol. 440. P.225.

[A2] Иванчик А.В., Балашев С.А., Варшалович Д.А., Клименко В.В. Молекулярные облака H_2/HD в ранней Вселенной. Независимый способ оценки концентраций барионов во Вселенной // Астрономический журнал. 2015. Т. 92. С.119.

[A3] Balashev S. A., Noterdaeme P., Klimenko V. V., Petitjean P., Srianand R., Ledoux C., Ivanchik A. V., Varshalovich D. A. Neutral chlorine and molecular hydrogen at high redshift // Astronomy & Astrophysics. 2015. Vol. 575. P.8

[A4] Klimenko, V. V., Balashev, S. A., Ivanchik, A. V., Ledoux, C., Noterdaeme, P., Petitjean, P., Srianand, R., Varshalovich, D. A. Partial covering of the emission regions of Q 0528–250 by intervening H_2 clouds. // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2015. Vol. 448. P.280.

- [A5] Ofengeim, D. D., Balashev, S. A., Ivanchik, A. V., Kaminker, A. D., Klimenko, V. V. Effect of a partial coverage of quasar broad-line regions by intervening H₂-bearing clouds // *Astrophysics and Space Science*. 2015. Vol. 359. P.26
- [A6] Klimenko V. V., Balashev S. A., Ivanchik A. V., Varshalovich D.A. A new estimation of HD/2H₂ at high redshift using the spectrum of the quasar J 2123–0050. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2015. 661 012005
- [A7] Клименко В.В., Балашев С.А., Иванчик А.В., Варшалович Д.А. Оценка физических условий в холодной фазе межзвездной среды в суб-DLA системе с $z=2.06$ в спектре квазара J 2123–0050. // *Письма в Астрономический Журнал* 2016, т.42, с. 161

Личный вклад автора В основу диссертационной работы положены исследования, выполненные в сотрудничестве с исследовательской группой Физико-Технического института им. А.Ф. Иоффе, исследовательскими группами Института астрофизики Парижа (Франция), Меж-университетского центра Астрономии и Астрофизики (Индия) и Южно-Европейской обсерватории (Чили). В работах, выполненных в соавторстве, диссертанту принадлежит проведение независимого анализа абсорбционных систем молекулярного водорода в спектрах квазаров, участие в интерпретации результатов, написании текста статей и обсуждение постановки задачи и полученных результатов. В публикациях, где диссертант является первым автором, ему принадлежит основной вклад в работу.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она содержит 188 страниц текста, включая 47 рисунков и 19 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 204 наименования.

Во Введении обоснована актуальность проведенных исследований, сформули-

рованы цель и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена методу поиска абсорбционных систем молекулярного водорода с большими красными смещениями $z = 2 - 5$ в спектрах квазаров среднего разрешения ($R \approx 2000$) обзора SDSS. Описана процедура анализа спектров квазаров, которая выполняет построение континуума квазара и идентификацию абсорбционной системы H_2 . Процедура полностью автоматизирована, что позволяет за короткое время обрабатывать большое число спектров. Надежность кандидатов в абсорбционные системы H_2 определяется с помощью двух независимых методов: “моделирование Монте-Карло” и “сравнение с контрольной выборкой спектров”. Метод поиска абсорбционных систем молекулярного водорода был применен к каталогам спектров квазаров обзора SDSS Data Release 7 и Data Release 9. Это позволило отобрать 23 кандидата в абсорбционные системы H_2 с высоким уровнем надежности, которые в дальнейшем следует исследовать в спектрах высокого разрешения на крупнейших оптических телескопах. Выполнены наблюдения кандидатов на телескопе VLT со спектрографом высокого разрешения UVES ($R \approx 50\,000$) и среднего разрешения X-Shooter ($R \approx 4000 - 10\,000$). Среди 23 кандидатов было отобрано 8 кандидатов, наиболее подходящих для наблюдений в 92 и 94 наблюдательных циклах. Для всех из восьми кандидатов абсорбционные системы H_2 были подтверждены.

Вторая глава посвящена анализу наблюдения абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями ($z \sim 2 - 3$), содержащих молекулы HD. Приведены результаты анализа трех абсорбционных систем H_2/HD в спектрах квазаров Q 0528–2508, J 2123–0050, J 2100–0641. В спектре квазара J 2100–0641 выполнена идентификация линий H_2 и HD. Определена скоростная структура абсорбционных систем, измерены полные лучевые концентрации молекул H_2 и HD, населенности вращательных уровней молекул H_2 и уровней тонкой структуры атомов C I, а также отношение $N_{HD}/2N_{H_2}$ в компонентах абсорбционных систем.

Третья глава диссертации посвящена исследованию эффекта неполного покрытия области формирования излучения квазара облаком молекулярного водорода, находящимся на большом красном смещении. Впервые идентифицирован эффект неполного покрытия области формирования континуального излучения квазара облаком H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.811$ в спектре квазара Q 0528–2508. В Показано, что в центре насыщенных абсорбционных линий H_2 детектируется ненулевой остаточный поток (около 2% от полного потока излучения квазара). В спектрах квазаров J 2123–0050 и J 2100–0641 обнаружен эффект неполного покрытия области формирования излучения в широких эмиссионных линиях облаками H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.059$ и $z_{\text{abs}} = 3.092$, соответственно. Определено, что в спектрах этих квазаров в центре абсорбционных линий H_2 , находящихся в участке спектра, содержащем эмиссионные линии квазара $\text{Ly}\beta/\text{O VI}$, детектируется остаточный поток. На настоящий момент эффект неполного покрытия области формирования излучения квазара облаком H_2 с большим красным смещением обнаружен для пяти квазаров, включая три идентификации эффекта, представленные в диссертации.

В четвертой главе диссертации выполнен анализ физических условий в абсорбционной системе H_2 в спектре квазара J 2123–0050. Показано, что абсорбционная система состоит из двух компонент А и В, которые имеют сильно отличающиеся оптические толщины в линиях H_2 . В компоненте А среда экранирована в линиях H_2 от внешнего УФ излучения и имеет типичные значения объемной концентрации $n \sim 22 \pm 7 \text{ см}^{-3}$ и кинетической температуры $T = 139 \pm 6 \text{ К}$. В компоненте В среда оптически тонкая в линиях H_2 , давление газа составляет $\log(P/k_B) = 4.2 \pm 0.3 \text{ К см}^{-3}$. Определено, что для обеих компонент абсорбционной системы H_2 среда характеризуется высокой интенсивностью УФ фона ($\sim 8 - 12$ раз выше среднегалактической интенсивности) и высокой степенью ионизации газа ($\sim 10^{-2}$). Показано, что для объяснения образования наблюдаемого количества молекул H_2 необходимо высокое значение коэффициента темпа образования молекул H_2 на пыли $R_{\text{H}_2} \sim 1 - 2 \times 10^{-15} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, что примерно в 40 раз выше ха-

рактерного значения R_{H_2} , измеренного в диффузных облаках нашей Галактики. Построена модель абсорбционной системы H_2 на основе моделирования с помощью кода Meudon PDR.

В пятой главе диссертации выполнена оценка распространенности нейтрального хлора в облаках межзвездного газа с большими красными смещениями $z = 2-5$, содержащих молекулярный водород. Линии нейтрального хлора, идентифицированы в 9 абсорбционных системах молекулярного водорода (включая 5 новых идентификаций), и дополнительно в 9 системах были получены верхние пределы на лучевую концентрацию Cl I . Обнаружена линейная зависимость между лучевыми концентрациями Cl I и H_2 . Показано, что отношение $\text{Cl I}/\text{H}_2$ в абсорбционных системах H_2 с большими красными смещениями такое же, что и в диффузных облаках нашей Галактики.

Каждая глава содержит вводный раздел, посвященный обзору современного состояния исследований по тематике главы.

В Заключении обобщены основные результаты работы.

Формулы и рисунки в диссертации нумеруются по главам, нумерация литературы единая для всего текста.

Глава 1

Абсорбционные системы H_2 в спектрах квазаров обзора SDSS

1.1 Введение

1.1.1 Оптические спектры квазаров

Квазары – это активные галактические ядра, мощность их излучения иногда в десятки и сотни раз превышает суммарную мощность всех звезд родительских галактик. Столь высокая светимость квазаров позволяет наблюдать их на больших космологических расстояниях вплоть до красных смещений $z = 7$ [12], при этом регистрируемое наблюдателем излучение соответствует возрасту объекта до 13 млрд. лет, когда еще не было Солнечной системы, а наша Галактика только зарождалась. Вследствие большой удаленности, излучение квазаров пересекает значительную часть пространства Вселенной до момента, когда оно регистрируется наблюдателем на Земле. По мере распространения свет проходит через вещество межзвездной и межгалактической среды, расположенное на луче зрения между наблюдателем и квазаром. Это отражается в спектре квазара в виде абсорбционных линий, исследование которых предоставляет возможность определения физических условий и химического состава вещества на ранних этапах эволюции Вселенной.

Большая часть абсорбционных линий в спектре квазара является линиями поглощения нейтрального водорода. Из-за космологического красного смещения z

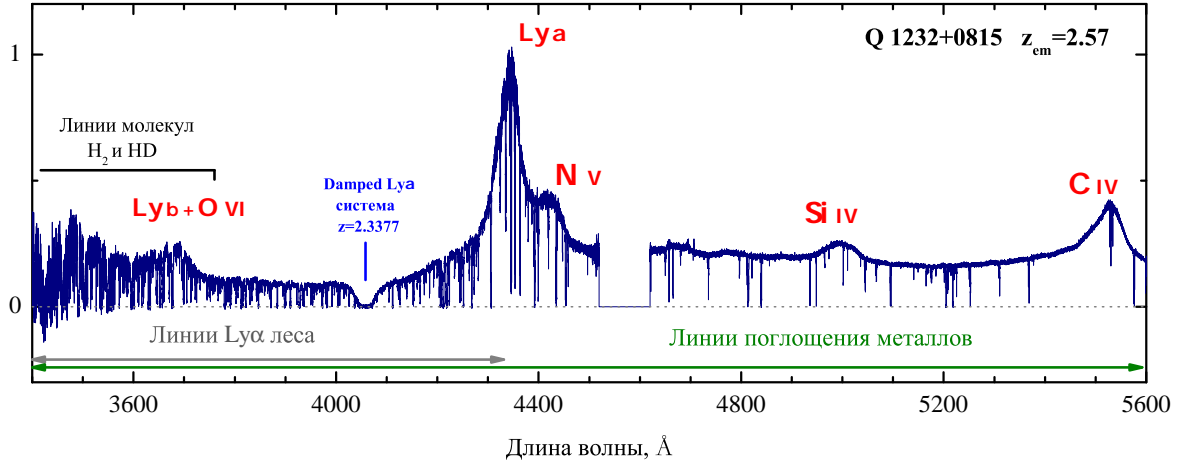


Рис. 1.1: Спектр квазара Q 1232+0815, полученный на 8.2-метровом телескопе VLT с использованием спектрографа высокого разрешения UVES. Красными подписями отмечено положение эмиссионных линий квазар в спектре. Синим штрихом показано положение Ly α абсорбционной линии HI DLA системы с $z_{abs} = 2.3377$. Ассоциированные с этой DLA системой абсорбционные линии молекул H₂ и HD находятся в синей части спектра. Другие абсорбционные линии представляют собой в основном абсорбции Ly α леса (в синей части спектра) и более редкие линии других тяжелых элементов с другими красными смещениями.

абсорбционные линии, соответствующие облакам нейтрального водорода, существовавшим на разных временах развития Вселенной, оказываются сдвинутыми друг относительно друга по длине волны на фактор $(1 + z)$. Если лучевая концентрация нейтрального водорода (HI) в абсорбционной системе не превышает значения $\log N_{HI} \lesssim 17$ (здесь и далее лучевые концентрации измеряются в единицах cm^{-2}), такие системы называются системам Лайман-альфа леса (Ly α леса) и представляют собой облака почти полностью ионизованного водорода, где лишь малая часть ($10^{-5} - 10^{-4}$) остается нейтральной (именно она и приводит к формированию абсорбционной линии). Считается, что линии Ly α леса ассоциируются с филаментами (нитеобразными структурами) межгалактической среды в крупномасштабной структуре Вселенной (см., например, [13, 14]). Абсорбционные системы с более высокой лучевой концентрацией водорода ($17 < \log N_{HI} < 19$) принято называть системами лаймановского предела (Lyman Limit systems, LLs).

При такой лучевой концентрации среда становится оптически толстой вблизи лаймановского предела ($\lambda = 912 \text{ \AA}$ или $E = h\nu = 13.6 \text{ эВ}$ – энергия ионизации атома водорода), что отражается в спектре квазара в виде поглощения излучения на длинах волн $\lambda < 912 \text{ \AA} \times (1 + z_{\text{LLS}})$ за счет ионизации атомов водорода в абсорбционной системе. Газ в таких системах оказывается, как правило, сильно ионизован.

Системы с очень высокой лучевой концентрацией нейтрального водорода ($\log N_{\text{HI}} > 20.3$), называются демпфированные Лайман-альфа системы (Damped Ly α systems, DLAs). Считается, что DLA системы являются главными резервуарами нейтрального водорода в ранней Вселенной ([5, 15, 16]). За счет высокой лучевой концентрации N_{HI} водород в DLA системах экранирован от ионизирующего УФ излучения и находится преимущественно в нейтральном состоянии. В спектрах квазаров такие системы легко идентифицируются благодаря широкой абсорбционной линии Ly α с характерными демпфированными лоренцевыми крыльями. Другой особенностью этих систем является присутствие в спектре с тем же красным смещением множества линий поглощения тяжелых элементов (элементы тяжелее гелия в спектроскопии квазаров принято называть металлами). По-видимому, такие системы представляют собой галактики или гало протогалактик с радиусом не более 20 кпк ([6, 17]). Указанием на то, что вещество в DLA системах относится к межзвездной среде, а не межгалактической, является детектирование молекулярных абсорбционных систем (H₂, HD, CO, см., например, [7, 18–21]), которые, как известно из наблюдений в нашей Галактике и галактиках местной Группы [22–24] ассоциируются с диффузными и полупрозрачными облаками межзвездной среды с характерными температурами $T \sim 50 - 200 \text{ К}$ и объемными концентрациями $n \sim 10 - 500 \text{ см}^{-3}$.

Системы с меньшей лучевой концентрацией в диапазоне ($19 < \log N_{\text{HI}} < 20.3$) относятся к классу суб-DLA систем. Из-за меньшей лучевой концентрации HI считается, что среда в суб-DLA системе может быть не полностью экранирована, и на луч зрения могут попадать одновременно области газа с различной степенью иони-

зации. При анализе распространенностей элементов в суб-DLA системах необходимо учитывать так называемые ионизационные поправки (см., например, [25, 26]).

На рисунке 1.1 в качестве примера показан оптический спектр квазара Q 1232+0815. Спектр состоит из континуального излучения и характерных эмиссионных линий: наиболее сильной Ly α линии атомарного водорода и линий N V, Ly β , C III, C IV, Si IV, O IV и др. (см., например, [27]). Считается, что континуальное излучение квазара формируется, в основном, аккреционным диском, а излучение в эмиссионных линиях формируется в области формирования широких эмиссионных линий (Broad Line Region, BLR) квазара, состоящей из облаков газа, удаленных от центральной области квазара (сверхмассивной черной дыры с $M_{\text{ВН}} \sim 10^6 - 10^9 M_{\odot}$) и разогреваемых континуальным излучением (см., например, [28, 29]). Положение эмиссионных линий в спектре характеризует красное смещение квазара z_{em} . Условно спектр квазара разделяется на синюю и красную части, левее и правее положения эмиссионной линии Ly α ($z_{\text{em}} = 2.57$), соответственно. В синей части спектра квазара присутствует множество линий поглощения, большая часть из которых – это абсорбционные линии систем Ly α леса с $z < z_{\text{em}}$. Среди них на красном смещении $z_{\text{DLA}} = 2.33771$ идентифицируется широкая абсорбционная Ly α линия DLA системы. Абсорбционные линии, находящиеся в красной части спектра, относятся к линиям поглощения металлов (O I, N I, Fe II, Si II, Al II, C II, Al III, Si IV, C IV и др.). Большинство этих линий ассоциированы с DLA системой, а также с другими системами H I, попавшими на луч зрения между квазаром и наблюдателем. В случае, если в DLA системе на луч зрения между квазаром и наблюдателем попадет молекулярное облако, в спектре квазара могут быть идентифицированы абсорбционные линии молекул H₂, HD и CO с $z \approx z_{\text{DLA}}$. Линии молекул H₂ и HD имеют длины волн $\lambda < 1150 \text{ \AA}$ и попадают в синюю часть спектра, где находятся многочисленные линии Ly α леса. При невысоком качестве спектров линии этих молекул почти неотличимы от линий Ly α леса, что создает сложности для их идентификации и анализа. В тоже время линии наиболее

сильных переходов молекул CO с $\lambda = 1477 \text{ \AA}$ и 1509 \AA попадают в красную часть спектра квазара, если разница $z_{\text{em}} - z_{\text{DLA}}$ невелика.

1.1.2 Абсорбционные системы молекулярного водорода

Молекула водорода – наиболее распространенная молекула в межзвездной среде. Спектр молекулы H_2 находится в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне длин волн $912 - 1100 \text{ \AA}$ и состоит из переходов с основного $X^1\Sigma_g^+$ на возбужденные электронные состояния $V^1\Sigma_u^+$ и $C^1\Pi_u$ (переходы лаймановской и вернеровской полос $L\nu-0$ и $W\nu-0$). В каждом электронном состоянии имеется колебательная и вращательная структура уровней.

Поскольку УФ излучение эффективно поглощается атмосферой, молекулы H_2 в нашей Галактике были зарегистрированы впервые только с помощью внеатмосферных наблюдений на телескопах, установленных на ракетах [30, 31] и более детально с помощью наблюдений на орбитальной астрономической обсерватории “Copernicus”¹ [32–34]. Современные наблюдения молекул H_2 выполнялись с помощью обсерватории Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer² (FUSE) в нашей Галактике [24, 35] и галактиках локальной Группы [36–38].

За счет космологического красного смещения для абсорбционных систем с $z > 1.7$ линии переходов H_2 в спектре квазара сдвигаются в оптический диапазон, что позволяет изучать абсорбционные системы H_2 в спектрах квазаров [7, 21, 39, 40] и спектрах послесвечения вспышек гамма-излучения (Gamma Ray Burst, GRB) [41, 42], полученных на больших оптических телескопах Very Large Telescope³ (VLT) и Keck⁴, у которых спектральное разрешение выше, чем у орбитальных обсерваторий УФ диапазона. С меньшими красными смещениями наблюдения молекул H_2 в стали возможными только в недавнее время (см., например,

¹<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/copernicus/copernicus.html>

²<http://fuse.pha.jhu.edu/>

³<http://www.eso.org/public/teles-instr/vlt.html>

⁴<http://www.keckobservatory.org/>

работу [43] и ссылки в ней) с помощью обсерватории Hubble Space Telescope⁵ (HST) с использованием УФ спектрографа высокого разрешения Cosmic Origins Spectrograph⁶ (COS).

Важность исследований абсорбционных систем H_2 связана с решением ряда фундаментальных физических задач: (i) это изучение физических условий в диффузных облаках холодной нейтральной фазы межзвездной среды в галактиках местной Вселенной и удаленных галактиках с большими красными смещениями (определение кинетической температуры [34], объемной плотности газа [22], интенсивности УФ излучения [44], интенсивности фона космических лучей [45], содержания пыли [46] и тяжелых элементов [47, 48] и др.); (ii) определение относительной распространенности дейтерия D/H по относительной распространенности молекул HD и H_2 в облаках молекулярного водорода с большими красными смещениями, что позволяет независимым способом оценить одним из ключевых космологических параметров – относительную плотность барионного вещества во Вселенной Ω_{B} (см., например, [21, 49]); (iii) оценка возможной космологической вариации одной из фундаментальных физических констант – отношения масс протона и электрона $\mu = m_{\text{p}}/m_{\text{e}}$, посредством сравнения длин волн переходов молекул H_2 , наблюдаемых в спектрах квазаров, с лабораторными значениями (см., например, [50–53]); (iv) измерение температуры реликтового излучения $T_{\text{СМВ}}(z)$ на больших красных смещениях $z \sim 2 - 4$ с помощью анализа населенностей уровней тонкой структуры атомов C I и вращательных уровней молекул CO , ассоциированных с абсорбционными системами H_2 [19, 20].

1.1.3 Статистика наблюдений абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями

Впервые абсорбционная система H_2 с большим красным смещением ($z_{\text{abs}} = 2.811$) была идентифицирована в спектре квазара Q 0528–2508 в 1985 году [7]. На насто-

⁵<http://www.stsci.edu/hst>

⁶<http://www.stsci.edu/hst/cos/>

ящий момент обнаружены тридцать две абсорбционные системы H_2 с красными смещениями $z_{\text{abs}} > 1.7$. Полный список систем представлен в таблице 1.1. Приведены названия квазаров, красные смещения квазаров и H_2 систем, а также лучевые концентрации H_2 и H I в DLA системах, ассоциированных с системами H_2 . В последней колонке приведены ссылки на работы, в которых выполнялись измерения.

Вследствие того, что абсорбционные линии H_2 попадают в синюю часть спектра квазара, содержащую многочисленные линии $\text{Ly}\alpha$ леса, для надежной идентификации абсорбционных систем H_2 необходимо высокое качество спектров: разрешение $R = \lambda/\Delta\lambda \geq 10\,000$ и отношение сигнала к шуму $S/N > 10$ (в спектрах низкого разрешения абсорбционные линии H_2 оказываются практически неотличимы от линий $\text{Ly}\alpha$ леса). На данный момент такая задача является предельной даже для крупнейших оптических телескопов – VLT, Кеэк⁷. Другая особенность исследований абсорбционных систем H_2 заключается в том, что большинство абсорбционных систем H_2 были обнаружены случайным образом при анализе спектров, содержащих DLA системы. Вероятность идентификации абсорбционной системы H_2 слепым методом в спектрах квазаров, содержащих DLA системы, не превышает 10 % (см. результаты обзора систем H_2 на телескопе VLT [40]). В тоже время для наблюдений H_2 в галактиках местной Вселенной известно, что эта вероятность оказывается значительно выше и составляет около 90 % для нашей Галактики (в 63 из 73 спектрах внегалактических источников в направлении перпендикулярном галактической плоскости [73]) и около 70 % для Магеллановых облаков (52 % для Большого и 92 % для Малого Магеллановых облаков, [36]).

Малое число идентификаций абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями может объясняется несколькими факторами: (i) вследствие малого размера абсорбционных систем H_2 ($l \lesssim 1$ пк, см., например, [69]) вероятность попадания систем молекулярного водорода на луч зрения между квазаром и наблю-

⁷Квазары с $z > 2$ являются слабыми объектами с характерной видимой звездной величиной ($m_V \sim 18-21$ см., например, [72]). Поэтому для получения спектров такого качества необходимы длинные экспозиции ~ 3 часов.

Таблица 1.1: Список известных абсорбционных систем молекулярного водорода, идентифицированных в спектрах квазаров и спектрах послесвечения вспышек гамма-излучения с большими красными смещениями $z > 1.7$. Жирным шрифтом выделены системы, анализ которых представлен в этой работе.

| | Объект | z_{em} | z_{abs} | $\log N_{\text{HI}}$ | $\log N_{\text{H}_2}$ | Ссылка |
|----|--------------------|-----------------|------------------|----------------------|-------------------------|----------|
| 1 | Q 0013–0029 | 2.09 | 1.973 | 20.83 ± 0.05 | 17.8 – 20.0 | [54] |
| 2 | Q 0027–1836 | 2.55 | 2.402 | 21.75 ± 0.10 | 17.43 ± 0.02 | [53, 55] |
| 3 | J 0154+1935 | 2.53 | 2.252 | 21.75 ± 0.15 | 17 – 19 | [56] |
| 4 | Q 0203+1134 | 3.61 | 3.387 | 21.25 ± 0.10 | 14.8 – 16.6 | [8] |
| 5 | Q 0347–383 | 3.21 | 3.025 | 20.73 ± 0.05 | 14.7 ± 0.3 | [57] |
| 6 | Q 0405–4418 | 3.00 | 2.595 | 21.05 ± 0.10 | 18.14 ± 0.07 | [39] |
| 7 | Q 0528–2508 | 2.78 | 2.811 | 21.35 ± 0.07 | 18.28 ± 0.02 | [58] |
| 8 | Q 0551–3637 | 2.32 | 1.962 | 20.70 ± 0.08 | $17.42^{+0.45}_{-0.73}$ | [59] |
| 9 | Q 0643–5041 | 3.09 | 2.659 | 21.03 ± 0.08 | 18.54 ± 0.01 | [60] |
| 10 | Q 0812+3208 | 2.70 | 2.626 | 21.35 ± 0.10 | 19.96 ± 0.02 | [49] |
| 11 | Q 0816+1446 | 3.84 | 3.287 | 22.00 ± 0.10 | 18.66 ± 0.20 | [61] |
| 12 | J 0843+0221 | 2.92 | 2.787 | 21.82 ± 0.11 | 21.21 ± 0.02 | |
| 13 | Q 0918+1636 | 3.07 | 2.583 | 20.96 ± 0.05 | 16.2 – 19.1 | [17] |
| 14 | Q 1232+0815 | 2.57 | 2.337 | 20.90 ± 0.07 | 19.67 ± 0.10 | [62] |
| 15 | Q 1237+0647 | 2.78 | 2.689 | 20.00 ± 0.15 | 19.20 ± 0.13 | [63] |
| 16 | Q 1331+170 | 2.08 | 1.776 | 21.18 ± 0.04 | 19.71 ± 0.10 | [49, 64] |
| 17 | Q 1337+3152 | 3.17 | 3.174 | 21.36 ± 0.10 | 14.09 ± 0.03 | [65] |
| 18 | Q 1439+1118 | 2.58 | 2.418 | 20.10 ± 0.10 | 19.38 ± 0.04 | [19] |
| 19 | Q 1443+2724 | 4.42 | 4.224 | 20.95 ± 0.08 | 18.29 ± 0.04 | [66] |
| 20 | Q 1444+0126 | 2.21 | 2.087 | 20.07 ± 0.07 | 18.30 ± 0.37 | [67] |
| 21 | J 1456+1609 | 3.68 | 3.352 | 21.70 ± 0.10 | 17.10 ± 0.09 | [56] |
| 22 | J 2100–0641 | 3.14 | 3.092 | 21.05 ± 0.15 | 18.76 ± 0.04 | [21] |
| 23 | J 2123–0050 | 2.26 | 2.059 | 19.18 ± 0.15 | 17.94 ± 0.01 | [68] |
| 24 | J 2140–0321 | 2.48 | 2.399 | 22.40 ± 0.10 | 20.13 ± 0.07 | [56] |
| 25 | Q 2318–1107 | 2.56 | 1.989 | 20.68 ± 0.05 | 15.49 ± 0.03 | [55] |
| 26 | Q 2340–0053 | 2.09 | 2.054 | 20.35 ± 0.15 | 18.47 ± 0.08 | [9] |
| 27 | Q 2343+1232 | 2.51 | 2.431 | 20.35 ± 0.05 | 13.69 ± 0.09 | [55] |
| 28 | Q 2348–0108 | 3.02 | 2.426 | 20.50 ± 0.10 | 18.52 ± 0.30 | [69] |
| 29 | GRB 080607 | 3.04 | 3.04 | 22.70 ± 0.15 | 21.2 ± 0.2 | [41] |
| 30 | GRB 120327 A | 2.81 | 2.81 | 22.02 ± 0.09 | 15.3 – 17.7 | [70] |
| 31 | GRB 120815 A | 2.36 | 2.36 | 21.95 ± 0.10 | 20.54 ± 0.13 | [71] |
| 32 | GRB 121024 A | 2.30 | 2.30 | 21.88 ± 0.10 | 19.8–19.9 | [42] |

дателем относительно мала (характерный размер DLA системы 1 – 20 кпк, см., например, [6]); (ii) малой статистикой – квазары слабые объекты, и, несмотря на то, что квазаров, содержащих DLA системы, известно более 12 000 [16], число спектров, полученных с высоким разрешением $\lesssim 1000$ (см., например, [40, 74, 75]); (iii) низкой эффективностью слепого метода. Для обнаружения одной абсорбционной системы H_2 необходимо затратить большое количество наблюдательного времени крупнейших обсерваторий. Более того, вероятность детектирования систем H_2 может быть $\lesssim 1\%$ (см., результаты обзора DLA систем на телескопе Magellan⁸ [75]).

Альтернативным путем изучения свойств ранней Вселенной являются обзоры неба, в ходе которых получают данные большого числа объектов, но не высокого качества (преимуществом такого исследования является большая статистика). Одним из таких проектов является обзор Sloan Digital Sky Survey (SDSS, 2000-2014 [76]), в ходе которого за последние пятнадцать лет было покрыто более четверти неба и были получены спектры более 5 000 000 объектов (из них $\sim 350\,000$ квазаров) [77]. Главным недостатком спектров SDSS является низкое качество: характерное отношение сигнала к шуму ($S/N \lesssim 4$) и среднее разрешение ($R \sim 2000$). В таких спектрах легко отождествляются широкие абсорбционные линии DLA систем и многочисленные линии Ly α леса. В этой главе представлено детальное описание и результаты поиска новых абсорбционных систем H_2 в спектрах квазаров каталога SDSS.

1.2 Спектры квазаров каталога SDSS. Первичный отбор спектров

Для поиска систем H_2 были использованы спектры квазаров, полученные в ходе второй и третьей части обзора SDSS – SDSS-II: Legacy Survey и SDSS-III: Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS [78]). Первые наблюдательные данные обзора BOSS были представлены в девятом выпуске данных SDSS Data Release 9

⁸<http://www.lco.cl/telescopes-information/magellan/>

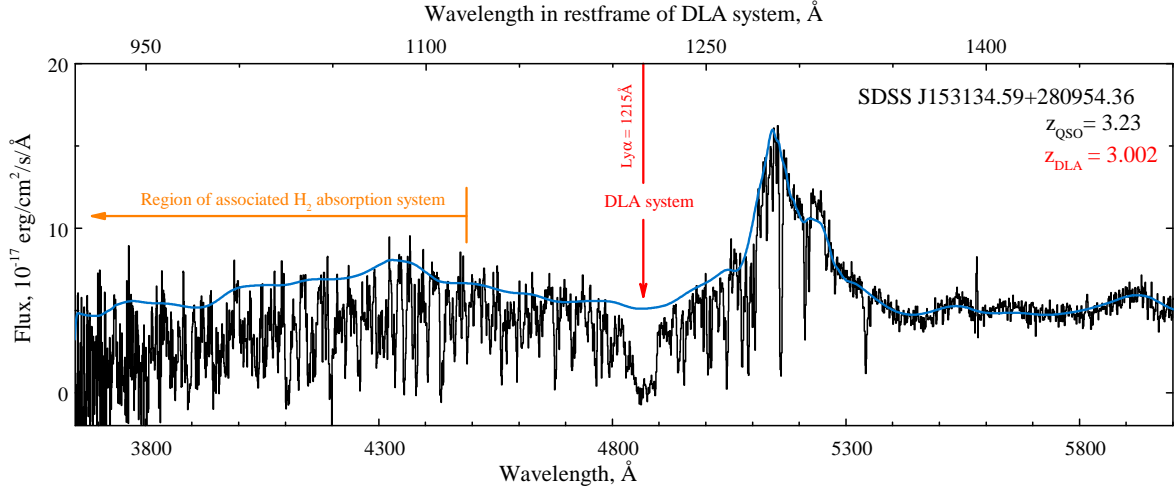


Рис. 1.2: Спектр квазара J 153134.59+280954.36 ($z_{\text{em}} = 3.23$), полученный в обзоре SDSS. Красной стрелочкой показано положение Ly α линии DLA системы с $z_{\text{abs}} = 3.002$. На нижней оси абсцисс длина волны приведена в лабораторной системе отсчета, на верхней оси абсцисс приведены длины волн в собственной системе отсчета DLA системы. Синей кривой показан восстановленный континуум квазара. Оранжевой линией показан участок спектра, где могут находиться линии абсорбционной системы H₂, ассоциированной с DLA системой. Следует отметить, что отношение сигнала к шуму в этом участке спектра $S/N \sim 10$, что значительно выше среднего значения S/N для спектров SDSS.

(DR 9) и содержат спектры 87 822 квазаров с большими красными смещениями (78 086 квазаров наблюдались впервые) [79]. В отличие от первых двух частей проекта SDSS-I (2000-2005) и SDSS-II (2005-2008)⁹, в третьей части SDSS-III (2009-2014) для получения спектров использовался новый спектрограф BOSS¹⁰, что позволило получить спектры с более высоким отношением сигнала к шуму и покрывающие более широкий диапазон длин волн. Поскольку качество спектров является критически важным параметром для задачи поиска систем H₂, главным образом, были исследованы спектры, полученные в каталоге SDSS DR 9. Данные обзора SDSS-II представлены в каталоге SDSS DR 7 [80], который содержит спектры 105 783 квазаров. На рисунке 1.2 в качестве примера показан спектр квазара SDSS J 153134.59+280954.36.

⁹<http://classic.sdss.org/>

¹⁰https://www.sdss3.org/instruments/boss_spectrograph.php

Известно, что облака молекулярного H_2 относятся к нейтральной фазе межзвездной среды. Следовательно, абсорбционные системы H_2 с высокой лучевой концентрации ($\log N_{\text{H}_2} > 16$) должны ассоциироваться с большим количеством нейтрального водорода H I , т.е. с DLA системами в спектрах квазаров. Поэтому искать абсорбционные системы H_2 следует только в тех спектрах квазаров, которые содержат DLA системы. Для того, чтобы детектировать DLA систему в спектре квазара, абсорбционная линия водорода $\text{Ly}\alpha$ ($\lambda = 1215.67 \text{ \AA}$), сдвинутая на красное смещение DLA системы, должна попадать в допустимый диапазон длин волн спектрографа (т.е. $\lambda_{\text{Ly}\alpha\text{DLA}} \geq 3570 \text{ \AA}$ и $\geq 3800 \text{ \AA}$ для спектрографов BOSS и SDSS, соответственно). Поэтому красное смещение квазара должно быть достаточно высоким: $z > 2.15$ и $z > 2$ для спектров каталогов DR 9 и DR 7. Этому условию удовлетворяют 61 931 спектр из каталога DR 9 и 14 616 спектров квазаров из каталога DR 7. Среди этих спектров DLA системы детектируются в 12 068 и 1 426 спектров каталогов DR 9 [16] и DR 7 [81].¹¹

Затем были отобраны спектры, в которых можно детектировать по крайней мере одну линию абсорбционной системы H_2 , ассоциированной с DLA системой (см. рисунок 1.2). Длины волн наиболее сильных переходов H_2 (с вращательных уровней $J=0,1$) находятся в диапазоне $912 - 1112 \text{ \AA}$, поэтому красное смещение DLA системы должно быть $z_{\text{DLA}} > 2.22$ и > 2.42 для спектров квазаров каталогов DR 9 и DR 7, соответственно. Это позволило отобрать около 10 000 и 1 200 спектров из каталогов DR 9 и DR 7, соответственно. Эти спектры составили набор S_{DLA} , в котором был выполнен поиск абсорбционных систем H_2 .

Дополнительно, для тестирования процедуры поиска H_2 систем мы построили набор спектров квазаров обзора SDSS, не содержащих абсорбционные системы H_2 . Набор состоит из спектров, не попавших в набор S_{DLA} и имеющих отношение $S/N > 2$ и $z_{\text{QSO}} > 2.22$. Этот набор обозначается S_{nonDLA} и содержит $\sim 40\,000$ спектров квазаров. Так как не все DLA системы были идентифицированы в спектрах

¹¹Часть квазаров из каталога DR 7 повторно наблюдалась в обзоре BOSS; спектры этих квазаров присутствуют в обоих каталогах DR 7 и DR 9.

SDSS (что вызвано сложностью анализа и средним качеством спектров – в частности, DLA системы с низкой лучевой концентрацией H I), то небольшая часть спектров квазаров из набора S_{nonDLA} вероятно содержит абсорбционные системы H₂.

1.3 Процедура поиска абсорбционных систем H₂

Поскольку необходимо обработать большое число спектров квазаров, процедура поиска абсорбционных систем должна быть полностью автоматизирована. Для этого была использована модификация стандартного метода анализа профилей абсорбционных линий, в котором наблюдаемый спектр квазара сравнивается с синтетическим спектром абсорбционной системы.

1.3.1 Построение континуума

Первый важный шаг спектроскопического анализа – это построение континуума квазара.¹² Мы использовали комбинацию двух методов: метод главных компонент (Principal component analysis, PCA, см. [82]) и итеративный метод сглаживания спектра.

Используя первый метод, можно восстановить континуум квазара в “поглощенной” синей части спектра (где расположены линии Ly α леса) с помощью подгонки красной части спектра некоторой функцией, состоящей из комбинации главных компонент (см. подробнее работу [82]). Однако для задачи поиска абсорбционных систем H₂ необходимо построить континуум в более широком диапазоне длин волн ($900 \text{ \AA} < \lambda_0 < 1200 \text{ \AA}$ в собственной системе отсчета квазара) по сравнению с тем, что это было сделано в [82]. Для этого мы выполнили экстраполяцию степенным законом первой главной PCA компоненты (среднего континуума квазара) в область $\lambda_0 < 1020 \text{ \AA}$, добавив несколько спектральных особенностей, связанных с

¹²Континуумом квазара принято называть спектр квазара, не содержащий абсорбционных линий, т.е. исходный спектр излучения квазара без линий поглощения.

$\text{Ly}\beta$ эмиссионной линией квазара и поглощением спектра на длинах волн меньших лаймановского предела (912 \AA).

Во втором методе континуум строился с помощью последовательного сглаживания абсорбционных и эмиссионных особенностей спектра. В каждой итерации сначала выполнялась свертка спектра с гауссовой функцией с полушириной на половине высоты $\sim 50 \text{ \AA}$; затем те пиксели, в которых поток отличается более чем на 3σ от уровня континуума (как в большую так и в меньшую сторону), исключались из анализа. Четырех итерацией оказалось достаточно для сходимости метода.

Следует отметить, что каждый из методов имеет свои недостатки. Первый метод переоценивает положение континуума, а в некоторых случаях, если спектр содержит резкие абсорбционные особенности, дает ошибочный результат. Вторым методом, наоборот, в среднем недооценивает положение континуума и чрезмерно сглаживает континуум вблизи эмиссионных линий. Чтобы компенсировать эти недостатки, мы использовали следующую процедуру. В каждом пикселе спектра вычислялось среднее геометрическое значение от величин потоков в континуумах, построенных с помощью первого и второго метода. Затем выполнялась свертка полученного континуума с гауссовой функцией с полушириной $\sim 1000 \text{ км/с}$. Пример восстановленного континуума показан на рисунке 1.2. Построение континуума в синей части спектра весьма сложно, и иногда (в зависимости от отношения сигнала к шуму, плотности $\text{Ly}\alpha$ леса) решение оказывается достаточно неопределенным. Тем не менее, анализ модельных спектров (см. подробнее раздел 1.3.3) показал, что неточности восстановления формы континуума нашей процедурой незначительно влияют на результаты поиска абсорбционных систем H_2 .

Дополнительно, для каждого спектра мы определяли отношение сигнала к шуму (S/N), равное среднему значению S/N по пикселях в диапазоне длин волн $1040 - 1120 \text{ \AA}$ (в системе отсчета, связанной с DLA системой).

1.3.2 Процедура поиска абсорбционных систем H_2

Основные сложности идентификации абсорбционных систем H_2 в спектрах квазаров обзора SDSS вызваны: (i) средним спектральным разрешением $R \approx 2000$, (ii) низким значением отношения сигнала-к-шуму ($S/N \leq 5$ для большинства спектров) и (iii) присутствием многочисленных абсорбционных линий $Ly\alpha$ леса в участке спектра, где выполняется поиск линий H_2 . При таких условиях высока вероятность ложной идентификации абсорбционных систем H_2 , – т.е. в некоторых спектрах SDSS линии $Ly\alpha$ леса хорошо имитируют набор абсорбционных линий H_2 . Наиболее важным параметром задачи поиска систем H_2 является спектральное разрешение. В синей части спектров обзора SDSS ширина пикселя $\sim 1 \text{ \AA}$, поэтому абсорбционная линия H_2 может быть идентифицирована только в том случае, если эквивалентная ширина линии $EW \gtrsim 1 \text{ \AA}$. Это условие дает нижнее ограничение на лучевую концентрацию абсорбционных систем H_2 , которые могут быть идентифицированы в спектрах SDSS: $\log N_{H_2} \gtrsim 18.5$. Абсорбционный спектр молекулярного водорода в УФ диапазоне длин волн состоит из линий лаймановской и вернеровской колебательных полос $L\nu-0$ и $W\nu-0$. Из-за среднего спектрального разрешения $R \sim 2000$ в спектрах каталога SDSS можно наблюдать только наиболее сильные линии H_2 , соответствующие переходам $R(0)$, $R(1)$ и $P(1)$ для каждой из колебательных полос. Линии этих переходов перекрываются друг с другом, образуя одну сложную абсорбционную линию. Характерная форма такой линии линий показана темно-синим цветом на левой панели рисунка 1.3. Здесь и далее будем обозначать такие абсорбционные линии в соответствии с названием полосы. Например, абсорбционная линия, состоящая из линий переходов $L4-0R(0)$, $L4-0R(1)$ и $L4-0P(1)$, обозначается как линия $L4-0$.

Линии переходов H_2 с нижних вращательных уровней $J=0, 1$ имеют лабораторные длины волн $\lambda < 1115 \text{ \AA}$. В диапазон длин волн спектра выше лаймановского предела DLA системы попадают (и могут быть идентифицированы) 26 абсорбционных линий H_2 (лаймановской и вернеровской полос). Предполагается, что

$z_{\text{DLA}} \approx z_{\text{H}_2}$. Однако абсорбционные линии атомарного водорода, соответствующие переходам высоких лаймановских порядков, могут сильно поглотить спектр на значительно больших длинах волн $\lambda \sim 950\text{\AA}$, что уменьшает число доступных для идентификации линий H_2 до 17. Также число доступных для анализа линий H_2 может меняться от спектра к спектру в зависимости от разницы красных смещений квазара и DLA системы ($z_{\text{em}} - z_{\text{DLA}}$) и качества конкретного спектра (в спектрах SDSS отношение S/N становится ниже с уменьшением длины волны). В тоже время, если красное смещение квазара мало, число доступных для анализа линий H_2 определяется нижней границей диапазона длин волн спектрографа. Если красное смещение квазара большое ($z_{\text{QSO}} > 2.8$) и в спектре, кроме DLA системы, есть система лаймановского предела или несколько насыщенных систем $\text{Ly}\alpha$ леса с красными смещениями $z > z_{\text{DLA}}$, это также уменьшит число линий H_2 доступных для анализа. Таким образом, чтобы определить число доступных для анализа линий H_2 в конкретном спектре, мы находили минимальную длину волны спектра, λ_{cutoff} , в которой поток излучения в четырех пикселях подряд превышает уровень нулевого потока на величину 2σ (где σ - статистическая ошибка измерения потока в пикселе). Далее вместо λ_{cutoff} мы будем использовать параметр $\lambda_{\text{B}} = \lambda_{\text{cutoff}} / (1 + z_{\text{DLA}})$ - "граница спектра" в собственной системе отсчета DLA системы. Этот параметр, характеризует число линий H_2 , доступных для анализа. Также из анализа исключались те пиксели, которые соответствуют абсорбционным линиям HI высоких лаймановских порядков ($\text{Ly}\beta$, $\text{Ly}\gamma$, $\text{Ly}\epsilon$ и др.).

Для идентификации абсорбционной системы H_2 в спектре мы использовали процедуру, которая сравнивает наблюдаемый спектр квазара с синтетическим спектром H_2 системы с заданным набором параметров (лучевая концентрация H_2 , доплеровское уширение b_{H_2} и красное смещение z). Поскольку необходимо выполнить анализ $\sim 13\,000$ спектров, процедура была полностью автоматизирована. Обычно в анализе абсорбционных систем в спектрах квазаров наилучшие значения параметров определяют путем минимизации функции правдоподобия χ^2 , однако

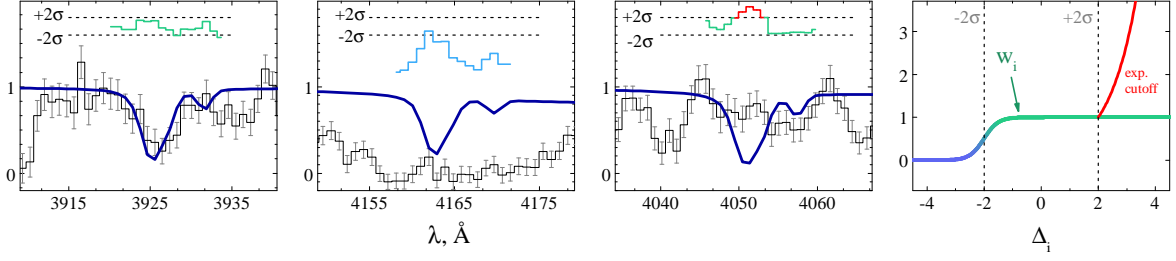


Рис. 1.3: Иллюстрация процедуры поиска абсорбционных систем H_2 в спектрах квазаров каталога SDSS. На трех левых панелях показаны различные ситуации: (a) линия H_2 прописывается в наблюдаемом спектре, (b) линия H_2 попадает на абсорбционную линию $\text{Ly}\alpha$ леса и (c) линия H_2 не прописывается в наблюдаемом спектре. Синей линией показан типичный профиль высоко насыщенного абсорбционной линии H_2 с $\log N_{\text{H}_2} = 20$, состоящей из переходов $\text{R}(0)$, $\text{R}(1)$ и $\text{P}(1)$, свернутых с аппаратной функцией спектрографа SDSS. На правой панели (d) показан вид функции веса w_i (сине-зеленая кривая) и экспоненциального фактора ξ_i (красная кривая), который выделяет пиксели, в которых синтетически спектр системы H_2 не прописывается (см. панель (c)). Подробнее см. раздел 1.3.2

такой метод требует расчета большого количества профилей линий, что в случае большого числа спектров требует высоких вычислительных мощностей и огромного времени. На данном этапе необходимо только отобрать спектры-кандидаты, в которых прописываются абсорбционные системы H_2 . Поэтому, нами был использован другой подход.

Для каждого спектра мы рассчитывали функцию L , построенную на основе функции правдоподобия согласно следующему выражению:

$$\log L = \frac{\sum_i w_i \xi_i}{\sum_i w_i}, \quad (1.1)$$

где w_i – вес для каждого пикселя

$$w_i = \frac{1}{1 + e^{-4(\Delta_i + 2)}}, \quad (1.2)$$

а $\Delta_i = (y_i - f(x_i))/\sigma_i$ обозначает относительное отклонение потока в синтетическом спектре $f(x_i)$ от наблюдаемого потока y_i в i пикселе, σ_i – ошибка определения потока в i пикселе. Графическое представление функции w_i дано на правой панели рисунка 1.3. Такой вид функции w_i позволяет не учитывать в анализе пиксели,

в которых наблюдаемый поток ниже потока в синтетическом спектре более чем на 2σ (такие пиксели относятся к линиям поглощения Ly α леса и не несут информации о присутствии или отсутствии линии H₂ в спектре, см. панель (b) на рисунке 1.3). Если $2 > \Delta_i > -2$ (см. панель (a)), тогда значение $w_i \simeq 1$; в этих пикселях поток в синтетическом спектре близок к наблюдаемому, и их необходимо учитывать в анализе. При поиске спектров-кандидатов, содержащих абсорбционные системы H₂, важно сразу убирать из рассмотрения спектры, в которых линии H₂ точно не прописываются. Для этого была использована функцию ξ_i , которая задается следующим образом:

$$\xi_i = \begin{cases} \Delta_i^2 e^{(1-\Delta_i)^2-1} \Delta_i \geq 2 \\ \Delta_i^2 & \Delta_i < 2 \end{cases} \quad (1.3)$$

Если абсорбционная система H₂ присутствует в спектре квазара, должно выполняться условие, что все абсорбционные линии H₂ детектируются в спектре на своих жестко заданных положениях. Другими словами, если хотя бы одна абсорбционная линия H₂ не детектируется (т.е. наблюдаемый поток y_i в этих пикселях значительно превышает поток в синтетическом спектре $f(x_i)$ – см. панель (c) на рисунке 1.3) – тогда такой абсорбционной системы H₂ нет в исследуемом спектре. Учет этого условия достигается с помощью экспоненциального множителя $e^{(1-\Delta_i)^2-1}$. Из-за введения экспоненциального фактора функция L больше не является функцией правдоподобия. Однако, функция L используется только для отбора спектров-кандидатов, в которых прописываются абсорбционные системы H₂, а не для анализа абсорбционных систем. Оценка надежности кандидатов в H₂ системы выполняется независимо, и описана ниже в разделе 1.4. Также очевидно, что выполнять сравнение наблюдаемого и синтетического спектров имеет смысл только для тех участков спектра, где присутствуют абсорбционные линии H₂. Поэтому суммирование в формуле (1.1) выполнялось только в тех пикселях, в которых синтетический спектр $f(x_i) < 0.9$ уровня континуума.

Критерий идентификации абсорбционной системы H₂ определяется следующим образом: $L < L_{id}$, где L_{id} – значение функции L , вычисленное при $\Delta_i = 2$

для всех пикселей ($w_i \simeq 1$), для заданного красного смещения системы H_2 . Этот критерий выполняется, если синтетический спектр системы H_2 удовлетворительно прописывается в наблюдаемом спектре квазара, что означает отсутствие “выпавших” пикселей, в которых поток значительно выше, чем поток в синтетическом спектре (см. панель (с) на рисунке 1.3).

Чтобы сократить время на построение синтетических спектров при анализе каждого спектра, был построен тестовый набор синтетических спектров абсорбционных систем H_2 для плотной сетки значений лучевой концентрации N_{H_2} и температуры возбуждения уровней $J=0$ и $J=1$ ($T_{0,1}$). Как правило, значения именно этих двух параметров определяют форму насыщенных абсорбционных линий H_2 при заданном спектральном разрешении R . Лучевая концентрация $\log N_{H_2}$ менялась в диапазоне значений от 18.5 до 21 с шагом 0.1 (в логарифмическом масштабе). Для лучевой концентрации $\log N_{H_2} < 18.5$ абсорбционные линии H_2 после свертки с аппаратной функцией спектрографа SDSS (~ 150 км/с) оказываются “слабыми”, и надежная идентификация таких систем невозможна (из-за присутствия линий поглощения Ly α леса линии H_2 прописываются почти в любом спектре), см. подробнее раздел 1.4.2. Значение $T_{0,1}$ менялось в диапазоне от 25 до 150 К, что соответствует типичным значениям для абсорбционных систем H_2 в спектрах квазаров (см., например, [39]). Параметр доплеровского уширения линий b не важен в этой задаче, поскольку мы интересуемся только высоко насыщенными линиями H_2 ($\log N_{H_2} > 18.5$). В спектрах с высоким спектральным разрешением форма абсорбционных линий H_2 в не меньшей степени определяется скоростной структурой H_2 системы – число компонент, их относительная сила и положение. Около половины известных абсорбционных систем H_2 имеют многокомпонентную структуру с характерный разбросом скоростей не более 50 км/с (см., например, [39, 40]). Поскольку ширина аппаратной функции спектрографа SDSS (~ 150 км/с) в три раза превышает это значение, в спектре SDSS отдельные компоненты будут неразрешимы. Поэтому для описания линий H_2 достаточно использовать однокомпонентную

модель. Однако это приводит к тому, что определяемые лучевые концентрации N_2 могут быть переоценены. В частности, это подтверждается результатами анализов нескольких систем H_2 , присутствующих в спектрах обзора SDSS, которые ранее исследовались в спектрах высокого разрешения, полученных на телескопах Кеэк, VLT (см. раздел 1.5).

Для каждого спектра из набора S_{DLA} и каждого синтетического спектра H_2 из тестового набора мы строили функцию L в зависимости от красного смещения H_2 системы z_{H_2} . Красное смещение z_{H_2} менялось в пределах окна ± 600 км/с относительно красного смещения DLA системы z_{DLA} ¹³, что с запасом превышает характерное значение разброса скоростей H_2 и DLA систем. Затем определялся диапазон значений z_{H_2} , для которого удовлетворяется критерий идентификации, т.е. $L < L_{id}$. Следует отметить, что вид функции L гарантирует, что если H_2 система с лучевой концентрацией N_0 и с некоторым красным смещением z_0 удовлетворяет критерию, то системы H_2 с $N_{H_2} < N_0$ также будут удовлетворять критерию.

Для каждого кандидата фиксировались значения наибольшей лучевой концентрации $N_{H_2}^{max}$, при котором $L < L_{id}$, и красного смещения z_0 , для которого функция L имеет минимум (при $N = N_{H_2}^{max}$). В результате, был сформирован предварительный набор кандидатов в абсорбционные системы H_2 (S_{cand}), который содержит более 4 000 спектров. Однако в большинстве из них детектирование абсорбционных систем H_2 является ложным. Во-первых, при низком значении S/N в спектре SDSS линии $Ly\alpha$ леса похожи на систему H_2 . Во-вторых, полученное значение вероятности детектирования абсорбционной системы H_2 в спектрах SDSS, содержащих DLA системы, $\sim 4000/13000 = 0.3$, что почти в три раза превышает оценку, полученную из анализа спектров высокого разрешения ~ 0.1 , см. [40].

Для дальнейшего исследования в спектрах высокого разрешения необходимо из набора S_{cand} отобрать наиболее надежные кандидаты с наименьшей вероятностью ложной идентификации. Для расчета этой вероятности мы использовали два

¹³Значения z_{DLA} были взяты из работ [16, 81].

различных метода, которые описаны ниже в разделе 1.4.

1.3.3 Тестирование процедуры поиска

Процедура поиска абсорбционных систем H_2 должна детектировать большинство реально-существующих H_2 систем (т.е. полнота набора кандидатов должна быть близка к единице). Одно из необходимых условий – это детектирование известных абсорбционных систем H_2 (из наблюдений в спектрах с высоким разрешением), которые в небольшом количестве есть в спектрах SDSS. В каталоге SDSS DR 9 есть только 5 таких спектров (см. таблицу 1.3 в разделе 1.5). Из пяти спектров идентификация H_2 возможна только для трех. Наша процедура поиска детектирует все три системы. Выполнение только этого условия недостаточно для проверки надежности процедуры поиска, поэтому был выполнен дополнительный тест. В спектры набора S_{nonDLA} (в которых нет DLA систем и, следовательно, H_2 , см. раздел 1.2) мы искусственно добавили DLA системы, содержащие однокомпонентные системы H_2 с заданными лучевыми концентрациями N_{H_2} и красными смещениями. Для увеличения статистики каждый спектр использовался несколько раз с различными значениями z_{DLA} . Такое построение гарантирует, что условия поиска будут теми же, что и при анализе спектров набора S_{DLA} (отношения S/N и распределение красных смещений).

Применив процедуру поиска систем H_2 к тестовому набору, находим, что процедура детектирует более 99 % абсорбционных систем H_2 . Другими словами, доля пропущенных систем H_2 (по отношению к общему количеству) не превышает 1 %. На рисунке 1.4 показано, с какой вероятностью абсорбционная система H_2 будет пропущена поисковой процедурой в зависимости от лучевой концентрации H_2 .

Таким образом, можно утверждать, что для систем H_2 с $\log N_{H_2} > 18$ набор кандидатов S_{cand} полный более чем на 99,%, т.е. почти все спектры из каталога SDSS, в которых есть системы H_2 , были обнаружены процедурой. Однако среди кандидатов (помимо реально существующих) также есть еще большое число случаев ложной идентификации. Как показано в следующем разделе, вероятность

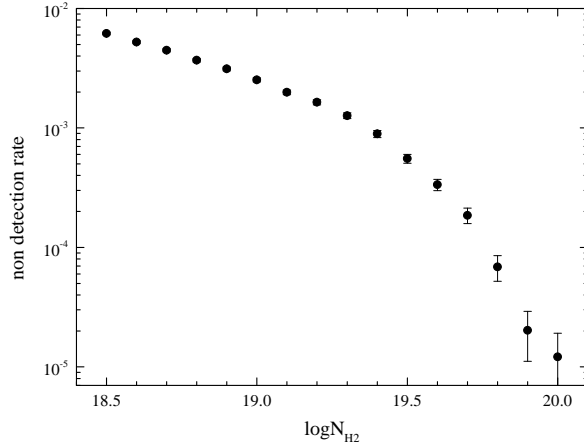


Рис. 1.4: Вероятность, с которой процедура поиска абсорбционных систем H_2 не обнаружит систему H_2 в спектрах каталога SDSS, в зависимости от $\log N_{\text{H}_2}$. Для исследуемого диапазона лучевых концентраций эта вероятность ниже 1 %.

ложной идентификации для систем с $\log N_{\text{H}_2} \sim 18$ оказывается очень высокой (большой процент ложных детектирований). Граничное значение $\log N(\text{H}_2)$, при котором в спектрах обзора SDSS абсорбционные системы H_2 идентифицируются надежно, равняется 19. В этом случае ($\log N_{\text{H}_2} > 19$) полнота набора также превышает уровень 99 %.

1.4 Оценка надежности кандидатов

Для оценки надежности кандидатов из набора S_{cand} мы определяли вероятность ложной идентификации ($P_{\text{ЛИ}}$) – т.е. вероятность ошибочного (ложного) детектирования абсорбционной системы H_2 для некоторых реализаций $L\alpha$ леса. Если значение $P_{\text{ЛИ}}$ мало, значит найденная абсорбционная система H_2 скорее всего присутствует в спектре кандидата, т.е. надежность этого кандидата велика.

Расчет $P_{\text{ЛИ}}$ выполнялся с помощью двух независимых методов. В первом методе для каждого спектра-кандидата вычисляется вероятность идентификации абсорбционных линий системы H_2 в любом другом участке спектра кандидата (см. раздел 1.4.1). Во втором методе значение $P_{\text{ЛИ}}$ оценивается с помощью вероятности

сти детектирования абсорбционной системы H_2 в спектрах контрольного набора, построенного на основе S_{nonDLA} (см. раздел 1.4.2). Использование набора S_{nonDLA} с высокой вероятностью гарантирует, что эти спектры не содержат абсорбционных систем H_2 (см. раздел 1.2). Второй метод дополнительно позволил оценить пороговые значения N_{H_2} и других параметров, при которых детектирование становится надежным, а также измерить вероятность детектирования абсорбционной системы H_2 в спектрах квазаров, содержащих DLA системы.

1.4.1 Моделирование Монте-Карло

Благодаря большому числу линий абсорбционной системы H_2 в спектрах квазаров обзора SDSS (около 6 – 15 линий, см. раздел 1.3.2), полная вероятность прописать одновременно все линии H_2 в участке спектра, содержащем только линии $Ly\alpha$ леса, должна быть достаточно низкой. Эта идея является основой первого метода. Действительно, пусть, вероятность случайно прописать одну абсорбционную линию H_2 равняется 0.5. Это означает, что абсорбционная линия H_2 удовлетворяет критерию идентификации ($L < L_{id}$) для половины ширины диапазона длин волн рассматриваемого участка спектра. Тогда вероятность прописать одновременно N абсорбционных линий H_2 будет $\sim (0.5)^N$. Таким образом, можно ожидать, что вероятность случайно прописать абсорбционную систему H_2 в спектре квазара, содержащем только линии $Ly\alpha$ леса (и не содержащем системы H_2) будет крайне мала. В этом Поэтому разумно предположить, что даже в спектрах с разрешением и отношением S/N (как в спектрах обзора SDSS) надежное детектирование абсорбционных систем H_2 возможно.

Надежность кандидата оценивалась следующим образом. Для каждой линии синтетического спектра системы H_2 искусственно выполнялся случайный сдвиг относительно спектра квазара в пределах окна между положением соседних линий H_2 (что составляет ~ 4000 км/с). При этом разные линии H_2 системы сдвигались независимо друг от друга. Другими словами, выполнялось случайное “перемешивание” положений линий H_2 в спектре. Затем для полученного синтетического

спектра вычислялось значение критерия L , и процедура повторялась. После выполнения большого числа итераций, вероятность идентификации H_2 системы в конкретном спектре можно оценить следующим образом:

$$f_{\text{MC}} = n(L < L_{\text{id}})/n_{\text{all}}, \quad (1.4)$$

где $n(L < L_{\text{id}})$ – число идентификаций – т.е. таких реализаций, для которых $(L < L_{\text{id}})$, а n_{all} – общее число итераций. Значение f_{MC} можно интерпретировать, как вероятность описать абсорбционную систему H_2 с помощью некоторой реализации линий $\text{Ly}\alpha$ леса, имеющую статистику как в исследуемом спектре. Если для большинства итераций $L < L_{\text{id}}$, тогда $f_{\text{MC}} \simeq 1$, – идентификация ненадежна – в исследуемом спектре $\text{Ly}\alpha$ лес может эффективно имитировать систему H_2 . Если условие $L < L_{\text{id}}$ выполняется для малого числа реализаций, тогда вероятность $f_{\text{MC}} \simeq 0$. В таком спектре линии $\text{Ly}\alpha$ леса плохо имитируют абсорбционную систему H_2 , и надежность кандидата высокая. Следует отметить, что этот метод дает более точную оценку вероятности ложной идентификации по сравнению со вторым методом с точки зрения учета индивидуальных особенностей спектра кандидата.

Важно отметить, что в действительности абсорбционные линии H_2 имеют строго фиксированное относительное положение, в то время как описанный выше метод использует случайные относительные положения линий H_2 . С другой стороны, использование случайных сдвигов линий H_2 относительно фиксированных положений линий $\text{Ly}\alpha$ леса эквивалентно случайному сдвигу линий $\text{Ly}\alpha$ леса относительно фиксированного положения линий H_2 . Последний вариант сложно реализовать технически, поэтому мы сдвигали линии синтетического спектра H_2 системы.

Значение f_{MC} позволяет только оценить $P_{\text{ЛД}}$ кандидата. Чтобы определить пороговое значение f_{MC} , начиная с которого идентификацию можно считать надежной, мы применили процедуру поиска абсорбционных систем H_2 к набору спектров квазаров каталога SDSS, не содержащих DLA систем (как следствие, с высокой вероятностью не содержащих систем H_2). Найденные кандидаты в H_2 системы

являются случаями ложной идентификации. Поэтому, сравнивая значения вероятностей f_{MC} для “ложных” кандидатов со значениями f_{MC} для кандидатов из набора S_{DLA} , можно определить пороговое значение вероятности f_{MC} , начиная с которого доля “ложных” кандидатов будет мала.

На основе контрольного набора S_{nonDLA} был сформирован набор S'_{nonDLA} такого же размера, что и S_{DLA} . Для каждого спектра из S'_{nonDLA} (с красным смещением z_{QSO}) красное смещение “фиктивной” DLA системы z_{DLA} рассчитывалось следующим образом. Среди набора S_{DLA} отбирались спектры с $z_{em} = z_{QSO} \pm 0.1$, затем для этой выборки рассчитывалось распределение z_{DLA} и по этому распределению определялось z_{DLA} “фиктивной” DLA системы. Затем для набора спектров S'_{nonDLA} мы выполнили поиск систем H_2 и для каждого кандидата рассчитали значение f_{MC} . На рисунке 1.5 показано сравнение распределений значений f_{MC} для наборов S_{DLA} (дискретный профиль) и S'_{nonDLA} (непрерывный профиль) в зависимости от значения лучевой концентрации кандидата в абсорбционные системы H_2 . Как видно из рисунка, значение $\log f_{MC} < -3$ можно рассматривать в качестве порогового значения, ниже которого идентификация абсорбционной системы H_2 будет надежной.

1.4.2 Использование контрольного набора

Вероятность ложной идентификации $P_{ЛИ}$ может быть оценена через темп идентификации систем H_2 в спектрах набора S_{nonDLA} , которые почти не содержат систем H_2 . Эта вероятность зависит, в основном, от качества спектра, плотности линий $Ly\alpha$ леса и формы профилей линий абсорбционной системы H_2 . Чтобы охарактеризовать зависимость, мы использовали четыре параметра: z_{QSO} , S/N , N_{H_2} и $\lambda_B = \lambda_{cutoff}/(1 + z_{DLA})$ – граница спектра в системе отсчета DLA системы (λ_B задает число доступных для анализа линий H_2 , см. раздел 1.3.2). Для наглядности, вместо S/N и N_{H_2} были использованы логарифмы этих величин.

Набор спектров S_{nonDLA} условно был разделен по ячейкам сетки параметров z_{QSO} , $\log(S/N)$ и λ_B . Красное смещение квазара z_{QSO} менялось в диапазоне от 2.2

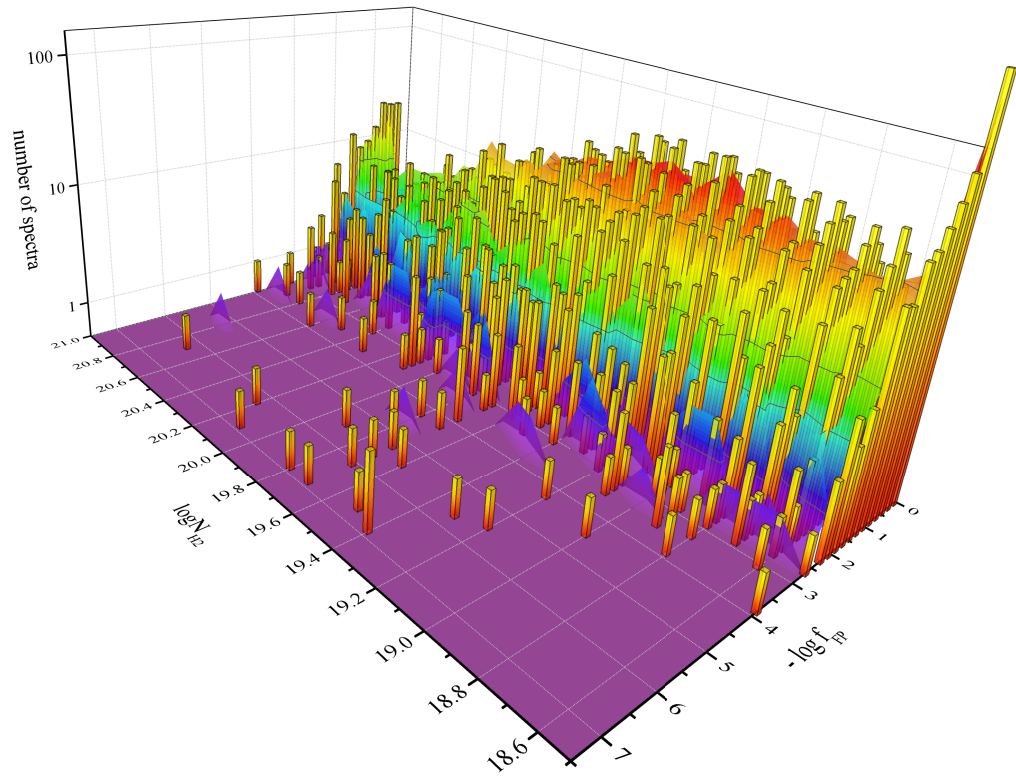


Рис. 1.5: Сравнение распределений вероятности ложной идентификации f_{MC} в зависимости от лучевой концентрации H_2 кандидата для двух наборов: S_{DLA} – спектров квазаров каталога SDSS, содержащих DLA системы (дискретный профиль), и S'_{nonDLA} – спектров квазаров каталога SDSS, не содержащих DLA системы, и, следовательно, с высокой вероятностью, не содержащих систем H_2 (только ложные случаи, непрерывный профиль).

до 4.2 с шагом 0.4. $\log(S/N)$ изменялось в диапазоне от 0.2 до 1.4 с шагом 0.1. Сетка значений для параметра λ_B соответствовала изменению числа доступных для анализа линий H_2 на единицу. Для увеличения статистики, каждый спектр из набора S_{nonDLA} использовался несколько раз с разными значениями z_{DLA} , что, в свою очередь, дает разное число линий H_2 , т.е. разные λ_B . Увеличенный набор спектров обозначается далее как S_{nonDLA}^* . К спектрам набора S_{nonDLA}^* мы применили процедуру поиска абсорбционных систем H_2 (см. раздел 1.3.2) и рассчитали темп идентификации f_{CS} с помощью следующего выражения:

$$f_{\text{CS}}(\lambda_B, S/N, z_{\text{QSO}}, N_{H_2}) = n(L < L_{\text{id}})/n_{\text{bin}}, \quad (1.5)$$

где $n(L < L_{\text{id}})$ – число спектров в ячейке, для которых выполняется критерий идентификации ($L < L_{\text{id}}$), n_{bin} – общее число спектров в ячейке. Значение f_{CS} является оценкой вероятности ложной идентификации $P_{\text{ЛИ}}$.

На рисунке 1.6 показаны контуры значения f_{CS} в пространстве параметров “ $\lambda_B - \log S/N$ ” для 4 значений лучевой концентрации искомым абсорбционных систем H_2 : $\log N_{H_2} = 18.5, 19.0, 19.5$ и 20.0 . Главным образом, значение f_{CS} зависит от параметров λ_B и $\log S/N$, и в меньшей степени от z_{QSO} . Поэтому для увеличения статистики величина f_{CS} была проинтегрирована по параметру z_{QSO} для каждой ячейки сетки параметров “ $\lambda_B - \log S/N$ ”. Зависимость f_{CS} от λ_B и $\log S/N$ для различных z_{QSO} показана на рисунке 1.7. Для удобства восприятия, на рисунках 1.6 и 1.7 дискретная зависимость f_{CS} была сглажена. Общие закономерности поведения функции f_{CS} соответствуют ожидаемым. А именно, темп ложной идентификации f_{CS} уменьшается с уменьшением параметра λ_B (или ростом числа линий H_2 , доступных для анализа), с увеличением отношения S/N и с уменьшением z_{QSO} (меньшая плотность линий Ly α леса). Также темп ложной идентификации уменьшается с увеличением N_{H_2} .

Величина f_{CS} является верхним ограничением вероятности ложной идентификации $P_{\text{ЛИ}}$ поскольку, поиск абсорбционной системы H_2 выполняется в некотором диапазоне красных смещений вблизи z_{DLA} . Вероятность, что на некотором z кри-

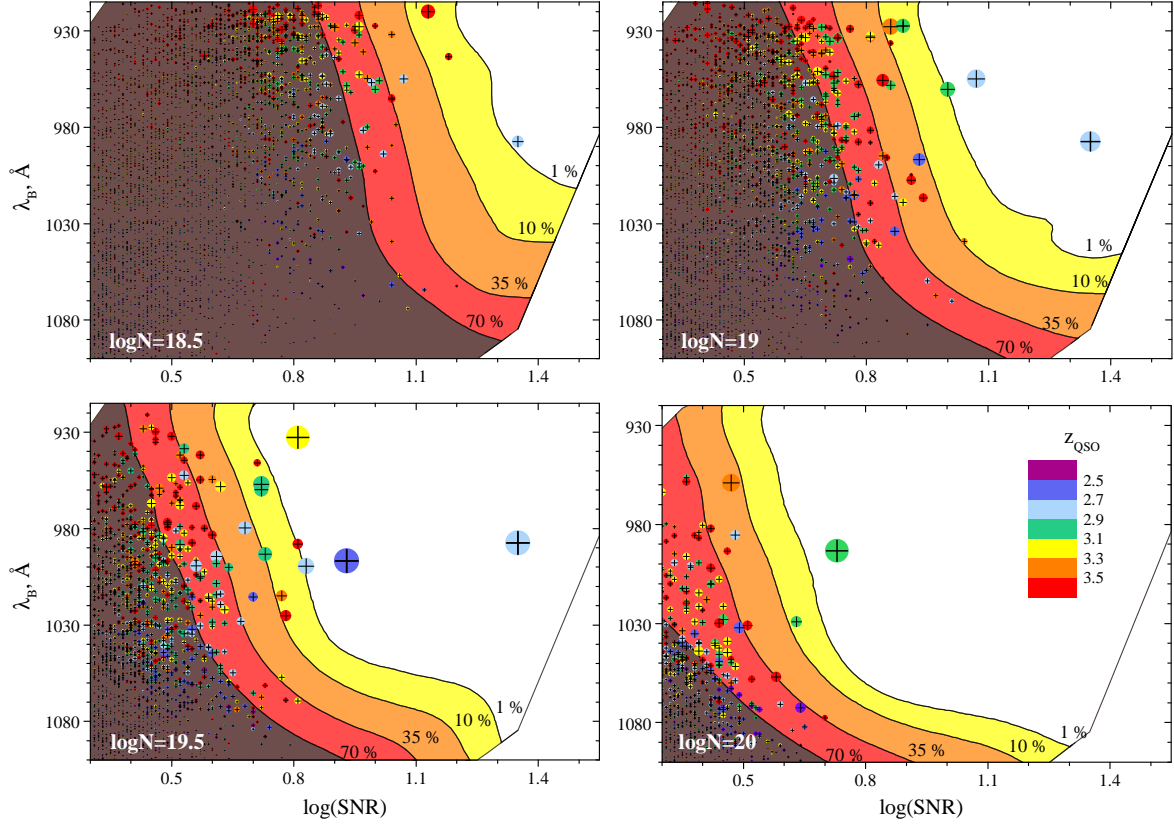


Рис. 1.6: Контуры значений темпа ложной идентификации абсорбционных систем H_2 (f_{CS}) в спектрах квазаров набора S'_{nonDLA} . На четырех панелях показаны значения f_{CS} для различных лучевых концентраций систем H_2 . По оси абсцисс отложены значения $\log(S/N)$ спектров, по оси ординат значения параметра λ_B , характеризующего число линий H_2 доступных для идентификации. Белым, желтым, оранжевым и красным цветом выделены области в пространстве значений “ $\lambda_B - \log S/N$ ”, при которых темп ложной идентификации f_{CS} не превышает 1 %, 10 %, 35 % и 70 %, соответственно. Черными крестиками показано положение кандидатов в абсорбционные системы H_2 из набора S_{cand} . Размер крестика соответствует оценке вероятности ложной идентификации f_{MC} , определенной методом Монте Карло. Чем больше размер крестика, тем ниже величина f_{MC} . Также цветом для каждого крестика показано красное смещение кандидата.

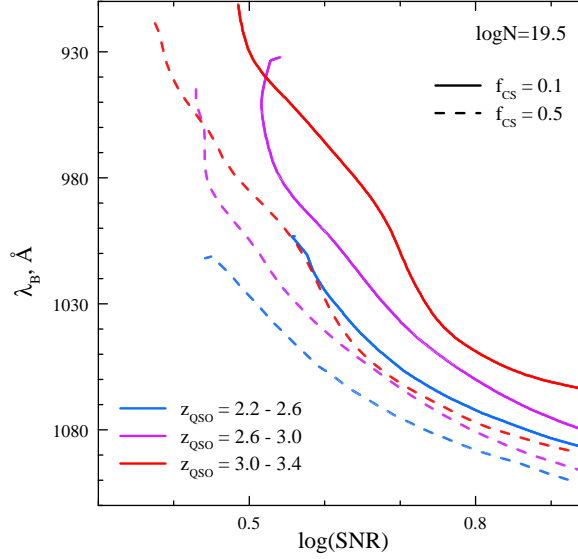


Рис. 1.7: Зависимость темпа ложной идентификации систем H_2 (f_{CS}) от красного смещения квазаров z_{QSO} . Лучевая концентрация H_2 полагалась равной $\log N = 19.5$. Сплошной и штриховой линиями показаны уровни постоянного значения $f_{CS} = 0.1$ и 0.5 . Синим, фиолетовым и красным цветами показано положение контуров f_{CS} для спектров квазаров с z_{QSO} в диапазоне $(2.2 \div 2.6)$ $(2.6 \div 3.0)$ и $(3.0 \div 3.4)$, соответственно.

терий идентификации будет выполнен растет с ростом ширины поискового окна. Таким образом, темп f_{CS} оказывается пропорционален ширине поискового окна и стремится к значению $P_{ЛИ}$ с уменьшением ширины окна. Однако мы не можем установить ширину очень маленькой, поскольку не знаем точного положения абсорбционной системы H_2 относительно DLA системы (положение которой соответствует центру поискового окна).

Вероятность ложной идентификации для кандидатов из набора S_{cand} оценивалась следующим образом. Для каждого кандидата было определено его положение на диаграмме “ $\lambda_B - \log S/N$ ” и обозначено крестиком на рисунке 1.6. Размер крестика соответствует значению вероятности ложной идентификации кандидата, рассчитанной методом Монте-Карло f_{MC} . Заметим, что оценки вероятности $P_{ЛИ}$, полученные с помощью двух различных методов, согласуются друг с другом. Видно, что большинство кандидатов находятся в области параметров, где вероятность $P_{ЛИ}$ велика, т.е. эти идентификации ненадежны. Однако некоторые кандидаты

расположены в области, где вероятность ложной идентификации низкая.

Таким образом, мы смогли оценить пороговые значения параметров S/N и λ_B , для которых идентификация H_2 систем с заданной лучевой концентрацией N_{H_2} имеет заданный уровень надежности f_{CS} . Отметим, что пороговое значение N_{H_2} , для которого идентификация надежна оказывается выше, чем $\log N_{H_2} = 19$. Как показано на рисунке 1.6, надежная идентификация ($f_{CS} < 0.1$) H_2 системы с $\log N_{H_2} = 19$ возможна только в спектрах с высоким отношением $S/N > 8$, которые лишь в небольшом количестве встречаются в каталоге обзора SDSS.

Для некоторых ячеек сетки параметров, в особенности с высоким отношением S/N и низким значением λ_B , в наборе S'_{nonDLA} имеется малое число спектров – поэтому эти области плохо исследуются, описанным выше методом. Чтобы учесть влияние ограничивающих факторов, был построен искусственный каталог спектров квазаров, $S_{Ly\alpha}$, повторяющий основные особенности каталога SDSS. Построение континуума квазара выполнялось с помощью метода главных компонент [82] (использовались только первые 10 главных компонент). Распределение абсорбционных систем $Ly\alpha$ леса по значениям лучевой концентрации $H I$, доплеровского параметра b , а также эволюция плотности систем $Ly\alpha$ леса в зависимости от красного смещения были взяты из [83]. Построение спектров выполнялось в два этапа: сначала спектр квазара вместе с абсорбционными линиями строился при высоком разрешении ($R \approx 100\,000$), затем выполнялась свертка спектра с аппаратной функцией спектрографа SDSS BOSS, взятой из работы [84]. Для каждой ячейки в пространстве параметров “ $\lambda_B - \log S/N$ ” было построено ~ 400 искусственных спектров. Для этого каталога были применены те же процедуры, и рассчитаны вероятности ложной идентификации. Результаты, полученные для каталога SDSS DR 9 и каталога искусственных спектров согласуются друг с другом в пределах статистических ошибок.

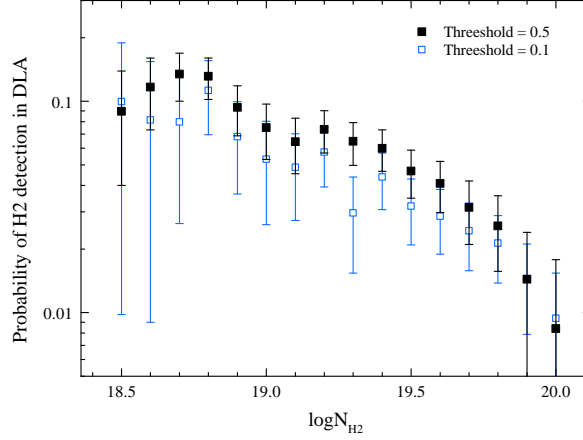


Рис. 1.8: Вероятность детектирования абсорбционной системы H_2 с заданной лучевой концентрацией (ось абсцисс) в спектрах квазаров, содержащих абсорбционные DLA системы. Эту вероятность следует рассматривать как верхний предел, т.к. определяемые лучевая концентрация H_2 в спектрах SDSS как правило переоценена. Синие открытыми и черными заполненными квадратами показаны результаты расчета вероятности для пороговых значений $f_{\text{CS}} = 0.1$ и 0.5 , соответственно. См. подробнее текст.

1.4.3 Оценка вероятности детектирования H_2 системы в спектре квазара

С помощью оценки вероятности ложной идентификации f_{CS} можно определить в какой доле спектров квазаров, содержащих DLA системы, присутствуют абсорбционные системы H_2 . Для заданного значения лучевой концентрации N_{H_2} мы определили область в пространстве параметров $\lambda_{\text{B}} - \log \text{S}/\text{N}$, в которой вероятность f_{CS} не превышает некоторого заданного порогового значения. Если выбрать низкое пороговое значение f_{CS} , надежность детектирования абсорбционной системы H_2 будет высокой, однако статистика оценки низкой (из-за малого числа спектров, удовлетворяющих этим условиям). Поэтому, в качестве порогового значения было взято значение $f_{\text{CS}} = 0.5$. Дополнительно, было проверено, что для меньшего порогового значения $f_{\text{CS}} = 0.1$ полученный результат согласуется в пределах статистических ошибок с результатом для $f_{\text{CS}} = 0.5$.

Главное отличие спектров из наборов S_{DLA} и $\text{S}_{\text{nonDLA}}^*$ заключается в присутствии абсорбционных систем H_2 в наборе спектров S_{DLA} . Отличие значений темпа

ложной идентификации f_{CS} для этих наборов в одной и той же ячейке пространства параметров $\lambda_B - \log S/N$, в основном, вызвано присутствием абсорбционных систем H_2 в спектрах набора S_{DLA} (т.к. свойства Ly α леса в спектрах этих наборов должны быть одинаковыми). Тогда для заданной лучевой концентрации H_2 (N_0) вероятность детектирования абсорбционной системы H_2 с $N \leq N_{H_2}$ определяется выражением:

$$P(N_{H_2}) = \frac{\sum N_{S_{DLA}} \times (f_{CS}(S_{DLA}) - f_{CS}(S_{nonDLA}^*))}{\sum N_{S_{DLA}}}, \quad (1.6)$$

где сумма берется по ячейкам, в которых $f_{CS}(S_{nonDLA}^*)$ меньше, чем пороговое значение. С помощью $N_{S_{DLA}}$ обозначено число спектров с DLA системами в ячейке. Результаты расчета для двух пороговых значений ($f_{CS} = 0.1$ и 0.5) показаны на рисунке 1.8. Расчет с более высоким пороговым значением (следовательно, большее число спектров) дает меньшие статистические ошибки. С другой стороны, как видно на рисунке 1.8, такой расчет дает более высокое значение вероятности идентификации H_2 , что вызвано учетом небольшого числа случаев ложной идентификации. Тем не менее, результаты для $f_{CS} = 0.1$ и $f_{CS} = 0.5$ согласуются в пределах статистических ошибок. Заметим, что эту оценку следует рассматривать только как верхний предел вероятности детектирования систем H_2 (в особенности для низких лучевых концентраций H_2) так как процедура поиска систем H_2 немного переоценивает значения лучевых концентраций, см. подробнее раздел 1.3.2.

Оценка вероятности детектирования систем H_2 , полученная в обзоре абсорбционных систем H_2 в спектрах квазаров высокого разрешения [40], составляет $\sim 10\%$ для систем со степенью молекуляризации $\log f > -4.5$ ($f = 2N_{H_2}/(N_{HI} + 2N_{H_2})$). А в случае высоких лучевых концентраций $\log N_{H_2} > 18$ (который рассматривается в этой работе) оценка составляет $\sim 8\%$, что находится в хорошем согласии с полученным результатом.

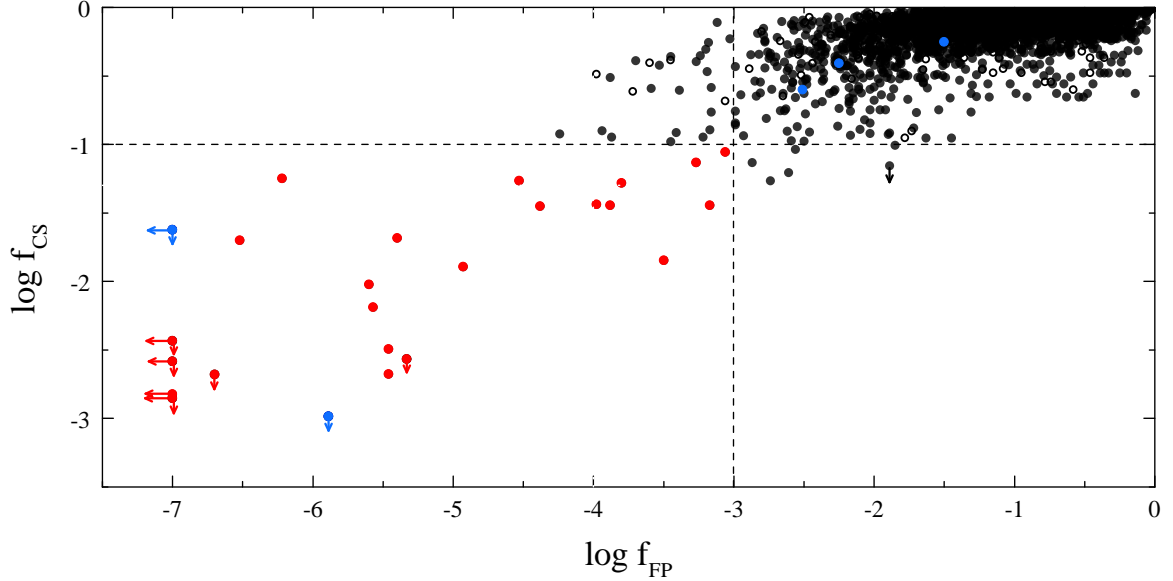


Рис. 1.9: Результаты анализа надежности кандидатов в абсорбционные системы H_2 из предварительного набора S_{cand} . По оси абсцисс и ординат показаны значения логарифма f_{MC} – оценки вероятности ложной идентификации, рассчитанной методом Монте-Карло, и логарифма f_{CS} – темпа ложной идентификации систем H_2 в контрольном наборе спектров. Красными точками показаны наиболее надежные кандидаты, которые мы отобрали в набор S_{final} . Заполненные и незаполненные кружки соответствуют кандидатам, взятым из каталогов SDSS DR9 и DR7. Синим цветом показаны известные абсорбционные системы H_2 . Две из них (J 081240.69+320808.52 и J 123714.61+064759.64) легко детектируются нашим методом.

1.5 Кандидаты в абсорбционные системы H_2

Окончательный набор S_{final} состоит из кандидатов в абсорбционные системы H_2 , имеющих высокий уровень надежности, которые в дальнейшем следует наблюдать на телескопах с высоким разрешением. На рисунке 1.9 показаны значения f_{MC} и f_{CS} , рассчитанные для каждого кандидата из набора S_{cand} .

Список кандидатов, включенных в набор S_{final} , представлен в таблице 1.2. В него вошли кандидаты, имеющие $\log f_{\text{MC}} < -3$ и $\log f_{\text{CS}} < -1$. Эти кандидаты отмечены красным цветом на рисунке 1.9. Известные абсорбционные системы H_2 (из анализов спектров высокого разрешения, полученных на телескопах VLT, Keck) показаны синими кружками. Эти системы исключены из набора S_{final} . Заполнен-

ные и незаполненные кружки соответствуют кандидатам из каталогов SDSS DR9 и DR7. Следует отметить, что улучшение качества спектров квазаров в обзоре SDSS-III BOSS по сравнению с SDSS-I и SDSS-II сильно влияет на вероятность надежной идентификации систем H_2 . Только два кандидата (J 081240.69+320808.52 и J 153134.59+280954.36) из каталога DR 7 удовлетворяют критерию отбора наиболее надежных кандидатов ($\log f_{MC} < -3$ и $f_{CS} < 0.1$). Спектры этих квазаров также представлены в каталоге DR 9, поэтому для анализа мы использовали их спектры из каталога DR 9.

Лучевые концентрации H_2 , приведенные в таблице 1.2, как правило, оказываются переоценены. Во-первых, из-за большого числа абсорбционных линии Ly α леса в участке спектра, содержащем линии H_2 , высока вероятность, что часть линий Ly α леса перекрывается с линиями H_2 . При низком разрешении спектров SDSS две близкие линии неразрешимы, что приводит к уширению профилей абсорбционных линий H_2 . Во-вторых, используемая процедура поиска абсорбционных систем H_2 определяет максимальное значение лучевой концентрации N_{H_2} , при котором выполняется критерий идентификации ($L < L_{id}$). По-видимому, качества спектров SDSS недостаточно, чтобы измерять лучевую концентрацию H_2 с разумным значением величины погрешности. С помощью анализа каталога искусственных спектров (см. раздел 1.4.2), для которых параметры систем H_2 были заданы, определено, что применение стандартной процедуры анализа абсорбционных систем, основанной на критерии χ^2 , дает систематическую ошибку определения $\log N_{H_2}$ более, чем 0.5 (в логарифмическом масштабе).

Известно, что DLA системы, содержащие абсорбционные системы H_2 с $\log N_{H_2} > 19$, ассоциируются в спектре квазара с сильными линиями поглощения нейтрального углерода (см., например, [9, 39, 69]). Кандидаты из набора S_{final} имеют красные смещения систем H_2 , сдвинутые в пределах ± 100 км/с относительно красных смещений DLA систем (что меньше величины статистической ошибки измерения z в спектрах SDSS). Из анализа спектров SDSS линии C I детектируют-

ся только для двух кандидатов (отмечены * в таблице 1.2). Это является дополнительным подтверждением присутствия систем H_2 в спектрах кандидатов. Редкость детектирования абсорбционных линий C I, по-видимому, объясняется низким спектральным разрешением SDSS и невысоким отношением S/N для большинства кандидатов.

Для примера, на рисунке 1.10 показан спектр кандидата J 234730.76–005131.68. Спектр J 234730.76–005131.68 имеет относительно высокое отношение S/N и очень низкое значение f_{MC} , т.е. такая абсорбционная система H_2 надежно детектируется. Среди кандидатов есть один кандидат, содержащий H_2 систему с рекордно высокой лучевой концентрацией H_2 ($\log N_{H_2} \sim 10^{21.1} \text{ см}^{-2}$, см. подробный анализ этого кандидата в разделе 1.6.1) еще три кандидата, для которых оценка лучевой концентрации H_2 системы превышает 10^{20} см^{-2} . На настоящий момент системы со столь высокой лучевой концентрацией H_2 с большими z детектировались только в спектре квазара J 2140–0321 [56] и спектрах послесвечения двух вспышек гамма-излучения [41, 71]. Анализ этих кандидатов позволит изучить полупрозрачную фазу нейтральной межзвездной среды на больших красных смещениях.

В таблице 1.3 приведены свойства семи систем H_2 , которые были ранее идентифицированы в спектрах квазаров высокого разрешения, полученных на телескопах Кекк и VLT.¹⁴ Для двух систем из-за низкого качества спектров обзора SDSS абсорбционные линии H_2 не попадают в диапазон длин волн, где выполнялся поиск систем H_2 . В оставшихся пяти спектрах абсорбционные системы H_2 были идентифицированы процедурой, однако идентификация является надежной только для двух из них (это системы с $\log N_{H_2}^{HR} > 19$)¹⁵. Для остальных трех систем вероятность ложной идентификации не столь мала: $f_{MC} > 10^{-3}$, что не позволяет включить эти системы в список надежных кандидатов.

¹⁴Одна из систем (J 143912.04+111740.5) не была включена в каталог DLA систем в спектрах SDSS [16], что вызвано, по-видимому, низким отношением S/N. Эта система была добавлена в набор S_{DLA}.

¹⁵индексом HR обозначены значения, полученные в анализе спектров высокого спектрального разрешения

Таблица 1.2: . Список наиболее надежных кандидатов (составляющих набор S_{final}) в новые абсорбционные системы H_2 в спектрах квазаров каталога SDSS DR9. Примечание: z_{em} , z_{DLA} – красные смещения квазара и DLA системы, $\log N_{\text{HI}}$ – лучевая концентрация DLA системы, см. [16]; S/N – отношение сигнала к шуму в участке спектра SDSS, где расположены линии поглощения H_2 (приведено в единицах $\log S/N$); λ_{B} – длина волны левой границы спектра SDSS (где $S/N > 2$ для 4 пикселей подряд) в системе отсчета, связанной с DLA системой; $\log N_{\text{H}_2}$ – верхний предел на лучевую концентрацию H_2 системы в спектре кандидата; T_{01} , К – кинетическая температура, которая задает отношение населенностей уровней H_2 $J=0$ и $J=1$; f_{MC} – оценка вероятности ложной идентификации системы H_2 , полученная с помощью моделирования Монте-Карло, см. раздел 1.4.1; f_{CS} – оценка вероятности ложной идентификации, полученная с помощью анализа контрольного набора спектров, не содержащих систем H_2 , см. раздел 1.4.2; Δ_V , км/с – сдвиг по скоростям системы H_2 относительно DLA системы. * – отмечены кандидаты, в спектрах которых детектируются линии C I, ассоциированные с системой H_2 ; ¹ – в этих спектрах компонента H_2 ассоциируется со второй, менее сильной компонентой в профилях линий металлов; ² – в этих спектрах не детектируются линии металлов низких степеней ионизации (O I, Si II и др.), z_{DLA} определялось с помощью анализа абсорбционных линий C IV, Si IV. Визуальный анализ спектров SDSS этих кандидатов указывает, на слабую надежность кандидатов.

| Квазар | z_{em} | z_{DLA} | $\log N_{\text{HI}}$ | S/N | $\lambda_{\text{B}}, \text{\AA}$ | $\log N_{\text{H}_2}$ | T_{01} | $\log f_{\text{MC}}$ | f_{CS} | Δ_V |
|-----------------------------------|-----------------|------------------|----------------------|-------|----------------------------------|-----------------------|----------|----------------------|-----------------|------------|
| J234730.76–005131.68 | 2.63 | 2.5874 | 20.20 | 0.9 | 996 | 19.5 | 25 | < -7.0 | 0.1 | -60 |
| J221122.52+133451.24 | 3.07 | 2.8376 | 21.85 | 0.7 | 993 | 20.1 | 25 | < -7.0 | < 0.1 | -70 |
| J114824.26+392526.40 | 2.98 | 2.8320 | 20.84 | 1.0 | 960 | 19.4 | 25 | < -7.0 | < 0.3 | -30 |
| J075901.28+284703.48 | 2.85 | 2.8221 | 20.87 | 1.1 | 955 | 19.2 | 25 | < -7.0 | < 0.4 | -70 |
| J153134.59+280954.36 | 3.23 | 3.0025 | 21.01 | 0.8 | 932 | 19.5 | 25 | -6.7 | < 0.2 | 60 |
| J001930.55–013708.40 | 2.53 | 2.5284 | 20.64 | 0.5 | 1032 | 20.7 | 25 | -6.5 | 2.0 | -130 |
| J152104.92+012003.12 | 3.31 | 3.1410 | 21.56 | 0.5 | 958 | 20.2 | 25 | -6.2 | 5.6 | -150 |
| J013644.02+044039.00 | 2.81 | 2.7787 | 20.47 | 0.7 | 979 | 19.7 | 25 | -5.6 | 1.0 | -110 |
| J105934.34+363000.00 | 3.77 | 3.6402 | 20.97 | 0.8 | 955 | 19.3 | 25 | -5.6 | 0.7 | -80 |
| J164805.16+224200.00 | 3.08 | 2.9900 | 21.52 | 0.7 | 957 | 19.6 | 25 | -5.5 | 0.3 | -40 |
| J160638.54+333432.89* | 3.09 | 3.0845 | 20.42 | 0.9 | 927 | 19.2 | 25 | -5.5 | 0.2 | -80 |
| J123602.11+001024.60 ¹ | 3.03 | 3.0289 | 20.58 | 0.5 | 938 | 19.9 | 25 | -5.4 | 2.1 | -420 |
| J144132.27–014429.40* | 2.98 | 2.8908 | 21.46 | 0.7 | 959 | 19.7 | 25 | -5.3 | < 0.3 | 110 |
| J150739.67–010911.16 | 3.10 | 2.9743 | 20.05 | 0.6 | 958 | 19.8 | 25 | -4.9 | 1.3 | -30 |
| J150227.22+303452.68 | 3.33 | 3.2828 | 20.83 | 0.9 | 927 | 19.0 | 25 | -4.5 | 5.5 | 0 |
| J082102.66+361849.68 | 2.81 | 2.8030 | 20.38 | 0.6 | 994 | 19.7 | 25 | -4.4 | 3.5 | -10 |
| J084312.72+022117.28 | 2.91 | 2.7866 | 21.80 | 0.4 | 1040 | 21.0 | 25 | -4.0 | 3.6 | -10 |
| J123052.64+020834.80 | 3.36 | 2.7981 | 21.26 | 0.8 | 1015 | 19.7 | 25 | -3.9 | 3.6 | 20 |
| J082716.26+395742.48 | 2.83 | 2.7420 | 20.59 | 1.0 | 956 | 18.8 | 25 | -3.8 | 5.2 | 50 |
| J004349.39–025401.80 ² | 2.96 | 2.4721 | 20.57 | 0.6 | 1029 | 20.1 | 25 | -3.5 | 1.4 | 270 |
| J120847.64+004321.72 | 2.72 | 2.6083 | 20.35 | 1.0 | 993 | 18.8 | 25 | -3.3 | 7.4 | -40 |
| J160332.00+081622.44 | 2.86 | 2.8429 | 20.27 | 0.9 | 942 | 18.9 | 25 | -3.2 | 3.6 | -10 |
| J141205.80–010152.68 | 3.75 | 3.2678 | 20.53 | 0.9 | 1007 | 19.1 | 25 | -3.1 | 8.8 | 30 |

Таблица 1.3: Известные (из наблюдений с высоким разрешением) абсорбционные системы H_2 в спектрах каталога SDSS. Примечание: S/N – приведено в единицах ($\log S/N$); $\log f_{MC}$ – оценка вероятности ложной идентификации, полученная методом Монте-Карло; $\log N$ – лучевая концентрация H_2 , определенная процедурой поиска систем H_2 в спектрах SDSS; $\log N^{\text{HR}}$ – лучевая концентрация H_2 , измеренная в спектрах высокого разрешения. [*] - ссылка

| Квazar | z_{em} | z_{abs} | S/N | $\log f_{MC}$ | $\log N$ | $\log N^{\text{HR}}$ | Прибор | [*] |
|-----------------------|-----------------|------------------|-------|---------------|----------|-------------------------|---------------|------|
| J 081240.69+320808.52 | 2.70 | 2.625 | 1.4 | <-7.0 | 19.8 | 19.88 ± 0.06 | Keck/HIRES | [85] |
| J 123714.61+064759.64 | 2.79 | 2.689 | 0.8 | -5.5 | 19.9 | 19.21 ± 0.13 | VLT/UVES | [63] |
| J 144331.17+272436.73 | 4.44 | 4.225 | 0.6 | -2.5 | 19.2 | 18.29 ± 0.08 | VLT/UVES | [66] |
| J 081634.39+144612.36 | 3.85 | 3.287 | 0.6 | -1.7 | 19.8 | $18.66^{+0.17}_{-0.30}$ | VLT/UVES | [61] |
| J 235057.87-005209.84 | 3.02 | 2.425 | 0.6 | -1.4 | 19.7 | $18.52^{+0.30}_{-0.49}$ | VLT/UVES | [86] |
| J 143912.04+111740.5 | 2.58 | 2.418 | 0.6 | Вне диапазона | | 19.38 ± 0.10 | VLT/UVES | [19] |
| J 091826.16+163609.0 | 3.07 | 2.58 | 0.1 | Вне диапазона | | 16.2 – 19.1 | VLT/X-shooter | [17] |

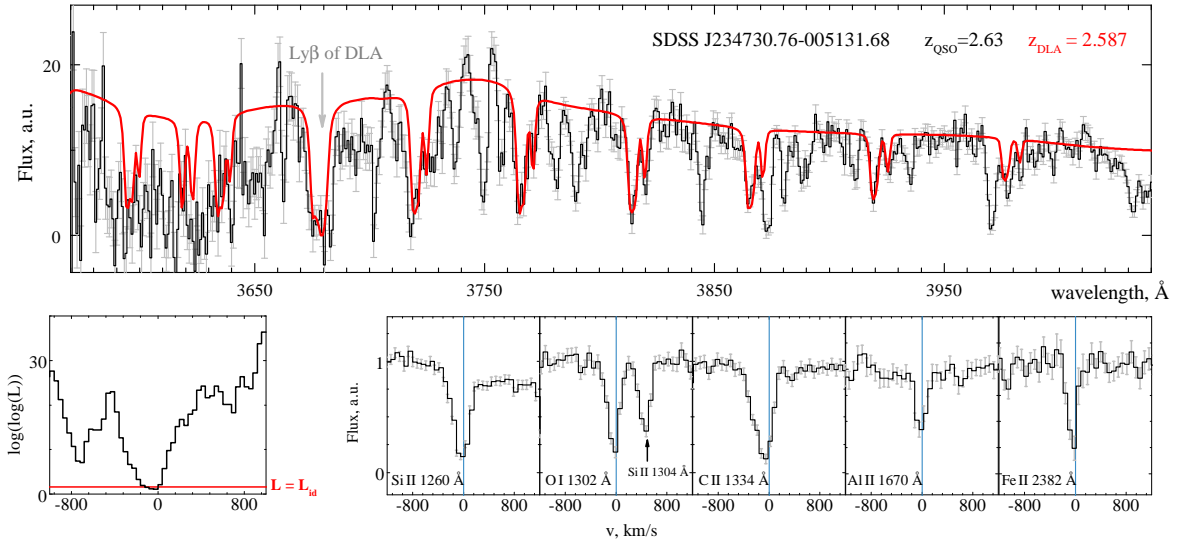


Рис. 1.10: Спектр квазара SDSS J 234730.76–005131.68. На верхней панели показан участок спектра, содержащий линии системы H_2 с красным смещением $z_{\text{abs}} = 2.587$. Красной линией показан синтетический профиль абсорбционных линий H_2 (после свертки с с аппаратной функцией спектрографа BOSS). На пяти нижних правых панелях показаны профили линий металлов, ассоциированных с системой H_2 . На левой нижней панели показана зависимость функции L (см. (1.1)) от сдвига по скоростям системы H_2 относительно DLA системы. Красной горизонтальной линией показано положение критерия идентификации L_{id} , при $L < L_{\text{id}}$ считается, что система H_2 прописывается удовлетворительно.

1.6 Подтверждение кандидатов. Наблюдения с высоким разрешением на телескопе VLT.

По результатам поиска абсорбционных систем H_2 в спектрах каталога SDSS мы подали три заявки на наблюдения наиболее надежных кандидатов на 8.2м оптическом телескопе VLT, и по двум заявкам наблюдения были выполнены в 92 и 94 циклах. В заявка 092.A.0345 (руководитель программы Варшалович Д.А.) предложены 12ч наблюдения с использованием спектрографа высокого разрешения UVES (Ultraviolet and Visible Echelle Spectrograph, [87]) квазара SDSS J084312.72+022117.28, содержащего кандидат в абсорбционную систему H_2 с рекордно высокой лучевой концентрацией $\log N_{\text{H}_2} \approx 21.1$. В заявке 094.A-0362(A) (руководитель программы Балашев С.А.) были предложены для наблюдений 7 квазаров (16 часов экспозиций со спектрографом среднего разрешения X-shooter [88]), в спектрах которых были найдены кандидаты в абсорбционные системы H_2 с большими красными смещениями. Предварительный анализ этих спектров подтверждает присутствие абсорбционных систем H_2 для всех из восьми кандидатов.

1.6.1 Высоко насыщенная абсорбционная система H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.786$ в спектре квазара J 0843+0221

Наблюдения квазара SDSS J084312.72+022117.28 (далее J0843+0221) (с красным смещением $z_{\text{em}} = 2.92$ и видимой звездной величиной $m_V = 19.9$) были выполнены в период с января по март 2014г на телескопе VLT с использованием эшелле-спектрографа UVES. Получено 9 экспозиций спектра квазара, суммарной длительностью 12 часов. Редукция и сложение отдельных экспозиций выполнены с использованием набора процедур UVES CPL (Common Pipeline Library data reduction pipeline release 6.5.1)¹⁶. Итоговый спектр покрывает диапазон длин волн 328–947нм. При разрешении $R \simeq 48\,000$ удалось получить отношение сигнал к

¹⁶<http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/uves/doc/>

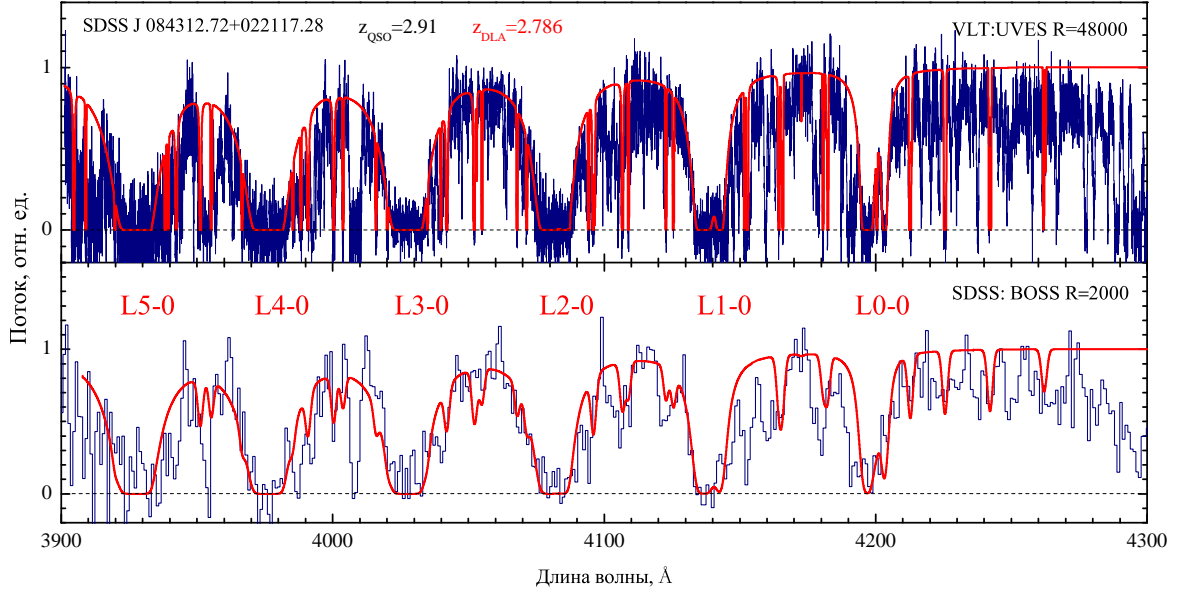


Рис. 1.11: Участок спектра квазара SDSS J 084312.72+022117.28, содержащий абсорбционные линии H_2 , ассоциированные с DLA системой ($z_{\text{abs}} = 2.786$). Верхняя панель: спектр, полученный на телескопе VLT/UVES ($R = 48\,000$). Нижняя панель: спектр, полученный на телескопе SDSS/BOSS ($R \approx 2000$). Красной линией показан синтетический спектр абсорбционной системы H_2 .

пуму $S/N \sim 10$ для участка спектра, содержащего абсорбционных линии H_2 . Поглощение в лоренцевых крыльях высоко-насыщенных абсорбционных линий H_2 сильно ослабляет спектр, что объясняет невысокое значение S/N .

На красном смещении $z_{\text{abs}} = 2.786$ детектируется DLA система. Определена полная лучевая концентрация нейтрального водорода в этой системе, $\log N_{\text{HI}} = 21.82 \pm 0.11$. Линии абсорбционной системы H_2 , ассоциированной с этой DLA системой, детектируются в семи лаймановских полосах (от L0-0 до L6-0) для переходов с вращательных уровней от $J=0$ до $J=6$. На рисунке 1.11 показан синтетический профиль линий H_2 , вписанный в наблюдаемый спектр квазара. На верхней и нижней панелях приведены спектры этого квазара, полученные с высоким и низким разрешением на телескопах VLT/UVES ($R \approx 48\,000$) и SDSS/BOSS ($R \approx 2000$), соответственно. Из-за высокой лучевой концентрации профили отдельных компоненты системы H_2 перекрываются друг с другом, что не позволяет

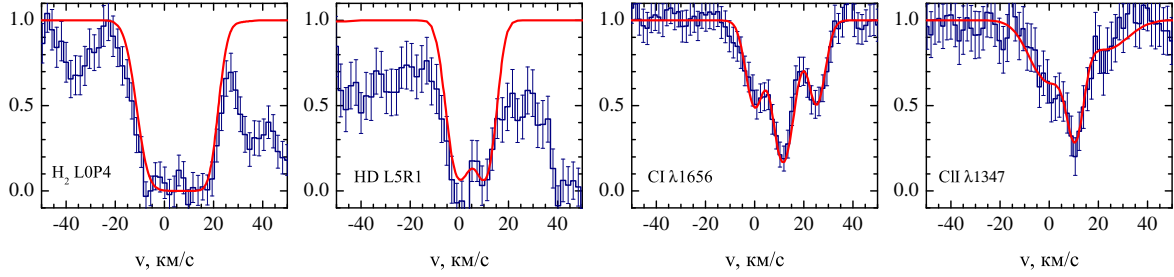


Рис. 1.12: Абсорбционные линии переходов молекул HD (L5R1) и атомов CI ($\lambda 1659$), CI ($\lambda 1347$), ассоциированных с абсорбционной системой H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.786$ в спектре J0843+0221.

определить скоростную структуру системы (число и относительную силу компонент). Однако можно с высокой точностью оценить полную лучевую концентрацию H_2 , которая оказалась равной $\log N_{H_2} = 21.21 \pm 0.02$. Это значение на порядок выше, чем N_{H_2} для других известных систем H_2 с большими красными смещениями в спектрах квазаров и сравнимо с тем, что наблюдалось для одной из DLA систем в спектре послесвечения вспышки гамма-излучения [41]. Дополнительно, в этом спектре мы детектируем абсорбционные линии нейтральных элементов CI и CI и молекул HD, ассоциированные с исследуемой системой H_2 . Профили линий этих элементов показаны на рисунке 1.12. Полная лучевая концентрация HD оказалась равной $\log N_{HD} = 17.21 \pm 0.26$, что на порядок выше, чем значения в других H_2/HD системах с большими красными смещениями.

1.6.2 Наблюдения кандидатов на телескопе VLT с использованием спектрографа X-shooter

Для наблюдений на телескопе VLT с использованием спектрографа X-shooter мы отобрали наиболее надежные кандидаты, доступные для наблюдений в 94 цикле, см. таблицу 1.4. Наблюдения по программе 094.A-0362(A) выполнялись в период с 27 ноября 2014 по 18 февраля 2015. Для каждого кандидата были получены две экспозиции по 1ч. Редукция данных выполнена с помощью пакета программ ESO/X-shooter pipeline v2.5.2 [89], используя визуальное приложение Reflex [90].

Таблица 1.4: Список кандидатов в абсорбционные системы H_2 , для которых были выполнены наблюдения со средним спектральным разрешением на телескопе VLT/X-shooter. Приведены названия квазаров, красные смещения квазаров и абсорбционных систем H_2 и звездные величины квазаров в r фильтре SDSS.

| Квазар | z_{em} | z_{abs} | m_r |
|---------------------------|----------|-----------|-------|
| SDSS J013644.02+044039.00 | 2.78 | 2.779 | 20.03 |
| SDSS J085859.67+174925.32 | 2.66 | 2.625 | 19.22 |
| SDSS J090609.46+054818.72 | 2.79 | 2.568 | 19.73 |
| SDSS J094649.47+121628.56 | 2.67 | 2.608 | 19.00 |
| SDSS J114638.95+074311.28 | 3.03 | 2.840 | 19.45 |
| SDSS J123602.11+001024.60 | 3.03 | 3.029 | 20.27 |
| SDSS J234730.76-005131.68 | 2.63 | 2.587 | 20.05 |

Для UVB участка спектра ($3100 - 5500 \text{ \AA}$), содержащего линии H_2 , при разрешении $R \approx 8500$ отношение сигнала к шуму оказывается около $S/N \approx 40$.

В спектре каждого кандидата выполнено детектирование абсорбционных систем H_2 для переходов с уровней $J=0$ до $J=4$. На рисунке 1.13 показаны синтетические спектры абсорбционных систем H_2 для первых пяти лаймановских полос L0-0-L4-0, вписанные в наблюдаемые спектры квазаров.

1.7 Выводы

В данной главе представлен новый метод поиска абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями в спектрах квазаров среднего разрешения обзора SDSS. Основные сложности задачи поиска систем H_2 связаны с (i) средним спектральным разрешением спектров SDSS, $R \sim 2000$, (ii) низким отношением сигнала-к-шуму (типичное значение $S/N \sim 4$) (iii) присутствием абсорбционных линий Лайман- α леса в участке спектра квазара, где необходимо искать абсорбционные линии H_2 . Разработана автоматизированная процедура, которая выполняет построение континуума квазара, идентификацию абсорбционной системы H_2 с заданным набором параметров (z_{H_2} , b_{H_2} , N_{H_2}) и оценку надежности кандидата. Из-за среднего качества спектров SDSS большинство кандидатов имеют высокую

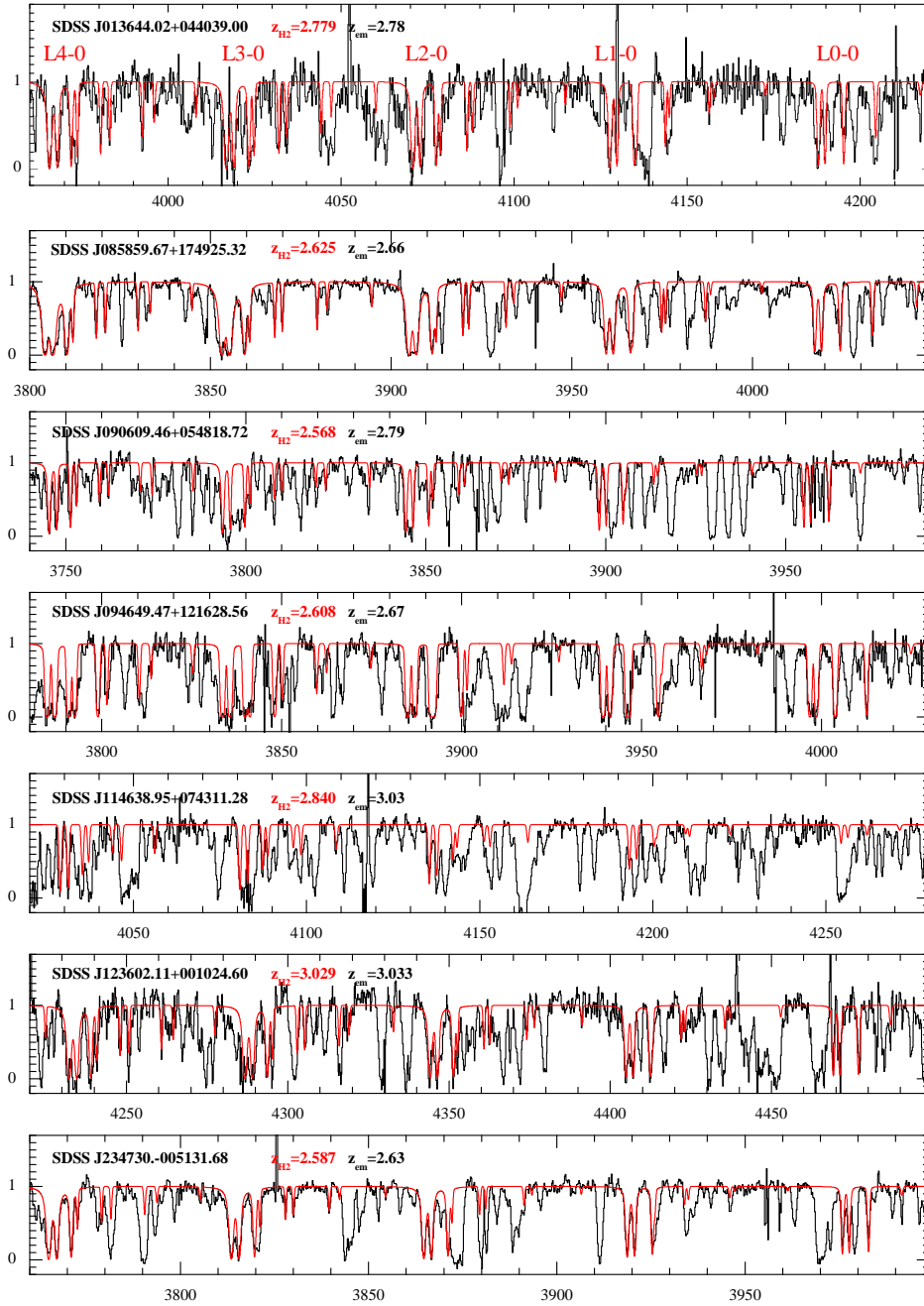


Рис. 1.13: Синтетические спектры абсорбционных систем H_2 , вписанные в наблюдаемые спектры кандидатов, полученных с помощью VLT/XSHOOTER. Показаны линии переходов H_2 с уровней $J = 0 - J = 4$ для первых пяти лаймановских полос L0-0-L4-0.

вероятность ложной идентификации абсорбционных систем H_2 . Для того, чтобы отобрать наиболее надежные кандидаты разработано два метода оценки вероятности ложной идентификации: “моделирование Монте-Карло” и “сравнение с контрольным набором спектров”, и определены пороговые значения вероятности, для которых идентификация систем H_2 становится надежной.

Метод поиска абсорбционных систем H_2 был применен к каталогам спектров квазаров SDSS DR 7 и SDSS DR 9. Обнаружено 23 кандидата в абсорбционные системы H_2 с высоким уровнем надежности. Для восьми из 23 кандидатов были выполнены наблюдения на телескопе VLT с использованием спектрографов высокого и среднего разрешения UVES и X-shooter. Для всех из восьми кандидатов присутствие H_2 систем было подтверждено.

Глава 2

Распространенность молекул HD на больших красных смещениях

2.1 Введение

Одной из задач, решаемых с помощью исследования абсорбционных систем в спектрах квазаров является определение распространенности первичного дейтерия $(D/H)_{\text{пр}}$. Дейтерий по сравнению с другими элементами (^3He , ^4He , ^7Li , ^7Be), образовавшимися в процессе первичного нуклеосинтеза, обладает простейшей ядерной структурой и наиболее чувствителен к изменению плотности барионной материи Ω_b – одного из ключевых параметров Стандартной космологической модели. Считается, что дейтерий только выгорает в ходе звездной эволюции, а любую оценку (D/H) следует рассматривать как нижний предел первичного отношения $(D/H)_{\text{пр}}$. Поэтому особый интерес представляют исследования состава межзвездной среды в галактиках с большим красным смещением, в которых вещество почти не подвергалось влиянию процессов звездообразования (см., например, работу [91] и ссылки в ней).

Отношения изотопов (D/H) в удаленной системе может быть определено с помощью анализа абсорбционных линий атомарного водорода и дейтерия в спектрах квазаров [92]. За последние двадцать лет было обнаружено и детально исследовано 15 абсорбционных систем атомарного дейтерия и водорода с низким содержанием тяжелых элементов (состав вещества в этих системах был почти

не подвержен изменению), и в них отношение (D/H) было измерено с высокой точностью (см. работы [21, 93–95] и ссылки в них). Полученные значения по порядку величины согласуются с предсказаниями стандартной космологической модели, однако имеются и некоторые проблемы. В работе [94] для оценки отношения (D/H) используют лишь пять из пятнадцати систем с низкой металличностью ($[O/H] < -1.55$ ¹), в которых распространенность дейтерия можно определить с наибольшей достоверностью². Среднее значение³ для этой выборки оказывается равным $(D/H) = (2.53 \pm 0.04) \times 10^{-5}$, что согласуется в пределах ошибок с оценкой $(D/H)_P$, полученной из анализа анизотропии реликтового излучения $(2.61 \pm 0.14) \times 10^{-5}$ [98]. При этом разброс отдельных измерений (D/H) для исследуемой выборки попадает в диапазон двух стандартных отклонений. Однако если учитывать другие измерения, разброс значений (D/H) существенно превышает наблюдательных погрешностей отдельных измерений (см. [21, 93, 99]). Наиболее вероятное объяснение связано с недооценкой статистических или систематических ошибок (см., например, [93, 99]) и/или реальных физических процессов, локально, в каждом облаке, изменяющих отношение (D/H), см., например, [100–102]. Также одна из возможных причин вариации результатов может быть связана с методикой измерения отношения (D/H) с помощью анализа линий поглощения D I и H I в спектрах квазаров. Дело в том, что УФ спектр поглощения D I отличается от спектра H I сдвигом длин волн переходов D I относительно H I на ~ 81.5 км/с. Поскольку лучевая концентрация D I примерно на 4–5 порядков ниже, чем лучевая концентрация H I, для исследования отношения (D/H) подходят не все абсорбционные системы H I: если линии H I сильно насыщены, они наплывают на линии D I; в обратной ситуации лучевая концентрация D I оказывается недостаточно высокой ($\log N_{D I} \geq 13$), чтобы детектировать линии D I при имеющимся уровне

¹ $[O/H] = \log(N_O/N_H) - \log(N_O/N_H)_\odot$ – разница логарифмов распространенности элемента (кислорода) в исследуемой системе и по отношению к распространенности, измеренной в Солнечной системе, $\log(N_O/N_H)_\odot = -3.31$ [96].

²в системах с низкой металличностью $[X/H] < -1.5$ изменение содержания дейтерия за счет выгорания D в ходе звездной эволюции ожидается пренебрежимо малым [97]

³Усреднение производится для логарифмов величин.

чувствительности современных телескопов. Основная сложность этого метода связана с присутствием многочисленных линий поглощения $\text{Ly}\alpha$ леса, которые имеют близкие к D I лучевые концентрации и такой же абсорбционный спектр. Если небольшое облако H I движется относительно исследуемой системы со скоростью ~ 81 км/с, линии H I в спектре квазара будут наплывать на линии D I и менять структуру абсорбционных линий, и, как следствие, менять определяемую лучевую концентрацию $N_{\text{D I}}$.

Альтернативным методом определения отношения изотопов (D/H) в абсорбционных системах с большими красными смещениями является анализ линий поглощения молекул HD и H_2 . В случае, если степени молекуляризации D и H в исследуемой абсорбционной системе близки к единице (т.е. облако почти полностью молекуляризовано), отношение лучевых концентраций молекул HD и H_2 (в центральной части облака) $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$ соответствует изотопическому отношению (D/H), см., например, работы [49, 103, 104] (далее отношение $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$ будем обозначать как $(\text{HD}/2\text{H}_2)$). Преимуществом этого метода заключается в том, что абсорбционные спектры молекул HD и молекул H_2 существенно различаются, а большинство узких абсорбционных линий не перекрываются друг с другом в спектре квазара.

Наблюдения молекул HD с большим красным смещением более сложная задача, чем наблюдения молекул H_2 . Впервые линии молекулы HD с большим красным смещением $z_{\text{abs}} = 2.3377$ были идентифицированы в спектре квазара Q 1232+0815 в 2001 году [18]. К настоящему времени линии молекул HD обнаружены в 9 и 32 спектров, содержащих известные абсорбционные системы H_2 с большими красными смещениями. Типичное значение лучевой концентрации HD на ~ 5 порядков меньше, чем у H_2 . Поэтому в некоторых спектрах, содержащих системы H_2 , линии HD не были идентифицированы из-за недостаточно высокого качества спектров. Другая возможная причина заключается в высокой чувствительности молекул HD к физическим условиям в облаках межзвездной среды (см., напри-

мер, [49, 104, 105]). Относительное содержание молекул HD определяется несколькими факторами: это химия межзвездной среды, степень самоэкранирования H_2 и HD в линиях, ослабление фона УФ излучения при поглощении на пыли, интенсивность фона КЛ и др. Определение отношения $(\text{HD}/2\text{H}_2)$ в системах с большими красными смещениями важно для понимания физических условий в холодной фазе нейтральной межзвездной среды в галактиках ранней Вселенной. В этой главе представлен независимый анализ абсорбционных систем H_2 и HD в спектрах Q 0528–2508, J 2123–0050 и J 2100–0641.

2.2 Абсорбционная система H_2 в спектре квазара Q 0528–2508

2.2.1 Данные наблюдений

Квазар Q 0528–2508 (с красным смещением $z_{\text{em}} = 2.78$ и видимой звездной величиной $m_V = 17.3$) – первый квазар, в котором была обнаружена абсорбционная система H_2 с большим красным смещением [7]. Наблюдения Q 0528–2508 выполнялись несколько раз, в частности, в период с 2001 и 2009 годы наблюдения выполнялись на телескопе VLT с использованием спектрографа UVES по четырем программам. В 2001-2003 годах по программам 66.A-0594(A) (руководитель программы Моларо, Molaro), 68.A-0600(A) (руководитель программы Леду, Ledoux) и 68.A-0106(A) (руководитель программы Петижан, Petitjean). Были использованы следующие настройки: размер щели был выбран $\sim 1''$, пиксели CCD матрицы бинированы 2×2 . Это позволило получить спектр с разрешением $R \sim 45000$ для синей ветви спектрографа UVES (300 – 500 нм) и $R \sim 43000$ для красной (420 – 1100 нм). Наблюдений ThAr лампы по этих программах не выполнялось. Еще одни наблюдения были выполнены в 2008-2009 годах по программе 082.A-0087(A) (руководитель программы Убах, Ubachs). Размер щели был выбран $\sim 0.8''$ для синей ветви и $\sim 0.7''$ для красной ветви, пиксели CCD матрицы были бинированы 2×2 . Спектральное разрешение составило $R \sim 60000$ для синей части спектра и ~ 56000 для

Таблица 2.1: Журнал наблюдений квазара Q 0528–2508.

| №. | Дата наблюдений | Программа ID | Экспозиция, с | Размер щели, угл. сек |
|-----------|-----------------|---------------|---------------|-----------------------|
| 1 | 03.02.2001 | 66.A-0594(A) | 1×5655 | 1.0 |
| 2 | 04.02.2001 | 66.A-0594(A) | 2×5655 | 1.0 |
| 3 | 05.02.2001 | 66.A-0594(A) | 1×5655 | 1.0 |
| 4 | 07.02.2001 | 66.A-0594(A) | 1×5655 | 1.0 |
| 5 | 13.02.2001 | 66.A-0594(A) | 1×5655 | 1.0 |
| 6 | 13.03.2001 | 66.A-0594(A) | 1×5655 | 1.0 |
| 7 | 15.03.2001 | 66.A-0594(A) | 1×5655 | 1.0 |
| 8 | 17.10.2001 | 68.A-0600(A) | 1×3600 | 1.0 |
| 9 | 18.10.2001 | 68.A-0600(A) | 2×3600 | 1.0 |
| 10 | 08.01.2002 | 68.A-0106(A) | 2×3600 | 1.0 |
| 11 | 09.01.2002 | 68.A-0106(A) | 2×3600 | 1.0 |
| 12 | 10.01.2002 | 68.A-0106(A) | 2×3600 | 1.0 |
| 13 | 23.11.2008 | 082.A-0087(A) | 2×2900 | 0.8-0.7 |
| 14 | 25.11.2008 | 082.A-0087(A) | 1×2900 | 0.8-0.7 |
| 15 | 23.12.2008 | 082.A-0087(A) | 4×2900 | 0.8-0.7 |
| 16 | 25.01.2009 | 082.A-0087(A) | 1×2900 | 0.8-0.7 |
| 17 | 26.01.2009 | 082.A-0087(A) | 1×2900 | 0.8-0.7 |
| 18 | 26.02.2009 | 082.A-0087(A) | 1×2900 | 0.8-0.7 |
| Суммарное | | | 108450 | |

красной. Съемка ThAg лампы выполнялась сразу после съемки каждой экспозиции квазара. Журнал наблюдений показан в таблице 2.1.

Редукция данных выполнена с помощью специального пакета программ UVES Common Pipeline Library (CPL) data reduction pipeline release 4.9.5⁴. Все экспозиции скорректированы на движения наблюдателя относительно центра масс Солнечной системы. После перебинирования спектров отдельных экспозиций к общему разбиению, экспозиции были сложены с весом, равным обратному значению квадратов ошибок измерения потока в пикселе, и получен итоговый спектр. Использование всех доступных экспозиций позволило получить отношение S/N \sim 60 для участка спектра, содержащего абсорбционные линии H₂.

⁴<ftp://ftp.eso.org/pub/dfs/pipelines/uves/uves-pipeline-manual-22.8.pdf>

Таблица 2.2: Результаты различных анализов абсорбционной системы H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.811$ в спектре Q 0528–250.

| Год | $\log N_{\text{H}_2}^{\text{tot}}$ | Число компонент | Разрешение | Ссылка |
|-------------|------------------------------------|-----------------|------------|--------|
| 1985 | 16.46 ± 0.07 | 1 | | [7] |
| 1988 | 18.0 | 1 | 10 000 | [107] |
| 1998 | 16.77 ± 0.09 | 1 | 10 000 | [108] |
| 2005 | $18.22^{+0.13}_{-0.17}$ | 2 | 40 000 | [39] |
| 2006 | 18.45 ± 0.02 | – | | [109] |
| 2011 | 16.56 ± 0.02 | 3 | 45.000 | [52] |
| 2015 | 18.28 ± 0.02 | 2 | 45 000 | [58] |

2.2.2 Анализ спектра

DLA система с красным смещением $z_{\text{abs}} = 2.811$ в спектре квазара Q 0528–2508 была идентифицирована в работе [106]. Лучевая концентрация нейтрального водорода равняется $\log N_{\text{HI}} = 21.35 \pm 0.07$ [40]. Необычным свойством исследуемой системы является то, что красное смещение $z_{\text{DLA}} = 2.811$ превышает красное смещение квазара $z_{\text{em}} = 2.78$, что может быть вызвано движением DLA системы в направлении на квазар с высокой скоростью, более 2400 км/с.

Абсорбционная система H_2 , ассоциированная с этой DLA системой, впервые идентифицирована в работе [7]. С момента первой идентификации система H_2 исследовалась несколько раз разными независимыми группами, однако полученные результаты анализов сильно варьируются (см. таблицу 2.2). Так, например, оценка полной лучевой концентрации H_2 меняется в пределах двух порядков ($3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$) в зависимости от качества спектра и используемой модели абсорбционной системы.

Линии молекул HD, ассоциированные с исследуемой системой H_2 , в этом спектре идентифицированы в работе [52]. Авторы измерили лучевую концентрацию $\log N_{\text{H}_2} = 16.56 \pm 0.02$, $\log N_{\text{HD}} = 13.267 \pm 0.072$ и относительную распространенность $(\text{HD}/\text{H}_2) = (2.6 \pm 0.6) \times 10^{-4}$, которая почти на порядок превосходит распространенность дейтерия (D/H), определяемую из анализа атомарных линий H I и

D I в спектрах квазаров. Однако, если для оценки $(\text{HD}/2\text{H}_2)$ использовать значение лучевой концентрации H_2 , полученное Шрианандом и др. [39] (с использованием другой модели абсорбционной системы), отношение $(\text{HD}/2\text{H}_2)$ оказывается ниже первичного (D/H) , что согласуется с измерениями (HD/H_2) в абсорбционных системах H_2 с большими красными смещениями (см. [21, 49]).

В новом спектре, полученном с использованием всех доступных экспозиции и имеющим очень высокие отношения сигнала к шуму, мы выполнили независимый детальный анализ абсорбционной системы H_2 . Была обнаружена важная особенность: в центре насыщенных абсорбционных линий H_2 с выраженными лоренцевыми крыльями детектируется остаточный поток на уровне $(2.22 \pm 0.54)\%$ от полного потока. За счет высокого отношения сигнала к шуму ($S/N \sim 60$) этот поток значительно выше уровня нулевого потока в спектре $(-0.21 \pm 0.22)\%$. При этом остаточный поток детектируется для всех линий H_2 , а его величина не меняется, т.е. остаточный поток не зависит от положения линий H_2 в спектре. По видимому, наблюдаемый остаточный поток соответствует излучению квазара (от области формирования континуального излучения квазара), прошедшему мимо молекулярного облака, т.е. облако H_2 только частично покрывает область формирования континуального излучения квазара. Этот эффект детально рассмотрен в главе 3. В следующем разделе приведены результаты анализа системы H_2 с учетом коррекции спектра на фактор неполного покрытия.

2.2.3 Система молекулярного водорода

Спектр квазара был нормирован на континуум, построенный с помощью интерполяции сплайном участков спектра, не содержащих абсорбционных особенностей. Молекулы H_2 детектируются в линиях переходов, идущих с вращательных уровней с $J = 0$ до $J = 5$. Профили абсорбционных линий H_2 имеют сложную структуру, которая не описывается одно-компонентной моделью (см. рисунок 2.1). Для анализа мы отобрали 99 линий H_2 , не имеющих сильного перекрытия с абсорбционными линиями $\text{Ly}\alpha$ леса. С учетом коррекции на остаточный поток в линиях

H_2 , профили линий хорошо описываются с помощью двух-компонентной модели с $z_A = 2.81099$ и $z_B = 2.81112$. Полученное значение критерия $\chi^2 = 1.08$. Параметры абсорбционной системы определялись путем сравнения наблюдаемого спектра квазара с синтетическим спектром абсорбционной системы. Для определения наилучшего значения параметров мы использовали метод Монте Карло по схеме Марковских цепей (MCMC) с применением Аффинно-инвариантного механизма генерации нового положения точек в пространстве параметров [110]⁵, что позволило существенно увеличить скорость сходимости метода. Синтетический спектр абсорбционной системы H_2 , вписанный в наблюдаемый спектр квазара показан на рисунке 2.1. Наилучшие значения параметров абсорбционной системы представлены в таблице 2.3.

Полная лучевая концентрация H_2 для компонент А и В равняется 18.10 ± 0.02 и 17.82 ± 0.02 . Высокое значение N_{H_2} согласуется с присутствием лоренцевых крыльев в профилях линий H_2 переходов с уровней $J = 0$ и $J = 1$ (см. рисунок 2.1). Отношение орто- и пара-водорода для А и В компонент равняется 2.7 ± 0.1 и 3.2 ± 0.3 , что позволило определить кинетическую температуру газа в компонентах А и В, $T_{01}^A = 141 \pm 6$ К и $T_{01}^B = 167 \pm 13$ К.

2.2.4 Линии молекул HD

В новом спектре мы детектируем линии молекул HD, ассоциированные с исследуемой системой H_2 . Лабораторные длины волн переходов HD взяты из работы [111], силы осцилляторов переходов взяты из расчетов [112]. Линии HD детектируются только в компоненте В. Профили линий HD показаны на рисунке 2.2. Для анализа мы использовали только две линии HD L4-0R(0) и L8-0R(0), которые почти не перекрываются с линиями $\text{Lu}\alpha$ леса и имеют наибольшие значения λf . Лучевая концентрация HD оказалась равной $\log N_{\text{HD}}^B = 13.33 \pm 0.02$. Синтетический спектр

⁵Основное преимущество этого метода заключается в эффективном исследовании пространства параметров и отсутствии необходимости вычислять производные функции χ^2 по параметрам, что часто является причиной численных ошибок.

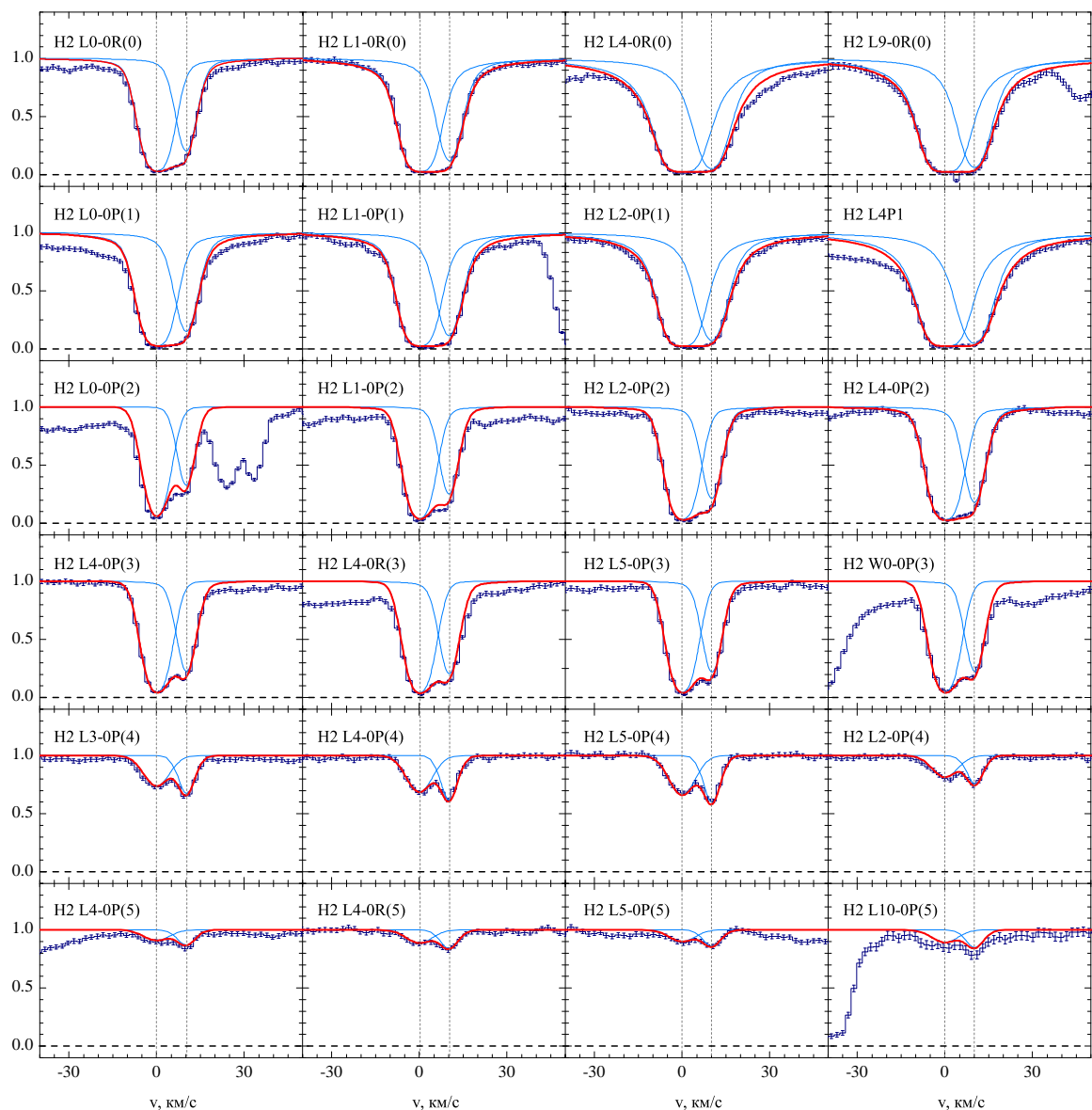


Рис. 2.1: Синтетический спектр линий поглощения молекулы H_2 абсорбционной системы с $z_{\text{abs}} = 2.811$, вписанный в наблюдаемый спектр Q 0528–2508 (UVES/VLT). Спектр приведен с учётом коррекции на фактор покрытия квазара (см. главу 3). Сдвиг по скоростям, показанный по оси абсцисс, вычисляется относительно компоненты A.

Таблица 2.3: Результаты анализа абсорбционной системы H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.811$ в спектре Q 0528–250 (с учетом коррекции спектра на фактор неполного покрытия).

| Компонента | X | J | z_{abs} | $\log N, \text{cm}^{-2}$ | $b, \text{km/c}$ |
|------------|--------------|------------|------------------|--------------------------|------------------|
| А | H_2 | 0 | 2.8109950(20) | 17.50 ± 0.02 | 2.66 ± 0.05 |
| | | 1 | 2.8109950(20) | 17.93 ± 0.01 | 2.71 ± 0.05 |
| | | 2 | 2.8109952(5) | 16.87 ± 0.03 | 2.75 ± 0.03 |
| | | 3 | 2.8109934(5) | 15.97 ± 0.07 | 2.87 ± 0.07 |
| | | 4 | 2.8109938(8) | 14.18 ± 0.01 | 4.79 ± 0.11 |
| | | 5 | 2.8109938(8) | 13.58 ± 0.02 | 5.04 ± 0.39 |
| | | Σ_J | | 18.10 ± 0.02 | |
| В | H_2 | 0 | 2.8111240(20) | 17.16 ± 0.03 | 1.17 ± 0.06 |
| | | 1 | 2.8111230(20) | 17.67 ± 0.02 | 1.14 ± 0.06 |
| | | 2 | 2.8111235(7) | 16.64 ± 0.03 | 1.22 ± 0.02 |
| | | 3 | 2.8111238(6) | 16.24 ± 0.06 | 1.25 ± 0.03 |
| | | 4 | 2.8111231(6) | 14.20 ± 0.01 | 1.72 ± 0.09 |
| | | 5 | 2.8111231(6) | 13.60 ± 0.02 | 2.38 ± 0.45 |
| | | Σ_J | | 17.82 ± 0.02 | |
| | HD | 0 | 2.811121(2) | 13.33 ± 0.02 | 2.25 ± 0.53 |

молекул HD показан красной линией на рисунке 2.2.

Полученное значение $\log N_{\text{HD}}^{\text{B}}$ согласуется в пределах ошибок с оценкой $\log N_{\text{HD}} = 13.27 \pm 0.07$, представленной в работе [52]. Используя измеренное значение полной лучевой концентрации H_2 для компоненты В ($\log N_{\text{H}_2}^{\text{B}} = 17.82 \pm 0.02$), мы получили оценку $(\text{HD}/2\text{H}_2) = (1.62 \pm 0.11) \times 10^{-5}$. Вследствие значительно более высокой лучевой концентрации H_2 оценка $(\text{HD}/2\text{H}_2)$ оказывается на порядок ниже, чем оценка, полученная в работе [52].

2.3 Абсорбционная система H_2 в спектре квазара J 2123–0050

2.3.1 Данные наблюдений

Квазар J 2123–0050 (с красным смещением $z_{\text{em}} = 2.261$ и видимой звездной величиной $m_V = 16.6$) был отождествлен в обзоре SDSS. Спектры высокого разрешения этого квазара были получены независимо на двух крупнейших оптиче-

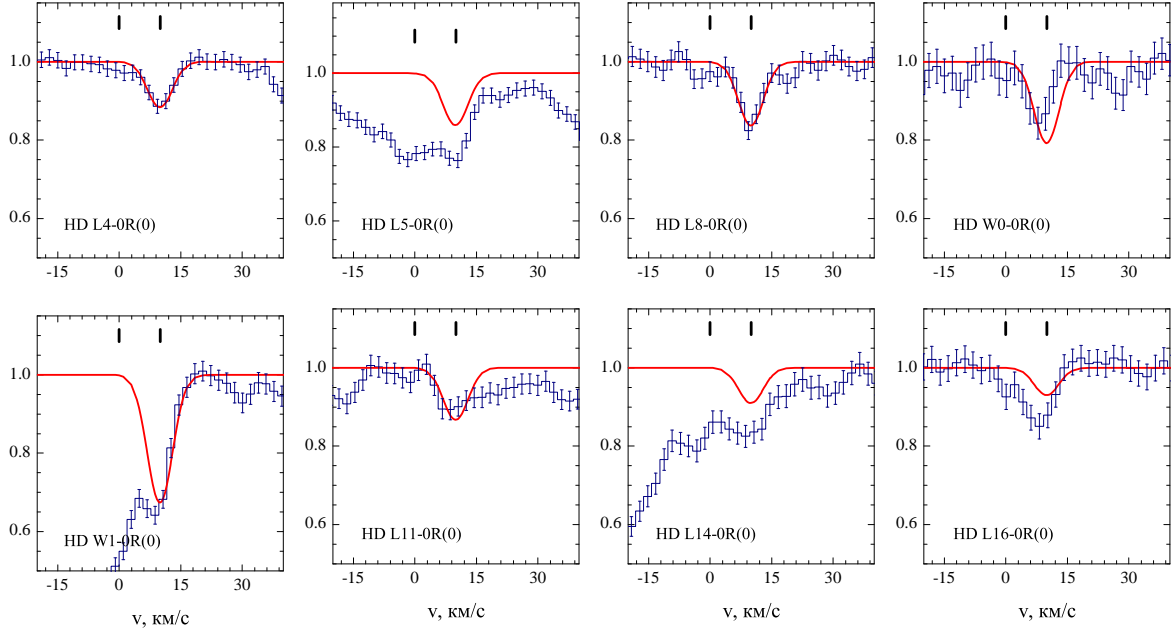


Рис. 2.2: Синтетический спектр линий поглощения молекулы HD абсорбционной системы с $z_{\text{abs}} = 2.811$, вписанный в наблюдаемый спектр Q 0528–2508 (UVES/VLT). Вертикальными штрихами показано положение компонент A и B абсорбционной системы H_2 . Сдвиг по скоростям, показанный по оси абсцисс, вычисляется относительно компоненты A. Линии HD детектируются только в компоненте B. В профиле линии HD W0-0R(0) синтетический спектр оказывается значительно ниже наблюдаемого, что связано с неопределенностью построения континуума квазара вблизи центра $\text{Ly}\alpha$ абсорбционной линии второй DLA системы с $z_{\text{abs}} = 2.14$.

ских телескопах Кеэк (с использованием эшелле-спектрографа высокого разрешения HIRES, High Resolution Echelle Spectrometer [113]) и VLT (с использованием эшелле-спектрографа UVES). Наблюдения квазара на телескопе Кеэк в диапазоне длин волн $3071 - 5869 \text{ \AA}$ проводились в 2006 году по программе U080Hb (руководитель программы Прохаска, Prochaska). Данные находятся в свободном доступе архива Кеэк⁶. Размер щели был выбран $0.4''$, пиксели CCD матрицы бинированы 2×1 . Указанные настройки позволили получить спектр с разрешением $R \sim 110\,000$. Редукция и сложение экспозиций выполнено с помощью пакета программ МАКЕЕ⁷. Суммарное время экспозиций составляет ~ 6.1 ч. Наблюдения

⁶<https://koa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/KOA/nph-KOAlgin>

⁷<http://www.astro.caltech.edu/tb/makee>

квара J 2123–0050 на телескопе VLT выполнялись в 2008 году по программе 81.A-0242 (руководитель программы Убах, Ubachs). Данные находятся в свободном доступе архива Южно-Европейской Обсерватории (ESO)⁸. Для синей и красной ветвей спектрографа UVES были использованы разные настройки. Для синей ветви размер щели был выбран 0.8", и пиксели CCD матрицы бинированы 2x2. Для красной ветви размер щели был выбран 0.7", и пиксели CCD матрицы бинированы 1x1. Указанные настройки позволили получить спектр с разрешением 49 620 для синей части и 56 990 для красной. Редукция и сложение отдельных экспозиций выполнялись с помощью пакета программ UVES CPL. Общее время экспозиций составило ~ 11.3 ч.

2.3.2 Анализ спектра

Суб-DLA система с красным смещением $z_{\text{abs}} = 2.06$ в спектре квазара J 2123–0050 была идентифицирована в работе [114]. Детальный анализ суб-DLA системы выполнен в работе [26]. Суб-DLA система состоит, по крайней мере, из двух компонент с лучевыми концентрациями $\log N_{\text{HI}}(z = 2.05684) = 18.40 \pm 0.30$ и $\log N_{\text{HI}}(z = 2.05930) = 19.18 \pm 0.15$. В компоненте с $z_{\text{abs}} = 2.05930$ детектируются линии молекул H₂, HD и нейтральных элементов C I, Cl I, S I и Mg I, которые, как считается, ассоциируются с холодной фазой нейтральной межзвездной среды (см., например, [39, 48]).

Абсорбционная система H₂ в спектре квазара J 2123–0050 исследовалась в нескольких работах. В работе [115] в спектре, полученном на телескопе Keck/HIRES, и в работе [116] в спектре, полученном на телескопе VLT/UVES, независимо исследованы линии молекул H₂ и HD для постановки ограничения на возможную временную вариацию отношения масс протона и электрона. Исследования отношения HD/2H₂ в молекулярном облаке было выполнено в работе [117] в спектре, полученном на телескопе Keck (сравнение результатов анализов см. в таблице 2.4). Мы выполнили независимый анализ этой абсорбционной системы в

⁸http://archive.eso.org/wdb/wdb/adp/phase3_main/form

Таблица 2.4: Сравнение результатов измерений лучевых концентраций H_2 и HD в компоненте А абсорбционной системы H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.059$ в спектре J 2123–0050.

| Работа | z_A | $\log N_A(\text{H}_2)$ | $\log N_A(\text{HD})$ | T_{01}, K | $\text{HD}/2\text{H}_2$ |
|------------|--------------|------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|
| [115] | 2.0593276(5) | 15.76 ± 0.03 | 12.95 ± 0.03 | 116 ± 17 | $(7.7 \pm 0.8) \times 10^{-4}$ |
| | 2.0593290(4) | 17.55 ± 0.04 | 13.69 ± 0.05 | -97 ± 51 | $(6.9 \pm 1.0) \times 10^{-5}$ |
| [117] | 2.0594(1) | 17.64 ± 0.15 | 13.84 ± 0.20 | 281_{-134}^{+2700} | $(7.9 \pm 4.6) \times 10^{-5}$ |
| Эта работа | 2.0593245(5) | 17.94 ± 0.01 | 13.87 ± 0.06 | 138.6 ± 5.8 | $(4.3 \pm 0.6) \times 10^{-5}$ |

спектре, полученном на телескопе VLT. Параметры абсорбционной системы определялись путем сравнения наблюдаемого спектра квазара с синтетическим.

2.3.3 Абсорбционная система H_2

В допустимый диапазон длин волн спектрографа UVES ($3000 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 11000 \text{ \AA}$)⁹ попадают линии H_2 девяти полос лаймановской серии и одной полосы вернеровской серии. В линиях H_2 переходов с вращательных уровней $J = 0$ до $J = 5$ детектируется, по крайней мере, две компоненты (далее А и В) с красными смещениями $z_A = 2.05932(5)$ и $z_B = 2.05955(3)$. Относительный скоростной сдвиг между компонентами А и В достаточно велик по сравнению с шириной аппаратной функции UVES $\sim 6 \text{ км с}^{-1}$, доплеровским уширением линий $\sim 1 - 5 \text{ км с}^{-1}$, и составляет $\simeq 22 \text{ км с}^{-1}$. Поэтому отдельные компоненты в профилях линий переходов разрешимы даже для насыщенных уровней $J = 0, 1$. Указаний на присутствие дополнительных компонент в профиля тонких линий нейтральных элементов (С I, С I I, S I и Mg I) не обнаружено, поэтому мы использовали двух-компонентную модель. Наилучшие значения параметров и ошибки их определения приведены в таблице 2.5. Синтетический спектр абсорбционной системы H_2 показан на рисунке 2.3. Полные лучевые концентрации оказались равными $\log N_{\text{H}_2}^A = 17.94 \pm 0.01$ и $\log N_{\text{H}_2}^B = 15.16 \pm 0.02$. Отметим, что доплеровский параметр b_J увеличивается с возрастанием уровня J . Этот эффект хорошо известен для H_2 систем (см., на-

⁹<http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/uves/inst.html>

Таблица 2.5: Результаты анализа абсорбционной системы H_2 в спектре J2123–0050 в суб-DLA системе с $z_{\text{abs}} = 2.059$.

| компонента А $z_A = 2.0593245$ | | | | компонента В $z_B = 2.0595532$ | | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|------------------|-----------------|-----------------------------------|------------|------------------|-----------------|
| | J | $\log N_A$ | b_A , км/с | | J | $\log N_B$ | b_B , км/с |
| H_2 | 0 | 17.37 ± 0.02 | 1.71 ± 0.04 | H_2 | 0 | 14.00 ± 0.02 | 5.18 ± 0.51 |
| | 1 | 17.79 ± 0.01 | 2.07 ± 0.05 | | 1 | 14.84 ± 0.01 | 5.24 ± 0.11 |
| | 2 | 16.00 ± 0.03 | 2.97 ± 0.05 | | 2 | 14.41 ± 0.01 | 5.02 ± 0.18 |
| | 3 | 15.54 ± 0.02 | 3.56 ± 0.06 | | 3 | 14.50 ± 0.01 | 4.71 ± 0.30 |
| | 4 | 14.16 ± 0.01 | 4.64 ± 0.23 | | 4 | 13.84 ± 0.03 | 7.86 ± 0.57 |
| | 5 | 13.75 ± 0.03 | 5.10 ± 0.51 | | 5 | 13.50 ± 0.06 | 7.36 ± 0.80 |
| | Σ_J | 17.94 ± 0.01 | | | Σ_J | 15.16 ± 0.02 | |
| HD | 0 | 13.87 ± 0.06 | 2.0 ± 0.6 | HD | 0 | не детектируется | |
| HD/2H ₂ | $(4.26 \pm 0.60) \times 10^{-5}$ | | | HD/2H ₂ | | | |

пример, работы [60, 62, 69]) и может быть вызван неоднородным распределением молекул H_2 на разных вращательных уровнях J по объему молекулярного облака (см. подробнее [118]).

Мы детектируем ненулевой остаточный поток для линий H_2 компоненты А (переходов с уровней J=0 и J=1), находящихся в участке спектра квазара, содержащем эмиссионные линии квазара Ly β и O VI. Остаточный поток детектируется на уровне около 1 – 4 % полного потока. В силу невысокой лучевой концентрации H_2 и малости сил осцилляторов для переходов H_2 нижний лаймановских полос учет остаточного потока в анализе слабо влияет на определяемые значения лучевой концентрации H_2 . Детальный анализ эффекта представлен в главе 3.

2.3.4 Молекулы HD

Для оценки лучевой концентрации молекул HD мы использовали спектр, полученный на телескопе VLT. Из-за малости лучевой концентрации H_2 в системе В ($\log N_{\text{H}_2}^B = 15.16 \pm 0.02$) ожидаемая лучевая концентрация молекул HD не превосходит значения $\log N_{\text{HD}}^B \lesssim 11$, поэтому зарегистрировать линии HD в этой компоненте невозможно при имеющимся уровне чувствительности современных телескопов.

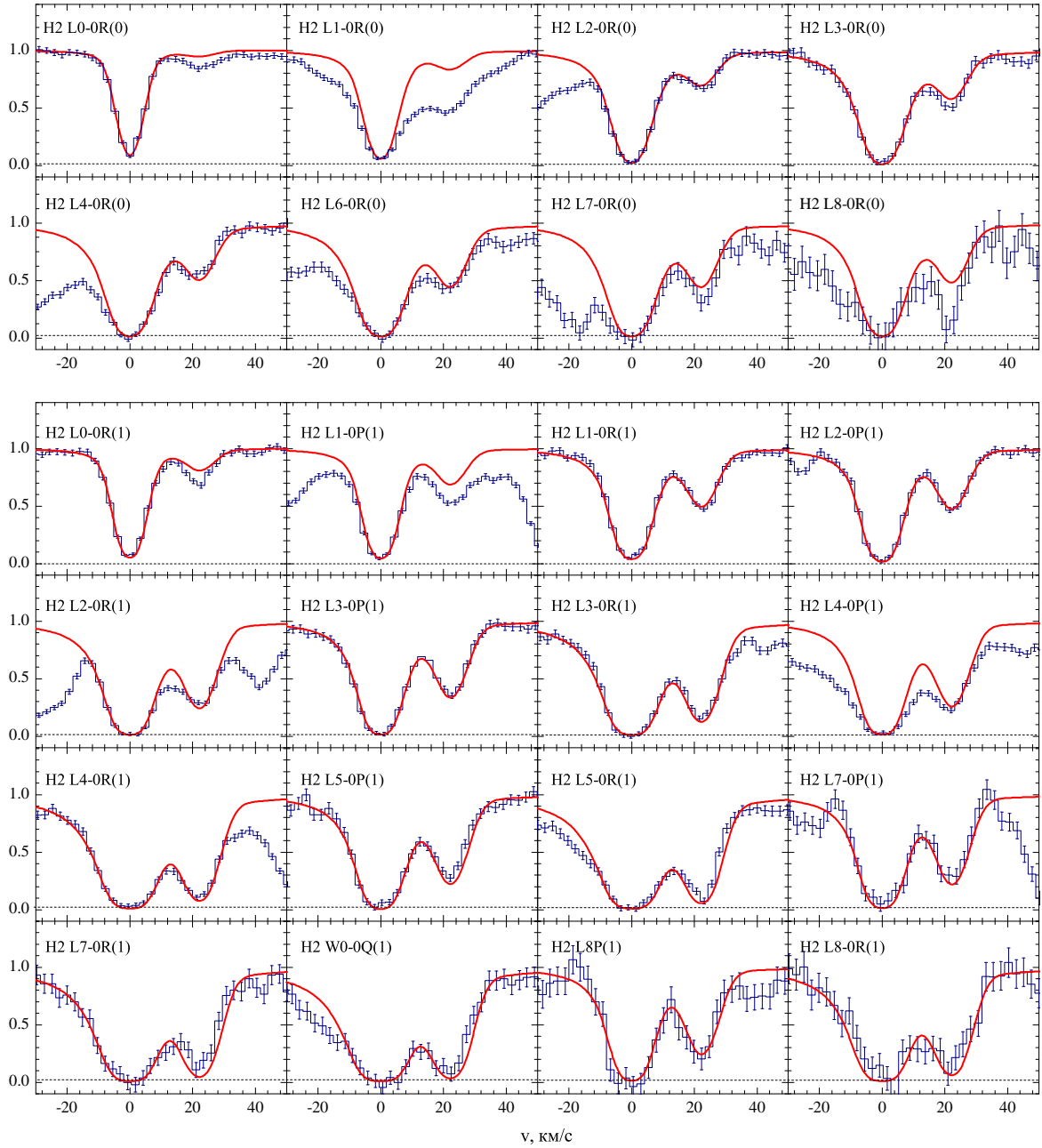


Рис. 2.3: Синтетический спектр линий поглощения молекулы H_2 абсорбционной системы с $z_{\text{abs}} = 2.059$, вписанный в наблюдаемый спектр J 2123–0050 (VLT/UVES). Спектр приведен с учётом коррекции на фактор покрытия квазара (см. главу 3). Сдвиг по скоростям, показанный по оси абсцисс, вычисляется относительно компоненты А.

Линии молекул HD детектируются только в компоненте А для переходов лаймановской и вернеровской полос вплоть до L8-0 и W0-0. Для определения лучевой концентрации HD ($J = 0$) были использованы линии переходов молекул HD: L0-0, L2-0, L3-0, L5-0, L7-0, L8-0, не перекрывающиеся с линиями Ly α леса. Лабораторные длины волн переходов молекулы HD были взяты из работы [111]. Силы осцилляторов взяты из расчетов, приведенных в работе [112]. Оцененная лучевая концентрация молекул HD равна $\log N_{\text{HD}}^{\text{A}} = 13.87 \pm 0.06$. Профили линий молекул HD и вписанный синтетический спектр показаны на рис. 2.4. Полученное значение согласуется с оценкой, $\log N_{\text{HD}}^{\text{A}} = 13.84 \pm 0.20$, представленной в работе [117]. Однако вследствие более высокого отношения сигнала к шуму в спектре, полученном на телескопе VLT, точность нашей оценки N_{HD} значительно выше.

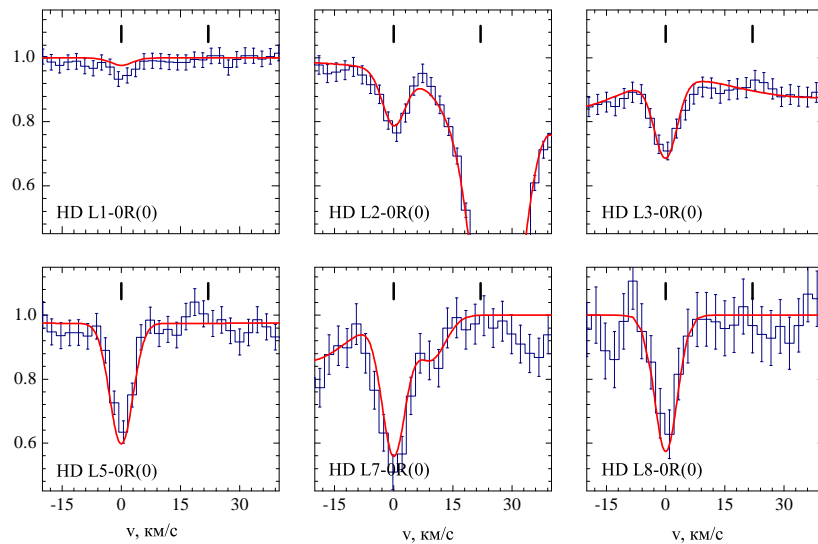


Рис. 2.4: Синтетический спектр молекул HD с $z_{\text{abs}} = 2.05933$, вписанный в наблюдаемый спектр квазара J2123–0050 (VLT/UVES). Вертикальными штрихами показано положение двух компонент абсорбционной системы H₂ (A и B). Сдвиг по скоростям, показанный по оси абсцисс, вычисляется относительно компоненты A, в которой детектируются линии HD.

2.3.5 Нейтральный углерод

Структура линии нейтрального углерода для переходов с основного, $2s^2 2p^2 \ ^3P_0$ (C I), и двух возбужденных состояний, $2s^2 2p^2 \ ^3P_1$ (C I*) и $2s^2 2p^2 \ ^3P_2$ (C I**) в спектре J 2123–0050 состоит по крайней мере из двух компонент с красными смещениями, совпадающими с положением компонент А и В системы H_2 . Анализ линий нейтрального углерода был выполнен для двух моделей. Модель (i) содержит две компоненты C I, ассоциированные с компонентами А и В абсорбционной системы H_2 . В модели (ii) по сравнению с моделью (i) использована еще одна дополнительная компонента со значительно большим значением доплеровского параметра. Результаты анализа приведены в табл. 2.6.

С помощью модели (i) профили линий переходов C I с основного состояния для компоненты А описываются недостаточно хорошо ($\chi_{\text{red}}^2 \simeq 1.5$). Модель (ii) дает значительно лучшее описание ($\chi_{\text{red}}^2 \simeq 0.9$). Чтобы определить наиболее предпочитаемую модель среди моделей с разным числом подгоночных параметров, мы использовали статистический критерий AICС (corrected Akaike information criterion, см. [119])¹⁰. Считается, что разница значений $\Delta\text{AICС} < -10$ является сильным свидетельством в пользу модели с меньшим значением критерия, см., например, [120]. Изменение величины критерия AICС для модели (ii) по сравнению с моделью (i) составляет $\Delta\text{AICС} = -252$. На рисунке 2.5 показан синтетический спектр линий C I для модели (ii), вписанный в наблюдаемый спектр квазара. Присутствие дополнительной подкомпоненты C I, которая не детектируется в линиях H_2 , можно объяснить с помощью нейтрального углерода, связанного с ионизованной частью суб-DLA системы. См. подробнее обсуждение происхождения этой компоненты в главе 4.

¹⁰ $\text{AICС} = \chi^2 + 2p + \frac{2p(p+1)}{n-p-1}$, где p – число подгоночных параметров модели, n – число точек спектра, включенных в анализ.

Таблица 2.6: Сравнение результатов анализа абсорбционных линий C I с $z_{\text{abs}} = 2.059$ в спектре J 2123–0050 для двух моделей .

| Модель | | $\log N_{\text{C I}}$ | $\log N_{\text{C I}^*}$ | $\log N_{\text{C I}^{**}}$ | b , км/с | χ_{red}^2 | AICC |
|--------|---|-----------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------|-------|
| (i) | A | 13.82 ± 0.02 | 13.26 ± 0.02 | 12.65 ± 0.02 | 1.31 ± 0.03 | 1.53 | 638 |
| | B | 12.71 ± 0.02 | 12.43 ± 0.04 | 11.94 ± 0.18 | 4.37 ± 0.44 | | |
| (ii) | A | 13.91 ± 0.03 | 13.46 ± 0.03 | 12.65 ± 0.03 | 0.88 ± 0.04 | 0.91 | 386.4 |
| | B | 12.71 ± 0.02 | 12.43 ± 0.03 | 11.90 ± 0.09 | 4.18 ± 0.27 | | |
| | C | 12.78 ± 0.03 | нет | нет | 6.89 ± 0.60 | | |

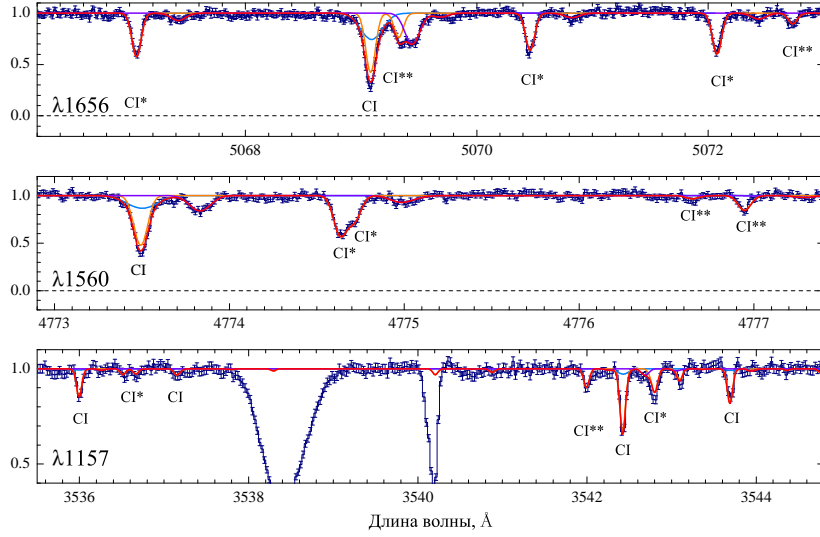


Рис. 2.5: Синтетический спектр линий C I , ассоциированных с абсорбционной системой H_2 , вписанный в наблюдаемый спектр квазара J 2123–0050 (UVES/VLT). Профили отдельный компонент линий C I показаны оранжевой (А), сиреневой (В) и синей (С) линиями, соответственно.

2.3.6 Сравнение результатов анализов системы H_2

Сравнение результатов нашего анализа H_2 системы в спектре J 2123–0050, полученном на телескопе VLT, с результатами анализов H_2 системы в спектре J 2123–0050, полученном на телескопе Кеск, представленных в работах [115, 117] представлено в таблице 2.4. Основное отличие результатов заключается в оценке лучевой концентрации H_2 для компоненты А на уровне $J = 0$. Значение $\log N_{\text{H}_2}^A (J = 0) = 17.37 \pm 0.02$, полученное в этой работе, в три раза превосходит оценку, представленную в работе [117] (16.86 ± 0.24), и в 30 раз оценку, представ-

ленную в работе [115] (15.80 ± 0.40). Отличие результатов может быть вызвано разным качеством спектров и различным учетом абсорбционных линий $\text{Ly}\alpha$ леса, пересекающихся с линиями H_2 . Среди всех линий H_2 переходов с уровня $J = 0$ доступных для анализа только две линии L0-0R(0) и L3-0R(0) не перекрываются с линиями $\text{Ly}\alpha$ леса. На рисунке 2.6 показаны профили абсорбционных линий H_2 переходов с уровня $J = 0$ для двух спектров квазара, полученных на телескопе Keck (верхняя панель) и телескопе VLT (нижняя панель). Красной линией показан синтетический спектр системы H_2 , построенный с использованием лучевой концентрации H_2 , определенной в этой работе. Видно, что в профилях линий H_2 переходов L2-0R(0) и L4-0R(0) линии $\text{Ly}\alpha$ леса попадают в крыло линий H_2 , а в случае переходов L1-0R(0) и L6-0R(0) линии $\text{Ly}\alpha$ леса расположены вблизи центра линии H_2 . Чтобы определить лучевую концентрацию H_2 на уровне $J=0$ путем сравнения наблюдаемого спектра с синтетическим с использованием всех доступных линий H_2 , необходимо искусственно добавлять в синтетический спектр H_2 системы абсорбционные линии $\text{Ly}\alpha$ леса. Спектральные параметры (N и b) и число компонент для ненасыщенных линий $\text{Ly}\alpha$ леса, часто, нельзя однозначно определить, так как такие системы относятся к корневому участку зависимости на кривой роста. Поэтому неучет или наоборот избыточное использование линий $\text{Ly}\alpha$ леса в анализе может приводить к переоценке или недооценке определяемой лучевой концентрации H_2 , соответственно.

2.3.7 Отношение $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$

Используя значения полных лучевых концентраций H_2 и HD в компоненте A, $\log N_{\text{H}_2}^{\text{A}} = 17.94 \pm 0.01$ и $\log N_{\text{HD}}^{\text{A}} = 13.87 \pm 0.06$, мы определили отношение $N_{\text{HD}}^{\text{A}}/2N_{\text{H}_2}^{\text{A}} = (4.26 \pm 0.60) \times 10^{-5}$. Это значение ниже, чем результат измерения $(7.9 \pm 4.6) \times 10^{-5}$ в работе [117], однако превосходит оценку распространенности первичного дейтерия $(2.62 \pm 0.15) \times 10^{-5}$ ([98], из анализа анизотропии реликтового излучения) почти на 3 стандартных отклонения. На сегодняшний день исследуемая H_2/HD система является единственной, в которой отношение $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$ пре-

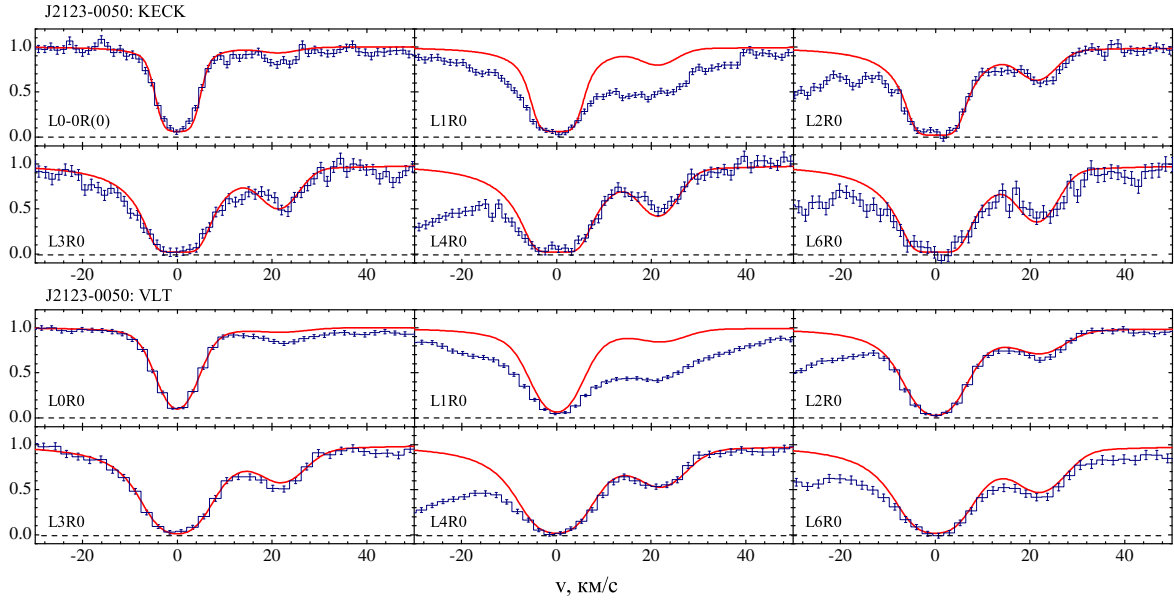


Рис. 2.6: Синтетический спектр линий H_2 переходов с уровня $J=0$ ($z_{\text{abs}} = 2.059$), вписанный в спектры квазара J 2123–0050, полученные с помощью телескопов Keck/HIRES (верхняя панель) и VLT/UVES (нижняя панель). Отличие профилей линий на верхней и нижней панелях связано с разным значением ширины аппаратной функции спектрографов (~ 3 км/с HIRES/Keck и ~ 6 км/с для UVES/VLT). При построении синтетического спектра лучевая концентрация H_2 в компоненте A полагалась равной $\log N_{\text{H}_2}^A (J = 0) = 17.37$. Несмотря на то, что все линии H_2 с $J = 0$, кроме L0R0 и L3R0, частично перекрываются с абсорбционными линиями Ly α леса, видно, что для модели с высокой лучевой концентрацией $N_{\text{H}_2}^A (J = 0)$ синтетический спектр прописывается во всех линиях H_2 .

вышает оценку распространенности первичного дейтерия. Возможные объяснения такого высокого значения скорее всего связаны с химией молекулярных облаков, а именно, при определенных физических условиях в облаке степень молекуляризации дейтерия может превышать степень молекуляризации водорода ([49], также см. главу 4).

2.4 Абсорбционная система в спектре квазара J 2100–0641

2.4.1 Данные наблюдений

Наблюдения квазара J 2100–0641 (с красным смещением $z_{\text{em}} = 3.14$ и видимой звездной величиной $m_V = 18.5$) были выполнены на телескопе Кекс с использованием спектрографа высокого разрешения HIRES в 2004, 2005, 2006 и 2007 годах по программам U45bH, U46H (руководитель программ Вольфе, Wolfe) (4 экспозиции по 1.25 ч в диапазоне 4480 – 9000 Å), U17H (руководитель программы Прохаска, Prochaska) (одна экспозиция 0.5 ч в диапазоне 4220 – 6600 Å), G400H (руководитель программы Эллисон, Ellison) (5 экспозиций по 1 ч в диапазоне 3750 – 6600 Å) и U149Hr (руководитель программы Вольфе, Wolfe) (3 экспозиции по 1 ч в диапазоне 4150 – 8500 Å), соответственно. Данные находятся в свободном доступе архива телескопа Кекс. Для наблюдений по программам U45bH, U46H, G400H и U149Hr размер щели был выбран 0.86", пиксели CCD матрицы бинированы 2x1. Для наблюдений по программе U17H размер щели 1.15", пиксели CCD матрицы бинированы 2x2. Указанные настройки позволили получить спектр с разрешением $\sim 48\,000$. Редукция и сложение экспозиций выполнено с помощью пакета программ MAKEE. Общее время экспозиций составляет 18 ч.

2.4.2 Анализ спектра

DLA система с $z_{\text{abs}} = 3.092$ в спектре квазара J 2100–0641 была идентифицирована в работе [114]. Лучевая концентрация H I в DLA системе $\log N_{\text{HI}} = 21.05 \pm 0.15$. Анализ абсорбционных линий C I, ассоциированных с DLA системой, в этом спектре, выполнен в работе [9]. Авторами показано, что линии C I описываются трехкомпонентной моделью с красными смещениями $z_A = 3.089776(7)$, $z_B = 3.091463(4)$ и $z_C = 3.09236(2)$. Полная лучевая концентрация $\log N_{\text{C I}}^{\text{tot}} = 13.17$. Мы выполнили идентификацию абсорбционных линий H₂ в этом спектре, ассоциированных с компонентой B.

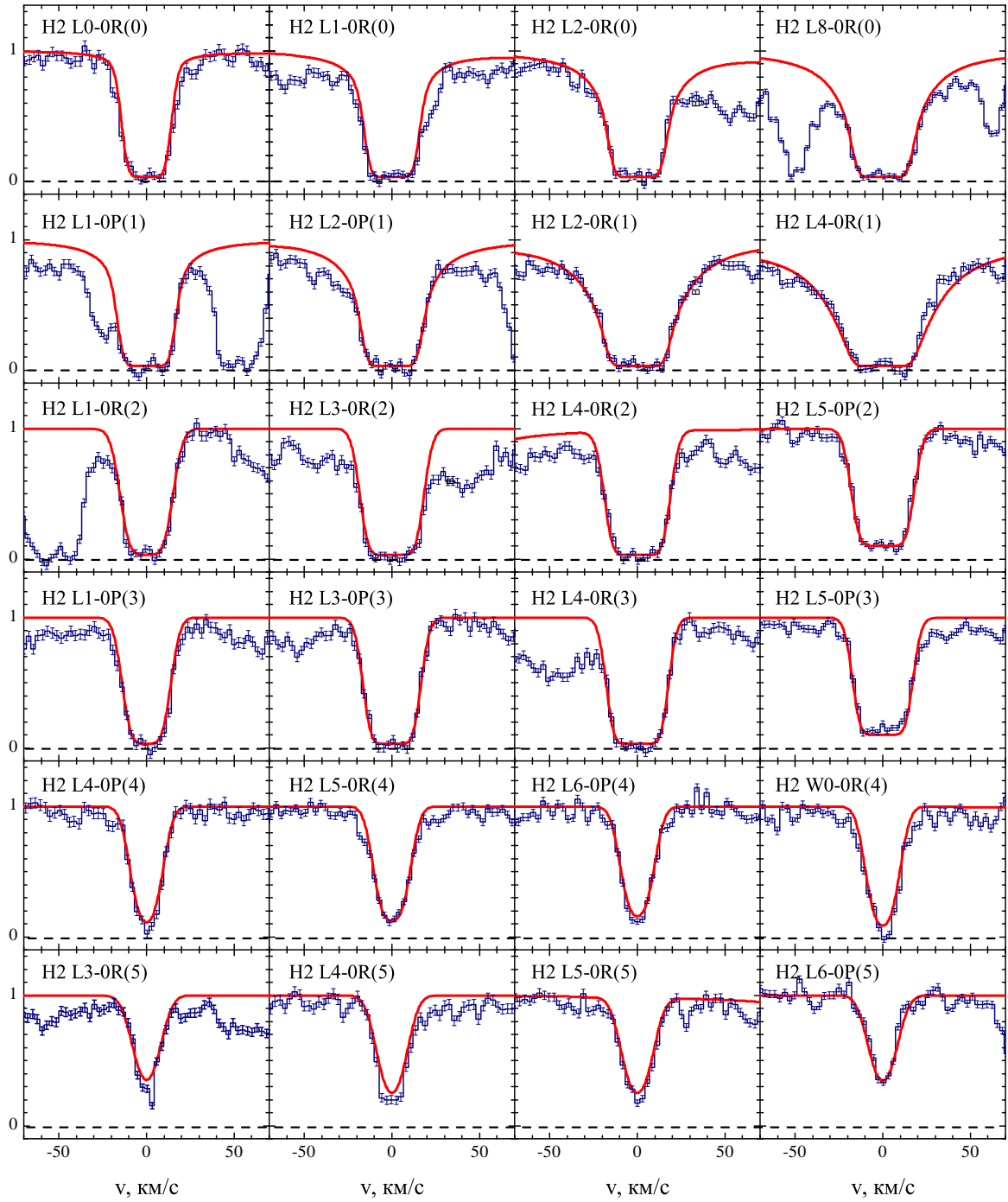


Рис. 2.7: Синтетический спектр линий поглощения молекулы H_2 абсорбционной системы с $z_{\text{abs}} = 3.09146$, вписанный в наблюдаемый спектр J 2100–0641 (Keck/HIRES). Спектр приведен с учётом коррекции на фактор покрытия квазара (см. главу 3).

Таблица 2.7: Результаты анализа абсорбционной системы H_2 с $z_{\text{abs}} = 3.09146$ в спектре J 2100–0641.

| | уровень | $\log N$ | b , км/с |
|--|------------|------------------|-----------------|
| H_2 | J=0 | 18.15 ± 0.06 | 5.33 ± 0.12 |
| | J=1 | 18.64 ± 0.04 | 5.64 ± 0.09 |
| | J=2 | 17.02 ± 0.09 | 8.01 ± 0.21 |
| | J=3 | 16.33 ± 0.06 | 8.54 ± 0.14 |
| | J=4 | 15.16 ± 0.02 | 8.89 ± 0.17 |
| | J=5 | 14.85 ± 0.01 | 8.82 ± 0.21 |
| | Σ_J | 18.77 ± 0.03 | |
| HD | J=0 | 13.83 ± 0.06 | 2.0 ± 0.6 |
| $\text{HD}/2\text{H}_2 = (0.58 \pm 0.09) \times 10^{-5}$ | | | |

2.4.3 Линии молекул H_2

В допустимый диапазон длин волн спектрографа HIRES попадают линии поглощения молекул H_2 17 полос лаймановской серии и 5 полос вернеровской. Линии H_2 детектируются для переходов с уровней J=0 до J=5. Наилучшие значения параметров приведены в таблице 2.7. Полная лучевая концентрация H_2 оказалась равной $\log N_{\text{H}_2} = 18.76 \pm 0.04$. Синтетический спектр молекул H_2 , вписанный в наблюдаемый спектр квазара, показан на рисунке 2.7. Дополнительно, для линий H_2 лаймановских полос L4-0 и L5-0, находящихся в спектре вблизи эмиссионных линий $\text{Ly}\beta$ и O VI , мы детектируем ненулевой остаточный поток на уровне $\sim 8\%$ полного потока. Детальный анализ эффекта неполного покрытия в этом квазаре представлен в главе 3.

2.4.4 Линии молекул HD

Линии молекулы HD, ассоциированные с системой H_2 , детектируются в 17 лаймановских и 3 вернеровских полосах (от L0-0 до L16-0 и от W0-0 до W2-0) для переходов с основного состояния с уровня J=0. Для анализа мы использовали линии переходов L4-0R(0), L7-0R(0), L8-0R(0), W1-0R(0), L16-0R(0), которые почти

не перекрываются с линиями $\text{Ly}\alpha$ леса. Лучевая концентрация молекул HD оказалась равной $\log N_{\text{HD}} = 13.83 \pm 0.06$. Синтетический профиль линий молекул HD показан на рисунке 2.8. Отношение $(\text{HD}/2\text{H}_2)$ в этой системе оказывается равным $(0.58 \pm 0.09) \times 10^{-5}$.

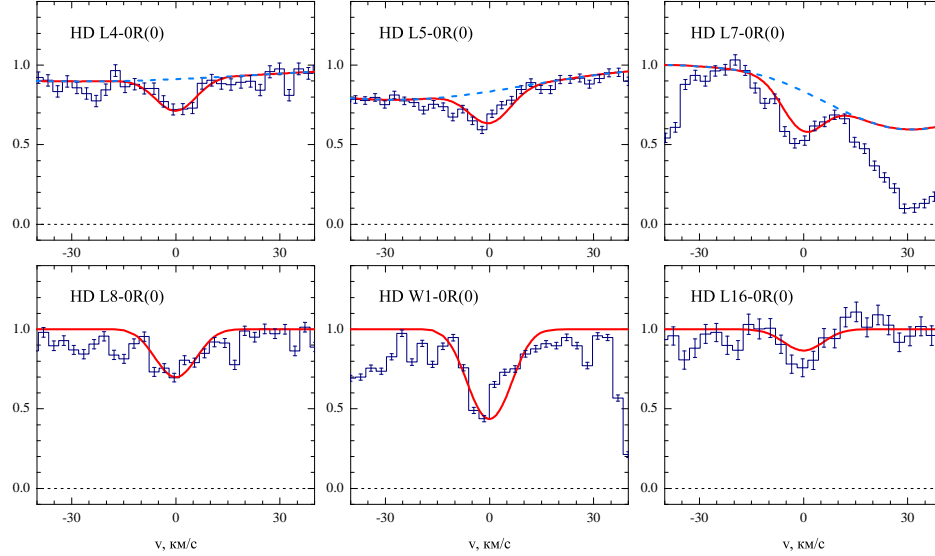


Рис. 2.8: Синтетический спектр молекул HD с $z_{\text{abs}} = 3.09146$, вписанный в наблюдаемый спектр квазара J 2100–0641 (Кеск/HIRES). Красной линией показан синтетический спектр линий молекул HD. Синей штриховой линией показан восстановленный континуум квазара для линий переходов L4-0R(0), L5-0R(0) и L7-0R(0), которые частично перекрываются с линиями $\text{Ly}\alpha$ леса.

2.5 Статистика измерений отношения $\text{HD}/2\text{H}_2$

На данный момент среди 28 спектров квазаров, содержащих абсорбционные системы H_2 с большими красными смещениями $z > 1.7$ (см. таблицу 1.1), линии молекул HD были идентифицированы в 9 спектрах (также в спектрах Q 0812+032 и Q 1331+170 линии молекулы HD имеют двух компонентную структуру). Полный список этих систем приведен в таблице 2.8. Приведены названия квазаров, красные смещения абсорбционных систем H_2 , измеренные лучевые концентрации H_2 и HD, отношение $(\text{HD}/2\text{H}_2)$ и ссылки на работы, в которых выполнялись

измерения.

На рисунке 2.9 показаны результаты измерений относительной распространенности молекул HD ($\text{HD}/2\text{H}_2$) для абсорбционных систем H_2/HD с большими красными смещениями (синие и красные кружки) в зависимости от лучевой концентрации HI в DLA системах, содержащих системы H_2 . Серыми полупрозрачными кружками показаны значения ($\text{HD}/2\text{H}_2$), полученные в анализе систем H_2 в спектрах J 2123–0050 и Q 0528–2508 в работах [117] и [52], соответственно. Красным цветом выделены системы, анализ которых выполнен в этой работе.

Только в трех из девяти абсорбционных систем лучевые концентрации H_2 и HD одновременно превышают 10^{15} см^{-2} : в спектрах квазаров Q 1232+082, Q 0812+032 и Q 0843+0221. Предполагая, что за счет высокой лучевой концентрации молекулы H_2 и HD экранированы от УФ излучения (см. [121]), степень молекуляризации H и D в этих системах может быть близка к единице. А значит, отношение ($\text{HD}/2\text{H}_2$) будет почти равно отношению (D/H). На рисунке 2.9 желтой полосой показано среднее значение распространенности ($\text{HD}/2\text{H}_2$), измеренное для H_2/HD систем в спектрах квазаров Q 1232+082, Q 0812+032 и Q 0843+0221. Соответствующая оценка отношения (D/H):

$$\left(\frac{\text{D}}{\text{H}}\right)_{z>2} = \frac{N_{\text{HD}}}{2N_{\text{H}_2}} = (3.16 \pm 0.51) \times 10^{-5}, \quad (2.1)$$

оказывается слегка выше, но в пределах статистических ошибок согласуется с оценками отношения $(\text{D}/\text{H}) = (2.53 \pm 0.04) \times 10^{-5}$ и $(2.61 \pm 0.14) \times 10^{-5}$, полученными на основе наблюдений HI и DI абсорбционных линий в спектрах квазаров [94] и анализа анизотропии реликтового излучения [98].

2.6 Заключение

В данной главе представлены результаты независимого анализа абсорбционных систем H_2 и HD в спектрах квазаров Q 0528–2508, J 2100–0641 и J 2123–0050.

- В спектре Q 0528–2508, полученном на телескопе VLT/UVES с учетом всех

Таблица 2.8: Абсорбционные системы H_2/HD с большими красными смещениями, идентифицированные в спектрах квазаров.

| Квазар | z_{abs} | $\log N_{\text{H}_2}$ | $\log N_{\text{HD}}$ | $(\text{HD}/2\text{H}_2)$ | Ссылка |
|-------------|------------------|-----------------------|-------------------------|---|--------|
| Q 0528–2508 | 2.81112 | 17.82 ± 0.02 | 13.33 ± 0.02 | $(1.62 \pm 0.11) \times 10^{-5}$ | [58] |
| Q 0812+3208 | 2.62644 | 19.93 ± 0.04 | 15.71 ± 0.07 | $(3.01 \pm 0.56) \times 10^{-5}$ | [49] |
| | 2.62638 | 18.82 ± 0.37 | 12.98 ± 0.22 | $(7.2 \pm 7.1) \times 10^{-7}$ | [49] |
| Q 0843+0221 | 2.7865 | 21.21 ± 0.02 | $17.21_{-0.26}^{+0.21}$ | $(5.0_{-2.3}^{+3.1}) \times 10^{-5}$ | * |
| Q 1232+0815 | 2.33771 | 19.67 ± 0.10 | $15.53_{-0.11}^{+0.17}$ | $(3.55_{-1.10}^{+1.85}) \times 10^{-5}$ | [62] |
| J 1237+0647 | 2.68956 | 19.21 ± 0.13 | 14.48 ± 0.05 | $(0.93 \pm 0.30) \times 10^{-5}$ | [63] |
| Q 1331+170 | 1.77637 | 19.43 ± 0.10 | 14.83 ± 0.15 | $(1.26 \pm 0.52) \times 10^{-5}$ | [49] |
| | 1.77670 | 19.39 ± 0.11 | 14.61 ± 0.20 | $(0.82 \pm 0.61) \times 10^{-5}$ | [49] |
| Q 1439+1117 | 2.41837 | 19.38 ± 0.10 | 14.87 ± 0.03 | $(1.5_{-0.4}^{+0.6}) \times 10^{-5}$ | [122] |
| J 2100–0641 | 3.09145 | 18.76 ± 0.04 | 13.83 ± 0.06 | $(0.58 \pm 0.09) \times 10^{-5}$ | [21] |
| J 2123–0050 | 2.05933 | 17.94 ± 0.01 | 13.87 ± 0.06 | $(4.26 \pm 0.60) \times 10^{-5}$ | [68] |

Примечание: * – эта работа

доступных экспозиций, выполнен независимый детальный анализ абсорбционной системы H_2/HD . Показано, что абсорбционная система H_2 описывается двух-компонентной моделью с полными лучевыми концентрациями H_2 , равными $\log N_{\text{H}_2}^{\text{A}} = 18.10 \pm 0.02$ и $\log N_{\text{H}_2}^{\text{B}} = 17.82 \pm 0.02$. Обнаружено, что линии молекул HD в этом спектре, ассоциированы только с компонентой B абсорбционной системы H_2 . Измерена полная лучевая концентрация молекул HD, $\log N_{\text{HD}} = 13.33 \pm 0.02$, и определена относительная распространенность молекул HD в этой компоненте, $(\text{HD}/2\text{H}_2) = (1.62 \pm 0.11) \times 10^{-5}$. Это значение оказывается на порядок ниже оценки $(2.6 \pm 0.6) \times 10^{-4}$, полученной другими авторами в работе [52].

- Выполнен независимый детальный анализ абсорбционной системы H_2/HD в спектре J 2123–0050, полученном на телескопе VLT/UVES. Показано, что абсорбционная система H_2 состоит из двух компонент с полными лучевыми концентрациями $\log N_{\text{H}_2}^{\text{A}} = 17.94 \pm 0.01$ и $\log N_{\text{H}_2}^{\text{B}} = 15.16 \pm 0.02$. Линии молекул HD детектируются только в компоненте A. Определе-

на лучевая концентрация молекул HD, $\log N_{\text{HD}}^{\text{A}} = 13.87 \pm 0.06$, и отношение $(\text{HD}/2\text{H}_2) = (4.26 \pm 0.60) \times 10^{-5}$. Это значение оказывается ниже, но в пределах статистических ошибок согласуется с оценкой $(\text{HD}/2\text{H}_2) = (7.9 \pm 4.6) \times 10^{-5}$, представленной в работе [117], где авторы использовали для анализа спектр J 2123–0050, полученный на телескопе Keck/HIRES.

- Выполнена идентификация и детальный анализ абсорбционной системы H_2/HD с $z_{\text{abs}} = 3.09146$ в спектре квазара J 2100–0641. Абсорбционная система H_2 описывается одно–компонентной моделью с полной лучевой концентрацией H_2 $\log N_{\text{H}_2} = 18.76 \pm 0.04$. Определена лучевая концентрация молекул HD $\log N_{\text{HD}} = 13.83 \pm 0.06$ и отношение $(\text{HD}/2\text{H}_2) = (0.58 \pm 0.10) \times 10^{-5}$.
- Получена оценка отношения изотопов (D/H) на больших красных смещениях с помощью анализа абсорбционных систем H_2/HD в спектрах квазаров, $(\text{D}/\text{H}) = (3.16 \pm 0.51) \times 10^{-5}$. Найденное значение выше, но в пределах статистических ошибок согласуется со значениями (D/H), определенными другими методами: из анализа атомарных линий H I и D I в спектрах квазаров $(2.53 \pm 0.04) \times 10^{-5}$ [94] и из анализа анизотропии реликтового излучения $(2.61 \pm 0.14) \times 10^{-5}$ [98].

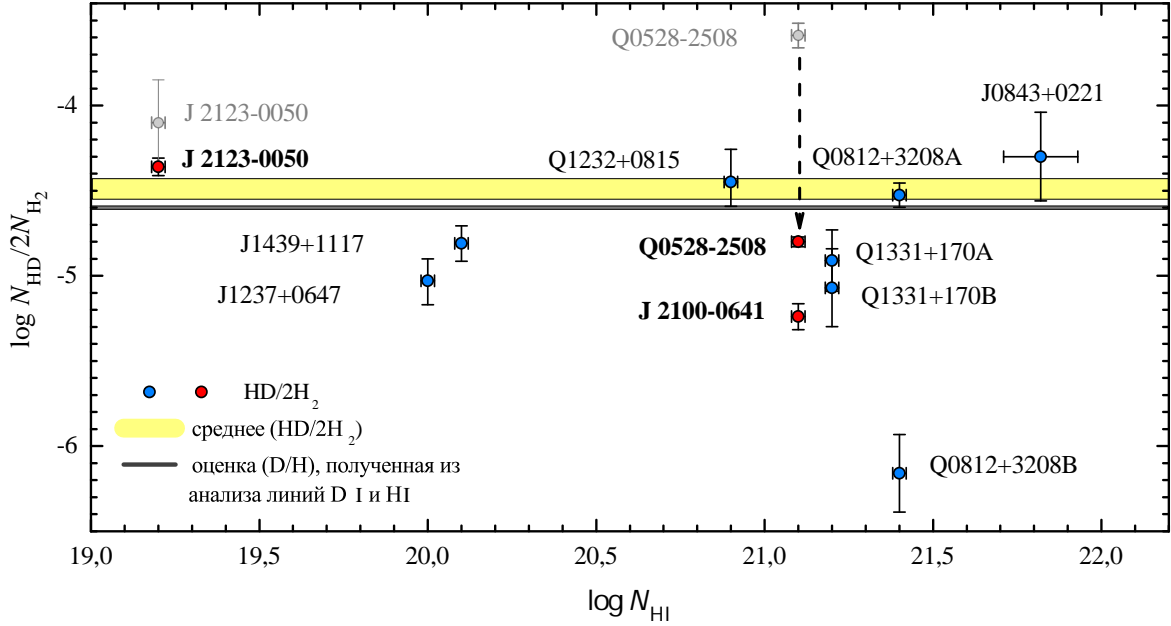


Рис. 2.9: Относительная распространенность молекул HD ($\text{HD}/2\text{H}_2$) в абсорбционных системах H_2 с большими красными смещениями в зависимости от лучевой концентрации атомарного водорода, ассоциированного с системами H_2 (N_{HI}). Красными кружками показаны оценки ($\text{HD}/2\text{H}_2$) в абсорбционных системах H_2 в спектрах Q 0528–2508, J 2123–0050, J 2100–0641, независимый анализ которых выполнен в этой работе. Серыми полупрозрачными кружками показаны результаты измерений ($\text{HD}/2\text{H}_2$) в абсорбционных системах H_2 в спектрах Q 0528–2508, J 2123–0050, представленные в работах [52, 117], соответственно. Желтой горизонтальной линией показано среднее значение распространенности молекул ($\text{HD}/2\text{H}_2$) для абсорбционных систем H_2 и HD с высокими лучевыми концентрациями в спектрах квазаров Q 1232+0815, Q 0812+3208A, J 0843+0221 (см. текст). Серой горизонтальной линией показана оценка отношения изотопов (D/H), полученная из анализа атомарных линий H I и D I [94].

Глава 3

Эффект неполного покрытия для абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями

3.1 Введение

Если часть излучения удаленного источника (квазара) проходит мимо абсорбционной системы, например, в случае сравнимых угловых размеров источника и абсорбционной системы, тогда в абсорбционных линиях исследуемой системы присутствует дополнительный поток (или остаточный поток, ОП). Величина эффекта характеризуется значением фактора покрытия

$$f_c = \frac{F_{\text{cloud}}}{F_{\text{total}}}, \quad (3.1)$$

где F_{cloud} – поток, проходящий через абсорбционное облако, F_{total} – полный поток излучения квазара. В этом случае измеряемый поток, $F(\lambda)$, определяется с помощью следующего выражения:

$$F(\lambda) = (1 - f_c)F_{\text{total}}(\lambda) + f_c F_{\text{total}}(\lambda) \exp(-\tau(\lambda)), \quad (3.2)$$

где $\tau(\lambda)$ обозначает оптическую толщину абсорбционной системы на длине волны λ . Схематично эта ситуация изображена на рисунке 3.1. Детектирование ОП не вызывает трудностей, если абсорбционная линия высоко насыщена – см. панели (а) и (б) на рисунке 3.1. Если линия ненасыщена (этот случай изображен на панели

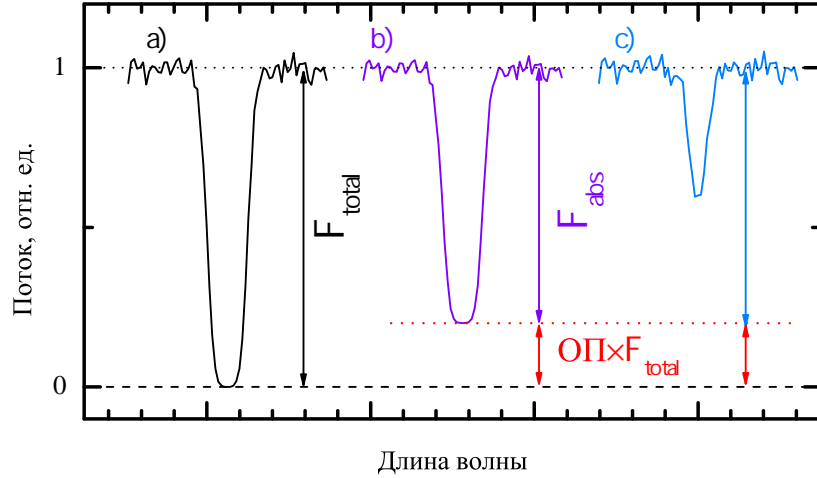


Рис. 3.1: Иллюстрация проявления эффекта неполного покрытия для абсорбционной линии в спектре квазара. На панели (а) приведен профиль высоко насыщенной абсорбционной линии в случае, если область формирования излучения квазара полностью покрывается абсорбционной системой, т.е. неполное покрытие отсутствует, $f_c = 1$. На панели (b) показана эта же абсорбционная линия, но в случае неполного покрытия на 20%, или $f_c = 0.8$. На панели (с) показан пример ненасыщенной абсорбционной линии для фактора покрытия $f_c = 0.8$ (как в случае b). Часть излучения квазара (20%), которое проходит мимо абсорбционной системы, образует остаточный поток (ОП) (показан красным цветом на панелях (b) и (с)). ОП легко детектируется в случае насыщенной линии (b) в отличие от случая (с) для ненасыщенной абсорбционной линии.

(с)), детектирование эффекта неполного покрытия становится более сложным и требует дополнительного анализа с использованием нескольких линий переходов с разными значениями сил осциллятора.

Если эффект неполного покрытия не принимать во внимание при анализе абсорбционной системы, полученное значение лучевой концентрации N может быть сильно недооценено (до нескольких порядков величины, см., например, работу [58]). Важность учета эффекта неполного покрытия проиллюстрирована на рисунке 3.2. В качестве примера, показана абсорбционная линия, которая состоит из одной компоненты с высокой лучевой концентрацией. Синтетический спектр этой линии показан на панели (а) красной линией. На панелях (b), (с), (d) и (e) показан профиль этой же абсорбционной линии в случае, если к профилю линии добавлен ОП (10%, для наглядности). Если ОП учитывать в анализе, линия

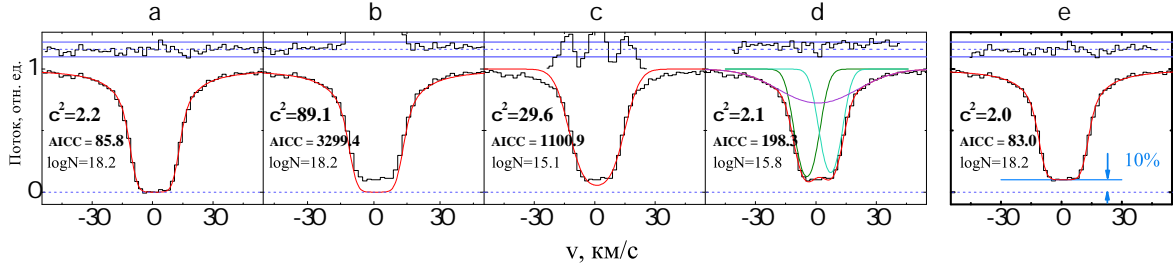


Рис. 3.2: На панели (а) показан профиль однокомпонентной абсорбционной линии H_2 для лучевой концентрации $\log N = 18.2$ и доплеровского параметра $b = 4$ км/с, и синтетический спектр, построенный с помощью однокомпонентной модели (красная линия). Поток в дне абсорбционной линии доходит до уровня нулевого потока. На панелях (b), (c), (d) и (e) показан профиль этой же абсорбционной линии, к которой добавлен остаточный поток 10%. Профиль абсорбционной линии рассчитывается согласно выражению (3.2). Вследствие высокой лучевой концентрации профиль имеет плоское дно и лоренцевы крылья, при этом поток в дне линии превышает уровень нулевого потока на величину 10%. В случае (e) для модели с учетом ОП линия описывается так же хорошо, как и для случая (a). На панелях (b) и (c) показан результат анализа с помощью однокомпонентной модели для Гауссова и Лоренцева профилей. В обоих случаях описание неудовлетворительное, значение редуцированного критерия $\chi^2 \gg 1$. Если использовать модель с несколькими ненасыщенными компонентами (см. панель (d)), можно получить удовлетворительное значение $\chi^2 \sim 1$ (но не значение статистического критерий AICC [119], который для модели (e) значительно ниже). При этом определяемое значение лучевой концентрации в случае (d) оказывается почти на 2 порядка ниже исходного.

также хорошо описывается однокомпонентной моделью, при этом восстанавливаются исходные значения лучевой концентрации N и ОП (см. панель (e)). Если ОП не учитывать, анализ с помощью однокомпонентной модели с Лоренцевым (случай (b)) или Гауссовым профилем (случай (c)) оказывается неудовлетворителен (значение редуцированного критерия $\chi^2 \gg 1$), т.к. с помощью функции Фойта невозможно одновременно описать плоское дно линии (с ненулевым ОП) и лоренцевы крылья. Однако такую линию можно описать с помощью модели без учета ОП, если использовать несколько ненасыщенных компонент (см. случай (d)). При этом критерий χ^2 не позволяет определить, которая из моделей, (d) или (e), предпочтительна. Модель для случая (e) неверна, поскольку лучевая концентрация $\log N = 15.8$ оказывается значительно ниже исходной ($\log N = 18.2$).

Наиболее вероятная причина возникновения эффекта неполного покрытия –

это сравнимость угловых размеров области формирования излучения квазара и абсорбционной системы. Характерные размеры области формирования излучения квазара около ~ 1 пк, см., например, работы по интерферометрическим исследованиям [123–125], исследованиям запаздывания активности галактического ядра [126, 127], и гравитационному микролинзированию квазаров [128–130]. В то же время большинство абсорбционных систем имеют размеры порядка нескольких кпк. Наиболее распространенные, системы Ly α леса ассоциируются с межгалактическими облаками почти полностью ионизованного водорода с размером ≥ 10 кпк [131]. Размер диффузных атомарных облаков в удаленных галактиках, которые ассоциируются с абсорбционными DLA или суб-DLA системами, оценивается ~ 10 пк – 20 кпк [6]. Системы лаймановского предела, также как Mg II и C IV абсорбционные системы, которые ассоциируются с облаками гало удаленных галактик, имеют масштаб до нескольких кпк. Угловые размеры таких систем значительно превосходят размер области формирования излучения квазара, поэтому с хорошим приближением квазар можно считать точечным объектом и не учитывать эффект неполного покрытия при анализе этих систем.

Тем не менее, в 1998 году, впервые, для удаленной абсорбционной системы с $z_{\text{abs}} = 1.181$ в спектре квазара APM 08279+5255 ($z_{\text{em}} = 3.911$) был обнаружен эффект неполного покрытия для линий Mg II [132, 133]. Впоследствии оказалось, что причиной ОП является излучение от непокрытого множественного изображения квазара, образовавшегося в результате гравитационного линзирования [134, 135]. Другой случай неполного покрытия был обнаружен при анализе линии поглощения DLA систем на длине волны 21 см, см. [8, 136]. В радио-диапазоне часть излучения квазара (несколько %) проходит мимо абсорбционной системы. По-видимому, это излучение относится к протяженной диффузной компоненте квазара. Также в работе [137] эффект неполного покрытия рассматривался как один из вариантов объяснения измеряемых значений эквивалентной ширины линий Mg II системы ($z_{\text{abs}} = 0.452$) в спектре квазара HE0001–2340 ($z_{\text{em}} = 2.28$).

Вероятность наблюдать эффект неполного покрытия оказывается не столь низкой, если рассматривать абсорбционные системы H_2 , которые в отличие от вышеперечисленных систем ассоциируются с компактными облаками, размером ~ 1 пк (см., например, [39, 69]). Известно, что за счет ускоренного расширения Вселенной угловой размер объектов на больших красных смещениях ($z \geq 1.4$) почти не меняется с расстоянием (или z) (см., например, [138, 139]). Поскольку размер системы H_2 оказывается сравним с характерным размером области формирования излучения квазара, в случае попадания абсорбционной системы на луч зрения вероятность детектирования эффекта неполного покрытия оказывается достаточно высокой. Детальный расчет вероятности детектирования эффекта неполного покрытия дает нижнюю оценку вероятности $\geq 11\%$ [140].

Впервые, эффект неполного покрытия области BLR квазара абсорбционной системой H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.33771$ был обнаружен в спектре Q 1232+0815 [62, 141]. Показано, что насыщенные абсорбционные линии H_2 , расположенные в крыле эмиссионной линии $Ly\beta$, не доходят до уровня нулевого потока на величину $\sim 10\%$ полного потока излучения квазара [141]. Второй случай неполного покрытия был обнаружен при анализе абсорбционной системы H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.659$ в спектре квазара Q 0643–5041 [60]. В этой главе представлен анализ трех случаев эффекта неполного покрытия абсорбционными системами H_2 в спектрах Q 0528–250, J 2123–0050 и J 2100–0641.

3.2 Неполное покрытие области формирования континуального излучения квазара Q 0528–2508 абсорбционной системой H_2

Описание обработки спектра Q 0528–2508 и анализа абсорбционной системы H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.811$ приведено в главе 2.2. Профили абсорбционных линий H_2 в этой системе имеют сложную структуру, которая состоит из двух компонент (см. рисунок 2.1). В новом спектре, имеющем высокое отношение $S/N \sim 60$ в участке

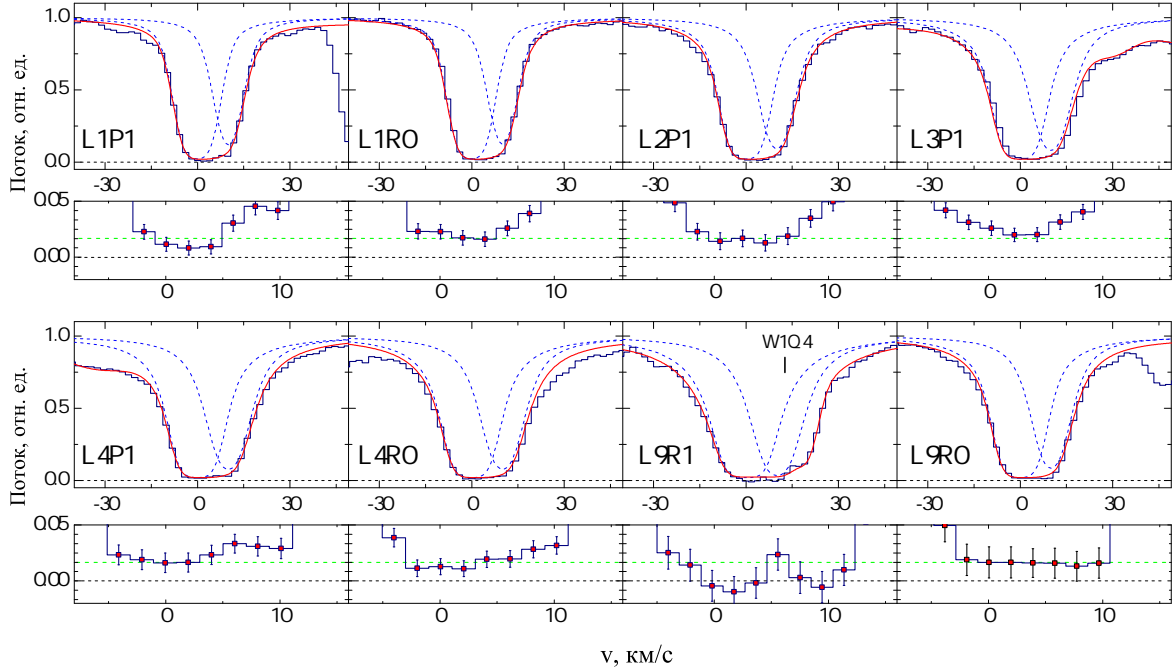


Рис. 3.3: Профили линий H_2 переходов с уровнями $J = 0, 1$ в спектре квазара Q 0528–250. Для примера приведены только насыщенные линии H_2 , которые почти не пересекаются с линиями $\text{Ly}\alpha$ леса. Синтетический спектр абсорбционной системы H_2 , вписанный в наблюдаемый спектр квазара, показан красной линией. Профили отдельных компонент (А и В) показаны синей пунктирной линией. Дополнительно, для каждой линии на нижней панели показано увеличенное изображение потока в дне линии. Пунктирная горизонтальная линия соответствует уровню нулевого потока в спектре. Поток в дне всех линий H_2 не доходит до уровня нулевого потока на величину $\sim 2\%$ полного потока. Сдвиг скоростей по оси абсцисс, вычисляется относительно компоненты А. В профиле линии L9-0R(1) поток в некоторых пикселях ниже уровня 2% , что, вероятно, вызвано поглощением в линии $\text{Ly}\alpha$ леса.

спектра, содержащем линии H_2 , мы детектируем ОП в центре насыщенных линий H_2 на уровне $\sim 2\%$ полного потока (см. рисунок 3.3). Малость величины ОП объясняет почему эффект не был обнаружен в предыдущих анализах этой системы (в спектре с меньшим отношением S/N , см. таблицу 2.2).

3.2.1 Коррекция уровня нулевого потока

Одной из причин ОП в центре насыщенных абсорбционных линий может быть сдвиг уровня нулевого потока в результате неаккуратного вычитания фона на

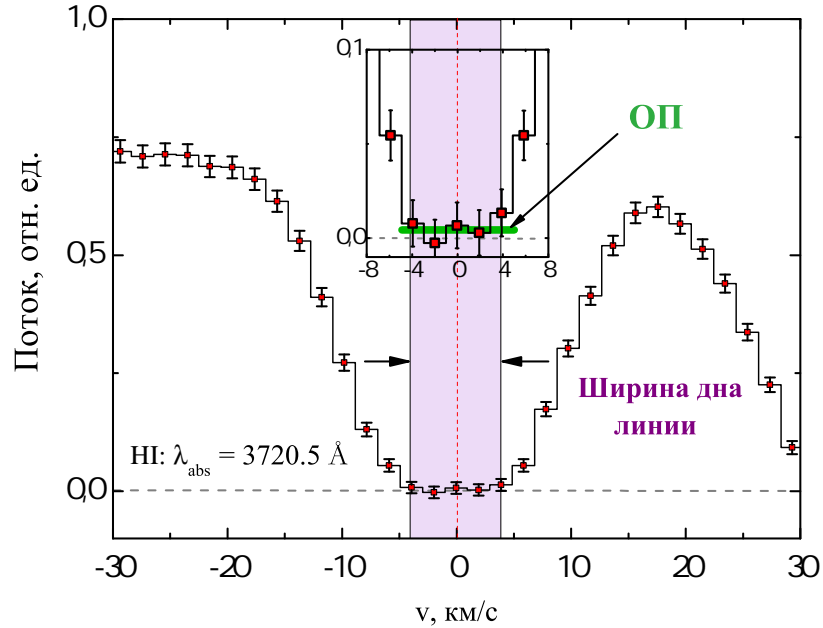


Рис. 3.4: Иллюстрация процедуры измерения остаточного потока (ОП) в дне абсорбционной линии. Для измерения ОП выбираются пиксели, в которых поток находится в диапазоне $\pm 1\sigma$ от потока в центре линии (эта область выделена сиреневым цветом). ОП определяется как средний поток среди выбранных пикселей. Ширина дна линии определяется как ширина выделенной области.

изображении между эшелле-порядками. Положение уровня нулевого потока можно определить, используя в качестве контрольных точек потоки в дне насыщенных линий $\text{Ly}\alpha$ леса, которые в большом количестве и однородно распределены в участке спектра (3500–4700 Å), содержащем линии H_2 . Поскольку характерный размер абсорбционных систем $\text{Ly}\alpha \gtrsim 10$ кпк [131], неполное покрытие области формирования излучения квазара системой $\text{Ly}\alpha$ леса маловероятно. Поэтому поток, измеряемый в дне насыщенной $\text{Ly}\alpha$ линии, должен равняться нулю.

Для анализа мы отобрали линии $\text{Ly}\alpha$ леса с широким и плоским дном ($\Delta\lambda > 1$ Å, т.е. $\delta v > 80$ км/с), что гарантирует насыщенность линий. Измерения ОП выполнялось с помощью процедуры, которая проиллюстрирована на рисунке 3.4. В профиле линии мы отбирали пиксели, для которых поток находится в диапазоне $f_c \pm 1\sigma_i$, где f_c – поток в центре линии, а σ_i – статистическая ошибка измерения

потока в i пикселе. Среднее значение потока для этих пикселей принималось в качестве оценки ОП. Ширина дна линии определялась как разница длин волн крайних правого и левого пикселей.

На левой панели рисунка 3.5 показаны значения ОП, измеренные линиях Ly α леса. Среднее значение равняется $(-0.21 \pm 0.04)\%$. Стандартное отклонение $\sigma \approx 0.22\%$. Зелеными звездочками показаны значения ОП в дне наиболее насыщенных абсорбционных линий: Ly α и Ly β линии DLA системы с $z_{\text{abs}} = 2.79$ и Ly α линия второй DLA системы с $z_{\text{abs}} = 2.14$.

3.2.2 Остаточный поток в линиях H₂

Для определения ОП в линиях H₂ мы отобрали линии переходов H₂ с вращательных уровней $J = 0, 1$, не перекрывающиеся с линиями Ly α леса. ОП измерялся с помощью той же процедуры, что была использована для анализа линий Ly α леса. Результат показан на правой панели рисунка 3.5. Синим и красным цветом показаны значения ОП для линий переходов с уровней $J = 0$ и $J = 1$, соответственно. Среднее значение ОП в линиях H₂ оказалось равным $(2.22 \pm 0.54\%)$ потока в континууме, что значительно выше уровня нулевого потока $(-0.21 \pm 0.22\%)$. Следует отметить, что поток в дне линий H₂ оказывается почти постоянным¹ в широком диапазоне скоростей $\delta v \simeq 10$ км/с, который больше, чем ширина аппаратной функции спектрографа UVES (6 км/с), и сравним со скоростным сдвигом между центрами компонент А и В системы H₂.

ОП в дне насыщенных линий H₂, в общем случае, может быть вызван: (i) сверткой насыщенных линий с аппаратной функцией спектрографа, (ii) ошибкой в процессе первичной обработки спектра, (iii) сложной структурой профилей линий, которая состоит из нескольких ненасыщенных компонент. Однако ни одна из этих причин не может объяснить происхождение ОП в линиях H₂ в спектре Q 0528–2508. Во-первых, ширина дна линий H₂ превышает ширину аппаратной функции спектрографа UVES (6 км/с, или $\sim 0.08 \text{ \AA}$), поэтому после свертки поток

¹Разброс потоков в пикселях в дне линий не превышает средней статистической ошибки.

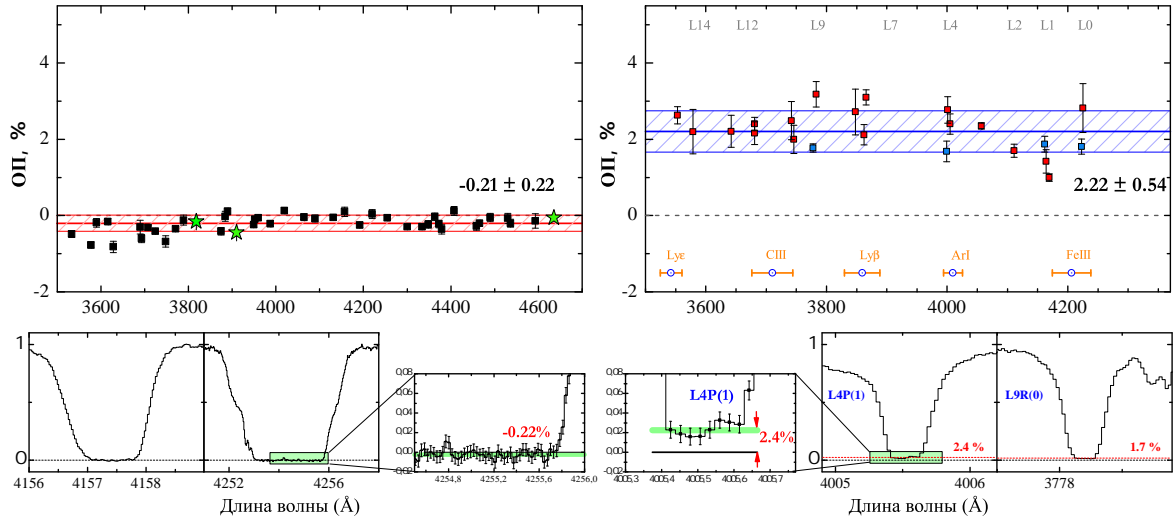


Рис. 3.5: Сравнение потоков в дне линий $\text{Ly}\alpha$ леса (левая верхняя панель) и линий H_2 (правая верхняя панель). На левой верхней панели показаны значения остаточных потоков (ОП), измеренных в дне насыщенных линий $\text{Ly}\alpha$ леса, в зависимости от положения линии в спектре (черными квадратиками). Значение ОП приведено в % полного потока. Дополнительно, зелеными звездочками показано величины ОП в дне линий $\text{Ly}\alpha$ и $\text{Ly}\beta$ DLA системы с $z_{\text{abs}} = 2.79$ и $\text{Ly}\alpha$ линии DLA системы с $z_{\text{abs}} = 2.14$. Среднее значение уровня нулевого потока (-0.21%) показано красной горизонтальной линией. Разброс измерений относительно среднего значения, соответствует гауссову распределению с дисперсией $\sigma = 0.22\%$. На нижних левых панелях показаны профили насыщенных линий $\text{Ly}\alpha$ леса. На третьей нижней панели показано увеличенное изображение потока вблизи дна линии на второй нижней панели. На правой верхней панели показаны ОП в дне абсорбционных линий переходов H_2 с вращательных уровней $J = 0$ (синие квадратиками) и $J = 1$ (красные квадратиками) в зависимости от положения линий в спектре. Среднее значение ОП показано синей линией. Синими кружками в нижней части панели показано положение эмиссионных линий квазара [27]. Усы точек соответствуют ширине эмиссионных линий. На нижних правых панелях показаны профили линий H_2 L4-0P(1) и L9-0R(0). Черной штриховой горизонтальной линией показан уровень нулевого потока в спектре, красной горизонтальной линией – поток в дне линии H_2 . На первой правой нижней панели показано увеличенное изображения дна профиля линии L4-0P(1). Видно, что потоки в пикселях в дне линии систематически выше уровня нулевого потока.

в дне линии должен оставаться равным нулю. Во-вторых, если ОП в линиях H_2 является результатом ошибки в процессе первичной обработки спектра потока, тогда ОП в линиях $Ly\alpha$ также должны быть отличны от уровня нулевого потока на ту же самую величину.

ОП может быть вызван случайным сильным сдвигом одной из экспозиций в процессе сложения экспозиций². В этом случае все узкие насыщенные абсорбционные линии в спектре будут иметь одинаковый ОП, в то время как широкие насыщенные линии (как линии $Ly\alpha$ леса) будут доходить до нуля. Такая возможность вполне вероятна, тем более, что исследуемый спектр Q 0528–250 содержит 27 экспозиций. Для проверки этой возможности, мы выполнили следующий тест. На рисунке 3.6 показаны результаты измерения ОП в зависимости от ширины дна линии для всех абсорбционных линий, расположенных в участке спектра 3500 – 4700 Å. Красные заполненные квадратики соответствуют линиям H_2 , голубые, зеленые и желтые – линиям $Ly\alpha$ леса. Зеленые квадратики соответствуют линиям $Ly\alpha$ леса, которые внешне похожи на линии H_2 , однако ОП в этих линиях равен нулевому потоку. Профили этих линий показаны на рисунке 3.7. Если бы одна из экспозиций действительно была бы сильно сдвинута, ОП ($\sim 2\%$) должен был бы детектироваться в этих линиях тоже. Желтыми квадратиками показаны линии $Ly\alpha$ леса, в дне которых ОП сравним или даже превышает уровень ОП в линиях H_2 . Для четырех таких линий мы также детектируем в спектре ассоциированные $Ly\beta$ абсорбционные линии³. Совместный анализ $Ly\alpha$ и $Ly\beta$ абсорбционных линий показал, что эти системы имеют $\log N < 14.3$ и большое значение $b > 25$ км/с. Профили таких линий не доходят до уровня нулевого потока, поэтому ОП оказывается выше нуля.

²Разница скоростей между отдельными экспозициями может достигать 500 м/с, а сдвиг между эшелле-порядками до 1500 м/с, см., например, работы [53, 142]

³Красные смещения этих систем достаточно высокие $z > 2.43$. Для систем с $z < 2.43$ абсорбционная линия $Ly\beta$ лежит ниже лаймановского предела DLA системы и не детектируется в спектре.

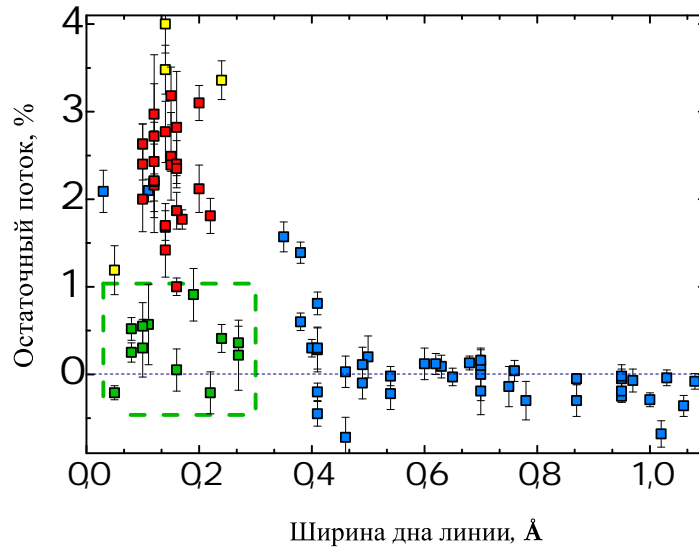


Рис. 3.6: Остаточные потоки в дне линий $\text{Ly}\alpha$ леса в зависимости от ширины дна линий. Синими точками показаны измерения для всех насыщенных линий $\text{Ly}\alpha$ леса с $\lambda > 3500 \text{ \AA}$, остаточный поток в которых не превышает 5% полного потока. Желтые точки соответствуют системам $\text{Ly}\alpha$, для которых также детектируется $\text{Ly}\beta$ абсорбционная линия. Красными точками показаны ОП в линиях H_2 . Среди линий $\text{Ly}\alpha$ леса есть линии с ОП $< 1\%$ и шириной дна линии $< 0.3 \text{ \AA}$. Мы выделили их зеленым цветом. Детектирование таких линий подтверждает отсутствие значительного сдвига одной из экспозиций.

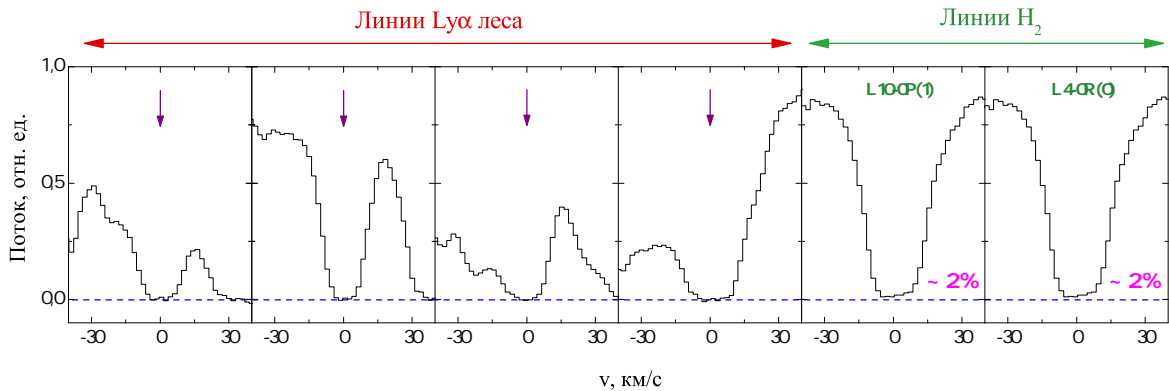


Рис. 3.7: Профили линии $\text{Ly}\alpha$ леса, соответствующих зелеными квадратиками на рисунке 3.6. Для сравнения на двух правых панелях показаны линии H_2 переходов L10-0P(1) и L4-0R(0). Синей горизонтальной линией показан уровень нулевого потока в спектре.

3.2.3 Зависимость остаточного потока в линиях H_2 от значения λf

В этом разделе представлен метод, который позволяет определить, является ли детектируемый ОП проявлением эффекта неполного покрытия или результатом свертки нескольких ненасыщенных компонент. Линии переходов молекулярного водорода с уровнями $J=0, 1$ имеют очень широкий диапазон значений параметра λf ⁴ от 0.6 (для линии L0-0P(1)) до 36.0 (для линии W1-0Q(1)). Известно, что поток в дне абсорбционной линии экспоненциально уменьшается с увеличением значения λf , $F \propto \exp(-\lambda f)$. На рисунке 3.8 штриховыми линиями показаны результаты расчета зависимости ОП для искусственной абсорбционной линии в спектре с разрешением 6 км/с (как в исследуемом спектре) от значения λf . Спектральные характеристики этой линии (Γ_{lm}, ν_{lm}) соответствуют переходу H_2 L2-0P(1), доплеровский параметр принимался равным $b = 4$ км/с.⁵ Сиреновой и серой штриховыми линиями показаны зависимости, рассчитанные для линии с лучевой концентрацией $\log N = 15$ и 16, соответственно. С увеличением лучевой концентрации штриховая линия на рисунке 3.8 сдвигается в направлении слева–направо. Для высокой лучевой концентрации ОП равен нулю в широком диапазоне значений λf (поскольку линия оказывается насыщена) и превышает уровень нулевого потока только при $\lambda f \leq 10$. В случае, если абсорбционная линия состоит из нескольких компонент (свертка двух или трех компонент с $\log N = 15$), зависимость ОП от λf также оказывается экспоненциальной. Результаты расчета для многокомпонентной модели показаны на рисунке 3.8 штрих-пунктирными линиями.

Значения ОП, измеренных в дне линий H_2 в спектре Q 0528–2508, показаны синими и красными квадратиками (для переходов с уровнями $J = 0$ и $J = 1$, соответственно). Видно, что точки не следуют ожидаемому поведению, более того, точки располагаются вблизи среднего значения $\sim 2\%$ для всего диапазона значений λf .

⁴Произведение силы осциллятора на собственную длину волны.

⁵Поскольку искусственная линия относится к логарифмическому участку зависимости на кривой роста, мы не рассматривали другие значения доплеровского параметра.

Чтобы описать такое поведение точек, мы использовали две модели. Наилучшие значений параметров моделей определялись с помощью анализа линии H_2 L2-0P(1) с $\lambda f = 4.23$ и ОП = 1.7%. Эта линия имеет широкое плоское дно ($\delta v \sim 10$ км/с) и лоренцевы крылья. Профиль линии показан на верхней правой панели рисунка 3.8. Чтобы описать такую линию с помощью модели (i) без учета неполного покрытия (т.е. ОП), необходимо использовать по крайней мере три ненасыщенные компоненты. В то время как в модели (ii) с учетом неполного покрытия линия L2-0P(1) может быть описана с использованием только одной компоненты с $\log N = 18.2$ и ОП = 1.7%. Синтетический спектр, построенный для моделей (i) и (ii), показан красной и синей линиями на верхней правой панели. Штриховыми линиями показаны профили отдельных компонент для модели (i). Следует отметить, что обе модели хорошо описывают наблюдаемый профиль линии. Поэтому, используя в анализе только одну абсорбционную линию, мы не можем определить, которая из моделей (i) или (ii) лучше. Если же использовать для анализа несколько линий H_2 переходов с одного уровня J и с различными значениями λf , выбор корректной модели оказывается возможен.

Считается, что линии переходов с одного уровня J соответствуют одной и той же области молекулярного облака, поэтому эти линии должны описываться одним набором физических параметров (лучевой концентрацией N и доплеровским параметром b). В этом случае отличие профилей двух линий переходов с одного уровня J должно быть вызвано только изменением значения λf (если линии не перекрываются с линиями $\text{Lu}\alpha$ леса). Как следствие, корректная модель абсорбционной системы должна описывать одновременно все измеряемые ОП в дне линий переходов H_2 с одного уровня J. Используя наилучшие значения параметров для моделей (i) и (ii) (из анализа линии L2-0P(1)), мы построили кривые зависимости ОП в дне линии от значения λf , которые показаны жирными красной и синей линиями на основной панели рисунка 3.8. Как видно, красная линия не может одновременно описать все точки, в отличие от синей линии. Поскольку линия L2-0P(1) выбрана

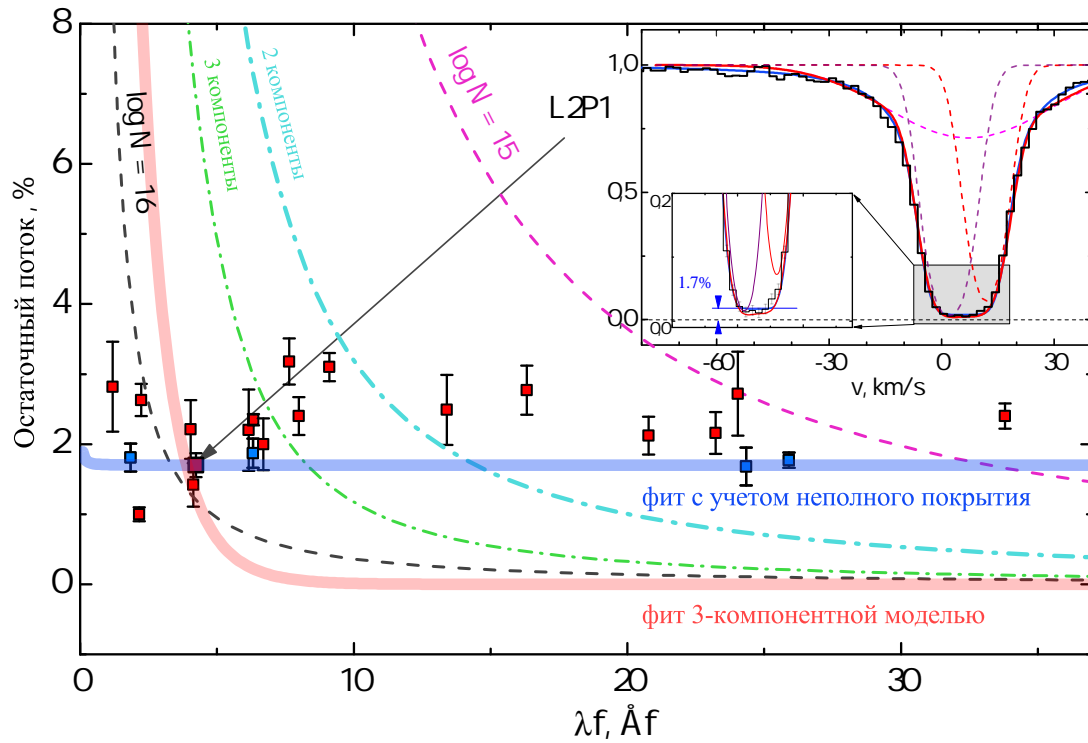


Рис. 3.8: Результат измерения ОП в дне абсорбционных линий H_2 в зависимости от значения λf перехода. (f – сила осциллятора перехода). Синими и красными квадратиками показаны ОП в линиях переходов H_2 с уровнями $J = 0$ и $J = 1$. Теоретический расчет зависимости для однокомпонентной линии, свернутой с аппаратной функцией с шириной 6 км/с, показан сиреневой и серой штриховыми линиями для лучевой концентрации $\log N_{\text{H}_2} = 15$ и 16, соответственно. Синяя штрих-пунктирная кривая соответствует расчету для линии, состоящей из 2 компонент с $\log N = 15$ и разницей скоростей $\delta v = 2$ км/с. Зеленая штрих-пунктирная линия соответствует трехкомпонентной модели с $\log N(\text{H}_2) = 15$ и разницей скоростей $\delta v = 2$ и 4 км/с, соответственно. Для примера на правой верхней панели показан профиль линии H_2 L2P(1) и синтетический спектр, построенный для двух моделей: однокомпонентной модели с учетом ОП (показан синей линией) и трехкомпонентной модели без учета ОП (показан красной линией). Обе модели позволяют удовлетворительно описать профиль линии H_2 . Однако модель без учета ОП не может одновременно описать ОП в других линиях H_2 , что показано красной жирной линией на основной панели. И наоборот, все точки описываются синей жирной линией для модели с учетом ОП.

произвольно, качественно результат сравнения двух моделей не изменится, если для определения наилучшего значения параметров моделей использовать другую линию H_2 .

3.2.4 Анализ абсорбционных линий H_2 с учетом фактора покрытия

Чтобы построить синтетический спектр системы H_2 с учетом ОП, мы эффективно делили область формирования излучения квазара на две части – основной и дополнительный источники. В простейшем случае излучение от основного источника ($\sim 98\%$ полного потока) проходит через обе компоненты системы H_2 , не создавая ОП в дне абсорбционных линий, в то время, как излучение от дополнительного источника проходит мимо абсорбционной системы и создает однородный ОП для всех линий H_2 . Тогда поток в абсорбционной линии описывается следующим выражением:

$$F(\lambda) = (1 - f_c)F_{\text{total}} + f_c \cdot F_{\text{total}}e^{-\tau_A(\lambda)}e^{-\tau_B(\lambda)}, \quad (3.3)$$

где f_c (в %) – фактор покрытия области формирования излучения квазара системой H_2 , см. (3.1).

Однако физически условия для компонент А и В могут быть различны, и эффект неполного покрытия может проявляться для компонент по-разному, т.е. компоненты А и В могут иметь разные значения фактора покрытия. Чтобы описать такую ситуацию, мы делили область излучения квазара на три части: основную и две дополнительных. Основной источник покрывается обоими компонентами. Дополнительные источники создают ОП в профилях линий H_2 . При этом есть две возможности, отличающиеся относительным пространственным положением компонент H_2 и дополнительных источников (см. рисунок 3.9):

(i) Один источник (непокрытый обоими компонентами) создает одинаковый ОП в профилях обеих компонент H_2 . Другой источник, который покрыт только

Таблица 3.1: Сравнение моделей системы H_2 с несколькими дополнительными источниками излучения квазара: А – модель с одним дополнительным источником, В и С – модели с двумя дополнительными источниками, соответствуют ситуациям (i) и (ii, см. раздел 3.2.4. p – число подгоночных параметров модели, АИСС – статистический критерий, см. [119]. m и n – относительный интенсивности дополнительных источников.

| Модель | p | АИСС | $\Delta\text{АИСС}$ | $m, 10^{-2}$ | $n, 10^{-2}$ |
|--------|-----|--------|---------------------|---------------|---------------|
| А | 31 | 3096.0 | 12.9 | 2.4 ± 0.1 | 0 |
| В | 32 | 3083.1 | 0 | 2.0 ± 0.1 | 4.0 ± 0.3 |
| С | 32 | 3331.1 | 248.0 | 2.4 ± 0.1 | 7.6 ± 0.3 |

одной H_2 компонентой, создает ОП только в профилях линий второй компоненты

$$F(\lambda) = mF_{\text{total}}(\lambda) + nF_{\text{total}}(\lambda)e^{-\tau_A(\lambda)} + (1 - m - n)F_{\text{total}}(\lambda)e^{-\tau_A(\lambda) - \tau_B(\lambda)}. \quad (3.4)$$

(ii) Каждый источник создает ОП в профилях линий только одной компоненты

$$F(\lambda) = mF_{\text{total}}(\lambda)e^{-\tau_B(\lambda)} + nF_{\text{total}}(\lambda)e^{-\tau_A(\lambda)} + (1 - m - n)F_{\text{total}}(\lambda)e^{-\tau_A(\lambda) - \tau_B(\lambda)}, \quad (3.5)$$

где m и n обозначают интенсивности дополнительных источников в относительных единицах. Результаты анализа для этих моделей представлены в таблице 3.1. Модель (А) – модель с одним дополнительным источником (простейший случай). Модели (В) и (С) соответствуют ситуациям (i) и (ii), описанным выше. Значения критерия АИСС для моделей (а) и (b) значительно ниже, чем для модели (с), что указывает на присутствие дополнительного источника, который непокрыт обеими компонентами. Учет второго дополнительного источника (модель (b) по сравнению с моделью (а)) почти не влияет на значение критерия АИСС, поэтому мы использовали более простую модель для анализа H_2 системы. Наилучшее значение ОП оказалось равным $2.40 \pm 0.07\%$ полного потока квазара, что соответствует фактору покрытия $f_c = 97.6 \pm 0.07\%$.

Таким образом, для описания линий H_2 для каждого уровня J мы использовали 7 подгоночных параметров: $z_A, z_B, b_A, b_B, N_A, N_B, f_c$. Значение f_c принято постоянным для всего диапазона длин волн, так как ОП в линиях H_2 почти не зависит от длины волны (см. рисунок 3.5).



Рис. 3.9: Показаны две возможные ситуации взаимного расположения двух абсорбционных облаков H_2 (А и В) и трех источников излучения: основного и двух дополнительных (см. подробнее текст).

3.2.5 Сравнение результатов анализов абсорбционной системы H_2

Наилучшие значения параметров модели и синтетический спектр абсорбционных линий H_2 приведены в главе 2.2. На рисунке 3.10 показано сравнение диаграмм населенностей вращательных уровней H_2 : на левой панели показан результат, представленный в работе [52], на правой панели – результат этой работы. Поскольку результат этой работы близок к результату работы [39], последний не показан на рисунке. Красные и синие квадратики на обеих панелях соответствуют населенностям компонент H_2 с $z_A = 2.81099$ (2.811001 в работе [52]) и $z_B = 2.81112$. Третьей компоненте из работы [52] с $z_C = 2.8109346(11)$ соответствуют зеленые звездочки. Несмотря на то, что отношение населенностей уровней $J = 0$ и $J = 1$ в компоненте С близко к значениям для компонент А и В, диаграмма населенностей для компоненты С физически некорректна. Температуры возбуждения T_{02} уровней $J = 0$ и $J = 2$, и T_{13} уровней $J = 1$ и $J = 3$ отрицательны. Этот результат, вероятно, является следствием использования неверной физической модели системы H_2 . Отличие результатов (вследствие учета эффекта неполного покрытия) наиболее значимо проявляется в анализе линий переходов с низких уровней J , для которых лучевая концентрация H_2 высокая (и поток в дне линии близок к уровню нулевого потока). Для высоких уровней J результаты этой работы и работы [52] согласуются в

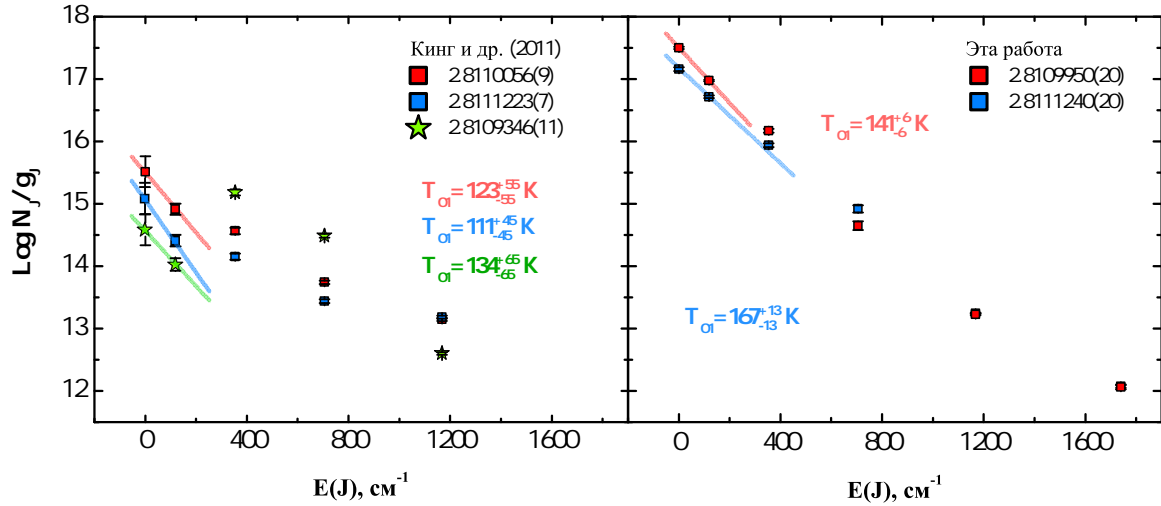


Рис. 3.10: Диаграмма населенностей вращательных уровней H_2 для абсорбционной системы с $z_{\text{abs}} = 2.811$ в спектре Q 0528–250. N_J – лучевая концентрация H_2 на уровне J , g_j – статистический вес уровня. Прямые линии (синяя, красная и зеленая) соответствуют температурам возбуждения T_{01} уровней $J=0$ и $J=1$. На левой панели показана диаграмма для анализа, выполненного в работе [52]. На правой панели показана диаграмма для анализа, представленного в этой работе (с учетом ОП).

пределах одного стандартного отклонения.

Для модели с учетом ОП (правая панель) лучевые концентрации H_2 на нижних вращательных уровнях оказываются на два порядка величины выше, чем в анализе, выполненном без учета ОП (левая панель). Таким образом, несмотря на малость ОП, сильно меняются определяемые лучевые концентрации и, как следствие, оценки физических условий. В первом случае оптическая толщина H_2 высокая, и молекулы H_2 экранированы в линиях от УФ излучения, во втором случае среда является оптически тонкой в линиях H_2 , фон УФ излучение почти не экранируется.

3.2.6 Интерпретация

В этом разделе рассмотрены причины возникновения ОП в центре насыщенных линиях абсорбционной системы H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.811$ в спектре Q 0528–250.

- Многокомпонентный квазар

На красном смещение $z \sim 2$ структура источника излучения с поперечным размером $\lesssim 3$ кпк неразрешима для наблюдений с помощью телескопа VLT/UVES. Например, пространственная структура двойного квазара размером ~ 10 кпк может оставаться неразрешимой (см. работы [143, 144]). Если Q 0528–250 имеет многокомпонентную структуру, и не все компоненты (источники) покрыты абсорбционной системой молекулярного водорода, излучение от непокрытых источников будет создавать ОП в линиях H_2 .

Анализ изображения Q 0528–250 на интерферометре Very Long Baseline Array (VLBA)⁶, выполненный в работах [8, 136], показывает, что структура квазара состоит из неразрешимой компоненты, которая содержит $\sim 94\%$ полного потока излучения в радиодиапазоне (см. таблицу 6 в работе [8]). Другие $\sim 6\%$, вероятно, относятся к диффузной компоненте. Интересно, что эти цифры по порядку величины согласуются с оценками, полученными в нашем анализе системы H_2 . Однако следует учитывать, что размер области формирования излучения квазара Q 0528–2508 в радиодиапазоне $\sim 65 \times 380$ пк [136] значительно больше размера облака H_2 (~ 1 пк). Дополнительно, мы изучили изображения квазара PKS 0528–250 на длинах волн 13 и 4 см, выполненные в процессе калибровки VLBA. В этих изображениях достигается более высокое пространственное разрешение, тем не менее центральный источник остается неразрешим.

- **Рассеяние излучения квазара на пыли в DLA системе**

Рассеяние излучения на пыли характеризуется узким окном направленности. Около 90% полного потока излучения рассеивается в направлении на наблюдателя в конус с углом раскрытия ~ 5 градусов (см., например, [145]). Размер области DLA системы, где происходит рассеяние, может значительно превышать размер облака H_2 . В результате, даже при условии полного покрытия области формирования излучения квазара облаком H_2 , излучение,

⁶<https://science.nrao.edu/facilities/vlba>

рассеянное на пыли в направлении на наблюдателя, может быть зарегистрировано как ОП в дне абсорбционных линий H_2 .

Поток излучения, рассеянного в области DLA системы с высоким содержанием пыли, можно оценить как:

$$F_{sc} = F (1 - e^{-\tau_{\text{DLA}}}) \frac{\Omega_{\text{QSO}}^* \Omega_{\text{DLA}}}{\Omega_{\text{QSO}} \Omega_{sc}}, \quad (3.6)$$

где с помощью F обозначен регистрируемый наблюдателем поток излучения, проходящего через облако H_2 , τ_{DLA} – средняя оптическая толщина вдоль луча зрения по направлению к квазару, Ω_{QSO} и Ω_{DLA} – телесные углы области формирования излучения квазара и области высокого содержания пыли в DLA системе, измеренные наблюдателем с Земли. Ω_{QSO}^* обозначен телесный угол области формирования излучения квазара, измеренный наблюдателем, находящимся вблизи DLA системы. Ω_{sc} – телесный угол, в который происходит рассеяние. Величина ОП = F_{sc}/F . В предположении, что характерный размер области рассеяния в DLA системе составляет $\sim 1 - 10$ кпк, ОП может достигать величины нескольких процентов полного потока. Это согласуется с результатами наблюдений. Однако в рамках этой модели рассеянное излучение одновременно может создавать ОП в абсорбционных линиях металлов, ассоциированных с DLA системой. В спектре Q 0528–2508 мы не детектируем такого эффекта.

- **Взаимодействие джета квазара с удаленным облаком**

Излучение джета квазара, направленное на наблюдателя, вносит вклад в континуальное излучение квазара в видимом диапазоне длин волн. Удаленная часть джета взаимодействует с внешней межзвездной средой (по отношению к родительской галактике квазара) и может разогреть облако газа, которое удалено от центрального источника. Такая ситуация наблюдалась в исследовании радиогалактики PKS B2152–699 в радио-, оптическом и рентгеновском диапазонах в работе [146]. Авторы, впервые, выполнили

наблюдения с высоким разрешением радио–джета в направлении на высоко–ионизованное облако газа, излучающее в эмиссионных линиях в видимом диапазоне. На изображении, полученном на телескопе HST, определено, что помимо области высоко–ионизованного газа излучение создается также некоторым сгустком газа, который идентифицируется на радио–изображении как структура похожая на узел. Поток излучения от этого сгустка в видимом диапазоне равняется $2.5 \pm 0.2 \mu\text{Ян}$ на частоте 4.97×10^{14} Гц [146]. Это значение близко к величине регистрируемого нами ОП в V полосе, $2.4 \pm 0.1 \mu\text{Ян}$. Полный поток излучения соответствует видимой звездной величине квазара $m_V = 17.34$ (см. [147]).

Обычно, излучение джета квазаров обладает высокой переменностью во времени (с периодом от нескольких дней до месяца, см. например, [148]), что позволяет ожидать такую же переменность ОП в линиях H_2 . Поэтому предложенная модель может быть проверена с помощью дальнейших наблюдений этого квазара.

3.3 Неполное покрытие области формирования излучения квазара J 2123–0050 абсорбционной системой H_2

Описание обработки спектра J 2123–0050 и анализа абсорбционной системы H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.059$ приведены в главе 2.3. Абсорбционная система H_2 состоит из двух компонент А и В с полными лучевыми концентрациями $\log N_{\text{H}_2}^{\text{A}} = 17.94 \pm 0.01$ и $\log N_{\text{H}_2}^{\text{B}} = 15.16 \pm 0.02$ (см. рисунок 2.3). Для линий H_2 компоненты А переходов лаймановских полос L1-0 L0-0, попавших в участок спектра, содержащий эмиссионные линии квазара $\text{Ly}\beta$ и O VI , детектируется ОП на уровне $\sim 3 - 5\%$ полного потока.

3.3.1 Корректировка уровня нулевого потока

Для определения уровня нулевого потока был выполнен анализ линий $\text{Ly}\alpha$ леса с плоским дном ($\Delta\lambda > 0.5 \text{ \AA}$ или $\delta v > 20 \text{ км с}^{-1}$). Для таких абсорбционных систем чрезвычайно маловероятен эффект неполного покрытия, и поток в дне линий должен совпадать с уровнем нулевого потока. ОП в дне линий $\text{Ly}\alpha$ леса определялись с помощью процедуры, описанной в разделе 3.2.1. Среднее значение ОП в линиях $\text{Ly}\alpha$ леса $-0.06 \pm 0.45 \%$.

3.3.2 Неполное покрытие в линиях H_2

На верхней панели рисунка 3.11 показан участок спектра J 2123–0050, содержащий абсорбционные линии H_2 . Синим фоном выделен участок спектра, содержащий эмиссионные линии квазара $\text{Ly}\beta$ и O VI . Среди доступных для анализа линий H_2 на положение эмиссионных линий квазара попадают только линии H_2 переходов лаймановских полос L0-0 и L1-0. На нижней панели показано увеличенное изображение спектра вблизи уровня нулевого потока. Значения потока в центре насыщенных абсорбционных линий H_2 показаны красными квадратиками на нижней панели. Видно, что для большинства линий H_2 поток в центре линии находится вблизи уровня нулевого потока, в то время как поток в центре линий лаймановских полос L0-0 и L1-0 превосходит уровень нулевого потока на 5 – 10 % полного потока. Для сравнения потоки в центре насыщенных линий $\text{Ly}\alpha$ леса для того же участка спектра показаны зелеными квадратиками.

Такая ситуация ранее была обнаружена в анализе абсорбционной системы H_2 в спектре Q 1232+0815 [48]. Авторами было показано, что для линий H_2 , находящихся в участке спектра, содержащем эмиссионные линии квазара, детектируется остаточный поток, в то время как для других переходов H_2 поток в центре линий достигает до уровня нулевого потока. Считается, что такой ОП соответствует излучению квазара от области формирования широких эмиссионных линий, которая не полностью покрывается системой H_2 .

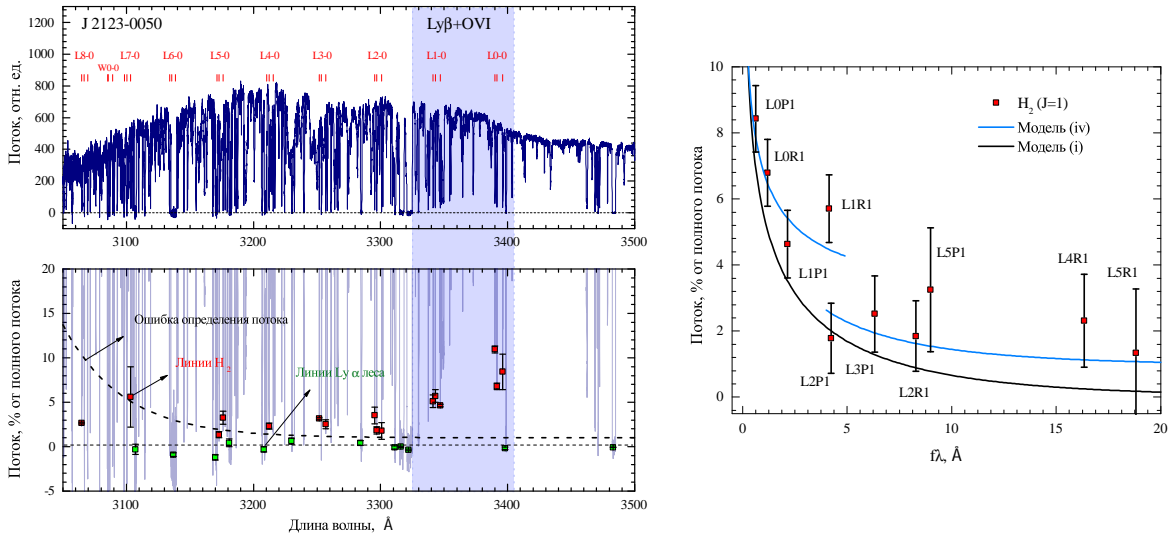


Рис. 3.11: *Левые панели:* на верхней панели показан участок ненормированного на континуум спектра квазара, содержащий линии абсорбционной системы H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.059$. Синим фоном выделен участок спектра, содержащий эмиссионные линии квазара $Ly\beta$ и OVI . Красными штрихами показано положение линий H_2 переходов с уровней $J=0$ и $J=1$. На нижней панели показано увеличенное изображение нормированного спектра квазара вблизи уровня нулевого потока. Красными квадратиками показаны ОП (в % от полного потока) в центре линий H_2 переходов с уровней $J=0$ и $J=1$. Зелеными квадратиками показаны ОП (в % от полного потока) в центре насыщенных линий $Ly\alpha$ леса. Штриховой кривой показана точность измерения потока в спектре. *Правая панель:* зависимость остаточных потоков в линиях H_2 переходов с уровня $J = 1$ от значения $f\lambda$ – произведения силы осциллятора на собственную длину волны перехода. Сплошной и пунктирной линиями показаны зависимости ОП для моделей с учетом и без учета эффекта неполного покрытия, модели (iv) и (i), соответственно. Наиболее слабые линии H_2 : L0P1, L0R1, L0P1 и L0R1, попадают на участок спектра, содержащий эмиссионные линии квазара $Ly\beta$ и OVI . Разрыв кривой для модели (iv) вблизи $f\lambda \sim 4$ вызван учетом фактора покрытия в этих линиях.

Такой ОП в линиях H_2 может быть результатом неполного покрытия области формирования широких эмиссионных линий квазара, свертки насыщенных линий с аппаратной функцией спектрографа и/или зависимости силы осциллятора f от длины волны перехода. Чтобы определить наиболее вероятную причину ОП в линиях H_2 мы рассмотрели четыре модели абсорбционной системы H_2 : (i) без источников дополнительного излучения, (ii) с источником дополнительного излучения в континууме, (iii) с источником дополнительного излучения в эмиссионных линиях (BLR), (iv) с двумя источниками дополнительного излучения в континууме и в эмиссионных линиях. Дополнительно, в моделях (ii) и (iv) учитывается возможность, что абсорбционная система H_2 может не полностью покрывать область формирования континуального излучения квазара. Для этих моделей мы выполнили два теста.

На правой панели рисунка 3.11 показана зависимость величины ОП в линиях H_2 переходов с уровня $J=1$ от произведения λf и кривые теоретического расчета этой зависимости для моделей (i) и (iv). Сравнение кривых и результатов измерений указывает на то, что ОП в линиях H_2 скорее всего не вызван сверткой насыщенных линий с аппаратной функцией спектрографа, а, по-видимому, является следствием эффекта неполного покрытия. Затем мы выполнили сравнений значений статистического критерий АИСС [119] для анализа абсорбционной системы H_2 с помощью моделей (i)–(iv), см. таблицу 3.2. Для моделей (iii) и (iv) значения АИСС оказываются меньше, чем для моделей (i) и (ii) ($\Delta\text{АИСС} \sim -40$). Учет ОП в континууме позволяет уменьшить значение АИСС еще на 10 единиц. Таким образом, наилучшим образом линии H_2 описывает модель (iv). Отметим, что вследствие невысокой лучевой концентрации H_2 и малости значений сил осцилляторов переходов H_2 лаймановских полос L0-0 и L1-0, учет эффекта неполного покрытия слабо влияет на определяемые значения лучевых концентраций H_2 (см. колонки 7 и 8 в таблице 3.2).

Таблица 3.2: Сравнение результатов анализа абсорбционной системы H_2 в спектре J 2123–0050 для четырех моделей H_2 системы с разным учетом эффекта неполного покрытия. Примечание: колонка 2 – значение редуцированного критерия χ^2 ; колонка 3 – абсолютное значение критерия AICC; колонка 4 – разница значений AICC; колонки 5 и 6 – ОП_{конт} и ОП_{эмис} – величина ОП в процентах полного потока от непокрытой области формирования континуального излучения квазара и от области формирования широких эмиссионных линий, соответственно; колонки 7 и 8 – лучевые концентрации H_2 в компоненте А для переходов с уровней $J = 0$ и $J = 1$.

| Модель | χ_{red}^2 | AICC | ΔAICC | ОП _{конт} | ОП _{эмис} | $\log N_{\text{H}_2}^{J=0}$ | $\log N_{\text{H}_2}^{J=1}$ |
|--------|----------------|-------|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| i | 1.11 | 374.7 | 0 | нет | нет | 17.36 ± 0.02 | 17.79 ± 0.01 |
| ii | 1.05 | 363.9 | -10.8 | 1.1 ± 0.4 | нет | 17.38 ± 0.02 | 17.80 ± 0.01 |
| iii | 0.94 | 330.0 | -44.7 | нет | 2.7 ± 0.5 | 17.35 ± 0.02 | 17.78 ± 0.01 |
| iv | 0.91 | 321.3 | -53.4 | 1.1 ± 0.3 | 3.4 ± 0.5 | 17.37 ± 0.02 | 17.79 ± 0.01 |

3.3.3 Неполное покрытие в линиях C I

Считается, что нейтральный углерод в диффузных атомарных облаках ассоциируется с центральной частью облаков, где внешний УФ фон значительно ослабляется за счет экранирования в линиях H_2 и поглощения на пыли (см., например, [4]). Поэтому, если облако H_2 не полностью покрывает область формирования излучения квазара, разумно ожидать, что неполное покрытие также может наблюдаться в линиях C I (см. анализ линий C I в спектра квазара Q 1232+0815 [141]).

В спектре J 2123–0050 абсорбционные линии переходов C I вблизи 1328 \AA и 1656 \AA , смещенные на фактор $(1 + z_{\text{abs}})$, находятся в участках спектра квазара, содержащих эмиссионных линии квазара N V и C IV, соответственно. В доступный для анализа диапазон длин волн спектра J 2123–0050, полученного на телескопе VLT, попадает только линии C I 1656 \AA . Мы рассмотрели две модели абсорбционной системы C I с учетом и без учета фактора покрытия в эмиссионной линии C IV. Обнаружено, что ОП детектируется на уровне $1 \pm 1\%$ полного потока, что почти не меняет значение критериев χ^2 и AICC.

3.4 Неполное покрытие области формирования излучения квазара J 2100–0641 абсорбционной системой H₂

3.4.1 Неполное покрытие в линиях H₂

Описание обработки спектра J 2100–0641 и анализа абсорбционной системы H₂ с $z_{\text{abs}} = 3.092$ приведены в главе 2.4. Абсорбционные линии H₂ лаймановских полос L5-0 и L6-0, находятся в участке спектра, содержащем эмиссионные линии квазара Ly β и O VI. В центре этих линий мы детектируем остаточный поток $\approx 10\%$ от полного потока излучения квазара. Линии переходов с уровней J=0 и J=1 пересекаются с линиями Ly α леса, поэтому в анализе использовались линии переходов с уровней J=2 и J=3. Из-за большого доплеровского уширения ($b_{\text{H}_2} \simeq 8$ км/с) линии этих переходов оказываются насыщены. На рисунке 3.12 показаны сравнение ОП, измеренных в линиях H₂ переходов с уровней J=2 и J=3 (красные квадратики) и в линиях Ly α леса (синие квадратики), в зависимости от положения линий в спектре. На рисунке 3.13 показан синтетический спектр линий H₂ переходов с уровней J=2 и J=3, вписанный в наблюдаемый спектр квазара. Синтетический спектр системы H₂ построен без коррекции на фактор покрытия. Видно, что в линиях H₂ лаймановских полос L5-0 и L6-0 синтетический спектр проходит ниже наблюдаемого, при этом в остальных линиях H₂ (как с меньшим, так и с большим значением λf) поток в центре линий равен нулевому.

3.5 Заключение

В этой главе диссертации исследован эффект неполного покрытия области формирования излучения квазара облаком молекулярного водорода, находящимся на большом красном смещении.

Впервые обнаружен эффект неполного покрытия области формирования континуального излучения квазара облаком H₂ с $z_{\text{abs}} = 2.811$ в спектре квазара

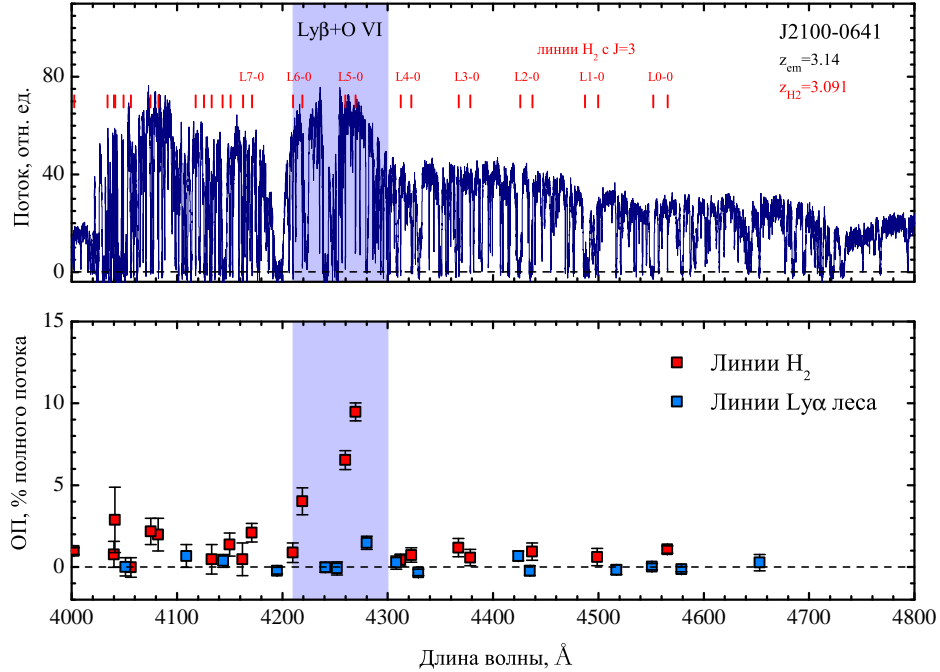


Рис. 3.12: Верхняя панель: Участок спектра квазара J 2100–0641, содержащий абсорбционные линии H_2 с $z_{\text{abs}} = 3.092$. Положение линий переходов H_2 с вращательного уровня $J=3$ показано красными вертикальными штрихами. Положение эмиссионных линий $\text{Ly}\beta$ и O VI показано синим фоном. Нижняя панель: остаточные потоки в дне абсорбционных линий H_2 переходов с уровней $J=2$ и $J=3$ (красные квадратики) и линий $\text{Ly}\alpha$ леса (синие квадратики) в зависимости от положения линий в спектре.

Q 0528–2508. Показано, что поток в центре насыщенных абсорбционных линий H_2 превышает уровень нулевого потока на постоянную величину (2.22 ± 0.54) % от полного потока. Рассмотрены возможные причины ОП в широких насыщенных линиях H_2 . ОП может возникнуть, если абсорбционная система состоит из нескольких ненасыщенных компонент с близкими красными смещениями, при этом отдельные компоненты не различаются в профилях линий. Такая модель была использована в анализе этой системы, выполненным другими авторами [52]. Предложен тест, который показал, что такая модель скорее всего не верна. Анализ абсорбционной системы H_2 $z_{\text{as}}=2.811$ в спектре квазара Q 0528–2508 с учетом коррекции спектра на фактор покрытия дает значительно более высокие (более чем на два порядка величины) лучевые концентрации H_2 на нижних вращательных уровнях $J=0$ и $J=1$,

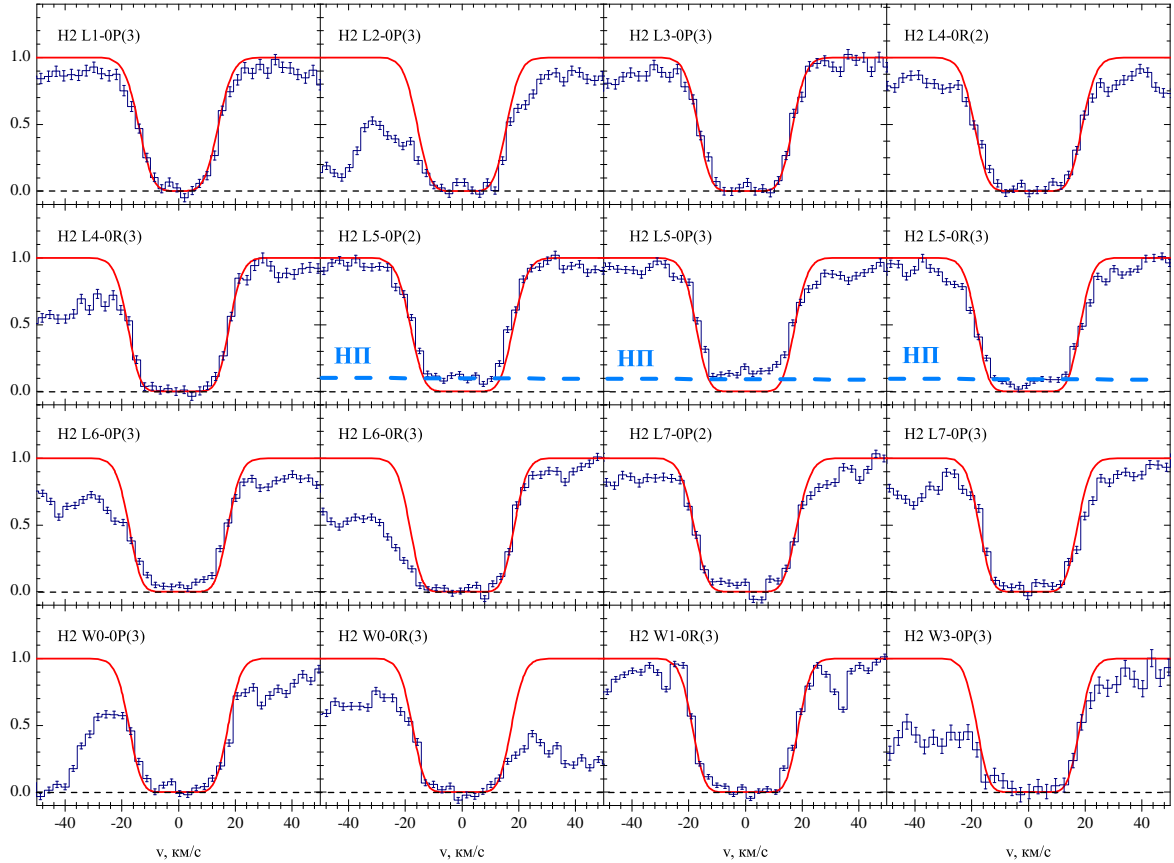


Рис. 3.13: Синтетический спектр абсорбционных линий переходов H_2 с уровнями $J=2$ и $J=3$ с $z_{\text{abs}} = 3.092$, вписанный в наблюдаемый спектр квазара J 2100–0641 (KECK/HIRES). Линии переходов H_2 , находящиеся в области эмиссионных линий квазара $Ly\beta$ и OVI , отмечены знаком “HII”. Остаточные потоки в дне этих линий значительно превышают уровень нулевого потока, который показан горизонтальной штриховой линией.

чем было определено в работе [52]. Предложено три интерпретации неполного покрытия области формирования континуального излучения квазара абсорбционной системой H_2 : (1) многокомпонентный квазар, (2) рассеяние излучения квазара на пыли в DLA системе, где находится исследуемая система H_2 , (3) взаимодействие джета квазара с удаленным облаком родительской галактики.

В спектре квазара J 2123–0050 идентифицирован эффект неполного покрытия области формирования широких эмиссионных линий квазара абсорбционной системой H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.059$. В абсорбционных линиях H_2 лаймановских полос L0-0 и L1-0, попавших в участок спектра, содержащий эмиссионные линии квазара

$\text{Ly}\beta/\text{O VI}$, ОП в центре линий H_2 превышает уровень нулевого потока на $\approx 3\%$ от полного потока. В то время как ОП $\approx 0\%$ в других линиях H_2 , которые находятся в участках спектра, не содержащих эмиссионные линии квазара. Вследствие невысокой лучевой концентрации H_2 и низких значений силы осцилляторов переходов H_2 лаймановских полос L0-0 и L1-0, учет эффекта неполного покрытия слабо влияет на определяемые значения лучевых концентраций H_2 .

В спектре квазара J 2100–0641 идентифицирован эффект неполного покрытия области формирования широких эмиссионных линий квазара абсорбционной системой H_2 с $z_{\text{abs}} = 3.092$. В абсорбционных линиях H_2 лаймановских полос L5-0 и L6-0, попавших в участок спектра, содержащий эмиссионные линии квазара $\text{Ly}\beta/\text{O VI}$, ОП в центре линий H_2 превышает уровень нулевого потока на $\approx 10\%$ от полного потока. Вследствие большого числа линий H_2 доступных для анализа учет фактора покрытия в линиях H_2 лаймановских полос L5-0 и L6-0 почти не влияет на определяемые параметры абсорбционной системы H_2 .

На настоящий момент эффект неполного покрытия области формирования излучения квазара облаком H_2 с большим красным смещением обнаружен для пяти квазаров, включая три идентификации эффекта, представленные в диссертации.

Глава 4

Анализ физических условий в холодной фазе межзвездной среды в суб-DLA системе с $z_{\text{abs}} = 2.059$ в спектре J 2123–0050

4.1 Введение

Исследование физических условий в межзвездной среде важно для понимания свойств галактик, как они формируются и эволюционируют. Звздообразование в галактиках является ключевым процессом, определяющим физические условия в межзвездной среде [1, 2]. Звезды производят УФ излучение и космические лучи, которые нагревают и ионизуют окружающий газ; взрывы сверхновых и звездный ветер передают энергию звезд окружающей среде, при этом происходит перемешивание и химическое обогащение вещества межзвездной среды тяжелыми элементами (Be, Li, C, N, O, Fe и др.) и пылью, синтезированными в звездах. В тоже время существует обратная связь. Темп звездообразования определяется физическими условиями в межзвездной среде. Известно, что звезды образуются в ядрах плотных молекулярных облаков (с $n \gtrsim 10^4 \text{ см}^{-3}$ и $T \sim 10 - 20 \text{ К}$), где достигается условие гравитационного коллапса [4]. Характерное время образования таких облаков зависит от локальных физических условий в среде: объемной концентрации газа, температуры, степени ионизации, интенсивности УФ фона, фона космиче-

ских лучей, турбулентности, металличности среды, содержание пыли и др. При этом физические условия определяются тем, как происходило звездообразование в прошлом, и определяют как звездообразование будет происходить в будущем.

Считается, что DLA системы (абсорбционные системы атомарного водорода с $N_{\text{HI}} > 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$) ассоциируются с дисками или гало галактик [5,6]. Детектирование тяжелых элементов в DLA системах $[(X/H) \sim 1/10(X/H)_{\odot}]$ указывает на то, что вещество в DLA системах скорее всего относится к области межзвездной среды повышенной плотности, где происходит/ло звездообразование. Анализ DLA систем позволяет определять средние характеристики систем: металличность, темп охлаждения среды (l_C , за счет излучения в линии C II*, см. [149]), степень молекуляризации газа и др. При этом исследования большинства DLA систем относятся к горячей фазе нейтральной межзвездной среды. Темп звездообразования в DLA системе можно оценить через интенсивность фонового УФ излучения. Один из методов – это анализ теплового равновесия среды. Считается, что газ в DLA системах разогревается УФ излучением, в основном, за счет фотоэлектрической реакции на пыли, а охлаждается, главным образом, за счет излучения в линии C II*. Относительное содержание пыли в DLA системе можно оценить с помощью сравнения распространенностей металлов, подверженных (Fe) и слабо подверженных (Zn, S) деплеции (оседанию на пыли) (см., например, [5]). Таким образом, зная содержание пыли и темп охлаждения l_C , можно оценить среднюю интенсивность УФ фона (см., например, [150]). Другой метод – это анализ населенностей возбужденных уровней атомов и молекул. В этом случае, чтобы аккуратно оценить интенсивность УФ излучения, важно понимать, каковы физические условия в среде. Такой анализ физических условий (температуры, объемной концентрации, степени ионизации, интенсивности УФ фона и др.) можно выполнить с помощью анализа линий поглощения молекул H_2 , HD, CO и атомов C I, ассоциированных с холодной фазой межзвездной среды в DLA системах.

В этой главе представлен анализ физических условий в суб-DLA системе

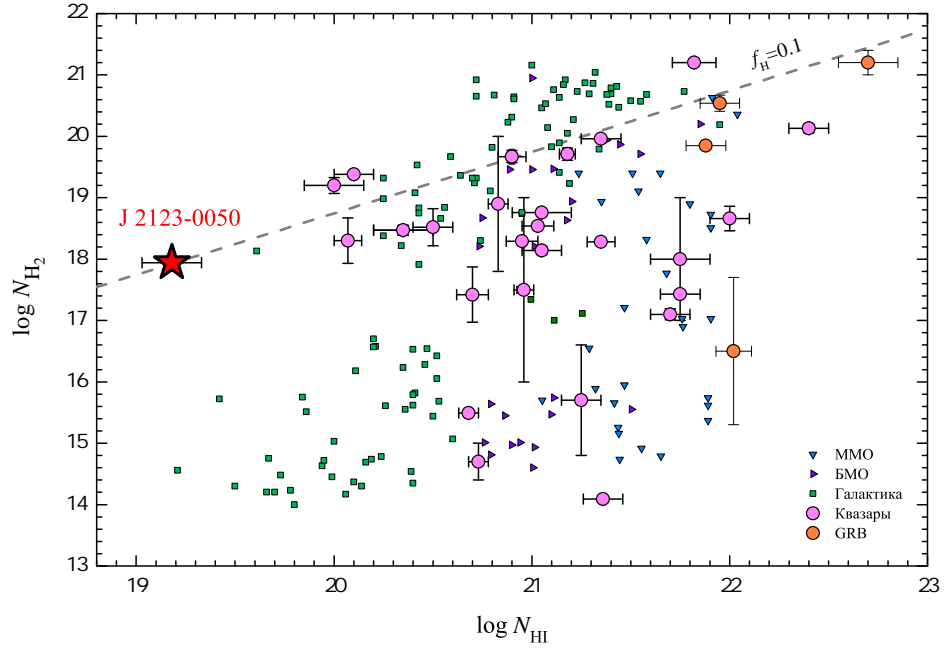


Рис. 4.1: Результаты измерений лучевой концентрации H_2 и HI для DLA и суб-DLA систем с большими красными смещениями в спектрах квазаров (заполненные розовые кружки – см. [21]) и спектрах послесвечения вспышек гамма излучения (заполненные оранжевые кружки – см. работы [41, 42, 70, 71]), а также для абсорбционных систем в нашей Галактике и Магеллановых облаках (зеленые квадратики – Галактика [24, 151–153], фиолетовые треугольники – Большое Магелланово Облако [36, 38], синие треугольники – Малое Магелланово Облако [36, 38]). Красной звездочкой показано значения лучевых концентраций H_2 и HI в суб-DLA системе с $z_{\text{abs}} = 2.059$ в спектре J 2123–0050. Штриховой линией показана граница области, где степень молекуляризации газа $f_{\text{H}_2} = 0.1$.

с $z_{\text{abs}} = 2.059$ в спектре J 2123–0050. Исследуемая система имеет высокое содержание молекул H_2 и атомов C I при наименьшей среди систем с большими красными смещениями лучевой концентрации H I , равной $\log N_{\text{H I}} = 19.18 \pm 0.15$ (см. рисунок 4.1). В сравнении с абсорбционными системами H_2 в нашей Галактике с таким же значением $N_{\text{H I}}$, полная лучевая концентрация H_2 в исследуемой системе оказывается почти на три порядка выше. Казалось бы такое различие может объясняться относительно низкой интенсивностью УФ фона, однако в работах [26] и [154] показано, что интенсивность фона УФ излучения в этой суб-DLA системе значительно выше среднегалактического значения.

Также для компоненты A абсорбционной системы H_2 относительно содержание молекул HD в 1.5 раза выше (на уровне значимости 3σ), чем отношение изотопов (D/H) на больших красных смещениях. В то время как для других известных H_2/HD систем с большими красными смещениями, отношение (HD/ 2H_2) в пределах статистических ошибок не превышает отношения (D/H). Моделирование структуры атомарных диффузных облаков [104] показывает, что для типичных физических условий (объемной концентрации газа, УФ фона, фона КЛ, металличности, содержания пыли и др.) значение (HD/ 2H_2) в диффузном атомарном облаке не может превышать отношение (D/H).

Эти и другие обстоятельства представляют дополнительный интерес для исследований физических условий в этой системе.

4.2 Методы определения физических условий в молекулярных облаках

Спектроскопический анализ абсорбционных систем позволяет измерять только лучевые концентрации элементов $N = \int_0^l n(x) dx$. Поскольку размер абсорбционной системы l и профили концентраций вдоль луча зрения $n(x)$ неизвестны, объемная концентрация газа и другие физические характеристики прямым способом не определяются. Однако, если один и тот же элемент в абсорбционной системе де-

тектируется в нескольких энергетических (или ионизационных) состояниях, тогда, сравнивая относительные населенности этих состояний со значением, полученным с помощью теоретического расчета баланса населенностей, можно определить физические условия в системе.

$$\left(\frac{N_2}{N_1}\right)_{\text{спек}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)_{\text{теор}}(n, T, \xi_{\text{ion}}, \dots), \quad (4.1)$$

где индексами 1 и 2 обозначены исследуемые элементы, например, молекулы H_2 на разных вращательных уровнях основного состояния или атомы нейтрального углерода на разных уровнях тонкой структуры.

При этом используется два предположения: (i) об однородности распределения объемных концентраций элементов вдоль луча зрения и (ii), что исследуемые элементы относятся к одной и той же области системы.

4.2.1 Анализ диаграммы населенностей вращательных уровней молекул H_2

Молекулы H_2 существуют в двух различных формах, отличающихся суммарным спином протонов: орто-водород ($I = 1$) и пара-водород ($I = 0$). В основном электронном состоянии орто- и пара-водород принципиально разделяются: молекулы пара-водорода могут находиться только на четных вращательных уровнях ($J=0, 2, 4, \dots$), в то время как молекулы орто-водорода – на нечетных вращательных уровнях ($J=1, 3, 5, \dots$).

Переход между орто- и пара-водородом (с изменением спина) невозможен для процессов в изолированном молекулярном газе (время спонтанного перехода $\sim 5 \times 10^{12}$ лет). Однако этот переход возможен посредством: (i) столкновений с протонами (скорость реакции $\sim 10^{-10} - 10^{-9} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, см. [155, 156]) или с атомами водорода (скорость реакции на порядок ниже, чем для протонов, см., например, [157]), (ii) в реакции адсорбции H_2 на межзвездной пыли (см., например, [158]), а также (iii) за счет процессов разрушения молекул H_2 УФ излучением и образования новых молекул на пыли. Считается, что молекулы орто- и пара- H_2

образуются в соотношении 3:1, в соответствии со статистическим весом состояния [159]. Таким образом, количество орто- и пара-водорода в облаке определяется отношением скоростей этих процессов и, как следствие, зависит от локальных физических условий в среде: интенсивности УФ фона, объемной концентрации протонов, кинетической температуры газа и др. Как показано в работе [160], отношение орто- и пара-водорода сильно меняется с расстоянием от границы (или глубины проникновения УФ излучения в облако). Вблизи границы облака фон УФ слабо экранирован в линиях H_2 , поэтому определяющую роль в установлении отношения орто- и пара-водорода играет процесс образования H_2 на пыли. В этом случае отношение орто- и пара-водорода полагается ≈ 3 . По мере увеличения расстояния от границы облака (или $\log N_{H_2}$) возрастет степень экранирование молекул H_2 , при этом экранирование орто- H_2 происходит эффективнее, чем пара- H_2 . Поэтому отношение орто- и пара-водорода значительно увеличивается и на некотором расстоянии от границы может быть очень высоким (≈ 20 , см., например, [160]). При дальнейшем увеличении расстояния от границы облака (случай высокой лучевой концентрации H_2), когда фон УФ излучения в линиях орто- и пара-водорода сильно экранирован, отношение орто- и пара- H_2 определяется, главным образом, столкновениями с H^+ . В предположении, что характерное время существования молекулярного облака ($\sim 10^7$ лет) значительно выше времени столкновений ($\sim 10^3 \div 10^5$ лет), отношение орто- и пара-водорода в центральной части облака принимает равновесное значение в соответствии с распределением Больцмана. Если большинство молекул H_2 находится на первых двух вращательных уровнях ($J=0$ и $J=1$), тогда отношение населенностей этих уровней определяется следующим выражением:

$$\frac{N_{H_2}^{J=1}}{N_{H_2}^{J=0}} = \frac{g_{J=1}}{g_{J=0}} \exp\left(-\frac{E_{10}}{k_B T}\right), \quad (4.2)$$

где $g_J = (2I + 1)(2J + 1)$ - статистический вес состояния, $E_{10}/k_B = 170.5$ К. Таким образом, в системах с высокой лучевой концентрацией H_2 ($\log N > 17$ [39, 121]) анализ отношения орто- и пара-водорода позволяет оценить кинетическую темпе-

ратуру газа.

Дипольные переходы в молекуле H_2 запрещены в основном электронном состоянии, что делает вращательные уровни фактически метастабильными (характерные времена жизни уровней составляют 3.4×10^{10} с для $J=2$ до 3.8×10^7 с для $J=6$). При типичных физических условиях в диффузных облаках $T \sim 50 - 200$ К, $n \sim 10 - 500$ см^{-3} (см., например, [22, 24]) и $J_{\text{UV}}^{\text{G}} \simeq 3.2 \times 10^{-20}$ эрг с^{-1} см^2 Гц^{-1} рад^{-1} (средняя интенсивность УФ излучения в нашей Галактике для длин волн $\lambda \approx 1000$ Å, см. [161]. Здесь и далее обозначается как J_{UV}^{G}) населенности уровней с $J \geq 2$ определяются, главным образом, радиативной накачкой [162] и спонтанными переходами [163]¹.

$$N_{\text{H}_2}^{J=4} = \frac{N_{\text{H}_2}^{J=0} \beta p_{4,0} + N_{\text{H}_2}^{J=2} (\beta p_{4,2})}{A_{42} + \beta (p_{2,4} + p_{0,4})} \quad (4.3)$$

$$N_{\text{H}_2}^{J=5} = \frac{N_{\text{H}_2}^{J=1} \beta p_{5,0} + N_{\text{H}_2}^{J=3} (\beta p_{5,3})}{A_{53} + \beta (p_{3,5} + p_{1,5})} \quad (4.4)$$

где A_{ij} , с^{-1} – вероятности спонтанных переходов, p_{ij} – коэффициенты радиативной накачки (см., например, [44]) и β – темп фотоабсорбции. $\beta = 4\pi \times 10^9 J_{\text{UV}} S_{\text{shield}}(N_{\text{H}_2}) \text{с}^{-1}$, где S_{shield} – фактор экранирования УФ излучения в линиях H_2 , см. [121].

В случае невысокой лучевой концентрации H_2 (оптически-тонкая среда в линиях H_2) структура облака хорошо описывается с помощью однородной модели, что позволяет легко оценить интенсивность УФ фона в среде с помощью выражений (4.3)–(4.4). Если лучевая концентрация H_2 высокая (оптически-толстый случай) распределение населенностей уровней H_2 в объеме облака сильно неоднородно: в центре облака молекулы H_2 находятся преимущественно на нижних вращательных уровнях $J=0, 1$, в то время как вблизи границы облака молекулы H_2 могут сильно заселять верхние вращательные уровни $J=3, 4$ и 5 (см., например, [118, 160]). Поэтому для детального расчета необходимо использовать численное моделиро-

¹ Учет столкновений H_2 с H важен только в процессе релаксации, если плотность газа выше критического значения, которое для $J=2$ составляет $n_{\text{cr}} = 200$ см^{-3} при $T = 100$ К и $n_{\text{cr}} = 80$ см^{-3} при $T = 240$ К. Для уровней $J \geq 3$ критическое значение плотности на порядок выше.

вание, например, с помощью кодов Meudon PDR [11] или CLOUDY [10]. Расчет в рамках однородной модели дает только приближенную оценку.

Следует заметить, что для некоторых систем в нашей Галактике (например, [151]) не удастся согласованно описать населенности высоких и низких вращательных уровней H_2 , что может быть вызвано неучетом других более сложных механизмов заселения уровней H_2 : например, возбуждение молекул H_2 при сжатии и нагреве газа в результате взаимодействия молекулярного облака с турбулентностью и/или ударной волной С-типа, так называемый “С-shocks”, см. работы [164–166].

4.2.2 Анализ диаграммы населенностей вращательных уровней молекул HD

Типичные значения лучевой концентрации молекул HD в диффузных атомарных облаках на 5 – 6 порядков ниже, чем N_{H_2} , поэтому при современном уровне чувствительности телескопов линии молекул HD детектируются, в основном, переходов с уровня $J=0$ и только в нескольких случаях с уровня $J=1$ (см., работы [23, 103] – наша Галактика, [49] – квазары). Относительная населенность уровня $J=1$, главным образом, определяется процессами (i) радиативной накачки (прямым переходом с уровня $J=0$ и каскадным переходом через возбужденные электронные состояния), (ii) столкновениями с H, H_2 и He и (iii) в реакции образования молекул HD (см., например, работу [105]). Если лучевая концентрация HD достаточно высокая ($\log N_{\text{HD}}^{\text{tot}} \geq 15$), молекулы HD экранированы от УФ излучения (см. [23, 49]). Поэтому при типичных условиях в диффузных облаках ($n \sim 10 - 500 \text{ см}^{-3}$ и среднегалактической интенсивности УФ фона), считается, что основным процессом заселения уровня $J=1$ являются столкновения, а обратным процессом – спонтанная релаксация.

$$\frac{N_{\text{HD}}^{J=1}}{N_{\text{HD}}^{J=0}} = \frac{k_{01}^{\text{H}_2} n_{\text{H}_2} + k_{01}^{\text{He}} n_{\text{He}} + k_{01}^{\text{H}} n_{\text{H}}}{A_{10}}, \quad (4.5)$$

где $A_{10} = 5.1 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ – вероятность спонтанного перехода, см. [167], k_{01}^{X} – столкновительные коэффициенты молекул HD с H, H_2 и He (которые также зависят от кинетической температуры, см. [168]). Если кинетическую температуру среды

можно определить из анализа отношения орто-пара водорода, тогда отношение населенностей уровней HD будет функцией только объемной концентрации газа и состава среды.

Измерения относительного содержания гелия (He/H) в межзвездной среде нашей Галактики показывают, что отношение (He/H) слабо меняется с металличностью и оценивается $\sim 8 - 9\%$ [169], что соответствует первичной распространенности He (8.18 ± 0.02) [98]. Также, известно, что при типичных физических условиях в атомарных диффузных облаках экранирование УФ излучения в линиях молекул HD происходит на большей глубине облака, чем экранирование H_2 (см., например, [105]). Поэтому в части облака, где содержатся молекулы HD, водород почти полностью молекуляризован, $f_{\text{H}_2} \approx 1$. Поэтому относительная населенность уровня HD $J=1$ является функцией только объемной концентрацией газа.

4.2.3 Анализ населенностей уровней тонкой структуры атомов нейтрального углерода

Энергетическая структура основного состояния атомов C I состоит из трех уровней: нижнего (основного) $2s^2 2p^2 \ ^3P_0$ (C I) и двух возбужденных $2s^2 2p^2 \ ^3P_1$ (C I*) и $2s^2 2p^2 \ ^3P_2$ (C I**), с энергиями возбуждения равными 23.6 и 62.4 К, соответственно. Вероятности спонтанных переходов равны $A_{10} = 7.932 \times 10^{-8} \text{ c}^{-1}$, $A_{20} = 2.054 \times 10^{-14} \text{ c}^{-1}$ и $A_{21} = 2.654 \times 10^{-7} \text{ c}^{-1}$.

Основными механизмами заселения уровней C I являются (i) столкновения атомов C с H, H_2 и He, (ii) радиативная накачка УФ излучением и (iii) прямое возбуждение атомов C I при поглощении фотонов реликтового излучения (см. [170]). Столкновительные коэффициенты приведены в работах [171] (для H), [172] (для орто- и пара-водорода), [173] (для He). Для среднегалактической интенсивности УФ фона коэффициенты накачки первого и второго возбужденных уровней C I равняются $\Gamma_{01} = 3.5 \times 10^{-10} \text{ c}^{-1}$ и $\Gamma_{02} = 2.8 \times 10^{-10} \text{ c}^{-1}$, соответственно, см. [174]. Скорости заселения уровней C I при поглощении фотонов реликтового излучения

определяются значением коэффициентов Эйнштейна B_{ij} и интенсивностью реликтового излучения (на заданном красном смещении) на длине волны переходов. Как показано в работе [170], вклад УФ накачки в населенности уровней С I пренебрежимо мал, если интенсивность УФ фона не превышает десяти среднегалактических значений. Также малым является вклад накачки реликтовым излучением для систем С I в местной Вселенной ($z = 0$), однако для систем с большими $z > 2$ накачка реликтовым излучением наоборот является основным механизмом заселения уровней С I (если $n \lesssim 50 \text{ см}^{-3}$). Это предоставляет возможность для измерения температуры реликтового излучения на больших z (см., например, [20]). Измерение роста температуры реликтового излучения с красным смещением как $T = T_0 \times (1 + z)$ является еще одним фактом, подтверждающим стандартную космологическую модель.

Как правило, абсорбционные системы С I в спектрах квазаров ассоциированы с абсорбционными системами H_2 . Если анализ населенностей уровней H_2 позволяет определить кинетическую температуру газа, тогда, полагая температуру реликтового излучения равной $T_{\text{CMBR}} = 2.725 \times (1 + z_{\text{abs}})$ и пренебрегая вкладом УФ накачки, можно определить объемную концентрацию газа в зависимости от степени молекуляризации облака. Дополнительно, если в исследуемой системе детектируются линии HD переходов с основного и первого возбужденного уровней, концентрация и степень молекуляризации газа в системе могут быть определены точно, т.к. HD и С I имеют разные столкновительные коэффициенты с H и H_2 .

4.3 Физические условия в абсорбционной системе H_2 в спектре J 2123–0050

Спектроскопический анализ абсорбционной системы H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.059$ в спектре J 2123–0050 приведен в главе 2.3. Также в этом спектре детектируются ассоциированные с абсорбционной системой H_2 линии молекул HD (с уровня J=0) и линии переходов тонкой структуры С I. Населенности уровней H_2 и С I приведены в таб-

лицах 2.5 и 2.6.

На рисунке 4.2 показана диаграмма населенностей уровней H_2 . Абсорбционная система состоит из двух компонент А и В. Красные кружки на рисунке 4.2 соответствуют компоненте А, синие квадратики – компоненте В. В компоненте А лучевая концентрация H_2 высокая, молекулы H_2 экранируют себя в центре облака и заселяют, в основном, нижние вращательные уровни $J=0$ и $J=1$. В компоненте В лучевая концентрация H_2 низкая, среда прозрачная в линиях H_2 , и заселение вращательных уровней H_2 определяется накачкой УФ излучением.

4.3.1 Анализ компоненты А

Кинетическая температура газа

Поскольку среда в компоненте А является оптически-толстой в линиях H_2 , отношение орто- и пара-водорода, равное 2.6 ± 0.1 , определяется, в основном, столкновениями H_2 с H^+ . Согласно выражению (4.2) кинетическую температуры газа в компоненте А равняется $T_{01}^A = 139 \pm 6$ К.

Температура возбуждения верхних уровней H_2 , $T_{35} \simeq 336$ К, значительно выше температуры возбуждения уровней $J=0$ и $J=1$, что указывает на существенный вклад от радиативной накачки. Для корректного определения интенсивности УФ фона с учетом переноса излучения в среде было выполнено моделирование структуры молекулярного облака с помощью кода Meudon PDR. Согласно результатам моделирования, интенсивность УФ фона в компоненте А должна в ~ 12 раз превышать среднегалактическое значение J_{UV}^G . Результаты моделирования подробно рассмотрены ниже в разделе 4.3.4.

Объемная концентрация газа

С помощью анализа относительных населенностей уровней C I в компоненте А мы определили области достоверности для кинетической температуры, объемной концентрации газа и интенсивности УФ фона, см. рисунок 4.3. На левой панели показаны области достоверности для объемной концентрации и интенсивности

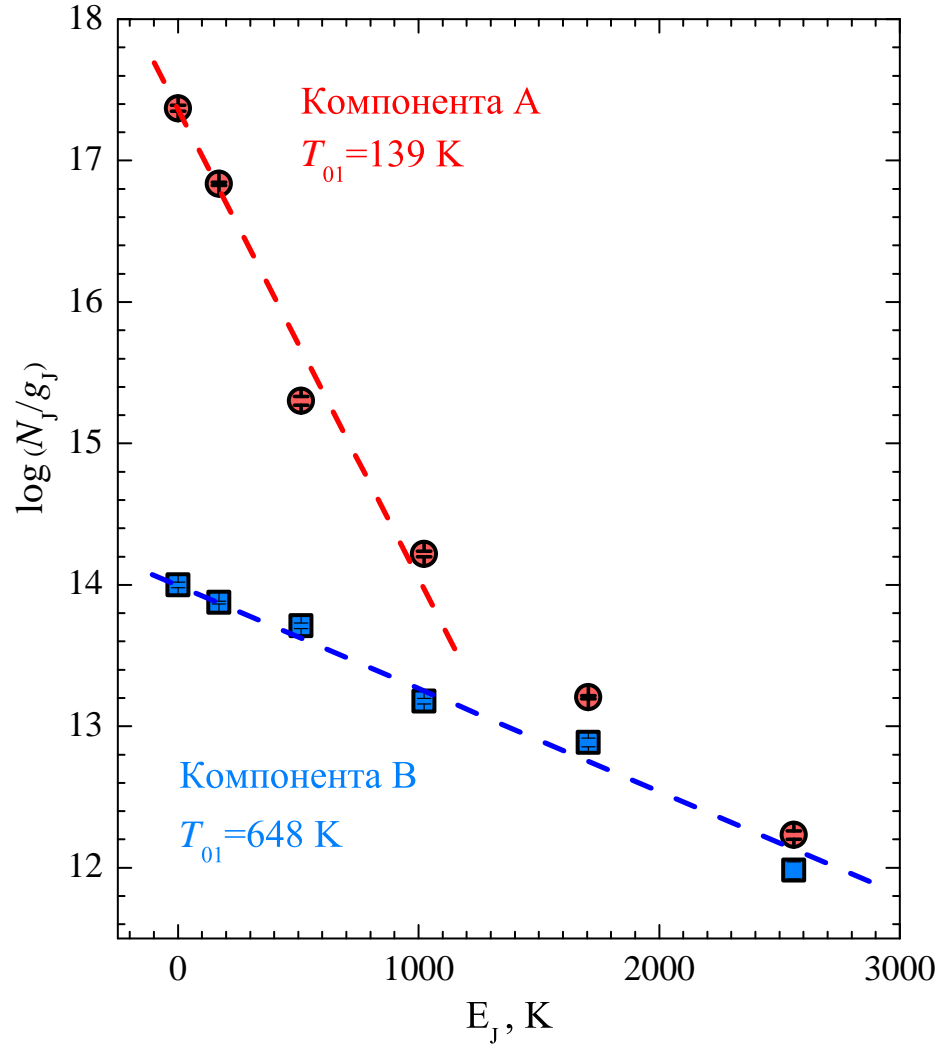


Рис. 4.2: Населенности N_J вращательных уровней H_2 , нормированные на статистический вес g_J , в зависимости от энергии возбуждения уровней E_J для компонент А и В абсорбционной системы H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.059$ в спектре J 2123–0050. Красные кружки соответствуют компоненте А, синие квадратики – компоненте В. Прямые штриховые линии соответствуют температурам возбуждения T_{01} уровней $J=0$ и $J=1$.

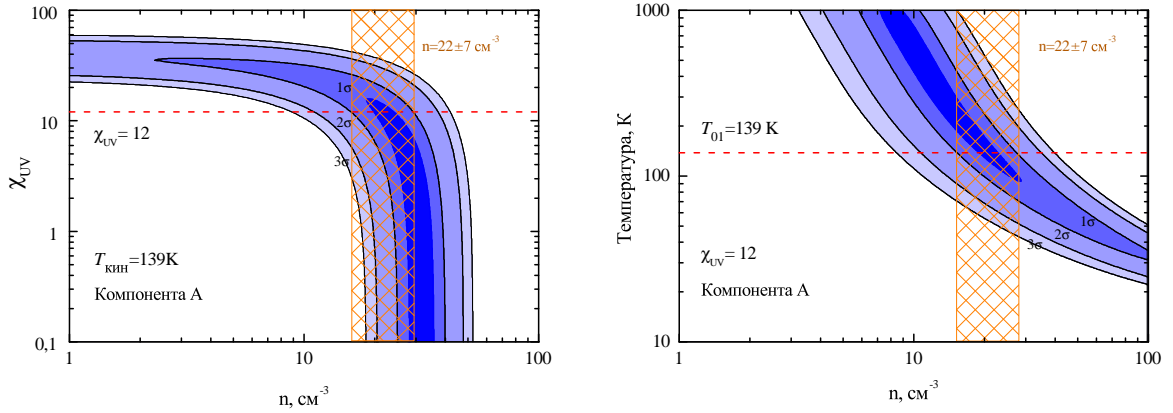


Рис. 4.3: Области достоверности 1, 2 и 3 σ определения физических условий с помощью анализа населенностей уровней тонкой структуры C I для компоненты A. На левой панели показаны области достоверности для интенсивности УФ фона (χ_{UV} , в единицах среднегалактического значения) и объемной концентрации газа. На правой панели показаны области достоверности для температуры и объемной концентрации. Для фиксированных значений интенсивности УФ фона $\chi_{UV} = 12$ и кинетической температуры $T_{01} = 139$ K объемная концентрация газа надежно определяется и равняется $(22 \pm 7) \text{ cm}^{-3}$. Эта область показана оранжевой штриховкой.

УФ фона ($\chi_{UV} = J_{UV}/J_{UV}^G$), кинетическая температура полагалась равной T_{01}^A . На правой панели показаны области достоверности для объемной концентрации и температуры, интенсивность УФ излучения полагалась равной $\chi_{UV} = 12$. В расчете баланса населенностей уровней C I степень молекуляризации газа полагалась равной среднему значению для суб-DLA системы $f_{H_2} = 0.1$, относительная концентрация гелия $n_{He}/n_H = 0.08$, $T_{CMBR} = 2.725 \times (1 + 2.059) \text{ K}$.

Видно, что в каждом отдельном случае (для левой и правой панелей) параметры среды однозначно не определяются. Однако если мы дополнительно зафиксируем еще один параметр: интенсивность УФ фона на левой панели ($\chi_{UV} = 12$) или кинетическую температуру на правой панели ($T_{kin} = 139 \text{ K}$), тогда объемная концентрация газа восстанавливается однозначно и равняется $n^A = (22 \pm 7) \text{ cm}^{-3}$.

Темп образования H_2 на пыли

Считается, что основным механизмом образования H_2 в межзвездной среде является образование молекул H_2 на пыли (см., например, [175]). Используя оценки

объемной концентрации газа ($n^A = 22 \pm 7 \text{ см}^{-3}$) и интенсивности фона УФ излучения ($\chi_{UV} = 12$), мы определили величину коэффициента темпа образования H_2 на пыли в этой системе.

При условии стационарного баланса в облаке количества молекул H_2 , образованных на пыли и разрушенных УФ излучением, равны:

$$R_{\text{H}_2} n_{\text{H}} n = 0.11 \beta n_{\text{H}_2}, \quad (4.6)$$

где R_{H_2} – коэффициент темп образования H_2 на пыли, $n = n_{\text{H}} + 2n_{\text{H}_2}$ – полная концентрация водорода, β – темп фотоабсорбции H_2 , который связан с интенсивностью внешнего УФ фона следующим соотношением: $\beta = 4 \times 10^{-10} \times \chi_{UV} \times S_{\text{shield}}(N_{\text{H}_2}) \text{ с}^{-1}$. Обычно, в межзвездных облаках степень молекуляризации водорода увеличивается к центру, поэтому в качестве нижней оценки $n_{\text{H}_2}/n_{\text{H}}$ в центре облака можно использовать отношение лучевых концентраций $N_{\text{H}_2}^A/N_{\text{H}I} = 0.05$. Тогда для центральной части облака ($\log N_{\text{H}_2} = 17.6$, $S_{\text{shield}} = 1.2 \times 10^{-3}$) получаем:

$$R_{\text{H}_2} = 1.5 \times 10^{-15} \times \frac{n_{\text{H}_2}/n}{(0.05)} \times \frac{\chi_{UV}}{12} \times \left(\frac{n}{22 \text{ см}^{-3}} \right)^{-1} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1} \quad (4.7)$$

Полученное значение оказывается примерно в ~ 40 раз выше, чем среднее значение коэффициента темпа образования H_2 измеренное в диффузных атомарных облаках нашей Галактики, $R_{\text{H}_2}^G = 3 \div 4 \times 10^{-17} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ [44, 151].

Степень ионизации газа

Для невысоких лучевых концентраций H_2 ($\log N_{\text{H}_2} \lesssim 20$) поглощение УФ излучения в линиях H_2 лаймановской и вернеровской полос незначительно меняет число фотонов, способных разрушить HD и ионизовать C I (см., например, [176]), поэтому содержание HD и C I в среде соответствуют равновесным значениям, которые зависят от концентраций e^- и H^+ , т.е. степени ионизации газа.

Молекулы HD образуются в реакции столкновений между H_2 и D^+ , а содержание ионов D^+ в газе с низкой степенью молекуляризации устанавливается согласно химическому равновесию прямой и обратной реакций $\text{H}^+ + \text{D} \rightleftharpoons \text{H} + \text{D}^+$ (см.,

например, [105]). В предположении, что облако однородно, и молекулы HD и H₂ относятся к одной пространственной области, т.е. $N_{\text{HD}}/N_{\text{H}_2} \sim n_{\text{HD}}/n_{\text{H}_2}$, концентрацию ионов H⁺ можно рассчитать по следующей формуле (см., например, [105]):

$$n_{\text{H}^+} = \frac{\beta(\text{HD})N_{\text{HD}}}{k_{\text{H}_2+\text{D}^+}N_{\text{H}_2}(\text{D}/\text{H})\frac{k_1}{k_2}}, \quad (4.8)$$

где с помощью $\beta(\text{HD}) = \chi_{\text{UV}} \times 1.5 \times 10^{-11} \text{ с}^{-1}$ обозначена скорость фоторазрушения HD (где χ_{UV} измеряется по отношению к интенсивности среднегалактического УФ фона из работы [161]), $k_{\text{H}_2+\text{D}^+} = 2 \times 10^{-9} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ – темп образования HD, $\text{D}/\text{H} = 3 \times 10^{-5}$ – распространенность атомарного дейтерия для систем на больших z , $k_1/k_2 = \exp(-41/T)$ – отношение скоростей прямой и обратной реакций столкновений H⁺ и D. Используя в качестве оценки температуры газа значение $T_{01} = 139 \text{ К}$ и интенсивности фона УФ излучения $\chi_{\text{UV}} = 12$, получаем $n_{\text{H}^+} \simeq 0.3 \text{ см}^{-3}$.

Нейтральный углерод в межзвездной среде образуется в реакциях рекомбинации ионов C⁺ с электронами и/или полиароматическими углеводородами (ПАУ) (см., например, [152, 177]). Однако, вклад реакции рекомбинации C⁺ с ПАУ на сегодняшний день не до конца установлен (см. обсуждение и ссылки в [177]). Если не учитывать этот канал реакции, тогда концентрация электронов в газе выражается через скорость фоторазрушения C I, $\beta(\text{C}) = \chi_{\text{UV}} \times 2.1 \times 10^{-10} \text{ с}^{-1}$, коэффициент рекомбинации C⁺ с электронами $\alpha(\text{C}^+) = 1.8 \times 10^{-11} (T/100)^{-0.83} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ (для $20 \text{ К} < T < 140 \text{ К}$, см. [152]) и отношение концентраций C I и C⁺:

$$n_{e^-} = \frac{\beta(\text{C})N_{\text{C I}}}{\alpha(\text{C}^+)N_{\text{C}^+}}, \quad (4.9)$$

Однако, поскольку абсорбционная линия C II 1334.5 Å в спектре J2123–0050 состоит из нескольких перекрывающихся насыщенных компонент, полная лучевая концентрация C⁺ не определяется. С другой стороны, количество C⁺ можно оценить в предположение, что распространенность углерода по отношению к солнечной такая же, как и для серы S. Для значения металличности $[\text{S}/\text{H}] = -0.2$ и $\log N_{\text{H}}^{\text{tot}} = 20.06$ [26] получается $\log N_{\text{C}^+}^{\text{tot}} = 16.25$. Тогда для $\chi_{\text{UV}} = 12$ и $T = 139 \text{ К}$, $\log N_{\text{C I}} = 14.06$, $\log N_{\text{C}^+} = 16.25$ получаем $n_{e^-} \simeq 1.2 \text{ см}^{-3}$. Считая, что степень

молекуляризации газа в компоненте А $f_{\text{H}_2}^{\text{A}} = 0.1$, а концентрация $n^{\text{A}} = 22 \text{ см}^{-3}$, получаем отношение $n_{\text{H}^+}/n_{\text{H}} \sim 1.5 \times 10^{-2}$ и $n_e/n_{\text{H}} \sim 6 \times 10^{-2}$. степень ионизации газа в компоненте А почти на порядок выше типичной степени молекуляризации в диффузных атомарных облаках нашей Галактики с тем же значением концентрации газа ($n_e/n_{\text{H}} \leq 6.6 \times 10^{-3}$, [178]) и почти на 3 порядка выше степени ионизации газа в центре молекулярных облаков, $\sim 10^{-6}$ [179].

4.3.2 Анализ компоненты В

Кинетическая температура газа

В компоненте В среда является оптически-тонкой в линиях H_2 . В этом случае процесс УФ накачки конкурирует со столкновительным возбуждением, и населенность уровня $J=1$ не соответствует равновесному значению (см., например, [11,160]). Как следствие, кинетическая температура может существенно отличаться от значения, измеренного с помощью анализа отношения орто- и пара-водорода, которое для компоненты В равняется $T_{01}^{\text{B}} \simeq 648 \pm 126 \text{ K}$.

Интенсивность УФ излучения

Поскольку интенсивность УФ излучения слабо экранируется в линиях H_2 (для центральной части облака, $N_{\text{H}_2} = 14.9$, фактор экранирования $S_{\text{shield}} \simeq 0.6$), исследуемую систему можно описывать в рамках модели однородного облака. Тогда, согласно выражениям (4.3) и (4.4), темп фотоабсорбции β можно оценить с помощью следующих выражений:

$$\beta_{J=4} = \frac{N_{\text{H}_2}^{J=4} A_{42}}{N_{\text{H}_2}^{J=0} p_{4,0} + N_{\text{H}_2}^{J=2} p_{4,2}}, \quad (4.10)$$

$$\beta_{J=5} = \frac{N_{\text{H}_2}^{J=5} A_{53}}{N_{\text{H}_2}^{J=1} p_{5,1} + N_{\text{H}_2}^{J=3} p_{5,3}}. \quad (4.11)$$

Используя значения $N_{\text{H}_2}^{\text{B}}(J)$ из таблицы 2.5, получаем: $\beta_{J=4} = 1.8 \times 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ и $\beta_{J=5} = 2.1 \times 10^{-9} \text{ с}^{-1}$. С учетом коррекции на фактор экранирования, интенсивность УФ фона в компоненте В в $\chi_{\text{UV}}^{\text{B}} = 8.3$ раз превышает среднегалактическое значение.

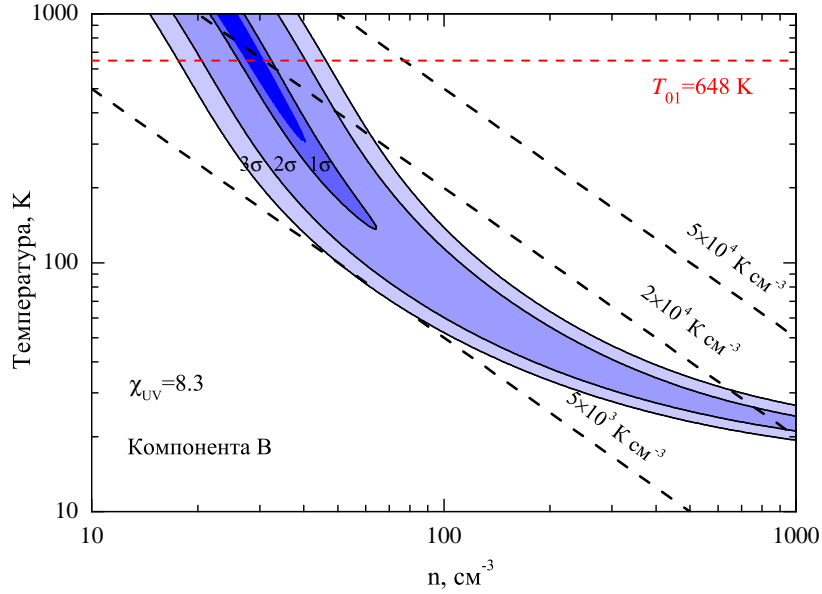


Рис. 4.4: Области достоверности 1, 2 и 3 σ определения объемной концентрации и кинетической температуры газа с помощью анализа населенностей уровней тонкой структуры C I для компоненты В. Интенсивность УФ фона полагалась в 8.3 раз выше среднегалактического значения. Штриховой красной горизонтальной линией показано значение температуры газа, соответствующее отношению орто- и пара-водорода в компоненте В. Черными штриховыми линиями показаны уровни постоянного давления.

Объемная концентрация газа

На рисунке 4.4 показаны области достоверности объемной концентрации и кинетической температуры газа в компоненте В, рассчитанные с помощью анализа населенностей уровней тонкой структуры C I. Интенсивность УФ фона полагалась равной $\chi_{UV}^B = 8.3$. Объемная концентрация и температура однозначно не определяются. Населенности уровней C I хорошо описываются как моделью с $n \sim 20 \text{ cm}^{-3}$ и высокой температурой $T \sim 1000 \text{ K}$, так и моделью с $n \sim 100 \text{ cm}^{-3}$ и низкой температурой $T \sim 100 \text{ K}$. Мы определили диапазон допустимых значений давления газа $\log(P/k_B) = 4.2 \pm 0.3 \text{ K cm}^{-3}$. Это значение выше среднего значения для облаков межзвездной среды в нашей Галактике, $\log(P/k_B) = 3.58 \pm 0.18 \text{ K cm}^{-3}$ [22], и согласуется с оценками для абсорбционных системах C I с большими красными смещениями, $\log(P/k_B) = 3 \div 5 \text{ K cm}^{-3}$ [9].

4.3.3 Дополнительная компонента в линиях C I.

Анализ линий C I в спектре J 2123–0050 приведен в главе 2. В линиях C I детектируется три компонента, две из которых ассоциированы с компонентами A и B абсорбционной системы H₂. Дополнительная компонента (C) имеет лучевую концентрацию $\log N_{\text{C I}}^{\text{C}} = 12.78 \pm 0.03$ и существенно большее значение доплеровского параметра b (см. таблицу, 2.6). Присутствие этой компоненты можно объяснить с помощью нейтрального углерода, ассоциированного с ионизованной частью суб-DLA системы.

Как показано в [26] до 90 % вещества исследуемой суб-DLA системы находится в ионизованном состоянии. Предполагая, что ионы C⁺ распределены равномерно по объему, большая часть лучевой концентрации C⁺ относится к ионизованному газу, где концентрация электронов ($n_e \sim n_{\text{H}^+}$) на три порядка выше, чем в нейтральной среде ($n_e \sim 10^{-3}n_{\text{H}}$, см., например, [178]). За счет рекомбинации ионов C⁺ с электронами, количество C I в ионизованной части системы может достигать наблюдаемого значения в компоненте C, $\log N_{\text{C I}} \sim 13$. Согласно условию химического равновесия:

$$N_{\text{C I}} = N_{\text{C}^+} \frac{n_e \alpha(\text{C}^+)}{\beta(\text{C})}, \quad (4.12)$$

где $\alpha(\text{C}^+)$ – коэффициент рекомбинации ($\sim 10^{-12} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ для $T \simeq 3 \times 10^3 \text{ К}$, [180]), $\beta(\text{C}) = \chi_{\text{UV}} \times 2.1 \times 10^{-10} \text{ с}^{-1}$ – скорость фотоионизации C I (см., например, [105]). Долю ионов C⁺, связанную с ионизованной частью суб-DLA системы, можно оценить как: $N_{\text{C}^+}^{\text{tot}} \times N_{\text{H}^+} / N_{\text{H}}^{\text{tot}} = 10^{16.2}$. Тогда лучевая концентрация нейтрального углерода составляет:

$$N_{\text{C I}} = 0.8 \times 10^{13} \times \frac{n_e}{1 \text{ см}^{-3}} \times \frac{10}{\chi_{\text{UV}}} \text{ см}^{-2}, \quad (4.13)$$

что соответствует измеренному значению $\log N_{\text{C I}}^{\text{C}} = 12.78$.

4.3.4 Моделирование структуры облака с помощью кода Meudon PDR

Известно, что в диффузных атомарных облаках присутствуют неоднородности физических условий, концентраций элементов в различной степени ионизации и молекул на разных вращательных уровнях (см., например, [23, 118, 181] и ссылки в них). Поэтому оценки физических условий, полученные с использованием однородной модели облака, часто являются приближенными. Для детального анализа физических условий в диффузных атомарных облаках необходимо выполнять численное моделирование.

На сегодняшний день существует несколько кодов, рассчитывающих физическую и химическую структуру фотодиссоционных областей межзвездной среды (Photon Dominated Region, PDR), которые по-разному учитывают те или иные процессы в зависимости от поставленной задачи исследования. Сравнение основных кодов для расчета PDR области представлено в [182]. Код Meudon PDR лучше, чем другие коды, рассчитывает химию молекул H_2 и HD. В этом коде используется стационарная плоско-параллельная модель облака, которое облучается УФ излучением (фоновым галактическим или излучением звезды) с одной или двух сторон. Учитывается экранирование УФ излучения в абсорбционных линиях и экранирование на пыли, согласованно решаются уравнения теплового, ионизационного и химического баланса в среде (итерационным методом). Для спектра фонового УФ излучения мы использовали модель, предложенную в [183]. Спектр излучения покрывает диапазон длин волн 912–8000 Å². Интенсивность УФ фона по отношению к среднегалактическому значению J_{UV}^{G} [161] задавалась параметром χ_{UV} . Также в коде учитывается облучение среды реликтовым излучением и фоном космических лучей (КЛ). Температура реликтового излучения полагалась равной $2.725 \times (1 + z_{\text{abs}}) = 8.34$ К. Интенсивность фона КЛ по отношению к среднегалактическому значению $2 \times 10^{-16} \text{ c}^{-1}$ (см., например, [184]) задавалась параметром

²Считается, что в фотодиссоционной области излучение с длиной волны ниже 912 Å экранировано слоем атомарного водорода, и поэтому не учитывается.

ζ_{CR} . Важно отметить, что в коде MeudonPDR ионизация газа происходит только в результате воздействия КЛ. Поэтому ζ_{CR} является ключевым параметром, определяющим степень ионизации, а следовательно, темп образования молекул HD и атомов C I.

Значения распространенностей элементов в облаке (He, C, N, S, Si, Fe и др.) задавались в соответствие со средней металличностью газа в суб-DLA системе, $[X/H] = -0.2$ [26]. Среди этих элементов особую роль в расчете теплового баланса играет углерод, поскольку излучение ионов C^+ в линии $\lambda = 158 \text{ мкм}$ – это один из основных процессов охлаждения газа в межзвездной среде [149]. Однако из-за того, что абсорбционная линия C II сильно насыщена, невозможно определить какая часть полной лучевой концентрации C^+ относится к исследуемым молекулярным облакам. Поэтому мы варьировали распространенность углерода в облаке в диапазоне значений, соответствующих значению полной лучевой концентрации углерода в облаке в диапазоне от $\log N_{\text{C}}^{\text{tot}} = 14.5$ (10^{-2} от солнечной распространенности) до $\log N_{\text{C}}^{\text{tot}} = 16.25$ (4.4 от солнечной, что соответствует полной лучевой концентрации C^+ в суб-DLA системе). При этом распространенности других элементов не изменялись. Распространенность углерода по отношению к солнечной $(\text{C}/\text{H})_{\odot} = 2.7 \times 10^{-4}$ (см. [96]) задавалась параметром X_{C} . Распространенность дейтерия полагалась равной $(\text{D}/\text{H}) = 3 \times 10^{-5}$, что соответствует значению характерной распространенности D на больших красных смещениях в молекулярных облаках (см., например, [21]).

Пыль является одним из важнейших компонентов межзвездной среды, ее свойства влияют на скорость нагрева среды (за счет фото-электрической реакции на пыли), на экранирование газа от УФ излучения и на темп образования H_2 . Для распределения пылинок по размеру использовалась модель, представленная в работе [185]. Поглощение УФ излучения на пыли описывалось с помощью модели экстинкции для Малого Магелланово облака, $R_V = 2.87$ (считается, что эта модель хорошо описывает покраснение спектров квазаров, см., например, [46]). Ко-

личество пыли на луче зрения определяется через параметр межзвездного поглощения $A_V = R_V E(B - V)$, который задавался равным 0.115 зв. вел., что соответствует верхнему пределу на покраснение спектра J 2123–0050 [176]. Объемная концентрация пыли в облаке определяется через отношения масс пыли и газа G . Мы использовали три значения: $G = 0.01, 0.02$ и 0.1 , что соответствует 1, 2 и 10 среднегалактическим значениям (см., например, [186]). Образование H_2 в коде Meudon PDR рассчитывается с помощью двух механизмов: Лэнгмюр-Хинншелвуд и Элей-Ридел (Langmuir-Hinshelwood и Eley-Rideal), см. [175]. Однако, как указано в работе [175], на сегодняшний день детальное описание процесса образования H_2 остается недостаточно понятным, поэтому мы использовали два подхода: (i) “численный расчет” – согласно моделям Лэнгмюр-Хинншелвуд и Элей-Ридел и (ii) “приближенный расчет”, когда темп образования H_2 задавался значением R_0 , постоянным по объему облака: $R_{H_2} = R_0 \times 3 \times 10^{-17} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$ (темп образования по отношению к среднегалактическому значению, [44]). Последний подход позволяет качественно, не вдаваясь в конкретные свойства пылинок (распределение по размерам, коэффициент отражения, коэффициент прилипания, плотность и др.), учесть возможность отличия свойств пыли в облаке с большим красным смещением от свойств пыли в нашей Галактике.

4.3.5 Моделирование облака J 2123–0050 A

DLA системы имеют значительно большие размеры, чем молекулярные облака, поэтому на луче зрения DLA система занимает большую область, чем система H_2 (при этом H_2 облако находится внутри DLA системы). Следовательно, измеряя полные лучевые концентрации $H\text{ I}$ и H_2 , нельзя надежно определить какая доля всей лучевой концентрации $H\text{ I}$ относится к облаку H_2 . Поскольку суб-DLA система имеет высокую лучевую концентрацию H_2 при наименьшей среди суб-DLA и DLA систем, содержащих H_2 , лучевой концентрации $H\text{ I}$ (см. рисунок 4.1), в моделировании мы считали, что весь наблюдаемый $H\text{ I}$ в суб-DLA системе относится к облаку H_2 . Поэтому полная лучевая концентрация водорода ($N_{H\text{ I}} + 2N_{H_2}$) пола-

Таблица 4.1: Результаты моделирования абсорбционной системы J 2123–0050 A. χ_{UV} и ζ_{CR} и R_0 – величины интенсивности УФ фона и фона КЛ и темп образования H_2 по отношению к их среднегалактическим значениям. X_C – распространенность углерода по отношению к солнечной, n и T – концентрация и температура в центре облака. * – указан диапазон изменения коэффициента темпа образования в единицах $3 \times 10^{-17} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, который рассчитывался численно согласно моделям Лэнгмюр-Хинншелвуд и Элей-Ридел, см. [175].

| No. | χ_{UV} | ζ_{CR} | X_C | R_0 | $n, \text{ см}^{-3}$ | $T, \text{ К}$ | N_{H^+}/N_H |
|-----|-------------|-----------------|-------|----------|----------------------|----------------|----------------------|
| a | 0.4 | 1 | 0.02 | 1.7-3.0* | 73 | 115 | 4.7×10^{-4} |
| b | 1.2 | 1 | 0.2 | 1.7-2.2* | 47 | 180 | 6.0×10^{-3} |
| c | 5 | 1 | 1.8 | 1.7-1.9* | 165 | 51 | 1.5×10^{-4} |
| d | 12 | 5 | 3.7 | 0.5-0.9* | 180 | 47 | 1.7×10^{-4} |
| e | 12 | 5×10^2 | 3.0 | 10 | 124 | 68 | 4.7×10^{-3} |
| f | 12 | 5×10^2 | 2.8 | 38 | 40 | 145 | 1.1×10^{-2} |

| No. | $\log N_{H_2}$ | $\log N_{C I}$ | $\log N_{HD}$ | $N_{H_2}^{J=1}/N_{H_2}^{J=0}$ | $\log N_{H_2}^{J=4}$ | $\log N_{H_2}^{J=5}$ | $N_{C I^*}/N_{C I}$ |
|-----|----------------|----------------|---------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| a | 18.8 | 11.4 | 14.2 | 2.0 | 13.0 | 12.5 | 0.4 |
| b | 18.0 | 11.7 | 13.5 | 3.1 | 13.0 | 12.6 | 0.4 |
| c | 17.7 | 13.7 | 12.8 | 0.4 | 13.7 | 13.1 | 0.7 |
| d | 14.6 | 14.0 | 10.6 | 1.1 | 13.1 | 12.9 | 0.7 |
| e | 17.8 | 14.3 | 13.9 | 0.7 | 14.1 | 13.7 | 0.7 |
| f | 17.9 | 14.0 | 14.0 | 2.6 | 14.1 | 13.8 | 0.4 |

галась равной $\log N = 19.22$.

Мы использовали две термодинамические модели облака: (I) с постоянным давлением и (II) с постоянной плотностью водорода. Давление полагалось равным $(8.4 \times 10^3) \text{ см}^{-3} \text{ К}$, что соответствует верхнему ограничению, определенному из анализа населенностей уровней C I. Концентрация водорода полагалась равной 40 см^{-3} , что примерно соответствует условиям в облаке. Вторая модель описывает ситуацию, когда H_2 образуется в области сжатия, сформировавшейся, например, в результате взаимодействия газа с фронтом ударной волны.

Для каждой модели были выполнены расчеты для значений сетки параметров χ_{UV} , ζ_{CR} , R_0 , X_C и G . Наилучшее описание дает модель с постоянной плотностью для набора параметров: $\chi_{UV} = 12$, $\zeta_{CR} = 5 \times 10^2$, $R_0 = 38$, $X_C = 2.8$ и $G = 0.01$ (модель (f) в таблице 4.1). Модель одновременно воспроизводит наблюдаемые лучевые концентрации элементов и населенностей уровней H_2 и C I. В таблице 4.1

и на рисунке 4.5 приведено сравнение результатов моделирования для шести наиболее характерных случаев: (a–e) соответствуют изобарическим моделям, (f) – модели с постоянной плотностью.

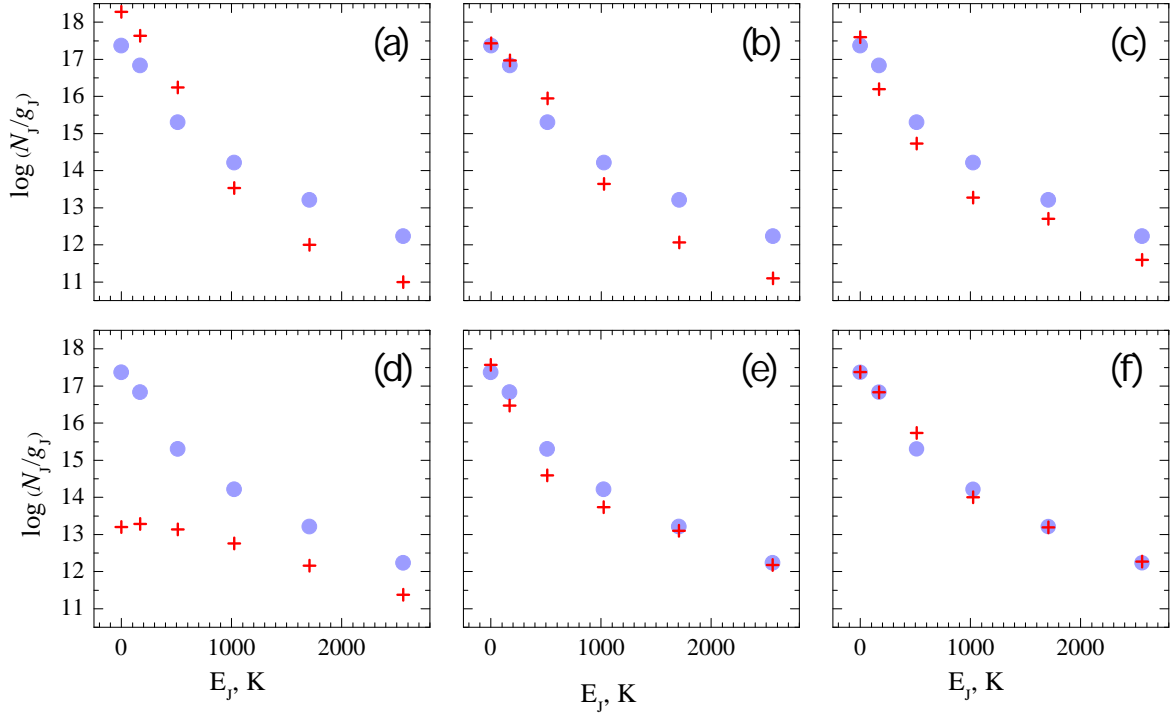


Рис. 4.5: Сравнение измеренных населенностей уровней H_2 для компоненты А (серые кружки) с результатами моделирования с помощью кода Meudon PDR (крестики) для шести моделей (a)–(f), параметры которых приведены в таблице 4.1.

Основные несоответствия изобарических моделей

С помощью изобарической модели можно получить лучевые концентрации H_2 , HD и C I близкими к наблюдаемым (модели (c) и (e)), но не удастся достаточно хорошо описать диаграммы населенности уровней H_2 и C I.

Модели (a и b) соответствуют случаю, когда среда облучается УФ фоном с невысокой интенсивностью $\chi_{\text{UV}} = 0.4$ и 1.2 . В этих моделях населенности уровней H_2 с $J \geq 3$ оказываются более чем на порядок ниже наблюдаемых значений, несмотря на то, что полная лучевая концентрация H_2 близка или даже выше, чем измеренное значение. Дополнительное заселение уровней можно обеспечить

за счет увеличения радиативной накачки УФ излучением. Заметим, что в этих моделях удастся описать лучевую концентрацию молекул HD, однако лучевая концентрация C I оказывается более чем на два порядка ниже.

Модель (с) описывает облако, которое облучается УФ фоном с интенсивностью в 5 раз выше средней галактической. За счет высокого УФ увеличивается темп нагрев газа, который в этой модели компенсируется повышенным содержанием углерода ($X_C = 1.9$) – основного охладителя среды. Модель позволяет получить лучевые концентрации H_2 и C I близкие к наблюдаемым. Однако полученные значения лучевой концентрации HD и населенности уровней H_2 и C I не согласуются с измеренными значениями. Населенности уровней $J = 4$ и $J = 5$ оказываются в три раза выше, чем в моделях (а) и (b), но в 2-3 раза ниже наблюдаемых значений.

В модели (d) интенсивность излучения еще выше: $\chi_{UV} \simeq 12$. Чтобы компенсировать нагрев облака, распространенность углерода бралась максимально высокой $X_C = 3.7$ (что соответствует случаю, когда вся лучевая концентрация C^+ в суб-DLA системе относится к молекулярному облаку). Концентрация газа и температура оказываются таким же как в модели (с). Однако молекул H_2 в модели (d) образуется $\log N_{H_2} \sim 15$, что на два порядка ниже, чем наблюдаемое значение. Во-первых, лучевая концентрация H_2 недостаточно высокая для экранирования молекул H_2 от УФ излучения, во-вторых, при той же скорости образования H_2 , как в модели (с), скорость фоторазрушения оказывается выше (см. выражение 4.6).

В моделях (а-d) образование молекул H_2 рассчитывалось численно с помощью модели, представленной в [175]. Отношение масс пыли и газа в среде полагалось $G = 0.01$. При увеличении G пропорционально возрастает коэффициент темпа образования H_2 и эффективность нагрева газа УФ излучением. Несмотря на то, что темп образования H_2 становится выше, концентрация газа уменьшается (из-за роста температуры при постоянном давлении). Поэтому, согласно выражению (4.6), увеличение содержания пыли в облаке не позволяет решить проблему образования большого количества H_2 в среде с высоким УФ фоном. В расчетах с помощью изо-

барической модели с высоким УФ фоном, высоким содержанием углерода (как в модели (d)), и $G = 0.02$ и 0.1 газ оказывается горячим $T > 1000$ К и разреженным $n \lesssim 1 \text{ см}^{-3}$. Молекулы H_2 в такой среде практически не образуются.

Если использовать “приближенный расчет” образования H_2 (этому случаю соответствует модель (e)), тогда при $R_0 \simeq 10$, $\chi_{\text{UV}} = 12$, $X_{\text{C}} = 3$ удается одновременно воспроизвести полную лучевую концентрацию H_2 и населенности верхних уровней (см. таблицу 4.1). Однако в этой модели не удастся восстановить наблюдаемые физические условия: газ оказывается более плотным ($n \geq 100 \text{ см}^{-3}$) и холодным ($T \leq 60 \text{ K}$). Отношения населенностей первых двух вращательных уровней H_2 и уровней тонкой структуры C I не согласуются с измеряемыми значениями: концентрация H_2 на уровне $J=1$ оказывается в 4 раза ниже, а отношение населенностей уровней C I^* и C I в два раза выше, чем измеряется в компоненте А.

Содержание молекул HD и степень ионизации газа

Для моделей (a-d) отношение $\text{HD}/2\text{H}_2$ не превышает значения 10^{-5} , что почти на порядок ниже наблюдаемого. Поскольку молекулы HD образуются в ионно-молекулярной реакции ($\text{H}_2 + \text{D}^+$), скорость образования HD увеличивается с ростом концентрации H^+ , которая в PDR моделях, в основном, определяется интенсивностью фона КЛ. Для значения $\zeta_{\text{CR}} = 1$ в моделях Meudon PDR степень ионизации газа оказывается низкой $n_{\text{H}^+}/n_{\text{H}} \simeq 10^{-4}$, что недостаточно для образования HD в среде с высокой интенсивностью УФ фона. Отношение $\text{HD}/2\text{H}_2$ согласуется с измеренным значением при относительной концентрации H^+ , $n_{\text{H}^+}/n_{\text{H}} \simeq 10^{-2}$, что соответствует $\zeta_{\text{CR}} = 5 \times 10^2$, т.е. необходим в 500 раз более интенсивный поток КЛ, чем в нашей Галактике. Вероятно, высокое значение ζ_{CR} не является оценкой интенсивности фона КЛ в облаке, а только указывает на высокую степень ионизации газа. Возможные причины обсуждаются ниже в разделе 4.3.7.

Модель с постоянной плотностью

В модели с постоянной плотностью (модель f) удается одновременно описать лучевые концентрации H_2 , HD, C I и населенности уровней H_2 и C I . При этом, так-

же как для изобарических моделей, необходимы высокие значения интенсивностей УФ фона, фона КЛ и высокая распространенность углерода.

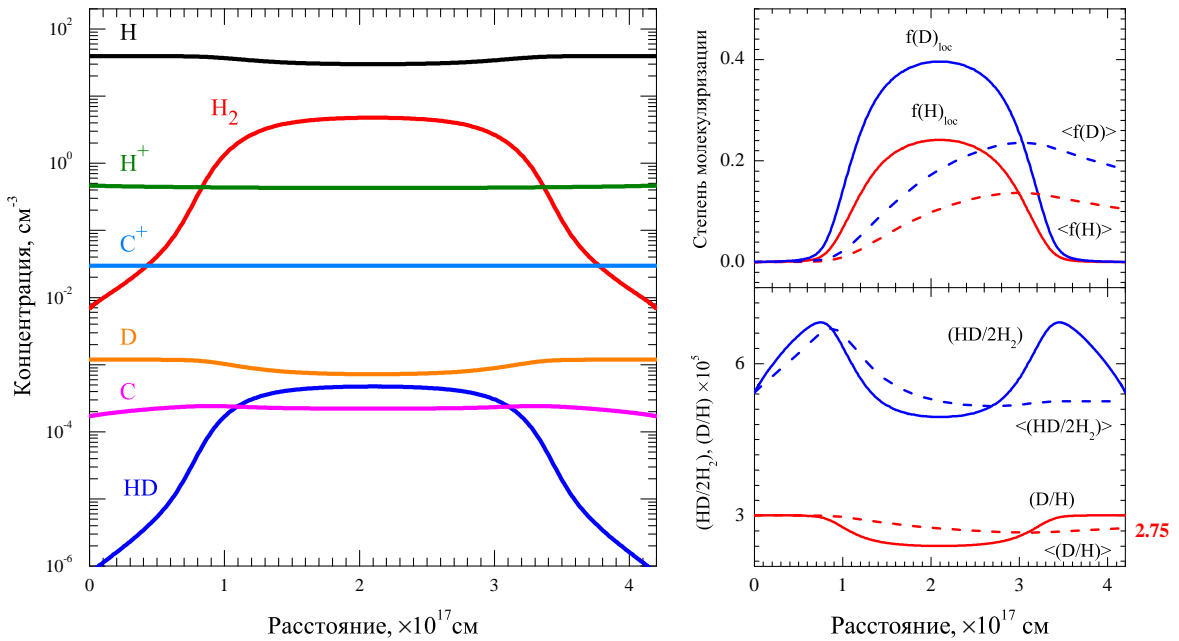


Рис. 4.6: Структура молекулярного облака, полученного в моделировании с помощью кода Meudon PDR (модель (f), см. табл. 4.1). На левой панели показаны профили объемных концентраций элементов в облаке. На правых панелях сплошной и пунктирной линиями показаны зависимости абсолютного и среднего значений степени молекуляризации H и D (верхняя панель), и отношений $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$ и $N_{\text{D}}/N_{\text{H}}$ (нижняя панель). Усреднение выполнено от одной из границ облака.

Детальный анализ модели (f) представлен на рисунке 4.6. На левой панели показаны концентрации элементов в зависимости от расстояния от границы облака. Концентрации H, H⁺, C⁺ C I почти не меняются вдоль луча зрения (что связано с постоянством плотности и невысокой степенью молекуляризации газа). На правых панелях показаны степени молекуляризации D и H (верхняя панель: локальные значения – сплошными линиями; а значения, усредненные вдоль луча зрения – пунктирными линиями) и отношения (HD/2H₂) и (D/H) (нижняя панель). Из-за относительно высокой степени ионизации газа $\sim 10^{-2}$ скорость образования HD в облаке выше скорости образования H₂. В результате, локальная степень молекуляризации D оказывается в 2 раза выше, чем степень молекуля-

ризации H, а отношение $(\text{HD}/2\text{H}_2)$ выше отношения (D/H) . Следует отметить, что распространенность (D/H) , определяемая по отношению лучевых концентраций атомарных DI и HI (2.75×10^{-5}), оказывается меньше отношения изотопов $(\text{D}/\text{H}) = 3.0 \times 10^{-5}$. Знак и величина эффекта зависят от средней степени молекуляризации газа вдоль луча зрения и концентрации ионов H^+ . Для $f_{\text{H}} = 0.1$ отношение $N_{\text{DI}}/N_{\text{HI}}$ может изменяться в пределах 10% от изотопического отношения. Эффект необходимо принимать во внимание, если на луч зрения проходящий через абсорбционную систему HI попадает молекулярное облако с тем же красным смещением. Очевидно, что в таком случае, корректной оценкой (D/H) является отношение $(N_{\text{DI}} + N_{\text{HD}})/(N_{\text{HI}} + 2N_{\text{H}_2})$.

4.3.6 Моделирование облака J 2123–0050 B

Для компоненты B (так же как для компоненты A) нельзя определить, какая часть измеренной лучевой концентрации HI относится к молекулярному облаку. Поэтому это значение N_{HI}^{B} было дополнительным свободным параметром и определялось по результатам моделирования. Верхним пределом N_{HI}^{B} было выбрано значение лучевой концентрации HI в суб-DLA системе $\log N_{\text{HI}} = 19.18 \pm 0.15$. Результаты моделирования представлены в таблице 4.2. Модель (g) соответствует расчету с постоянным давлением газа ($8.4 \times 10^3 \text{ см}^{-3} \text{ K}$), модели (h) и (i) – с постоянной концентрацией (40 см^{-3}). На рисунке 4.7 показаны диаграммы населенности уровней H_2 для этих моделей. Также как в случае моделирования компоненты A, чтобы описать населенности верхних вращательных уровней H_2 необходимо высокое значение интенсивности УФ фона ($\chi_{\text{UV}} \sim 12$). В модели (g) фон УФ низкий, и заселение уровней H_2 происходит, в основном, за счет столкновительного механизма. Населенности нижних уровней H_2 оказываются в 3 – 5 раз выше, чем наблюдаемые, в то время как населенности верхних уровней $J = 4$ и $J = 5$ оказываются на порядок ниже. Если фон УФ высокий, модели (h) и (i) хорошо описывают диаграмму населенности уровней H_2 для компоненты B.

При высоком УФ фоне и невысокой концентрации газа для эффективного об-

Таблица 4.2: Результаты моделирования абсорбционной системы J 2123–0050 В. Обозначения те же, что в табл. 4.1. * – указан диапазон изменения коэффициента темпа образования R_0 , который рассчитывался численно согласно модели Ле Бурло и др. (2012).

| No. | χ_{UV} | ζ_{CR} | R_0 | X_C | $\log N_H^{tot}$ | $\log N_{H_2}$ | $\log N_{CI}$ | $\log N_{H_2}^{J=4}$ | $\log N_{H_2}^{J=5}$ |
|-----|-------------|-------------------|----------|-------|------------------|----------------|---------------|----------------------|----------------------|
| g | 1.5 | 1 | 5.2-8.9* | 0.02 | 19.2 | 15.7 | 9.8 | 12.7 | 12.3 |
| h | 12 | 1 | 43 | 2.8 | 18.7 | 15.2 | 12.0 | 13.6 | 13.4 |
| i | 12 | 1.5×10^2 | 43 | 2.8 | 18.7 | 15.2 | 12.9 | 13.6 | 13.4 |

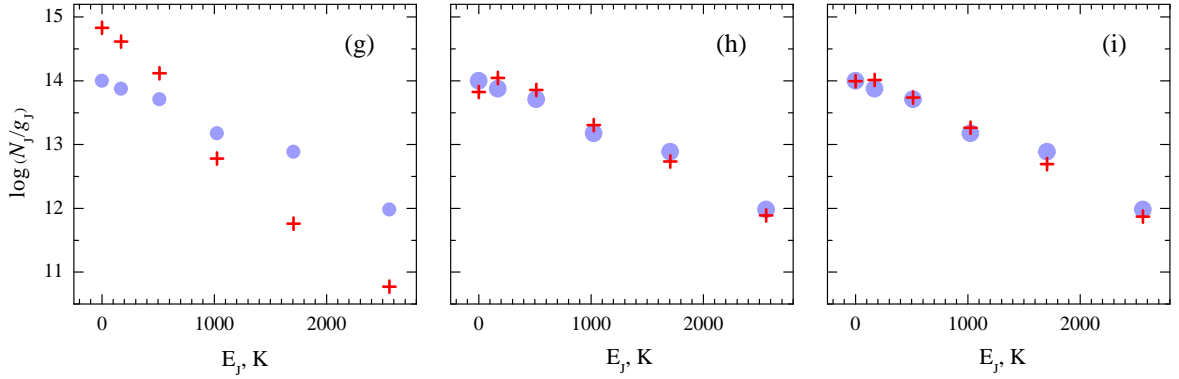


Рис. 4.7: Сравнение населенностей уровней H_2 для компоненты В (серые кружки) и результатов моделирования с помощью кода Meudon PDR для трех моделей (g)–(i). Параметры моделей приведены в табл. 4.2.

разования H_2 необходимо высокое значение коэффициента темпа образования H_2 на пыли. В модели (g) образование H_2 рассчитывалось численно (см. [175]), в моделях (h) и (i) использован “приближенный расчет”. Для $R_0 = 43$ лучевая концентрация H_2 в моделях (h) и (i) близка к наблюдаемой. Степень ионизации газа в компоненте В можно оценить с помощью относительного содержания С I. Наблюдаемое значение лучевой концентрации С I в модели (i) восстанавливается при $n_e/n_H = (0.9-1) \times 10^{-2}$, что соответствует интенсивности фона КЛ в $\zeta_{CR} = 1.5 \times 10^2$ раз выше среднегалактического значения.

4.3.7 Моделирование ионизационной структуры суб-DLA системы с помощью кода CLOUDY

Высокое значение ζ_{CR} , равное 5×10^2 для компоненты А и 1.5×10^2 для компоненты В, полученные при моделировании с помощью кода Meudon PDR, представляется маловероятным, и, по-видимому, указывает только на высокую степень ионизации газа, которая, в действительности, может быть вызвана другими источниками, например, жестким УФ или рентгеновским излучением, которые нельзя учесть в моделировании с помощью кода Meudon PDR. Эти процессы можно учесть в моделировании с помощью кода CLOUDY. Мы выполнили моделирование структуры суб-DLA системы и проверили, может ли внешнее УФ излучение (которое из-за невысокой лучевой концентрации HI не полностью экранируется в системе) создать высокую степень ионизации газа ($\sim 10^{-2}$) в центре системы, где может находиться молекулярное облако.

Расчет выполнен в рамках изобарической модели с плоско-параллельной геометрией. Облучение газа происходит только с одной стороны системы. Спектр излучения состоит из нескольких компонент: (i) внегалактический фон (модель NM96, [187]), (ii) средний Галактический фон (модель ISM) с интенсивностью в 12 раз выше значения $J_{\text{UV}}^{\text{G}} \simeq 3.2 \times 10^{-20} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^2 \text{ Гц}^{-1} \text{ рад}^{-1}$ [161], (iii) фон реликтового излучения на $z = 2$. Интенсивность фона КЛ равнялась среднегалактическому значению $2 \times 10^{-16} \text{ с}^{-1}$ (см., например, [104]). Распространенности тяжелых элементов соответствовали значению металличности для суб-DLA системы, $[\text{S}/\text{H}] = -0.2$. Мы обнаружили, что для образования наблюдаемого содержания H_2 в суб-DLA системе, темп образования H_2 должен быть почти на 2 порядка выше среднегалактического, $2.3 \times 10^{-15} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ (что согласуется с результатами моделирования с помощью кода Meudon PDR). Поскольку полная лучевая концентрация водорода $N_{\text{H}^+} + N_{\text{HI}} + 2N_{\text{H}_2}$ в суб-DLA системе не определяется (т.к. H^+ , которого до 90%, не детектируется), расчет выполнялся до тех пор, пока полная лучевая концентрация нейтрального водорода $N_{\text{HI}} + 2N_{\text{H}_2}$ не достигнет значения $10^{18.9}$ (по-

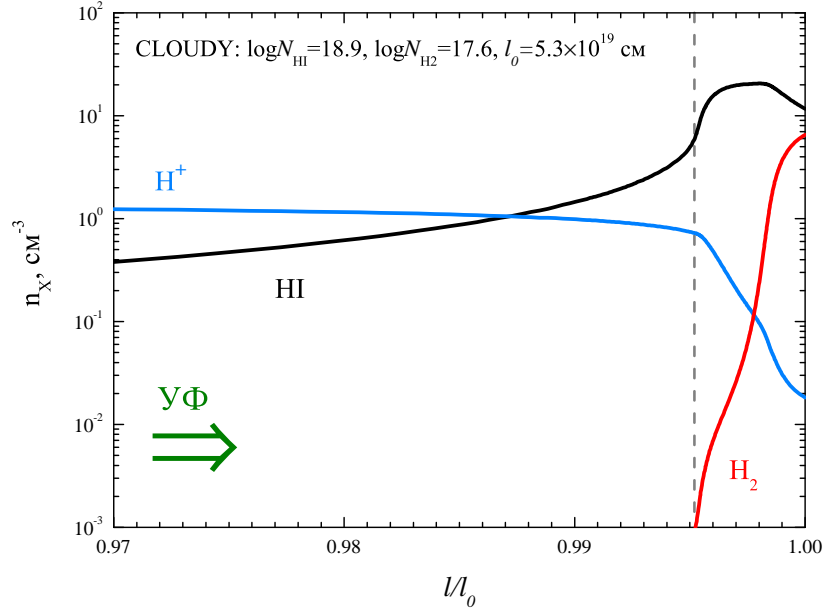


Рис. 4.8: Результат моделирования структуры суб-DLA системы с помощью кода CLOUDY. Показаны зависимости концентраций H^+ , HI и H_2 от расстояния от границы. Расчет выполнен в плоско-параллельной модели. Среда облучается УФ излучением только с левой стороны. Вертикальной линией показана условная граница областей горячей ионизованной и холодной нейтральной сред.

ловины от $N_{\text{HI}}^{\text{tot}}$ в исследуемой суб-DLA). Результат моделирования показан на рисунке 4.8. Профили объемных концентраций H^+ , HI и H_2 показаны в зависимости от расстояния до центра системы. Полная лучевая концентрация H^+ равняется $\log N_{\text{H}^+} = 19.9$, что в 10 раз выше, чем лучевая концентрация HI , т.е. нейтральный газ образуется только в узкой области вблизи центра системы, а большая часть системы ($\simeq 90\%$) ионизована. Концентрация ионов H^+ быстро уменьшается с расстоянием от границы нейтральной холодной и горячей ионизованных фаз (см. рисунок 4.8), и меняется от значения 2.0 cm^{-2} на границе до $2 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-2}$ в центре системы. Ионизации среды происходит посредством облучения УФ фоном, вклад КЛ пренебрежимо мал (профили H^+ , HI и H_2 практически не меняются, если фон КЛ не учитывать). Таким образом, несмотря на то, что концентрация ионов быстро уменьшается с глубиной нейтрального облака, из-за малости размера облака степень ионизации среды остается достаточно высокой. Среднее значение

$n_{\text{H}^+}/n_{\text{H}} \sim 10^{-2}$, что согласуется со значениями, определенными в моделировании Meudon PDR для компонент А и В. Таким образом, высокая степень ионизации газа, найденная в моделировании с помощью кода Meudon PDR, может быть вызвана неполным экранированием жесткого УФ излучения нейтральным водородом в суб-DLA системе.

4.4 Заключение

В этой главе диссертации выполнен анализ физических условий в абсорбционной системе H_2 , ассоциированной с суб-DLA системой с $z_{\text{abs}} = 2.059$ в спектре J 2123–0050. Показано, что абсорбционная система H_2 состоит из двух компонент А и В, которые имеют сильно отличающиеся оптические толщины в линиях H_2 . Для компоненты А среда экранирована в линиях H_2 от внешнего УФ излучения. В рамках однородной модели определена объемная концентрация газа $n = 22 \pm 7 \text{ см}^{-3}$ и кинетическая температура $T = 139 \pm 6 \text{ К}$. Для компоненты В среда оптически тонкая в линиях H_2 , давление газа составляет $\log(P/k_{\text{B}}) = 4.2 \pm 0.3 \text{ К см}^{-3}$.

Выполнено численное моделирование структуры облака для компонент А и В с помощью кода Meudon PDR. Построена сетка моделей в пространстве физических параметров: объемная концентрация газа, степень ионизации, интенсивность УФ излучения, относительное содержание углерода в облаке, темп образования H_2 на пыли. С помощью сравнения наблюдаемых лучевых концентраций H_2 , HD, C I и населенностей вращательных уровней H_2 и уровней тонкой структуры C I со значениями, полученными в моделировании, определены физические условия для компонент А и В. Компоненты А и В описываются моделью с постоянной плотностью $n = 40 \text{ см}^{-3}$, высокой интенсивностью УФ фона (в 12 раз выше среднегалактической), высокой степенью ионизации газа ($n_{\text{H}^+}/n_{\text{H}} \sim 10^{-2}$), содержанием углерода в облаке в 2.8 раз выше солнечной распространенности.

Показано, что при таких условиях для образования наблюдаемого количества молекул H_2 в компоненте А необходимо высокое значение коэффициента темпа

образования молекул H_2 на пыли $R_{\text{H}_2} \sim 1 - 2 \times 10^{-15} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, что в ~ 40 раз выше характерного значения R_{H_2} , измеренного в диффузных атомарных облаках нашей Галактики.

Большое значение $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$ в компоненте А, по-видимому, вызвано высокой степенью ионизации газа ($\sim 10^{-2}$), что является уникальной особенностью этой системы. Моделирование ионизационной структуры суб-DLA системы с помощью кода CLOUDY показывает, что такая степень ионизации газа может быть следствием неполного экранирования УФ-излучения (с $E > 13.6 \text{ эВ}$) нейтральным водородом в суб-DLA системе. Высокая степень ионизации газа приводит к существенному увеличению скорости образования HD. Поэтому, даже при невысокой степени молекуляризации газа $f_{\text{H}_2} \sim 0.1 - 0.2$, степень молекуляризации дейтерия оказывается выше степени молекуляризации водорода.

Глава 5

Содержание нейтрального хлора в облаках молекулярного водорода с большими красными смещениями

5.1 Введение

Согласно Стандартной космологической модели в результате первичного нуклеосинтеза только легкие элементы ($A < 8$) образовались в наблюдаемом количестве. Большинство тяжелых элементов были образованы на более поздних этапах эволюции Вселенной за счет процессов звездообразования и взрывов сверхновых звезд в ранних галактиках. Считается, что средний темп звездообразования во Вселенной менялся в ходе эволюции: сначала на красных смещениях от $z = 10$ до $z = 2$ происходил значительный рост, а затем темп стремительно уменьшается до настоящего времени, $z = 0$, см. [188]. Исследование металличности газа в DLA системах с большими красными смещениями позволяет изучать историю звездообразования в ранней Вселенной, см. [189].

Как правило, DLA системы имеют многокомпонентную скоростную структуру с характерным разбросом скоростей $\sim 100 - 500$ км/с, которая детектируется в профилях линий металлов. Вследствие высокой лучевой концентрации H I профили отдельных компонент DLA системы перекрываются, образуя широкие демпфированные абсорбционные линии, анализ которых позволяет определить только

полную лучевую концентрацию HI в системе. При этом лучевые концентрации HI , соответствующие отдельным компонентам в абсорбционных линиях металлов, остаются неизвестными. Поэтому в большинстве случаев анализ DLA систем позволяет измерять только среднюю металличность газа по системе.

Среди металлов хлор (ClI) обладает уникальными свойствами в присутствии в среде молекул H_2 . Потенциал ионизации хлора (12.97эВ) ниже, чем потенциал ионизации атомарного водорода (13.6эВ), поэтому в диффузной нейтральной среде, не содержащей молекул H_2 , атомы хлора ионизованы (УФ излучение на этих длин волн не экранируется атомарным водородом). При взаимодействии с молекулами H_2 ионы хлора за счет экзотермической реакции быстро переходят в соединение HCl^+ . Затем, с помощью нескольких каналов реакций хлор переходит в нейтральное состояние (ClI), см. подробнее [47, 190]. Даже при малом количестве молекул H_2 в среде хлор находится преимущественно в нейтральном состоянии. Можно сказать, что эти элементы ClI и H_2 оказываются “связанными” в абсорбционных системах. В тех спектрах, где мы детектируем ClI , мы обязательно должны детектировать H_2 .

Как показано в работах [47, 191, 192] в диффузных атомарных облаках в нашей Галактике детектируется линейная корреляция между содержанием ClI и H_2 . При этом содержание хлора антикоррелирует со средней объемной плотностью газа вдоль луча зрения (см. работы [193, 194]), что объясняется оседанием атомов хлора на частичках межзвездной пыли (так называемая “деплеция”). Однако, как показывают теоретические расчеты и наблюдения (см., например, [190, 195, 196]), в газе с низким содержанием пыли влияние деплеции на распространенность хлора пренебрежимо мало. В этой главе представлено исследование распространенности нейтрального хлора в облаках межзвездного газа с большими красными смещениями $z = 2 - 5$, содержащими молекулярный водород.

Таблица 5.1: Силы осцилляторов для линий переходов Cl I.

| Cl I λ , Å | f | Ссылка |
|--------------------|--------|--------|
| 1347.2396 Å | 0.153 | [197] |
| 1188.7742 Å | 0.0701 | [200] |
| 1097.3692 Å | 0.0088 | [197] |
| 1094.7686 Å | 0.0396 | [191] |
| 1088.0589 Å | 0.081 | [197] |
| 1084.6670 Å | 0.032 | [200] |
| 1085.3035 Å | 0.022 | [199] |

5.2 Абсорбционный спектр Cl I

Абсорбционный спектр Cl I в УФ диапазоне длин волн содержит несколько линий переходов, наиболее сильные из которых – это линии 1347 Å, 1188 Å и 1088 Å, см. [197]. Для других более слабых линий результаты расчета значения силы осциллятора варьируются с фактором 5 (см. [198]). В работе [191] с помощью анализа спектров, полученных обсерваторией FUSE для звезд в нашей Галактике, были измерены значения сил осцилляторов для более слабых линий 1004 Å, 1079 Å, 1090 Å и 1094 Å (эти значения на фактор 3 отличаются от теоретически рассчитанных). Дополнительно, в работе [199] из анализа спектра в направлении на HD 41161 были определены параметры еще для нескольких переходов. Значения длин волн и сил осцилляторов переходов, использованных в этой работе, приведены в таблице 5.1.

5.3 Данные анализа

На настоящий момент известно тридцать две абсорбционные системы молекулярного водорода с большими красными смещениями $z > 1.7$, см. таблицу 1.1. Сила осциллятора для наиболее сильной абсорбционной линии Cl I ($\lambda = 1347$ Å) равна $f = 0.153$. Чтобы детектировать такую линию в спектре высокого качества ($S/N \sim 50$, $R \sim 50\,000$) лучевая концентрация Cl I должна быть выше, чем 10^{12} см⁻². Солнечная распространенность хлора по отношению к водороду $10^{-6.5}$,

см. [96]. Используя соотношение $N_{\text{ClI}}/2N_{\text{H}_2}$, измеренное для межзвездной среды нашей Галактики [192], мы получили нижнее ограничение на лучевую концентрацию абсорбционных систем H_2 , $\log N_{\text{H}_2} \gtrsim 18$, в которых следует искать абсорбционные линии ClI. Дополнительно, были включили в анализ системы с $\log N_{\text{H}_2} > 17$. Среди известных H_2 систем с большими красными смещениями этому условию удовлетворяют 25 систем. Для трех систем в спектрах Q 0013–0029, J 0154+1935 и J 0918+1636 лучевая концентрация H_2 надежно не определяется, поэтому эти системы не использовались в дальнейшем анализе. Для абсорбционной системы H_2 в спектре J 0843+0221 выполнен только предварительный анализ. Также для трех систем в спектрах послесвечения вспышек гамма-излучения качество спектров недостаточно высокое для детектирования линий ClI. Таким образом, итоговый набор содержит 18 систем. Для анализа мы использовали архивные данные спектров квазаров, полученных на телескопах KECK/HIRES и VLT/UVES. Для каждого спектра была выполнена первичная обработка (редукция и сложение индивидуальных экспозиций).

5.4 Спектроскопический анализ

Абсорбционные линии ClI идентифицированы в девяти системах. Для четырех систем, детектирование линий ClI было ранее выполнено: в спектрах Q 1232+082 [141], Q 0812+3208 [201], Q 1237+0647 [63], Q 2140–0321 [56]. Другие пять случаев идентификации линий ClI в спектрах Q 0528–2508, Q 0643–5041, Q 1331+170, J 2123–0050 и J 2340–0053 выполнены впервые. В трех системах в спектрах Q 0528–2508, Q 0812+3208 и J 2340–0053 линии ClI детектируются в двух компонентах абсорбционных систем H_2 . На рисунке 5.1 показаны профили этих линий и вписанный синтетический спектр. Для оставшихся девяти систем получены верхние пределы на N_{ClI} . В большинстве случаев для анализа использовалась только наиболее сильная линия 1347 \AA , также, где это возможно, были использованы линии ClI 1188 \AA , 1094 \AA , 1088 \AA , 1085 \AA и 1084 \AA . В качестве примера на рисун-

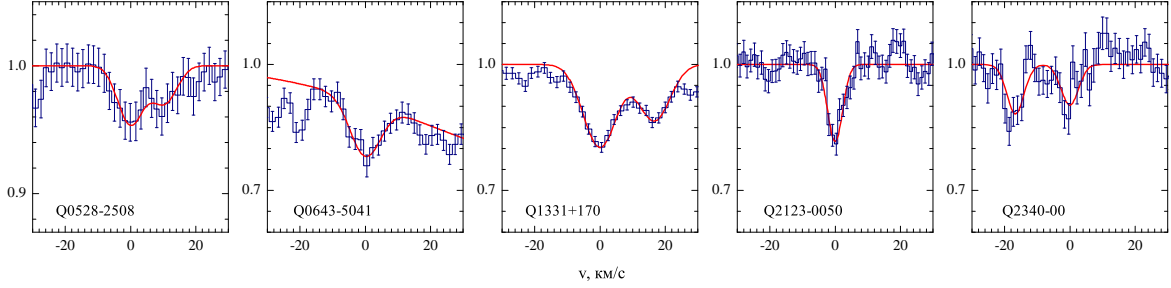


Рис. 5.1: Новые случаи идентификации абсорбционных линий Si I 1347 Å, ассоциированных с абсорбционными системами H₂ с большими красными смещениями. Красной линией показаны синтетический спектр Si I, вписанный в наблюдаемый спектр квазара.

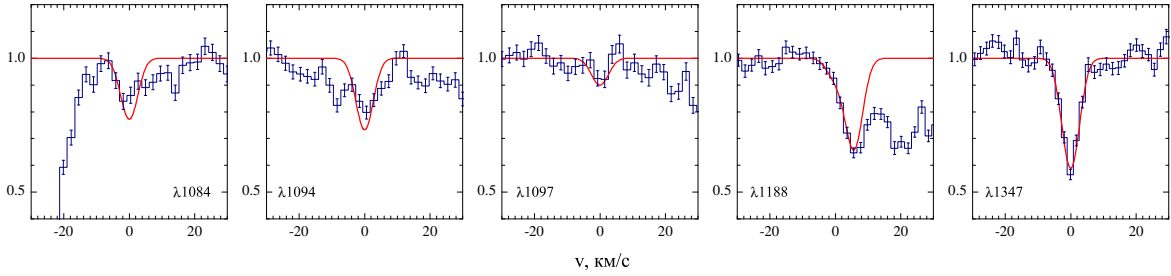


Рис. 5.2: Синтетический спектр абсорбционных линий Si I, ассоциированных с абсорбционной системой H₂ с $z_{\text{abs}} = 2.33771$, вписанный в наблюдаемый спектр квазара Q 1232+0815.

ке 5.2 показаны пять абсорбционных линий Si I в спектре квазара Q 1232+0815, ассоциированные с абсорбционной системой H₂ с $z_{\text{abs}} = 2.33771$.

Результаты анализа линий Si I приведены в таблице 5.2. Значения красных смещений и лучевых концентраций H₂ использованы из литературы, а также получены из собственного анализ спектров квазаров.

5.5 Результаты

На рисунке 5.3 показаны измеренные значения лучевой концентрации Si I в зависимости от лучевой концентрации H₂ для абсорбционных систем с большими красными смещениями (красные кружки). Между лучевыми концентрациями Si I и H₂ детектируется линейная корреляция в диапазоне лучевых concentra-

Таблица 5.2: Результаты анализа линий CII, ассоциированных с абсорбционными системами H₂ с большими красными смещениями.

| Квazar | z_{em} | z_{H_2} | $\log N_{H_2}$ | $\log N_{CII}$ | b_{CII} км/с | Ссылка |
|-------------|----------|-----------|---|----------------|----------------|-----------|
| Q 0027–1836 | 2.56 | 2.40183 | 17.30±0.07 | <12.71 | – | [55] |
| Q 0405–4418 | 3.02 | 2.59475 | 18.14±0.07 | <12.71 | – | [67] |
| Q 0528–2508 | 2.77 | 2.81098 | 18.11±0.02 | 11.92±0.08 | 4.1±1.5 | [40, 58] |
| | | 2.81112 | 17.85±0.02 | 11.73±0.11 | 4.2±2.0 | |
| Q 0551–3637 | 2.32 | 1.96214 | 17.42 ^{+0.45} _{-0.73} | <12.40 | – | [59] |
| Q 0643–5041 | 3.09 | 2.65860 | 18.54±0.01 | 12.51±0.05 | 5.8±1.4 | [60] |
| Q 0812+3208 | 2.7 | 2.62628 | 18.84±0.06 | 12.79±0.05 | 2.0±0.6 | [85, 201] |
| | | 2.62644 | 19.93±0.01 | 13.78±0.27 | 0.17±0.05 | |
| Q 0816+1446 | 3.84 | 3.2874 | 18.62±0.18 | < 13.65 | – | [61] |
| | | 3.28667 | 17.60±0.27 | < 12.76 | – | |
| Q 1232+0815 | 2.57 | 2.33772 | 19.67±0.10 | 13.49±0.07 | 0.8±0.2 | [141] |
| J 1237+0647 | 2.78 | 2.689560 | 19.20±0.13 | 13.01±0.02 | 4.5±0.4 | [63] |
| Q 1331+170 | 2.08 | 1.77638 | 19.71±0.10 | 12.87±0.02 | 5.7±0.5 | [49] |
| J 1439+1118 | 2.58 | 2.4184 | 19.38±0.10 | <13.25 | – | [19] |
| Q 1441+2737 | 4.42 | 4.22401 | 18.05±0.05 | <12.86 | – | [66] |
| | | 4.22371 | 17.91±0.03 | <12.66 | – | |
| Q 1444+0126 | 2.21 | 2.08696 | 18.16±0.11 | <12.42 | – | [67] |
| Q 2100–0641 | 3.14 | 3.09149 | 18.76±0.03 | <12.86 | – | [9] |
| Q 2123–0050 | 2.26 | 2.05933 | 17.94±0.01 | 12.27±0.06 | 2.6±0.5 | [68] |
| Q 2140–0321 | 2.48 | 2.33995 | 20.13±0.07 | 13.67±0.15 | 5–10 | [56] |
| Q 2340–0053 | 2.09 | 2.05456 | 18.07±0.06 | 12.25±0.15 | 0.8±0.6 | [9] |
| | | 2.05473 | 18.25±0.05 | 12.13±0.18 | 1.0±1.0 | |
| Q 2348–0108 | 3.01 | 2.42688 | 18.12±0.37 | <13.86 | – | [69] |
| | | 2.42449 | 17.52±0.80 | <13.13 | – | |

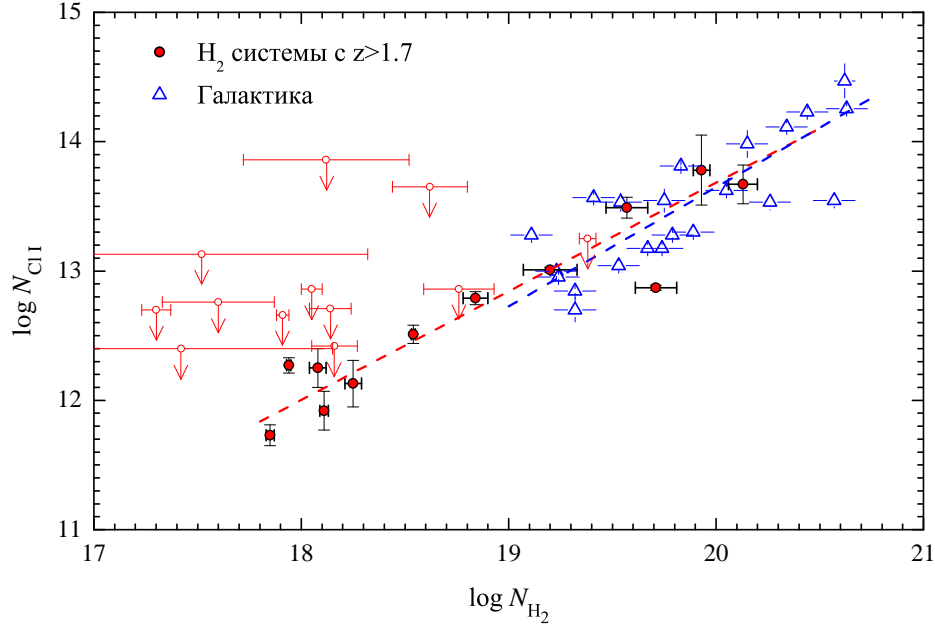


Рис. 5.3: Результаты измерений лучевой концентрации H_2 и CII для систем с большими красными смещениями (эта работа, красные заполненные кружки) и для систем в нашей Галактике ([192], синие точки). Открытыми красными кружками показаны верхние пределы на N_{CII} для систем с большими красными смещениями. Штриховыми линиями показаны зависимости между N_{CII} и N_{H_2} для систем с $z > 1.7$ (красная линия) и для систем в нашей Галактике (синяя линия), определенные методом наименьших квадратов в двумерном пространстве.

ций $17.8 < \log N_{\text{H}_2} < 20.1$. Для выборки из двенадцати измерений коэффициент корреляции Пирсона составляет $r = 0.95$; вероятность того, что выборка носит распределение точек носит случайный характер не превышает 0.001%. Для сравнения на рисунке 5.3 приведены результаты измерений N_{CII} и N_{H_2} для диффузных облаков нашей Галактики [192] (синие крестики). Следует заметить:

(I) Содержание хлора в молекулярных облаках H_2 оказывается почти одинаковым и хорошо описывается зависимостью:

$$N_{\text{CII}} = (8.6 \pm 1.4) \times 10^{-7} \times N_{\text{H}_2}, \quad (5.1)$$

при том, что средняя металличность газа в DLA системах, ассоциированных с исследуемыми абсорбционными системами H_2 , варьируется в пределах почти двух порядков величины ($[\text{X}/\text{H}] = -1.6 \div 0.3$, см. таблицу 5.3). Разумно ожидать похо-

жей вариации в измерениях лучевой концентрации хлора, однако это не наблюдается.

(II) Измерения в системах с большими z продолжают зависимость для нашей Галактики в диапазон на порядок меньших лучевых концентраций N_2 , а в области перекрытия диапазонов ($\log N_{H_2} \sim 19 - 20.2$) эти две группы измерений оказываются неотличимы. Это указывает на сходные химические и физические условия в холодной фазе межзвездной среды. В противном случае необходима “тонкая настройка” физических параметров, определяющих отношение N_{ClI}/N_{H_2} в межзвездной среде (например, объемная концентрация газа, металличность, содержание пыли, интенсивность УФ фона и др.), что маловероятно.

Верхние пределы на N_{ClI} (показаны открытыми красными кружками на рисунке 5.3) находятся в нижнем конце зависимости $N_{ClI} - N_{H_2}$ и по величине близки к ожидаемым значениям N_{ClI} . Их учет почти не влияет на статистику, поэтому эти систем далее не учитываются в анализе. Аппроксимация зависимости между $\log N_{ClI}$ и $\log N_{H_2}$ линейным законом с помощью метода наименьших квадратов в двумерном пространстве¹ дает близкие значения коэффициента наклона, равные 0.83 и 0.87 для систем с большими z и в нашей Галактике, соответственно, с почти одинаковой константой нормировки ($\log N_{ClI} \simeq 13.7$ для $\log N_{H_2} = 20$). Значение коэффициента наклона < 1 означает, что отношение N_{ClI}/N_{H_2} уменьшается для систем с большими лучевыми концентрациями N_2 . Часть атомов хлора может переходить в состав молекул H_2Cl^+ и HCl . Однако результаты теоретического расчета химического баланса Cl в облаках межзвездной среды [190], а также наблюдений в нашей Галактике (см., например, [202]) показывают, что в диффузных молекулярных облаках содержание хлора в молекулярной фазе не превышает 1%. Дополнительно, коэффициент наклона может быть < 1 вследствие деплеции атомов хлора. Но, согласно результатам наблюдений в облаках нашей Галактике [192], вклад деплеции примерно постоянен и не увеличивается с ростом лучевой концен-

¹Least-squares bisector linear fit

трации H_2 или Cl I . Также, известно, что для систем с $z > 1.7$ характерное значение коэффициента экстинкции $A_V < 0.2$ (см. работы [40, 63]). В тоже время, согласно результатам моделирования химии хлора (см. работу [190]) для систем с $A_V < 1$ весь хлор находится в газовой фазе. Другое объяснение наблюдаемой зависимости связано с предположением о распределении элементов в молекулярном облаке и степени молекуляризации газа.

5.5.1 Модель структуры молекулярного облака

В упрощенной модели структуру диффузного атомарного облака условно можно разделить на две области: “оболочка облака” – почти полностью атомарный газ (не содержащий молекул H_2), где Cl преимущественно находится в ионизованном состоянии Cl II и “ядро облака” – область с высокой степенью молекуляризации газа, где хлор находится в нейтральном состоянии Cl I . Условную границу этих областей можно определить, исходя их решения уравнений ионизационного баланса для Cl^+ .

$$n_{\text{Cl}^0} \times \xi = n_{\text{Cl}^+} n_{\text{H}_2} \times K_{\text{Cl}}, \quad (5.2)$$

где $\xi = 4.8 \times 10^{-11} \times \chi_{\text{UV}} \text{c}^{-1}$ – темп фотоионизации хлора [190], χ_{UV} – интенсивность УФ излучения в единицах среднегалактического УФ фона, см. [161], $K_{\text{Cl}} \simeq 2 \times 10^{-9} \text{cm}^3 \text{c}^{-1}$ – темп конверсии Cl^+ в Cl I путем нескольких каналов реакций, см. [47, 190]. Полагая $n_{\text{H}_2} = n \times f_{\text{H}_2}$, получаем условие:

$$f_{\text{H}_2} > 2.4 \times 10^{-2} \times \frac{\chi_{\text{UV}} n_{\text{Cl}^0}}{n n_{\text{Cl}^+}}. \quad (5.3)$$

При характерных физических условиях в диффузных облаках ($\chi_{\text{UV}} \sim 1$, $n = 10 - 500 \text{cm}^{-3}$) хлор будет преимущественно нейтрален при степени молекуляризации $f_{\text{H}_2} > 10^{-3} - 10^{-2}$. Эта оценка подтверждается также результатами моделирования структуры облака с помощью кода MeudonPDR (см. [203]).

Таким образом, в рамках рассматриваемой модели значения лучевых концентраций Cl I и H_2 определяются только “ядром облака”. Содержание этих элементов в “оболочке облака” считается пренебрежимо мало. В ядре облака хлор находится

преимущественно в нейтральное состояние, в то время как водород находится в атомарной и молекулярной фазах. увеличением лучевой концентрации H_2 увеличивается степень экранирования УФ фона в линиях H_2 , и увеличивается степень молекуляризации газа, – т.е. относительное содержание H_2 растет, в то время как относительное содержание нейтрального хлора не меняется (в ядре облака хлор полностью в нейтральном состоянии). Таким образом, количество Cl I по отношению к H_2 будет уменьшаться. Этот эффект может объяснять значение коэффициента наклона < 1 для зависимости между $\log N_{\text{Cl I}}$ и $\log N_{\text{H}_2}$.

5.5.2 Металличность газа в молекулярном облаке

Распространенность хлора (или металличность по Cl) в молекулярном облаке можно определить следующим образом:

$$\left[\frac{\text{Cl}}{\text{H}} \right]_{\text{core}} = \left[\frac{\text{Cl I}}{\text{H}_2} \right] + \log f_{\text{H}_2}^{\text{core}}, \quad (5.4)$$

где

$$\left[\frac{\text{Cl I}}{\text{H}_2} \right] = \log \left(\frac{N_{\text{Cl I}}}{2N_{\text{H}_2}} \right) - \log \left(\frac{\text{Cl}}{\text{H}} \right)_{\odot}, \quad (5.5)$$

а $f_{\text{H}_2}^{\text{core}} = 2N_{\text{H}_2} / (2N_{\text{H}_2} + N_{\text{HI}}^{\text{core}})$ – локальная степень молекуляризации газа в ядре облака, индекс “core” обозначает, что величины относятся к ядру облака. Если хлор захватывается частицами пыли, приведенные выше оценки нужно скорректировать на фактор деплеции Cl .

Значение $[\text{Cl I}/\text{H}_2]$ дает верхнее ограничение на металличность облака, так как степень молекуляризации $f_{\text{H}_2}^{\text{core}}$ всегда < 1 . Если для абсорбционной системы H_2 измерена локальная степень молекуляризации (например, из анализа населенностей уровней молекул HD и Cl I), можно с помощью выражения (5.4) рассчитать локальную металличность газа $[\text{Cl}/\text{H}]$.

В нашей Галактике для 13 из 21 систем были идентифицированы линии ионизованного хлора Cl II [192] и измерены значения лучевой концентрации $N_{\text{Cl II}}$. Это позволило напрямую измерить среднюю распространенность хлора $[\text{Cl}/\text{H}]$ в этих

| Квазар | z_{em} | z_{DLA} | $\log N_{\text{HI}}$ | [X/H] | X | $\log N_{\text{H}_2}$ | [ClI/H ₂] |
|-------------|-----------------|------------------|----------------------|------------|----|---|-----------------------|
| Q 0027–1836 | 2.56 | 2.40 | 21.75±0.10 | -1.63±0.10 | Zn | 17.30±0.07 | <1.61 |
| Q 0405–4418 | 3.02 | 2.59 | 21.05±0.10 | -1.12±0.10 | Zn | 18.14±0.07 | <0.77 |
| Q 0528–2508 | 2.77 | 2.81 | 21.35±0.07 | -0.91±0.07 | Zn | 18.11±0.02 | 0.01±0.08 |
| | | | | | | 17.85±0.02 | 0.08±0.11 |
| Q 0551–3637 | 2.32 | 1.96 | 20.70±0.08 | -0.35±0.08 | Zn | 17.42 ^{+0.45} _{-0.73} | <1.54 |
| Q 0643–5041 | 3.09 | 2.66 | 21.03±0.08 | -0.91±0.09 | Zn | 18.54±0.01 | 0.17±0.05 |
| Q 0812+3208 | 2.7 | 2.63 | 21.35±0.10 | -0.81±0.10 | Zn | 18.84±0.06 | 0.15 ± 0.08 |
| | | | | | | 19.93±0.01 | 0.05 ± 0.27 |
| Q 0816+1446 | 3.84 | 3.29 | 22.00±0.10 | -1.10±0.10 | Zn | 18.62±0.18 | <1.23 |
| | | | | | | 17.60±0.27 | < 1.36 |
| Q 1232+0815 | 2.57 | 2.34 | 20.90±0.08 | -1.35±0.12 | S | 19.57±0.10 | 0.12 ± 0.13 |
| J 1237+0647 | 2.78 | 2.69 | 20.00±0.15 | +0.34±0.12 | Zn | 19.20±0.13 | 0.01±0.12 |
| Q 1331+170 | 2.08 | 1.78 | 21.18±0.04 | -1.22±0.10 | Zn | 19.71±0.10 | -0.64±0.10 |
| J 1439+1118 | 2.58 | 2.42 | 20.10±0.10 | +0.16±0.11 | Zn | 19.38±0.10 | <0.07 |
| Q 1441+2737 | 4.42 | 4.22 | 20.95±0.08 | -0.63±0.10 | S | 18.05±0.05 | <1.01 |
| | | | | | | 17.91±0.03 | < 0.95 |
| Q 1444+0126 | 2.21 | 2.09 | 20.25±0.07 | -0.80±0.09 | Zn | 18.16±0.11 | <0.46 |
| Q 2100–0641 | 3.14 | 3.09 | 21.05±0.15 | -0.73±0.15 | Si | 18.76±0.03 | <0.3 |
| Q 2123–0050 | 2.26 | 2.06 | 19.18±0.15 | -0.19±0.10 | S | 17.94±0.01 | 0.38±0.06 |
| Q 2140–0321 | 2.48 | 2.34 | 22.40±0.10 | -1.05±0.13 | P | 20.13±0.07 | -0.26±0.18 |
| Q 2340–0053 | 2.09 | 2.05 | 20.35±0.15 | -0.92±0.03 | Zn | 18.07±0.06 | 0.38±0.16 |
| | | | | | | 18.25±0.05 | 0.08±0.19 |
| Q 2348–0108 | 3.01 | 2.43 | 20.50±0.10 | -0.62±0.10 | S | 18.12±0.37 | <1.94 |
| | | | | | | 17.52±0.80 | <0.81 |

Таблица 5.3: Сравнение распространенности атомов ClI относительно молекул H₂ со средней металличностью газа в DLA и суб-DLA системах.

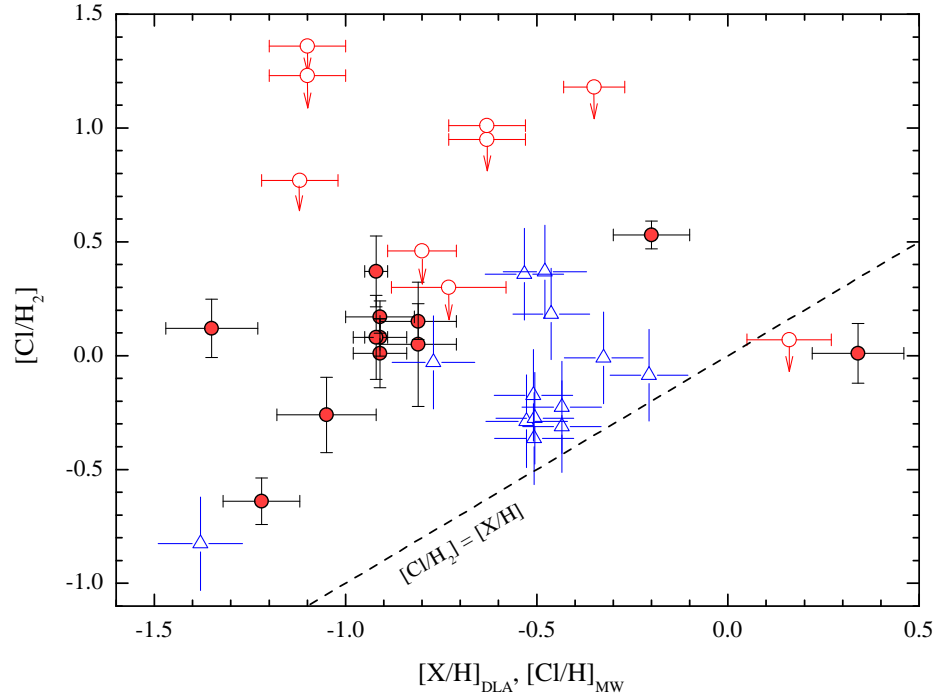


Рис. 5.4: $[\text{ClI}/\text{H}_2]$ в зависимости от средней металличности газа в DLA и суб-DLA системах $[\text{X}/\text{H}]_{\text{DLA}}$ (красные точки) и средней распространенности хлора для облаков нашей Галактики $[\text{Cl}/\text{H}]_{\text{MW}}$ (синие точки). Штриховой линией показано отношение этих величин в пропорции 1:1.

системах:

$$\left(\frac{\text{Cl}}{\text{H}}\right) = \frac{N_{\text{ClI}} + N_{\text{ClII}}}{N_{\text{HI}} + 2N_{\text{H}_2}} \quad (5.6)$$

Для DLA систем линии Cl II не идентифицированы.² Во-вторых, на луче зрения в DLA системе может находиться несколько облаков HI. Поэтому, предполагая, что распространенность Cl по отношению к солнечной такая же, как и для Zn или S (элементов слабо подверженных деплеции), мы использовали среднюю распространенность этих элементов в DLA системе $[\text{X}/\text{H}]_{\text{DLA}}$ в качестве оценки $[\text{Cl}/\text{H}]_{\text{DLA}}$.

На рисунке 5.4 и в таблице 5.3 показано сравнение значений $[\text{ClI}/\text{H}_2]$ и средней распространенности хлора для DLA систем (красные точки) и для облаков нашей Галактики (синие крестики). Видно, что для большинства DLA систем от-

²Линии Cl II более слабые, значение силы осцилляторов на порядок ниже, чем для перехода Cl I 1347 Å, см. [204].

ношение $[Cl/H_2]$ оказывается почти на порядок выше средней металличности газа, $[Cl/H_2] - [X/H]_{DLA} \approx 0.8 \pm 0.2$. Это означает, что скорее всего либо степень молекуляризации газа в облаках H_2 $f_{H_2}^{core} \gtrsim 0.1$ (т.е. на порядок выше средней степени молекуляризации газа в DLA системах $f_H^{DLA} = 10^{-2} \div 10^{-6}$ [40]), либо (ii) локальное содержание хлора в “ядре” облака почти на порядок выше, чем среднее содержание металлов (Zn, S) в DLA системе. Для большинства систем в нашей Галактике $[Cl I/H_2] \approx [X/H]$, что указывает на высокую степень молекуляризации газа $f_{H_2}^{core} \gtrsim 0.6$.

Следует отметить, что среди абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями есть две системы, для которых выполняется условие: $[Cl I/H_2] \approx [X/H]_{DLA}$ – это те системы, в которых детектируются абсорбционные линии молекул CO (Q 1439+1118 [19] и Q 1237+0647 [63]). По-видимому, в этих облаках газ полностью молекуляризован, и локальная металличность близка к средней металличности DLA системы.

5.6 Заключение

В этой главе диссертации выполнен обзор распространенности нейтрального хлора в облаках межзвездного газа с большими красными смещениями ($z = 2 - 5$), содержащих молекулярный водород. Для анализа были использованы оптические спектры 18 квазаров, содержащие абсорбционные системы H_2 с $\log N_{H_2} > 17$. Линии нейтрального хлора, ассоциированные с абсорбционными системами H_2 , идентифицированы в 9 спектрах (включая 5 новых идентификаций), и дополнительно в 9 спектрах были получены верхние пределы на лучевую концентрацию Cl I. Обнаружена линейная зависимость между лучевыми концентрациями Cl I и H_2 в диапазоне лучевых концентраций $18.1 < \log N_{H_2} < 20.1$:

$$N_{Cl I} = (8.6 \pm 1.4) \times 10^{-7} \times N_{H_2}.$$

Измерения в системах с большими z продолжают зависимость $N_{Cl I} - N_{H_2}$ для облаков нашей Галактики в диапазон на порядок меньших лучевых концентраций

H_2 , а в области перекрытия диапазонов ($\log N_{\text{H}_2} = 19 - 20.2$) эти две группы измерений оказываются неотличимы. Показано, что эта зависимость такая же, что и в диффузных атомарных облаках нашей Галактики. Это указывает на сходные химические и физические условия в холодной фазе нейтральной межзвездной среды на больших красных смещениях и в нашей Галактике.

Заключение

В диссертации получены следующие основные результаты:

- Разработан новый метод поиска абсорбционных систем H_2 в спектрах среднего разрешения ($R \approx 2000$) квазаров обзора SDSS. Метод применен к каталогам спектров квазаров SDSS DR 7 и DR 9. Обнаружено 23 кандидата в абсорбционные системы H_2 с большими красными смещениями. Для восьми из 23 кандидатов выполнены наблюдения на телескопе VLT с использованием спектрографов высокого разрешения UVES ($R \approx 50\,000$) и среднего разрешения X-shooter ($R \approx 4000 - 10\,000$). Для всех восьми кандидатов присутствие абсорбционных систем H_2 было подтверждено.
- Выполнен независимый анализ абсорбционных систем молекулярного водорода (H_2 и HD) с красными смещениями $z_{\text{abs}} = 2.81$, $z_{\text{abs}} = 2.06$ и $z_{\text{abs}} = 3.09$ в спектрах квазаров Q 0528–2508, J 2123–0050 и J 2100–0641, соответственно. В спектре J 2100–0641 идентифицированы линии молекул H_2 и HD. Определена скоростная структура абсорбционных систем, измерены лучевые концентрации молекул H_2 и HD и отношение $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$ в компонентах абсорбционных систем.
- Исследован эффект неполного покрытия области формирования излучения квазара облаком молекулярного водорода, находящимся на большом красном смещении. Впервые обнаружен эффект неполного покрытия области формирования континуального излучения квазара облаком H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.81$ в спектре квазара Q 0528–2508. В спектрах квазаров J 2123–0050

и J 2100–0641 обнаружен эффект неполного покрытия области формирования излучения в эмиссионных линиях облаками H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.06$ и $z_{\text{abs}} = 3.09$, соответственно. На настоящий момент эффект неполного покрытия области формирования излучения квазара облаком H_2 с большим красным смещением обнаружен для пяти объектов, три из которых идентифицированы в данной работе.

- Исследованы физические условия в абсорбционной системе H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.06$ в спектре квазара J 2123–0050. Показано, что абсорбционная система состоит из двух компонент А и В, которые имеют существенно разные оптические толщины в линиях H_2 . Показано, что для компоненты А среда экранирована в линиях H_2 от внешнего УФ излучения. В рамках однородной модели облака определены типичные значения объемной концентрации газа $n = 22 \pm 7 \text{ см}^{-3}$ и кинетической температуры $T = 139 \pm 6 \text{ К}$. Для компоненты В среда оказалась оптически тонкой в линиях H_2 . В рамках однородной модели получена оценка интенсивности УФ фона (в ~ 8 раз выше средней в Галактике) и давление газа, $\log(P/k_B) = 4.2 \pm 0.3 \text{ К см}^{-3}$. Выполнено моделирование структуры облака H_2 для сетки параметров: объемная концентрация газа, степень ионизации, интенсивность УФ излучения, относительное содержание углерода в облаке, темп образования H_2 на пыли. Показано, что наилучшая модель, которая описывает наблюдаемые лучевые концентрации H_2 , HD, C I и населенности уровней H_2 и C I для компонент А и В – это модель с постоянной плотностью газа ($n_{\text{H}} = 40 \text{ см}^{-3}$), степенью ионизации $n_{\text{H}^+}/n_{\text{H}} \sim 10^{-2}$, содержанием углерода (C/H) в 2.8 раз выше солнечной распространенности, интенсивностью УФ излучения на границе облака в 12 раз выше средней интенсивности в Галактике. Показано, что для образования наблюдаемого количества молекул H_2 для компонент А и В коэффициент темпа образования H_2 на пыли $R_{\text{H}_2} \sim (1 - 2) \times 10^{-15} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, что в ~ 40 раз выше типичного значения R_{H_2} в диффузных атомарных облаках нашей Галактики.

Выполнено моделирование ионизационной структуры суб-DLA системы. Показано, что высокое значение степени ионизации газа в облаке H_2 ($\sim 10^{-2}$) может быть следствием неполного экранирования внешнего УФ-излучения (с $E > 13.6$ эВ) слоем нейтрального водорода в этой системе.

- Выполнена оценка распространенности нейтрального хлора в облаках межзвездного газа с большими красными смещениями ($z_{\text{abs}} = 2-5$), содержащих молекулярный водород. Линии нейтрального хлора идентифицированы в 9 абсорбционных системах H_2 (включая 5 новых идентификаций), и дополнительно в 9 системах получены верхние пределы на лучевую концентрацию Cl I . Обнаружена линейная зависимость между лучевыми концентрациями Cl I и H_2 ; $N_{\text{Cl I}} = (8.6 \pm 1.4) \times 10^{-7} \times N_{\text{H}_2}$ в диапазоне лучевых концентраций $18 < \log N_{\text{H}_2} < 20$. Найденное соотношение соответствует данным наблюдений диффузных облаков нашей Галактики. Это указывает на сходные химические и физические условия в холодной фазе межзвездной среды на больших красных смещениях и в нашей Галактике.

Выражаю благодарность Патрику Петижану, Седерику Леду, Рагунатану Шриананду и Паскье Нотердаму за совместную работу. Выражаю благодарность своим научным руководителям Дмитрию Александровичу Варшаловичу и Александру Владимировичу Иванчику. Работа под их руководством была для меня очень полезной и интересной. Дмитрий Александрович постоянно оказывал внимание и поддержку, которые были для меня очень важны. Я признателен Александру Владимировичу Иванчику за его ценные замечания, наставления, поддержку в непростых ситуациях и терпение.

Я особенно благодарен Сергею Балашеву за долгую, интересную совместную работу, неоценимую помощь, поддержку и советы в решении многих научных задач, а также помощь в написании статей, подготовки диссертации и сопроводительных документов.

Благодарю Ю.А. Шибанова, П.С. Штернина, А.А. Даниленко, Д.А. Зюзина, Д.П. Барсукова, О.А. Гогличидзе, Д.Г. Яковлева, А.М. Красильщикова за ценные замечания, поддержку и помощь в работе над диссертацией. Я благодарен С.А. Левшакову за поддержку и обсуждение работ на семинарах сектора. Также я благодарен А.Д. Каминкеру, К.П. Левинфиш, Д.А. Бойко, А.И. Чугунову, А.А. Кожберову, А.Ю. Кириченко, В.М. Бессоловой и всему коллективу сектора теоретической астрофизики за содействие, поддержку и дружественную рабочую обстановку.

Отдельно выражаю благодарность моей семье и близким друзьям, без которых эта работа не была бы написана.

Литература

- [1] The neutral atomic phases of the interstellar medium / M. G. Wolfire, D. Hollenbach, C. F. McKee et al. // *Astrophys. J.* — 1995. — Vol. 443. — Pp. 152–168.
- [2] *de Avillez M. A., Breitschwerdt D.* Volume filling factors of the ISM phases in star forming galaxies. I. The role of the disk-halo interaction // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 425. — Pp. 899–911.
- [3] *Madau P., Dickinson M.* Cosmic Star-Formation History // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 52. — Pp. 415–486.
- [4] *Snow T. P., McCall B. J.* Diffuse Atomic and Molecular Clouds // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2006. — Vol. 44. — Pp. 367–414.
- [5] *Wolfe A. M., Gawiser E., Prochaska J. X.* Damped Ly α Systems // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 43. — Pp. 861–918.
- [6] On the sizes of $z \sim 2$ damped Ly α absorbing galaxies / J.-K. Krogager, J. P. U. Fynbo, P. Møller et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 424. — Pp. L1–L5.
- [7] *Levshakov S. A., Varshalovich D. A.* Molecular hydrogen in the $Z = 2.811$ absorbing material toward the quasar PKS 0528-250 // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1985. — Vol. 212. — Pp. 517–521.

- [8] Search for cold gas in $z > 2$ damped Ly α systems: 21-cm and H₂ absorption / R. Srianand, N. Gupta, P. Petitjean et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*. — 2012. — Vol. 421. — Pp. 651–665.
- [9] *Jorgenson R. A., Wolfe A. M., Prochaska J. X.* Understanding Physical Conditions in High-redshift Galaxies Through C I Fine Structure Lines: Data and Methodology // *Astrophys. J.*. — 2010. — Vol. 722. — Pp. 460–490.
- [10] The 2013 Release of Cloudy / G. J. Ferland, R. L. Porter, P. A. M. van Hoof et al. // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica.* — 2013. — Vol. 49. — Pp. 137–163.
- [11] A Model for Atomic and Molecular Interstellar Gas: The Meudon PDR Code / F. Le Petit, C. Nehmé, J. Le Bourlot, E. Roueff // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*. — 2006. — Vol. 164. — Pp. 506–529.
- [12] The Highest Redshift Quasar at $z = 7.085$: A Radio-quiet Source / E. Momjian, C. L. Carilli, F. Walter, B. Venemans // *Astron. J.*. — 2014. — Vol. 147. — P. 6.
- [13] *Petitjean P., Mucket J. P., Kates R. E.* The LY alpha forest at low redshift: Tracing the dark matter filaments // *Astron. Astrophys.*. — 1995. — Vol. 295. — Pp. L9–L12.
- [14] Nearby galaxy filaments and the Ly α forest: confronting simulations and the UV background with observations / B. P. Wakker, A. K. Hernandez, D. French et al. // *ArXiv e-prints.* — 2015.
- [15] *Prochaska J. X., Wolfe A. M.* On the (Non)Evolution of H I Gas in Galaxies Over Cosmic Time // *Astrophys. J.*. — 2009. — Vol. 696. — Pp. 1543–1547.
- [16] Column density distribution and cosmological mass density of neutral gas: Sloan Digital Sky Survey-III Data Release 9 / P. Noterdaeme, P. Petitjean, W. C. Carithers et al. // *Astron. Astrophys.*. — 2012. — Vol. 547. — P. L1.

- [17] Galaxy counterparts of metal-rich damped Ly α absorbers - II. A solar-metallicity and dusty DLA at $z_{abs}=2.58$ / J. P. U. Fynbo, C. Ledoux, P. Noterdaeme et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 413. — Pp. 2481–2488.
- [18] 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.
- [19] First detection of CO in a high-redshift damped Lyman- α system / R. Srianand, P. Noterdaeme, C. Ledoux, P. Petitjean // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 482. — Pp. L39–L42.
- [20] 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. — P. L7.
- [21] H₂/HD molecular clouds in the early universe. An independent means of estimating the baryon density of the universe / A. V. Ivanchik, S. A. Balashev, D. A. Varshalovich, V. V. Klimenko // *Astronomy Reports*. — 2015. — Vol. 59. — Pp. 100–117.
- [22] *Jenkins E. B., Tripp T. M.* The Distribution of Thermal Pressures in the Interstellar Medium from a Survey of C I Fine-Structure Excitation // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2001. — Vol. 137. — Pp. 297–340.
- [23] A New FUSE Survey of Interstellar HD / T. P. Snow, T. L. Ross, J. D. Destree et al. // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 688. — Pp. 1124–1136.
- [24] Molecular Hydrogen in the FUSE Translucent Lines of Sight: The Full Sample / B. L. Rachford, T. P. Snow, J. D. Destree et al. // *ArXiv e-prints*. — 2008.

- [25] New abundance determinations in $z \leq 1.5$ QSO absorbers: seven sub-DLAs and one DLA / J. D. Meiring, J. T. Lauroesch, V. P. Kulkarni et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 376. — Pp. 557–572.
- [26] Ionization corrections in a multiphase interstellar medium: lessons from a $z_{abs} \sim 2$ sub-DLA / N. Milutinovic, S. L. Ellison, J. X. Prochaska, J. Tumlinson // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 408. — Pp. 2071–2082.
- [27] Composite Quasar Spectra from the Sloan Digital Sky Survey / D. E. Vanden Berk, G. T. Richards, A. Bauer et al. // *Astron. J.* — 2001. — Vol. 122. — Pp. 549–564.
- [28] *Urry C. M., Padovani P.* Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* — 1995. — Vol. 107. — P. 803.
- [29] *Netzer H.* Revisiting the unified model of Active Galactic Nuclei. // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 53. — Pp. 365–408.
- [30] *Carruthers G. R.* Rocket Observation of Interstellar Molecular Hydrogen // *Astrophys. J.* — 1970. — Vol. 161. — P. L81.
- [31] *Smith A. M.* Interstellar Molecular Hydrogen Observed in the Ultraviolet Spectrum of Delta Scorpil // *Astrophys. J.* — 1973. — Vol. 179. — P. L11.
- [32] Spectrophotometric Results from the Copernicus Satellite. II. Composition of Interstellar Clouds / D. C. Morton, J. F. Drake, E. B. Jenkins et al. // *Astrophys. J.* — 1973. — Vol. 181. — P. L103.
- [33] *Spitzer Jr. L., Jenkins E. B.* Ultraviolet studies of the interstellar gas // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1975. — Vol. 13. — Pp. 133–164.
- [34] A survey of interstellar molecular hydrogen. I / B. D. Savage, R. C. Bohlin, J. F. Drake, W. Budich // *Astrophys. J.* — 1977. — Vol. 216. — Pp. 291–307.

- [35] A Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Survey of Interstellar Molecular Hydrogen in Translucent Clouds / B. L. Rachford, T. P. Snow, J. Tumlinson et al. // *Astrophys. J.* — 2002. — Vol. 577. — Pp. 221–244.
- [36] A Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Survey of Interstellar Molecular Hydrogen in the Small and Large Magellanic Clouds / J. Tumlinson, J. M. Shull, B. L. Rachford et al. // *Astrophys. J.* — 2002. — Vol. 566. — Pp. 857–879.
- [37] Interstellar H₂ in M 33 detected with FUSE / H. Bluhm, K. S. de Boer, O. Marggraf et al. // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 398. — Pp. 983–991.
- [38] *Welty D. E., Xue R., Wong T.* Interstellar H I and H₂ in the Magellanic Clouds: An Expanded Sample Based on Ultraviolet Absorption-line Data // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 745. — P. 173.
- [39] The VLT-UVES survey for molecular hydrogen in high-redshift damped Lyman α systems: physical conditions in the neutral gas / R. Srianand, P. Petitjean, C. Ledoux et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2005. — Vol. 362. — Pp. 549–568.
- [40] 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.
- [41] The First Positive Detection of Molecular Gas in a GRB Host Galaxy / J. X. Prochaska, Y. Sheffer, D. A. Perley et al. // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 691. — Pp. L27–L32.
- [42] The warm, the excited, and the molecular gas: GRB 121024A shining through its star-forming galaxy / M. Friis, A. De Cia, T. Krühler et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 451. — Pp. 167–183.

- [43] *Muzahid S., Srianand R., Charlton J.* An HST/COS survey of molecular hydrogen in DLAs & sub-DLAs at $z < 1$: molecular fraction and excitation temperature // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*— 2015. — Vol. 448. — Pp. 2840–2853.
- [44] *Jura M.* Interstellar clouds containing optically thin H₂ // *Astrophys. J.*— 1975. — Vol. 197. — Pp. 575–580.
- [45] *Hartquist T. W., Black J. H., Dalgarno A.* Cosmic ray ionization and the deuterium abundance // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*— 1978. — Vol. 185. — Pp. 643–646.
- [46] Diffuse molecular gas at high redshift. Detection of CO molecules and the 2175 Å dust feature at $z = 1.64$ / P. Noterdaeme, C. Ledoux, R. Srianand et al. // *Astron. Astrophys.*— 2009. — Vol. 503. — Pp. 765–770.
- [47] *Jura M.* Chlorine-Bearing Molecules in Interstellar Clouds // *Astrophys. J.*— 1974. — Vol. 190. — P. L33.
- [48] Neutral chlorine and molecular hydrogen at high redshift / S. A. Balashev, P. Noterdaeme, V. V. Klimenko et al. // *Astron. Astrophys.*— 2015. — Vol. 575. — P. L8.
- [49] *Balashev S. A., Ivanchik A. V., Varshalovich D. A.* HD/H₂ molecular clouds in the early Universe: The problem of primordial deuterium // *Astronomy Letters.* — 2010. — Vol. 36. — Pp. 761–772.
- [50] *Varshalovich D. A., Levshakov S. A.* On a time dependence of physical constants. // *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters.* — 1993. — Vol. 58. — Pp. 237–240.
- [51] *Ubachs W., Reinhold E.* Highly Accurate H₂ Lyman and Werner Band Laboratory Measurements and an Improved Constraint on a Cosmological Variation of the

- Proton-to-Electron Mass Ratio // *Physical Review Letters*. — 2004. — Vol. 92, no. 10. — P. 101302.
- [52] New constraint on cosmological variation of the proton-to-electron mass ratio from Q0528-250 / J. A. King, M. T. Murphy, W. Ubachs, J. K. Webb // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*. — 2011. — Vol. 417. — Pp. 3010–3024.
- [53] The UVES large program for testing fundamental physics II: constraints $\Delta\mu/\mu$ towards quasar HE 0027 - 1836 / H. Rahmani, M. Wendt, R. Srianand et al. // *Memorie della Societa Astronomica Italiana*. — 2014. — Vol. 85. — P. 70.
- [54] *Petitjean P., Srianand R., Ledoux C.* Molecular hydrogen at $\langle p \rangle_{z_{abs}} = 1.973$ toward Q0013-004: dust depletion pattern in damped Lyman α systems // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*. — 2002. — Vol. 332. — Pp. 383–391.
- [55] 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.
- [56] VLT/UVES observations of extremely strong intervening damped Lyman- α systems. Molecular hydrogen and excited carbon, oxygen, and silicon at $\log N(\text{H i}) = 22.4$ / P. Noterdaeme, R. Srianand, H. Rahmani et al. // *Astron. Astrophys.*. — 2015. — Vol. 577. — P. A24.
- [57] 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 / A. Ivanchik, P. Petitjean, D. Varshalovich et al. // *Astron. Astrophys.*. — 2005. — Vol. 440. — Pp. 45–52.
- [58] Partial covering of the emission regions of Q 0528-250 by intervening H₂ clouds / V. V. Klimenko, S. A. Balashev, A. V. Ivanchik et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*. — 2015. — Vol. 448. — Pp. 280–298.

- [59] *Ledoux C., Srianand R., Petitjean P.* Detection of molecular hydrogen in a near Solar-metallicity damped Lyman-alpha system at $z_{abs} \sim 2$ toward Q 0551-366 $\simeq 2$ // *Astron. Astrophys.* — 2002. — Vol. 392. — Pp. 781–789.
- [60] Molecular hydrogen in the $z_{abs} = 2.66$ damped Lyman- α absorber towards Q J 0643-5041. Physical conditions and limits on the cosmological variation of the proton-to-electron mass ratio / D. Albornoz Vásquez, H. Rahmani, P. Noterdaeme et al. // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 562. — P. A88.
- [61] Metallicities, Dust, and Molecular Content of a QSO-damped Ly α System Reaching $\log N(\text{H I}) = 22$: An Analog to GRB-DLAs / R. Guimarães, P. Noterdaeme, P. Petitjean et al. // *Astron. J.* — 2012. — Vol. 143. — P. 147.
- [62] 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. Roy. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 404. — Pp. 1583–1590.
- [63] A translucent interstellar cloud at $z = 2.69$. CO, H₂, and HD in the line-of-sight to SDSS J123714.60+064759.5 / P. Noterdaeme, P. Petitjean, C. Ledoux et al. // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 523. — P. A80.
- [64] Molecular Hydrogen in the Damped Ly α Absorber of Q1331+170 / J. Cui, J. Bechtold, J. Ge, D. M. Meyer // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 633. — Pp. 649–663.
- [65] Detection of 21-cm, H₂ and deuterium absorption at $z > 3$ along the line of sight to J1337+3152 / R. Srianand, N. Gupta, P. Petitjean et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 405. — Pp. 1888–1900.
- [66] *Ledoux C., Petitjean P., Srianand R.* Molecular Hydrogen in a Damped Ly α System at $z_{abs}=4.224$ // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 640. — Pp. L25–L28.

- [67] *Ledoux C., Petitjean P., Srianand R.* The Very Large Telescope Ultraviolet and Visible Echelle Spectrograph survey for molecular hydrogen in high-redshift damped Lyman α systems // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2003. — Vol. 346. — Pp. 209–228.
- [68] A new estimation of HD/2H₂ at high redshift using the spectrum of the quasar J2123–0050 / V. V. Klimenko, S. A. Balashev, A. V. Ivanchik, D. A. Varshalovich // *J. Phys.: Conf. Ser.*
- [69] Physical conditions in the neutral interstellar medium at $z = 2.43$ toward Q 2348-011 / P. Noterdaeme, P. Petitjean, R. Srianand et al. // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 469. — Pp. 425–436.
- [70] VLT/X-shooter spectroscopy of the GRB 120327A afterglow / V. D’Elia, J. P. U. Fynbo, P. Goldoni et al. // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 564. — P. A38.
- [71] Molecular hydrogen in the damped Lyman α system towards GRB 120815A at $z = 2.36$ / T. Krühler, C. Ledoux, J. P. U. Fynbo et al. // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 557. — P. A18.
- [72] The Sloan Digital Sky Survey quasar catalog: ninth data release / I. Pâris, P. Petitjean, É. Aubourg et al. // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 548. — P. A66.
- [73] *Wakker B. P.* A FUSE Survey of High-Latitude Galactic Molecular Hydrogen // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2006. — Vol. 163. — Pp. 282–305.
- [74] The UCSD/Keck Damped Ly α Abundance Database: A Decade of High-Resolution Spectroscopy / J. X. Prochaska, A. M. Wolfe, J. C. Howk et al. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2007. — Vol. 171. — Pp. 29–60.

- [75] The Magellan uniform survey of damped Lyman α systems - II. Paucity of strong molecular hydrogen absorption / R. A. Jorgenson, M. T. Murphy, R. Thompson, R. F. Carswell // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 443. — Pp. 2783–2800.
- [76] The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary / D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, Jr. et al. // *Astron. J.* — 2000. — Vol. 120. — Pp. 1579–1587.
- [77] The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III / S. Alam, F. D. Albareti, C. Allende Prieto et al. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2015. — Vol. 219. — P. 12.
- [78]
- [79] The Ninth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey / C. P. Ahn, R. Alexandroff, C. Allende Prieto et al. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2012. — Vol. 203. — P. 21.
- [80] The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey / K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros et al. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2009. — Vol. 182. — Pp. 543–558.
- [81] Evolution of the cosmological mass density of neutral gas from Sloan Digital Sky Survey II - Data Release 7 / P. Noterdaeme, P. Petitjean, C. Ledoux, R. Srianand // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 505. — Pp. 1087–1098.
- [82] A principal component analysis of quasar UV spectra at $z \sim 3$ / I. Pâris, P. Petitjean, E. Rollinde et al. // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 530. — P. A50.
- [83] *Meiksin A. A.* The physics of the intergalactic medium // *Reviews of Modern Physics.* — 2009. — Vol. 81. — Pp. 1405–1469.

- [84] The Multi-object, Fiber-fed Spectrographs for the Sloan Digital Sky Survey and the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey / S. A. Smee, J. E. Gunn, A. Uomoto et al. // *Astron. J.* — 2013. — Vol. 146. — P. 32.
- [85] Direct Evidence of Cold Gas in DLA 0812+32B / R. A. Jorgenson, A. M. Wolfe, J. X. Prochaska, R. F. Carswell // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 704. — Pp. 247–254.
- [86] Metallicity as a criterion to select H₂-bearing damped Lyman- α systems / P. Petitjean, C. Ledoux, P. Noterdaeme, R. Srianand // *Astron. Astrophys.* — 2006. — Vol. 456. — Pp. L9–L12.
- [87] 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. // Discoveries and Research Prospects from 8- to 10-Meter-Class Telescopes / Ed. by J. Bergeron. — Vol. 4005 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. — 2000. — Pp. 121–130.
- [88] X-shooter, the new wide band intermediate resolution spectrograph at the ESO Very Large Telescope / J. Vernet, H. Dekker, S. D’Odorico et al. // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 536. — P. A105.
- [89] The X-shooter pipeline / A. Modigliani, P. Goldoni, F. Royer et al. // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — Vol. 7737 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. — 2010. — P. 28.
- [90] Automated data reduction workflows for astronomy. The ESO Reflex environment / W. Freudling, M. Romaniello, D. M. Bramich et al. // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 559. — P. A96.
- [91] *Fields B. D.* On the Evolution of the Light Elements. I. D, 3He, and 4He // *Astrophys. J.* — 1996. — Vol. 456. — P. 478.

- [92] *Adams T. F.* The detectability of deuterium Lyman alpha in QSOs // *Astron. Astrophys.* — 1976. — Vol. 50. — P. 461.
- [93] Higher D or Li: probes of physics beyond the standard model / K. A. Olive, P. Petitjean, E. Vangioni, J. Silk // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 426. — Pp. 1427–1435.
- [94] Precision Measures of the Primordial Abundance of Deuterium / R. J. Cooke, M. Pettini, R. A. Jorgenson et al. // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 781. — P. 31.
- [95] The primordial deuterium abundance: subDLA system at $z_{\text{abs}} = 2.437$ towards the QSO J1444+2919 / S. A. Balashev, E. O. Zavarygin, A. V. Ivanchik et al. // *ArXiv e-prints*. — 2015.
- [96] The Chemical Composition of the Sun / M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, P. Scott // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 47. — Pp. 481–522.
- [97] Deuterium astration in the local disc and beyond / D. Romano, M. Tosi, C. Chiappini, F. Matteucci // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 369. — Pp. 295–304.
- [98] Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters / Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim et al. // *ArXiv e-prints*. — 2015.
- [99] Deuterium abundance in the most metal-poor damped Lyman alpha system: converging on $\Omega_{b,0}h^2$ / M. Pettini, B. J. Zych, M. T. Murphy et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2008. — Vol. 391. — Pp. 1499–1510.
- [100] *Gnedin N. I., Ostriker J. P.* Light element nucleosynthesis - A false clue? // *Astrophys. J.* — 1992. — Vol. 400. — Pp. 1–20.
- [101] Influence of gamma-ray emission on the isotopic composition of clouds in the interstellar medium / V. V. Klimenko, A. V. Ivanchik, D. A. Varshalovich, A. G. Pavlov // *Astronomy Letters*. — 2012. — Vol. 38. — Pp. 364–379.

- [102] *Medvedev P., Sazonov S., Gilfanov M.* Helium diffusion during formation of the first galaxies // *ArXiv e-prints.* — 2015.
- [103] Deuterated molecular hydrogen in the Galactic ISM. New observations along seven translucent sightlines / S. Lacour, M. K. André, P. Sonnentrucker et al. // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 430. — Pp. 967–977.
- [104] *Liszt H. S.* HD/H₂ as a Probe of the Roles of Gas, Dust, Light, Metallicity, and Cosmic Rays in Promoting the Growth of Molecular Hydrogen in the Diffuse Interstellar Medium // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 799. — P. 66.
- [105] *Le Petit F., Roueff E., Le Bourlot J.* D/HD transition in Photon Dominated Regions (PDR) // *Astron. Astrophys.* — 2002. — Vol. 390. — Pp. 369–381.
- [106] Absorption lines and ion abundances in the QSO PKS 0528-250 / D. C. Morton, A. E. Wright, B. A. Peterson et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1980. — Vol. 193. — Pp. 399–413.
- [107] *Foltz C. B., Chaffee Jr. F. H., Black J. H.* Molecules at early epochs. IV - Confirmation of the detection of H₂ toward PKS 0528 - 250 // *Astrophys. J.* — 1988. — Vol. 324. — Pp. 267–278.
- [108] *Srianand R., Petitjean P.* Molecules in the z_{abs} = 2.8112 damped system toward PKS 0528-250 // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 335. — Pp. 33–40.
- [109] *Ćirković M. M., Damjanov I., Lalović A.* H₂ and HD Absorption Lines and the Cosmic Ray Flux in High-Z Galaxies // *Baltic Astronomy.* — 2006. — Vol. 15. — Pp. 571–580.
- [110] *Goodman J., Weare J.* Ensemble samplers with affine invariance // *Comm. App. Math. and Comp. Sci.* — 2010. — Vol. 5. — P. 65.

- [111] 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.
- [112] *Abgrall H., Roueff E.* Theoretical calculations of excited rovibrational levels of HD. Term values and transition probabilities of VUV electronic bands // *Astron. Astrophys.*. — 2006. — Vol. 445. — Pp. 361–372.
- [113] HIRES: the high-resolution echelle spectrometer on the Keck 10-m Telescope / S. S. Vogt, S. L. Allen, B. C. Bigelow et al. // *Instrumentation in Astronomy VIII* / Ed. by D. L. Crawford, E. R. Craine. — Vol. 2198 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. — 1994. — P. 362.
- [114] The Metal-strong Damped Ly α Systems / S. Herbert-Fort, J. X. Prochaska, M. Dessauges-Zavadsky et al. // *Publ. Astron. Soc. Pacific*. — 2006. — Vol. 118. — Pp. 1077–1097.
- [115] Keck telescope constraint on cosmological variation of the proton-to-electron mass ratio / A. L. Malec, R. Buning, M. T. Murphy et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*. — 2010. — Vol. 403. — Pp. 1541–1555.
- [116] First Constraint on Cosmological Variation of the Proton-to-Electron Mass Ratio from Two Independent Telescopes / F. van Weerdenburg, M. T. Murphy, A. L. Malec et al. // *Physical Review Letters*. — 2011. — Vol. 106, no. 18. — P. 180802.
- [117] Cosmological Concordance or Chemical Coincidence? Deuterated Molecular Hydrogen Abundances at High Redshift / J. Tumlinson, A. L. Malec, R. F. Carswell et al. // *Astrophys. J.*. — 2010. — Vol. 718. — Pp. L156–L160.
- [118] *Balashov S. A., Varshalovich D. A., Ivanchik A. V.* Directional radiation and photodissociation regions in molecular hydrogen clouds // *Astronomy Letters*. — 2009. — Vol. 35. — Pp. 150–166.

- [119] *Sugiura N.* "Further analysis of the data by Akaike's information criterion and the finite corrections. // *Commun. Stat. A-Theor.* — 1978. — Vol. 7. — Pp. 13–26.
- [120] *Liddle A. R.* Information criteria for astrophysical model selection // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 377. — Pp. L74–L78.
- [121] *Draine B. T., Bertoldi F.* Structure of Stationary Photodissociation Fronts // *Astrophys. J.* — 1996. — Vol. 468. — P. 269.
- [122] HD molecules at high redshift. A low astration factor of deuterium in a solar-metallicity DLA system at $z = 2.418$ / P. Noterdaeme, P. Petitjean, C. Ledoux et al. // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 491. — Pp. 397–400.
- [123] The central dusty torus in the active nucleus of NGC 1068 / W. Jaffe, K. Meisenheimer, H. J. A. Röttgering et al. // *Nature.* — 2004. — Vol. 429. — Pp. 47–49.
- [124] The dusty torus in the Circinus galaxy: a dense disk and the torus funnel / K. R. W. Tristram, L. Burtscher, W. Jaffe et al. // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 563. — P. A82.
- [125] Revealing the large nuclear dust structures in NGC 1068 with MIDI/VLTI / N. López-Gonzaga, W. Jaffe, L. Burtscher et al. // *ArXiv e-prints.* — 2014.
- [126] Reverberation Mapping of High-Luminosity Quasars: First Results / S. Kaspi, W. N. Brandt, D. Maoz et al. // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 659. — Pp. 997–1007.
- [127] *Chelouche D., Daniel E.* Photometric Reverberation Mapping of the Broad Emission Line Region in Quasars // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 747. — P. 62.
- [128] Sizes and Temperature Profiles of Quasar Accretion Disks from Chromatic Microlensing / J. A. Blackburne, D. Pooley, S. Rappaport, P. L. Schechter // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 729. — P. 34.

- [129] A Robust Determination of the Size of Quasar Accretion Disks Using Gravitational Microlensing / J. Jiménez-Vicente, E. Mediavilla, J. A. Muñoz, C. S. Kochanek // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 751. — P. 106.
- [130] Zooming into the broad line region of the gravitationally lensed quasar QSO 2237+0305 \equiv the Einstein Cross. III. Determination of the size and structure of the C IV and C III λ emitting regions using microlensing / D. Sluse, R. Schmidt, F. Courbin et al. // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 528. — P. A100.
- [131] Rauch M. The Lyman Alpha Forest in the Spectra of QSOs // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 36. — Pp. 267–316.
- [132] KECK HIRES Spectroscopy of APM 08279+5255 / S. L. Ellison, G. F. Lewis, M. Pettini et al. // *Publ. Astron. Soc. Pacific*. — 1999. — Vol. 111. — Pp. 946–953.
- [133] Structure of the Mg II and damped Lyman-alpha systems along the line of sight to APM 08279+5255 and damped Lyman-alpha systems along the line of sight to APM 08279+5255 / P. Petitjean, B. Aracil, R. Srianand, R. Ibata // *Astron. Astrophys.* — 2000. — Vol. 359. — Pp. 457–470.
- [134] Spatially resolved STIS spectra of the gravitationally lensed broad absorption line quasar APM08279+5255: the nature of component C and evidence for microlensing / G. F. Lewis, R. A. Ibata, S. L. Ellison et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2002. — Vol. 334. — Pp. L7–L10.
- [135] The sizes and kinematic structure of absorption systems towards the lensed quasar APM08279+5255 / S. L. Ellison, R. Ibata, M. Pettini et al. // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 414. — Pp. 79–93.
- [136] The covering factor of high-redshift damped Lyman- α systems / N. Kanekar, W. M. Lane, E. Momjian et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2009. — Vol. 394. — Pp. L61–L65.

- [137] A Bare Molecular Cloud at $z \sim 0.45$ / T. M. Jones, T. Misawa, J. C. Charlton et al. // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 715. — Pp. 1497–1507.
- [138] *Zeldovich I. B., Novikov I. D.* Relativistic astrophysics. Volume 2 - The structure and evolution of the universe /Revised and enlarged edition/. — 1983.
- [139] *Kayser R., Helbig P., Schramm T.* A general and practical method for calculating cosmological distances. // *Astron. Astrophys.* — 1997. — Vol. 318. — Pp. 680–686.
- [140] Effect of a partial coverage of quasar broad-line regions by intervening H_2 -bearing clouds / D. D. Ofengeim, S. A. Balashev, A. V. Ivanchik et al. // *Astrophys. Space Sci.* — 2015. — Vol. 359. — P. 26.
- [141] Partial coverage of the broad-line region of Q1232+082 by an intervening H_2 -bearing cloud / S. A. Balashev, P. Petitjean, A. V. Ivanchik et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 418. — Pp. 357–369.
- [142] *Whitmore J. B., Murphy M. T., Griest K.* Wavelength Calibration of the VLT-UVES Spectrograph // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 723. — Pp. 89–99.
- [143] Binary Quasars in the Sloan Digital Sky Survey: Evidence for Excess Clustering on Small Scales / J. F. Hennawi, M. A. Strauss, M. Oguri et al. // *Astron. J.* — 2006. — Vol. 131. — Pp. 1–23.
- [144] SDSS J092712.64+294344.0: recoiling blackhole or merging galaxies? / M. Vivek, R. Srikanand, P. Noterdaeme et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2009. — Vol. 400. — Pp. L6–L9.
- [145] *Draine B. T.* Scattering by Interstellar Dust Grains. I. Optical and Ultraviolet // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 598. — Pp. 1017–1025.
- [146] The jet-cloud interacting radio galaxy PKS B2152-699 - I. Structures revealed in new deep radio and X-ray observations / D. M. Worrall, M. Birkinshaw,

- A. J. Young et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 424. — Pp. 1346–1362.
- [147] Véron-Cetty M.-P., Véron P. A catalogue of quasars and active nuclei: 13th edition // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. A10.
- [148] Gupta A. C., Joshi U. C., Fan J. H. Optical variability of gamma-ray loud blazars // *Astrophys. Space Sci.* — 2002. — Vol. 282. — Pp. 655–668.
- [149] Preliminary spectral observations of the Galaxy with a 7 deg beam by the Cosmic Background Explorer (COBE) / E. L. Wright, J. C. Mather, C. L. Bennett et al. // *Astrophys. J.* — 1991. — Vol. 381. — Pp. 200–209.
- [150] Wolfe A. M., Prochaska J. X., Gawiser E. C II* Absorption in Damped Ly α Systems. I. Star Formation Rates in a Two-Phase Medium // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 593. — Pp. 215–234.
- [151] H₂ formation and excitation in the diffuse interstellar medium / C. Gry, F. Boulanger, C. Nehmé et al. // *Astron. Astrophys.* — 2002. — Vol. 391. — Pp. 675–680.
- [152] Chemical Rates on Small Grains and PAHs: C⁺ Recombination and H₂ Formation / M. G. Wolfire, A. G. G. M. Tielens, D. Hollenbach, M. J. Kaufman // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 680. — Pp. 384–397.
- [153] A FUSE Survey of Interstellar Molecular Hydrogen toward High-Latitude AGNs / K. Gillmon, J. M. Shull, J. Tumlinson, C. Danforth // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 636. — Pp. 891–907.
- [154] Element abundances at high redshift: MIKE observations of sub-damped Lyman α absorbers at $1.7 < z < 2.4$ / D. Som, V. P. Kulkarni, J. Meiring et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2013. — Vol. 435. — Pp. 1469–1485.

- [155] *Dalgarno A., Black J. H., Weisheit J. C.* Ortho-Para Transitions in H₂ and the Fractionation of HD // *Astrophys. Lett.* — 1973. — Vol. 14. — P. 77.
- [156] *Gerlich D.* Ortho-para transitions in reactive H⁺+H₂ collisions // *Jour. Chem. Phys.* — 1990. — Vol. 92. — Pp. 2377–2388.
- [157] *Mandy M. E., Martin P. G.* Collisional excitation of H₂ molecules by H atoms // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1993. — Vol. 86. — Pp. 199–210.
- [158] *Le Bourlot J.* Ortho to para conversion of H₂ on interstellar grains // *Astron. Astrophys.* — 2000. — Vol. 360. — Pp. 656–662.
- [159] *Spitzer Jr. L., Zweibel E. G.* On the Theory of H₂ Rotational Excitation // *Astrophys. J.* — 1974. — Vol. 191. — P. L127.
- [160] Photodissociation of H₂ and the H/H₂ transition in interstellar clouds / H. Abgrall, J. Le Bourlot, G. Pineau Des Forets et al. // *Astron. Astrophys.* — 1992. — Vol. 253. — Pp. 525–536.
- [161] *Habing H. J.* The interstellar radiation density between 912 Å and 2400 Å // *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands.* — 1968. — Vol. 19. — P. 421.
- [162] *Black J. H., Dalgarno A.* Interstellar H₂ - The population of excited rotational states and the infrared response to ultraviolet radiation // *Astrophys. J.* — 1976. — Vol. 203. — Pp. 132–142.
- [163] *Spitzer L.* Physical processes in the interstellar medium. — 1978.
- [164] Non-equilibrium chemistry in the dissipative structures of interstellar turbulence / K. Joulain, E. Falgarone, G. Pineau des Forets, D. Flower // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 340. — Pp. 241–256.
- [165] *Cecchi-Pestellini C., Casu S., Dalgarno A.* H₂ excitation in turbulent interstellar clouds // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2005. — Vol. 364. — Pp. 1309–1314.

- [166] *Le Petit F., Roueff E., Herbst E.* H₃⁺ and other species in the diffuse cloud towards ζ Persei: A new detailed model // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 417. — Pp. 993–1002.
- [167] *Abgrall H., Roueff E., Viala Y.* Vibration-rotation transition probabilities for the ground electronic chi/1/-sigma/+/ state of HD // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* — 1982. — Vol. 50. — Pp. 505–522.
- [168] The cooling of astrophysical media by HD / D. R. Flower, J. Le Bourlot, G. Pineau des Forêts, E. Roueff // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2000. — Vol. 314. — Pp. 753–758.
- [169] *Izotov Y. I., Stasińska G., Guseva N. G.* Primordial ⁴He abundance: a determination based on the largest sample of H II regions with a methodology tested on model H II regions // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A57.
- [170] *Silva A. I., Viegas S. M.* Physical conditions in quasi-stellar object absorbers from fine-structure absorption lines // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2002. — Vol. 329. — Pp. 135–148.
- [171] *Abrahamsson E., Krems R. V., Dalgarno A.* Fine-Structure Excitation of O I and C I by Impact with Atomic Hydrogen // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 654. — Pp. 1171–1174.
- [172] Excitation of the fine-structure transitions of C in collisions with ortho- and para-H₂ / K. Schroder, V. Staemmler, M. D. Smith et al. // *Journal of Physics B Atomic Molecular Physics.* — 1991. — Vol. 24. — Pp. 2487–2502.
- [173] *Staemmler V., Flower D. R.* Excitation of the C(2p² ³P_j) fine structure states in collisions with He(1s² ¹S₀) // *Journal of Physics B Atomic Molecular Physics.* — 1991. — Vol. 24. — Pp. 2343–2351.

- [174] *Gondhalekar P. M., Phillips A. P., Wilson R.* Observations of the interstellar ultraviolet radiation field from the S2/68 sky-survey telescope // *Astron. Astrophys.* — 1980. — Vol. 85. — Pp. 272–280.
- [175] Surface chemistry in the interstellar medium. I. H₂ formation by Langmuir-Hinshelwood and Eley-Rideal mechanisms / J. Le Bourlot, F. Le Petit, C. Pinto et al. // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 541. — P. A76.
- [176] Neutral atomic-carbon quasar absorption-line systems at $z > 1.5$. Sample selection, H i content, reddening, and 2175 Å extinction feature / C. Ledoux, P. Noterdaeme, P. Petitjean, R. Srianand // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 580. — P. A8.
- [177] *Liszt H. S.* How does C⁺ recombine in diffuse molecular gas? // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 527. — P. A45.
- [178] *Welty D. E., Hobbs L. M., Morton D. C.* High-Resolution Observations of Interstellar Ca I Absorption-Implications for Depletions and Electron Densities in Diffuse Clouds // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2003. — Vol. 147. — Pp. 61–96.
- [179] *Dalgarno A., Lepp S.* Deuterium fractionation mechanisms in interstellar clouds // *Astrophys. J.* — 1984. — Vol. 287. — Pp. L47–L50.
- [180] *Nahar S. N., Pradhan A. K.* Electron-Ion Recombination Rate Coefficients, Photoionization Cross Sections, and Ionization Fractions for Astrophysically Abundant Elements. I. Carbon and Nitrogen // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1997. — Vol. 111. — Pp. 339–355.
- [181] The au-scale structure in diffuse molecular gas towards ζ Persei / P. Boissé, S. R. Federman, G. Pineau des Forêts, A. M. Ritchey // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 559. — P. A131.

- [182] A photon dominated region code comparison study / M. Röllig, N. P. Abel, T. Bell et al. // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 467. — Pp. 187–206.
- [183] *Mathis J. S., Mezger P. G., Panagia N.* Interstellar radiation field and dust temperatures in the diffuse interstellar matter and in giant molecular clouds // *Astron. Astrophys.* — 1983. — Vol. 128. — Pp. 212–229.
- [184] The Chemistry of Interstellar OH⁺, H₂O⁺, and H₃O⁺: Inferring the Cosmic-Ray Ionization Rates from Observations of Molecular Ions / D. Hollenbach, M. J. Kaufman, D. Neufeld et al. // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 754. — P. 105.
- [185] *Mathis J. S., Rumpl W., Nordsieck K. H.* The size distribution of interstellar grains // *Astrophys. J.* — 1977. — Vol. 217. — Pp. 425–433.
- [186] *Bohlin R. C., Savage B. D., Drake J. F.* A survey of interstellar H I from L-alpha absorption measurements. II // *Astrophys. J.* — 1978. — Vol. 224. — Pp. 132–142.
- [187] *Haardt F., Madau P.* Radiative Transfer in a Clumpy Universe. II. The Ultraviolet Extragalactic Background // *Astrophys. J.* — 1996. — Vol. 461. — P. 20.
- [188] *Dunlop J. S.* The Cosmic History of Star Formation // *Science.* — 2011. — Vol. 333. — Pp. 178–.
- [189] Metallicity Evolution of Damped Ly α Systems Out to $z \sim 5$ / M. Rafelski, A. M. Wolfe, J. X. Prochaska et al. // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 755. — P. 89.
- [190] *Neufeld D. A., Wolfire M. G.* The Chemistry of Interstellar Molecules Containing the Halogen Elements // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 706. — Pp. 1594–1604.
- [191] *Sonnentrucker P., Friedman S. D., York D. G.* Chlorine in the Galactic Interstellar Medium: Revised f-Values with the Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer and the Space Telescope Imaging Spectrograph // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 650. — Pp. L115–L118.

- [192] *Moomey D., Federman S. R., Sheffer Y.* Revisiting the Chlorine Abundance in Diffuse Interstellar Clouds from Measurements with the Copernicus Satellite // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 744. — P. 174.
- [193] *Harris A. W., Bromage G. E.* The abundance of interstellar chlorine in the galaxy // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1984. — Vol. 208. — Pp. 941–953.
- [194] *Jenkins E. B., Savage B. D., Spitzer Jr. L.* Abundances of interstellar atoms from ultraviolet absorption lines // *Astrophys. J.* — 1986. — Vol. 301. — Pp. 355–379.
- [195] *Savage B. D., Sembach K. R.* Interstellar Abundances from Absorption-Line Observations with the Hubble Space Telescope // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1996. — Vol. 34. — Pp. 279–330.
- [196] *Jenkins E. B.* A Unified Representation of Gas-Phase Element Depletions in the Interstellar Medium // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 700. — Pp. 1299–1348.
- [197] Accurate oscillator strengths for interstellar ultraviolet lines of Cl I / R. M. Schectman, S. R. Federman, D. J. Beideck, D. J. Ellis // *Astrophys. J.* — 1993. — Vol. 406. — Pp. 735–738.
- [198] *Oliver P., Hibbert A.* Transitions among fine-structure levels of Cl I // *Journal of Physics Conference Series*. — 2008. — Vol. 130, no. 1. — P. 012016.
- [199] *Oliveira C. M., Hébrard G.* Variations in the D/H Ratio of Extended Sight Lines from Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Observations // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 653. — Pp. 345–360.
- [200] *Morton D. C.* Atomic Data for Resonance Absorption Lines. III. Wavelengths Longward of the Lyman Limit for the Elements Hydrogen to Gallium // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2003. — Vol. 149. — Pp. 205–238.
- [201] *Prochaska J. X., Howk J. C., Wolfe A. M.* The elemental abundance pattern in a galaxy at $z = 2.626$ // *Nature*. — 2003. — Vol. 423. — Pp. 57–59.

- [202] Herschel/HIFI discovery of interstellar chloronium (H_2Cl^+) / D. C. Lis, J. C. Pearson, D. A. Neufeld et al. // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 521. — P. L9.
- [203] Hydrogen Chloride in Diffuse Interstellar Clouds along the Line of Sight to W31C (G10.6-0.4) / R. R. Monje, D. C. Lis, E. Roueff et al. // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 767. — P. 81.
- [204] Oscillator Strengths for Ultraviolet Transitions in Cl II and Cl III / R. M. Schectman, S. R. Federman, M. Brown et al. // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 621. — Pp. 1159–1162.