

Ioffe
Institute



Межзвёздное вещество в галактиках ранней Вселенной: молекулярный водород и нейтральный углерод

С.А. Балашев¹, П. Нотердам², Д. Крогагер², А. Раджан², В.В. Клименко¹,
А.В. Иванчик¹, Д.А. Варшалович¹, П. Петижан², Р. Шриананд³, С. Леду⁴

¹ Ioffe Institute, St Petersburg

² Institut d'Astrophysique de Paris

³ UICAA, Pune, India

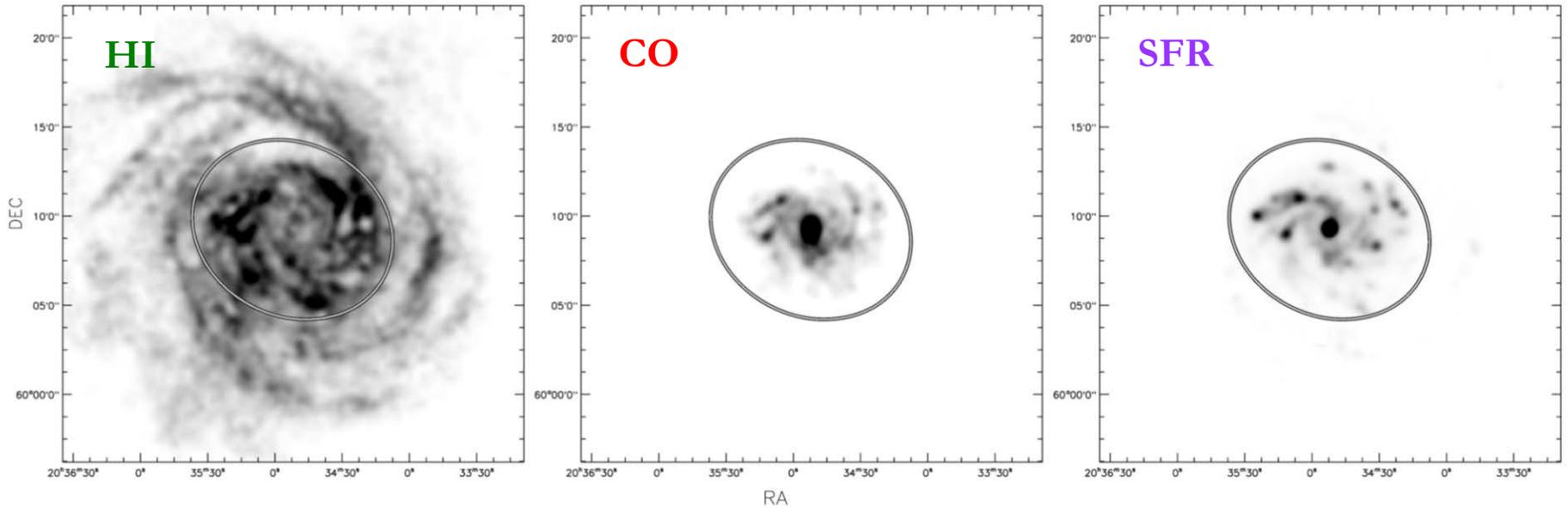
⁴ ESO, Chile

Звздообразование и H_2

В локальной Вселенной хорошо известно, что

→ Звёзды, в основном, образуются в молекулярных облаках

→ $\Sigma_{\text{SFR}} \not\propto \Sigma_{\text{HI}}$, но $\Sigma_{\text{SFR}} \sim \Sigma_{\text{H}_2}$ (Wong & Blitz 2002, Kennicutt et al. 2007, Bigiel et al. 2008, Schruba et al. 2011, ...)



NGC 6946 from Bigiel et al. 2008

Звездообразование и H_2

Является ли H_2 необходимым для процесса звездообразования?

(Krumholz 2011, Glover & Clark 2012, ...)

→ H_2 не является главным хладагентом холодной МЗС, охлаждение МЗС в основном за счет металлов

VS

→ H_2 является ключевым элементом для образования молекул, которые охлаждают МЗС до более низких температур, чем металлы

Наблюдательно в локальной Вселенной:

1. H_2 является трейсером холодной фазы МЗВ
2. Условия сопутствующие звездообразованию благоприятствуют образованию H_2 $[\text{X}/\text{H}] \sim A_V \sim \text{H}_2$

Звздообразование и H_2

Как протекает процесс звездообразования в условиях отличных от условий в нормальных галактиках локальной Вселенной?

$z=0$

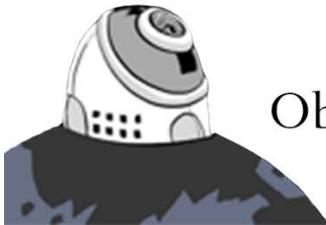
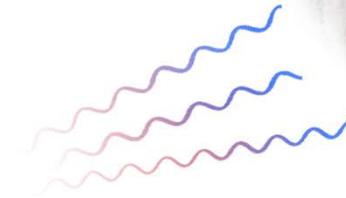
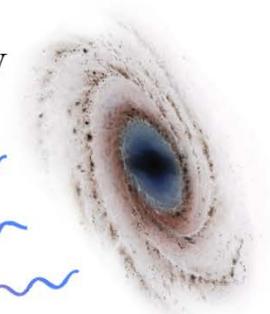


Dwarf galaxy



$z > 0$

Remote galaxy



Observer

Звздообразование и H_2

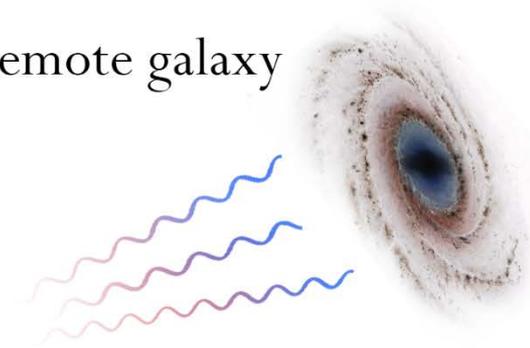
Как протекает процесс звездообразования в условиях отличных от условий в нормальных галактиках локальной Вселенной?

$Z=0$

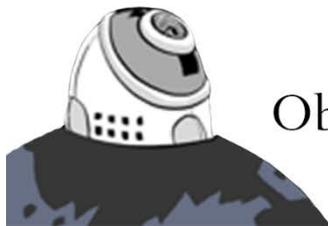


Dwarf galaxy

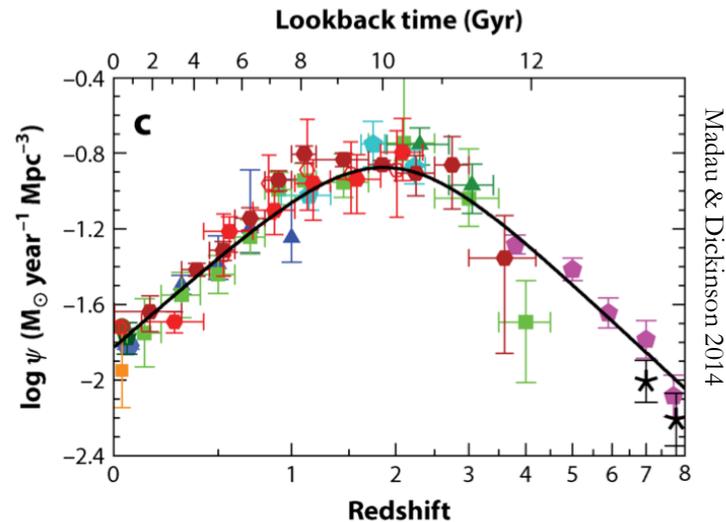
$Z>0$



Remote galaxy



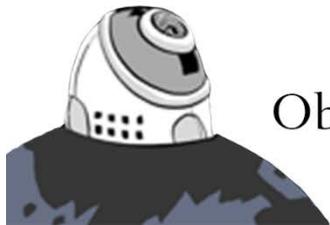
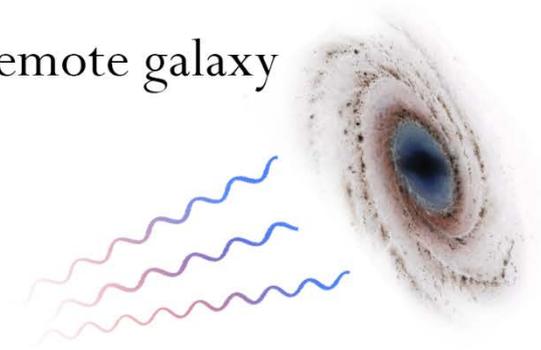
Observer



Галактики $z \sim 2$

Поток излучения от галактик сильно падает на $z > 2$

Remote galaxy

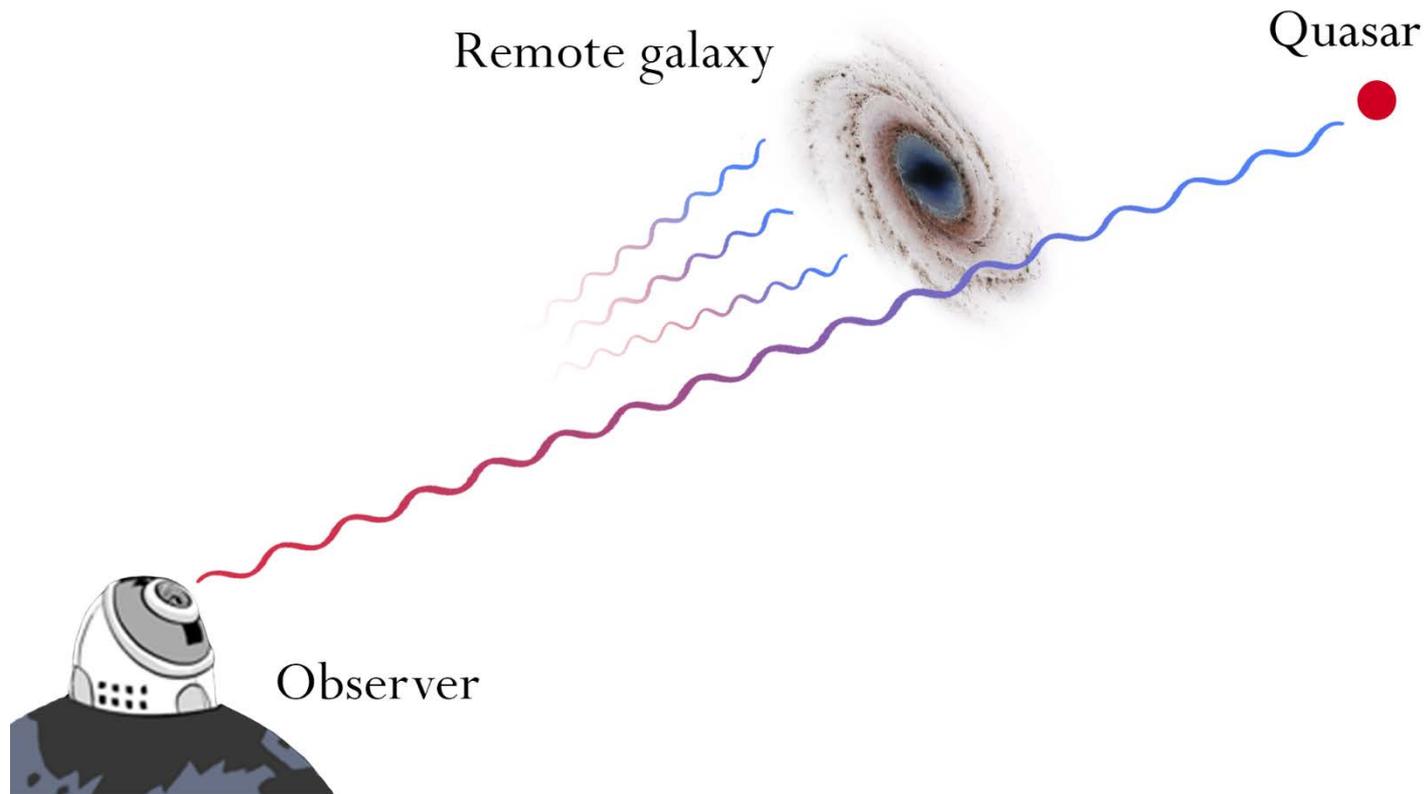


Observer

Поэтому в эмиссии изучаются в основном только яркие галактики из популяции

Галактики $z \sim 2$

Такой проблемы нет для изучения галактик в абсорбционных спектрах квазаров



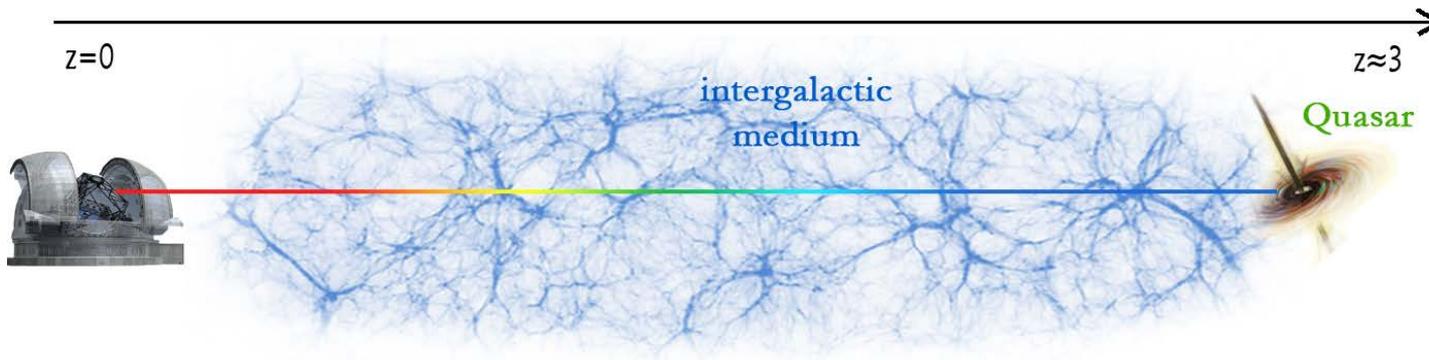
Однако есть сложности:

- вероятность попадания зависит от сечения
- свойства только вдоль прокола
(определяются **лучевые концентрации**)

Спектроскопия квазаров

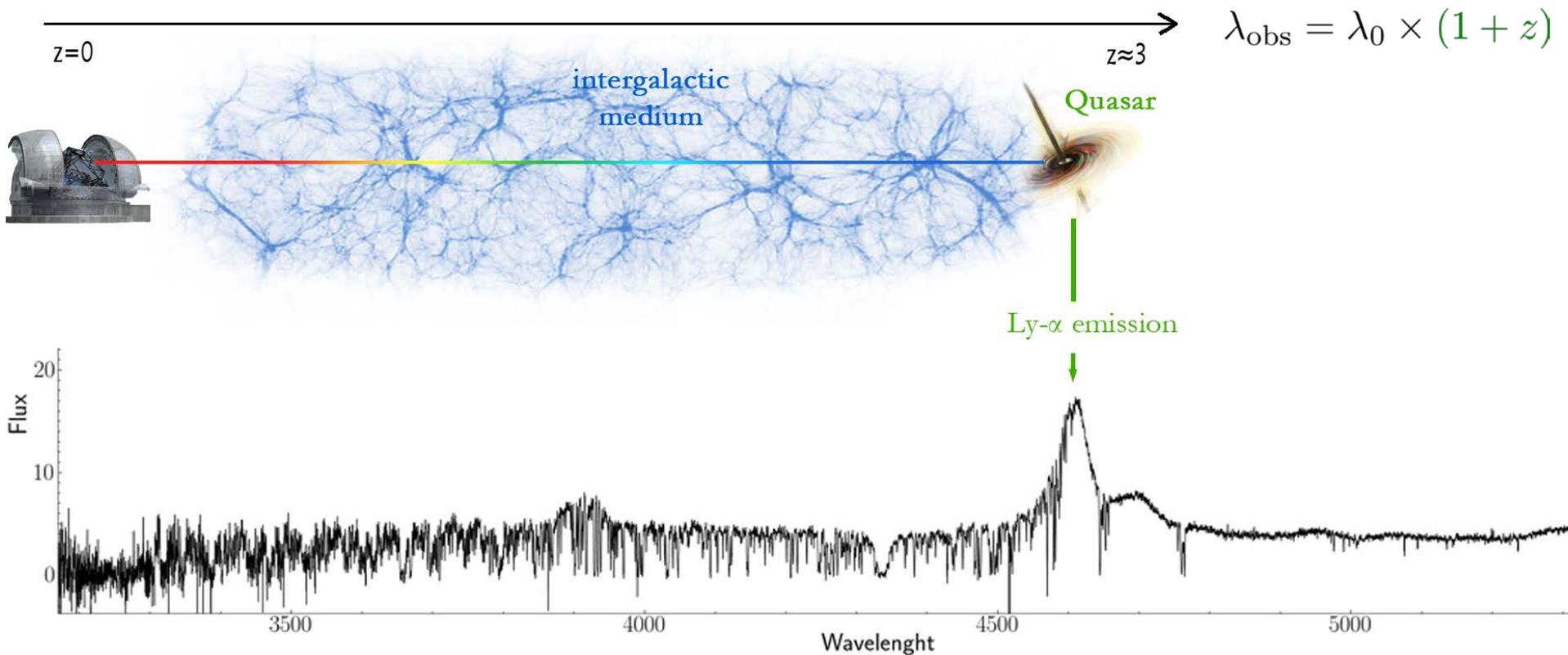
Квазары – активные ядра галактик.

Современные телескопы позволяют детектировать квазары вплоть до $z \sim 7$



Спектроскопия квазаров

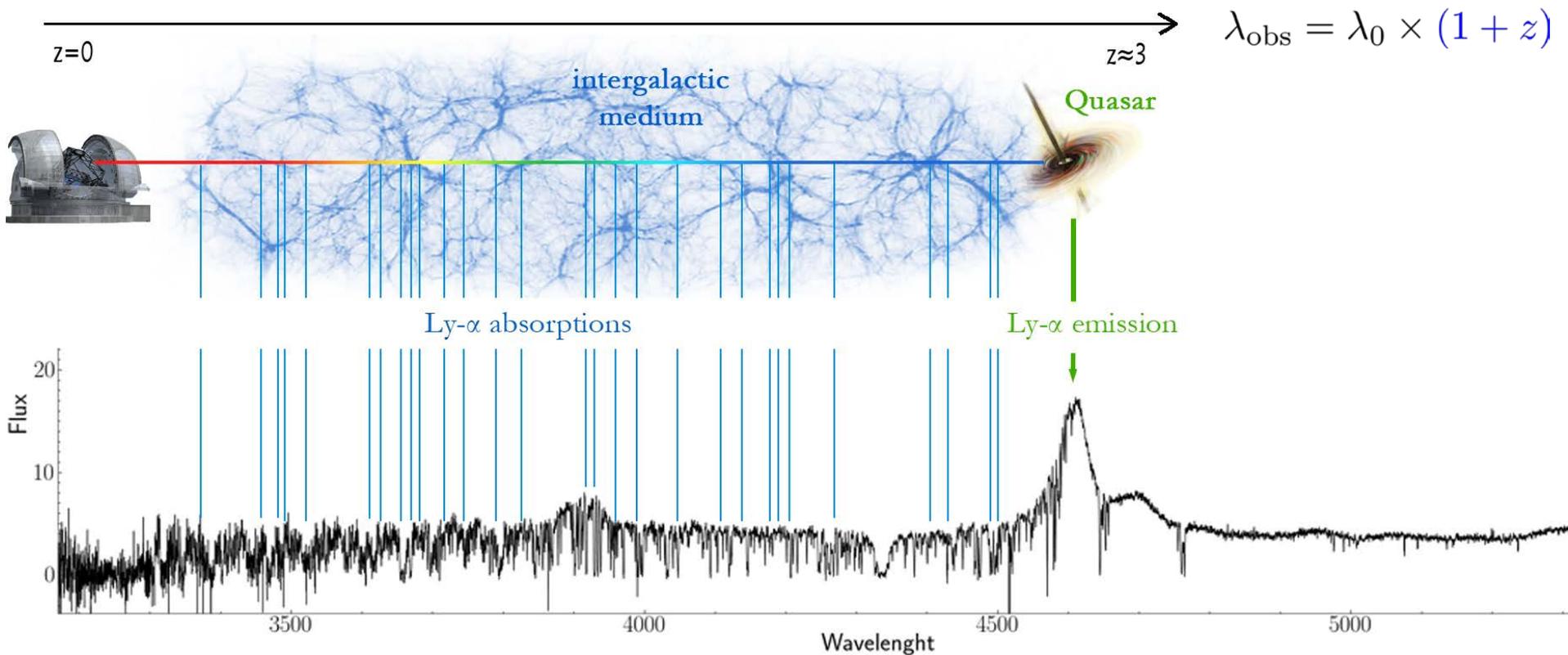
Анализ абсорбционных линий в спектрах квазаров – инструмент для изучения межгалактического и межзвездного вещества во Вселенной



Спектроскопия квазаров

Большинство линий поглощения в спектре квазара:

Лайман-альфа лес – линии Ly α , от межгалактического вещества ($z < z_{\text{QSO}}$)

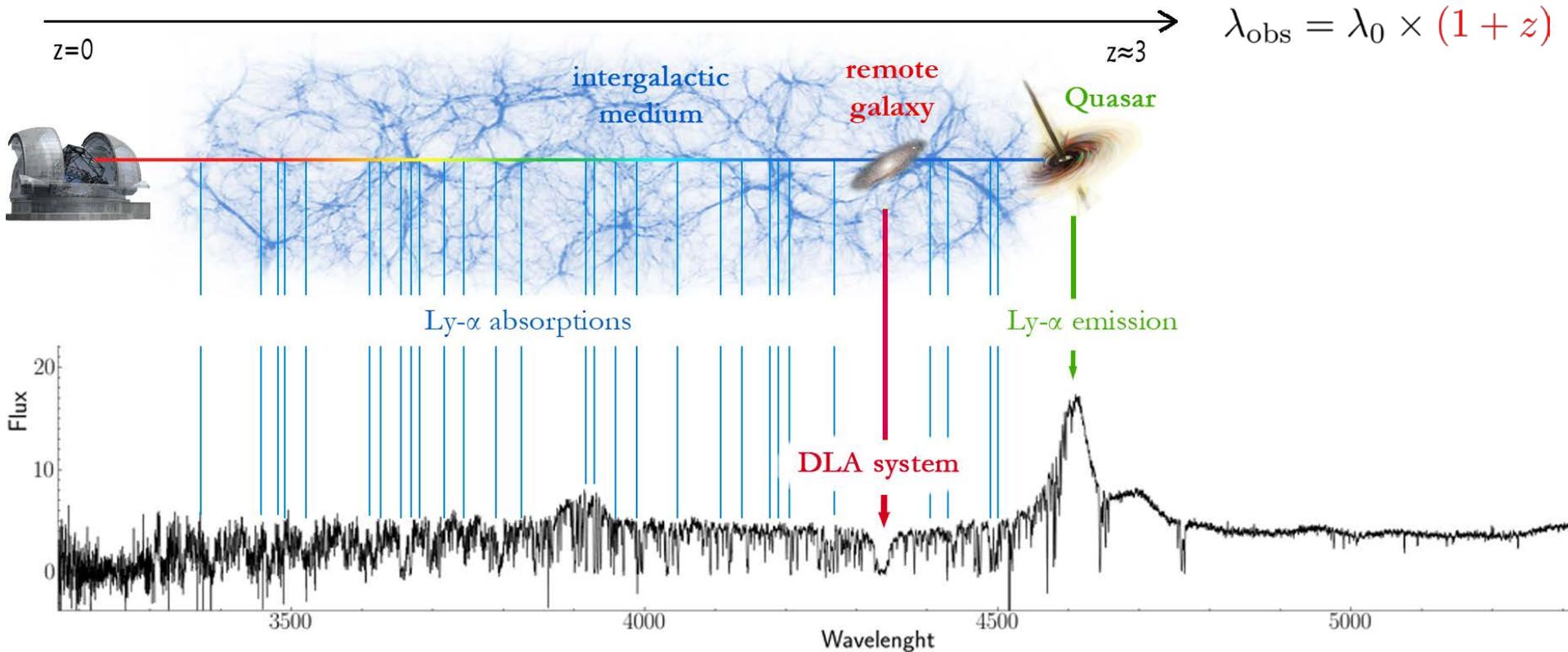


Спектроскопия квазаров. DLA системы

Примерно в $\sim 15\%$ спектрах квазаров может появиться насыщенная линия Ly α :

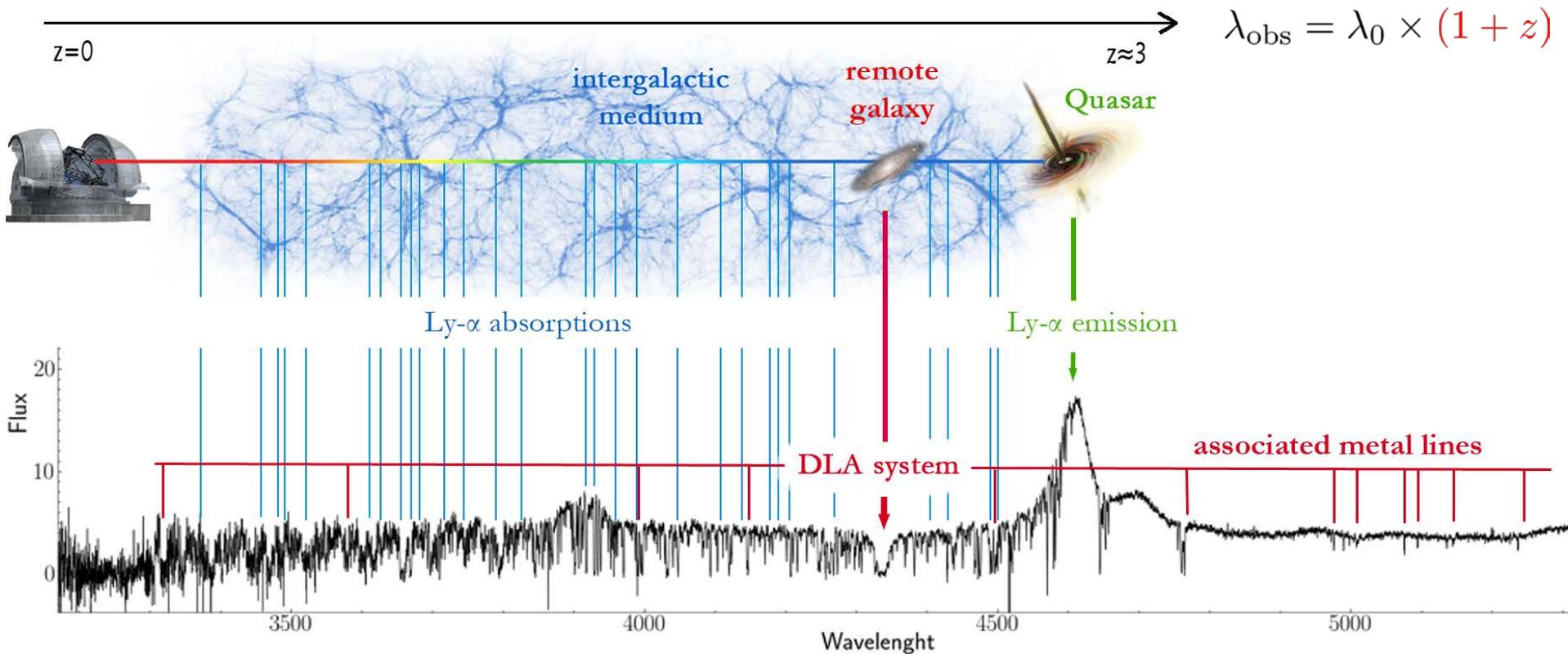
или **Damped Lyman Alpha (DLA)** система

Принятое определение DLA: $\log N(\text{HI}) > 20.3$, N – лучевая концентрация, в cm^{-2}



Спектроскопия квазаров. DLA системы

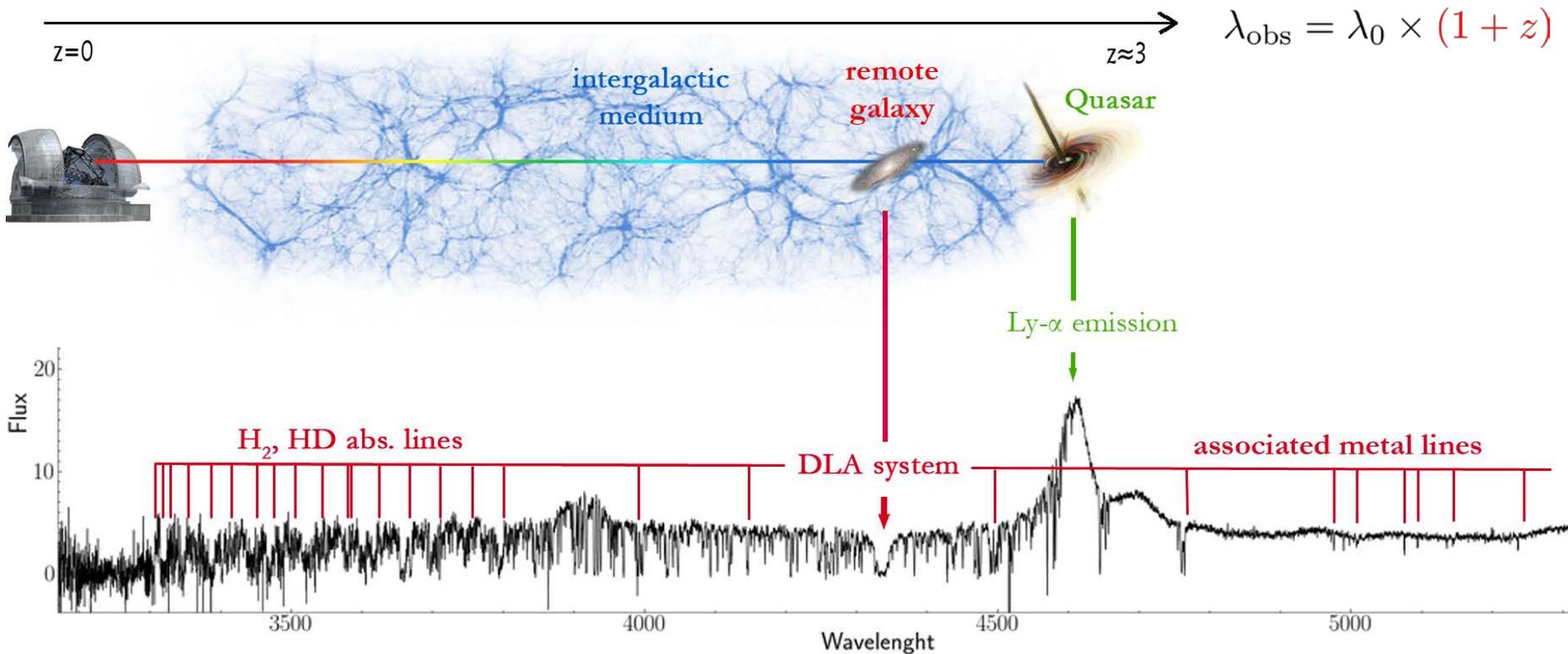
Помимо, линии Ly α в DLA системах обычно детектируется большое количество ассоциированных линий тяжёлых элементов (металлов) в различной степени ионизации: OI, SiII, CII, FeII, AlIII, SiIV, CIV, ...



Спектроскопия квазаров. DLA системы

В <10% DLA систем детектируются ассоциированные линии поглощения молекул H₂, HD и CO.

Эти молекулы относятся к холодной и плотной фазе межзвездного вещества



DLA системы – галактики в ранней Вселенной

Считается, что **DLA** – это галактики или ближайшие окрестности галактик:

1. $\log N(\text{HI}) > 20.3$ – аналог диска спиральных Галактик

2. Главные резервуары атомарного водорода. $\Omega_{\text{HI}}(z)$

3. Линии тяжелых элементов:

- Теплая нейтральная фаза МЗВ
- Металличность \uparrow при $z \downarrow$
- Деплеция металлов на пыли

РЕДКО, <10%

{

4. Прямая идентификация ($\text{Ly}\alpha$, $\text{H}\alpha$, OII , OIII , ...). Звздообразование

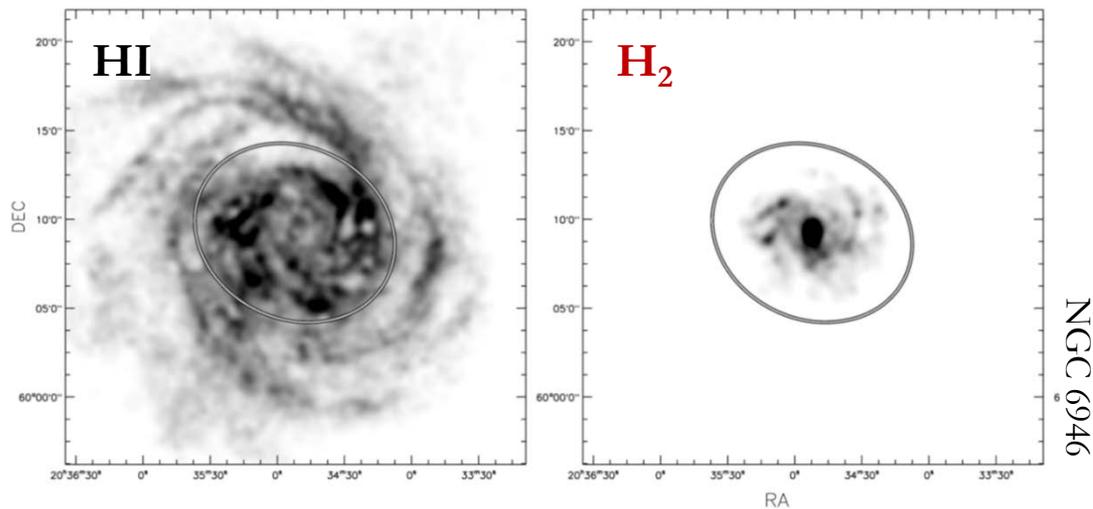
DLA системы. Холодная фаза МЗВ

5. Холодная фаза МЗВ:

- Металлы низкой степени ионизации: **CI**, **CII**, **SiI**, **FeI**, **MgI**
- Молекулы **H₂**, **HD**, **CO**
- Пыль (и 2175Å) – косвенный индикатор

РЕДКО, <10%

Объясняется соотношением сечений атомарного и молекулярного газа:



DLA системы. H₂

- УФ линии поглощения H₂: $\lambda < 1100 \text{ \AA}$ $\times (1 + z)$ \rightarrow Оптический телескоп $z \gtrsim 2$
- Для анализа нужны спектры высокого разрешения:



VLT (UVES)



KECK (HIRES)

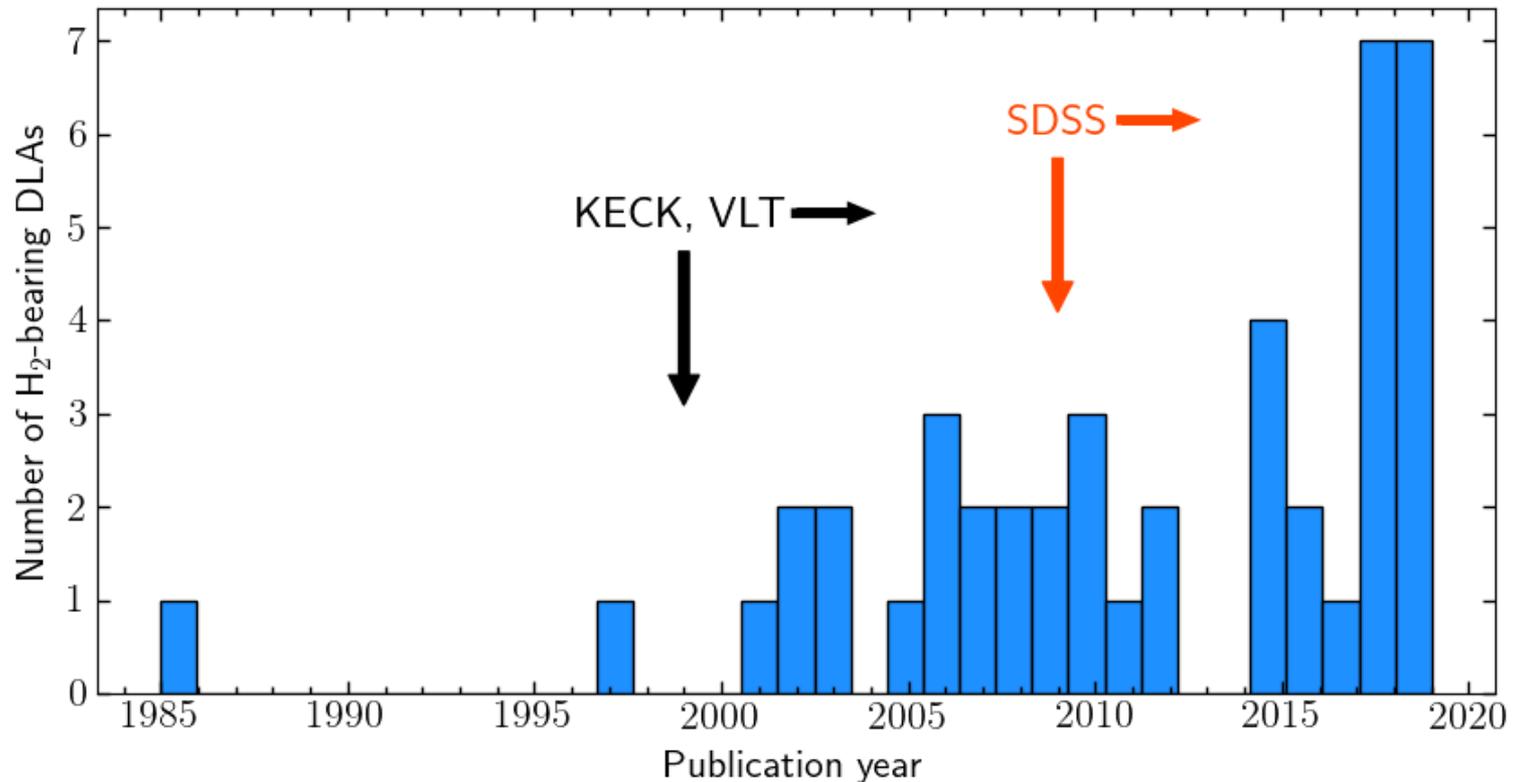


HST (STIS/COS)

- Большинство DLA с H₂ найдено **слепым поиском** (~1985-2010 гг.), что крайне не эффективно с точки зрения наблюдений на крупных оптических телескопах

DLA системы. H_2

- Исследовано ~ 36 систем H_2 с $z > 2$:



- Большинство DLA с H_2 найдено **слепым поиском** (~ 1985 - 2010 гг.), что крайне не эффективно с точки зрения наблюдений на крупных оптических телескопах

Sloan Digital Sky Survey

SDSS – крупнейший спектроскопический обзор:

~ 500,000 квазаров

↓ $z_{\text{em}} > 2.0$

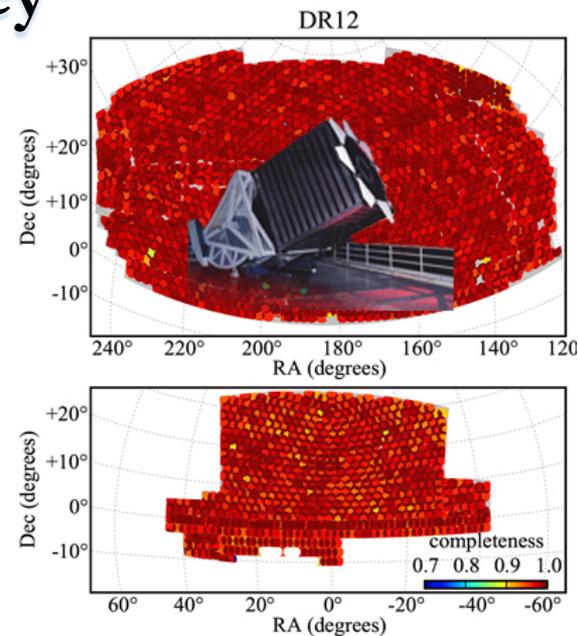
~ 350,000

↓ (Noterdaeme2009+, 2012+ и другие)

~ 40,000 DLAs

? ↓ × 0.05 ~ H₂ в DLA

~ 2000 абсорбционных систем H₂?



Покрытие DR12 BOSS

Sloan Digital Sky Survey

SDSS – крупнейший спектроскопический обзор:

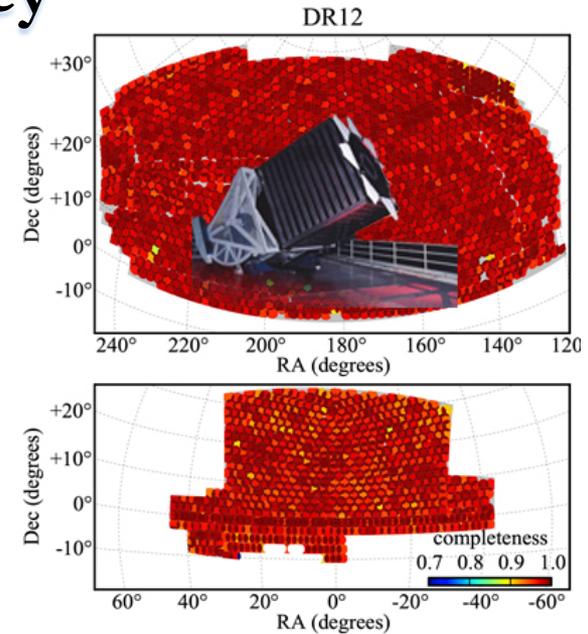
~ 500,000 квазаров

↓ $z_{\text{em}} > 2.0$

~ 350,000

↓ (Noterdaeme2009+, 2012+ и другие)

~ 40,000 DLAs



Покрывтие DR12 BOSS

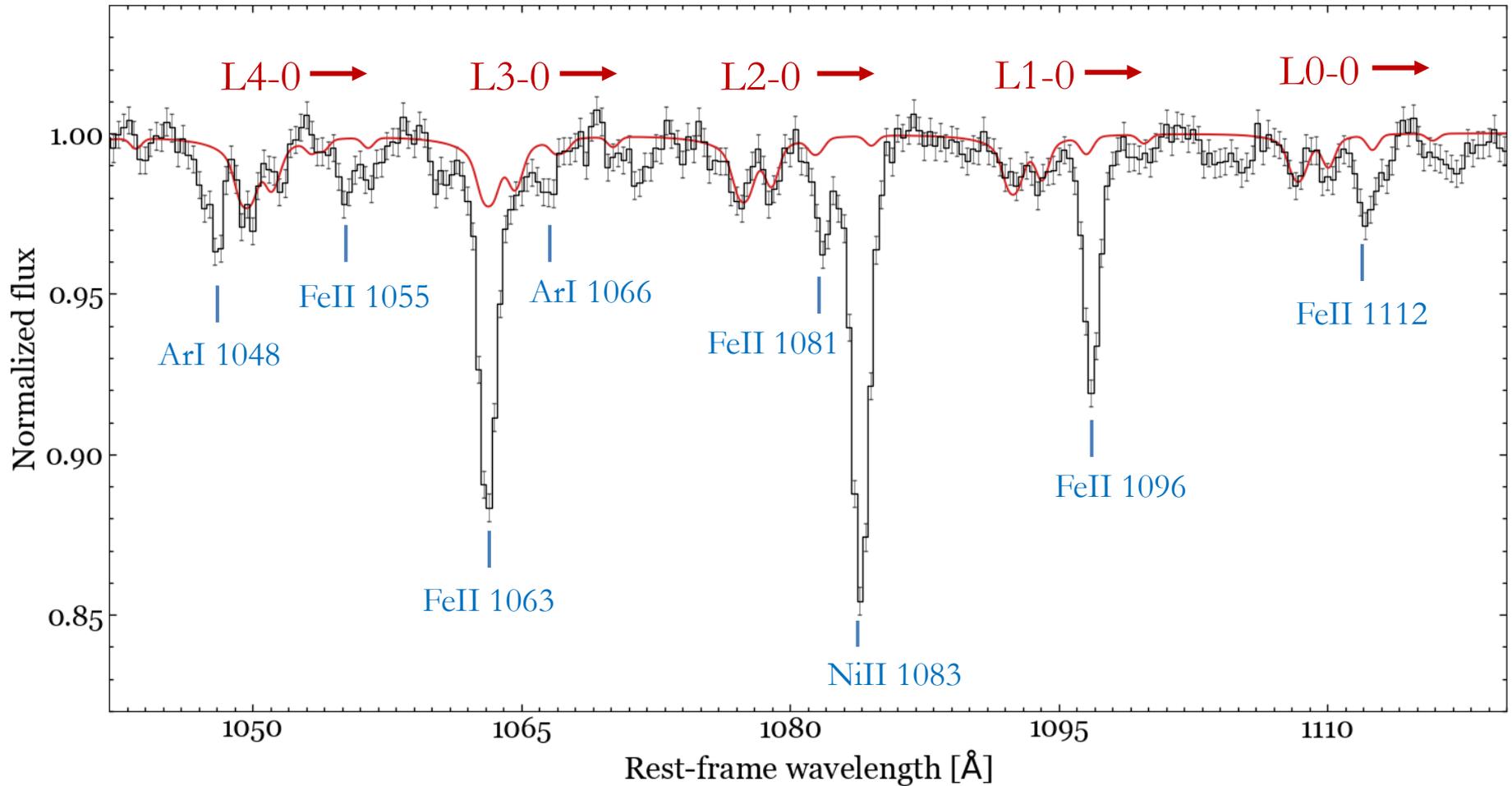
Однако, изучение холодной фазы МЗВ (H_2 , HD, CO, CI) сильно затруднено:

1. Низкий сигнал к шуму ($S/N \sim 3-4$)
2. Спектральное разрешение SDSS ($R \sim 2000$)
3. Ly- α лес

Косполитный спектр DLA

Мы идентифицировали линии H_2 в композитном спектре DLA систем из SDSS

Balashev & Noterdaeme 2018



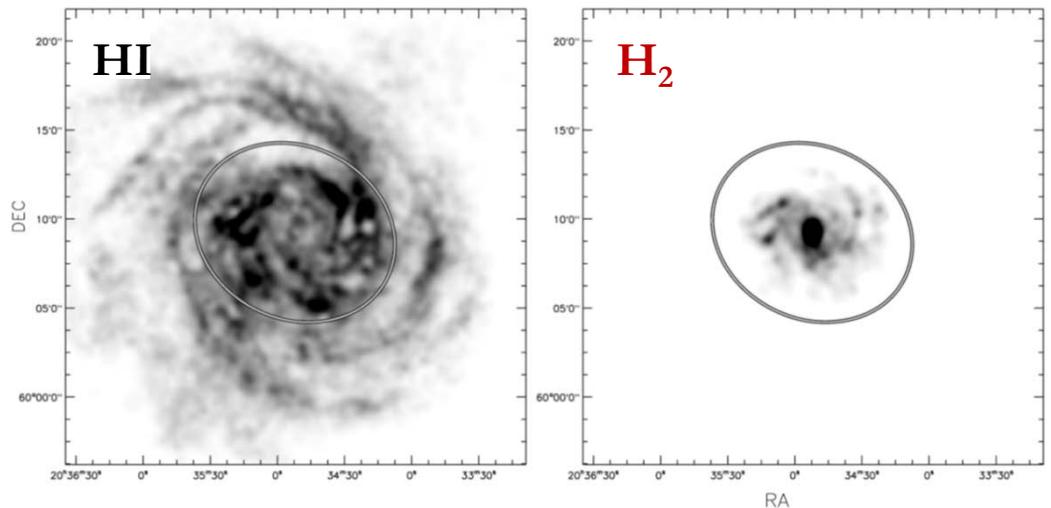
DLA системы. H_2

Это позволило определить, что

$3.5 \pm 1.0 \%$ DLA систем с содержат H_2 (Balashev & Noterdaeme 2018)

- ➔ Обзор VLT : **$< 10\%$** (8 из 77 при $\log N(H_2) > 18$, Noterdaeme2008+)
- ➔ Обзор Magellan **$< 6\%$** (1 из 55 при $\log N(H_2) > 17$, Jorgenson2014+)
- ➔ Обзор SDSS: **$< 7\%$** (для $\log N(H_2) > 19.5$, Balashev2014+)

Т.е. сечение диффузного молекулярного газа ~ 30 меньше сечения атомарного



SDSS. Преселекция H₂

1. **Линии C I** являются трейсером H₂ (Noterdaeme2009+, 2018+)

$$[X/H] \sim 0 \quad \text{CO, 2175\AA, \dots} \quad z < 2$$

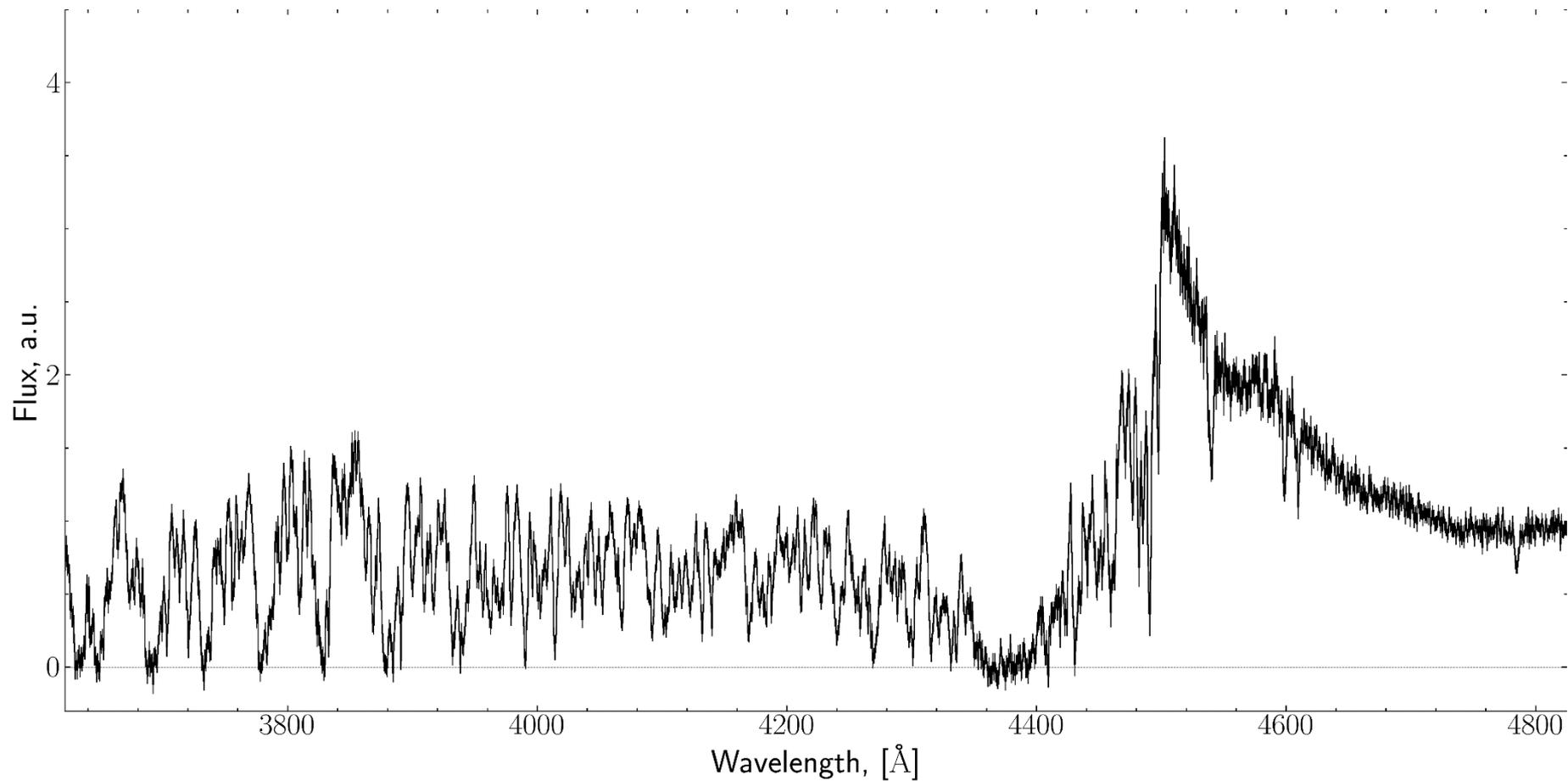
2. **Прямая идентификация H₂** (Balashev2014+, 2017+)

“Репрезентативная” выборка H₂ в DLA системах

3. **По HI: ESDLA** – DLA с $\log N > 21.7$ (Noterdaeme2015+, Ranjan2018+)

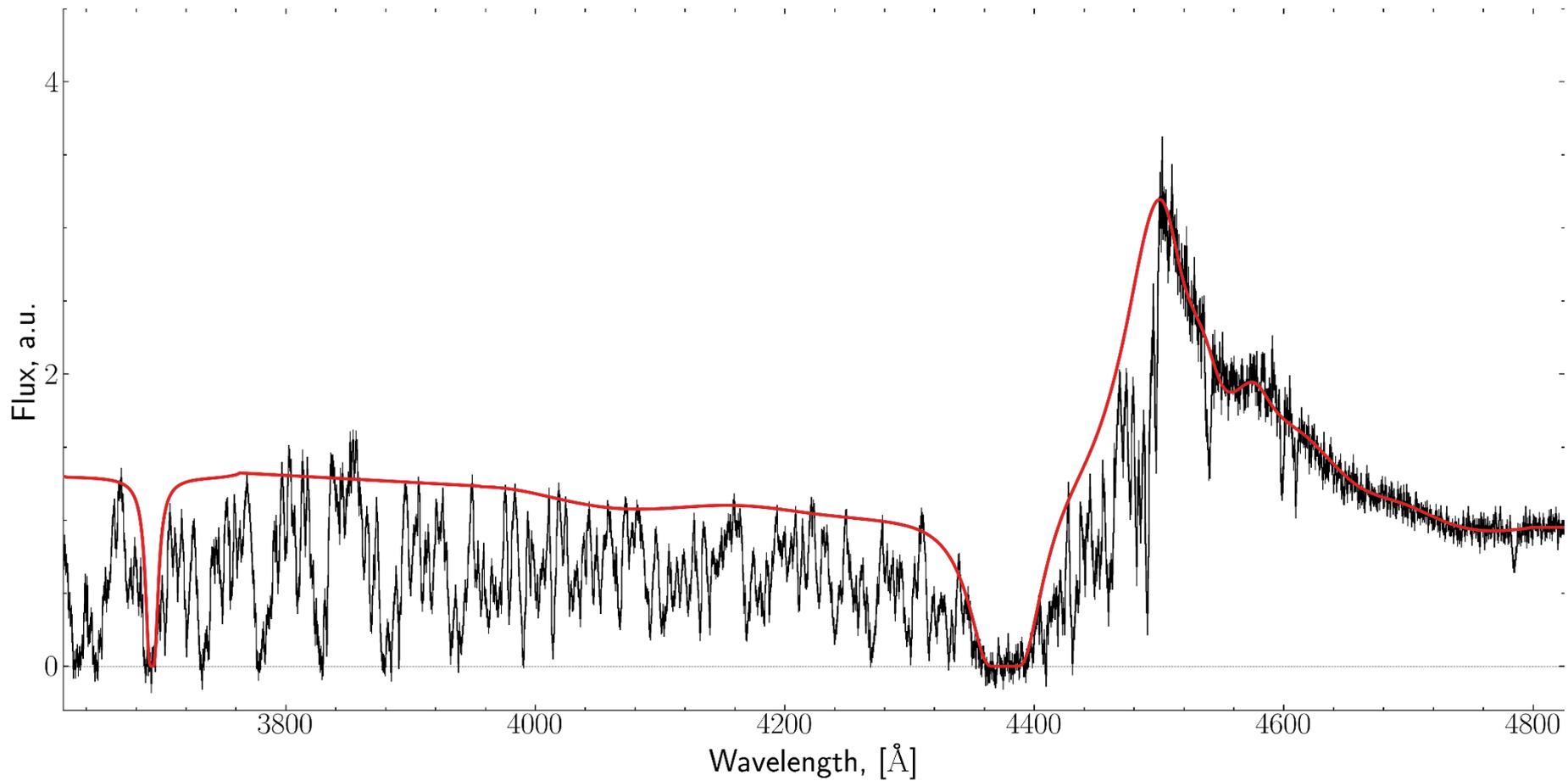
$$\text{Малый прицельный параметр} \quad [X/H] < -1$$

SDSS. Преселекция H₂



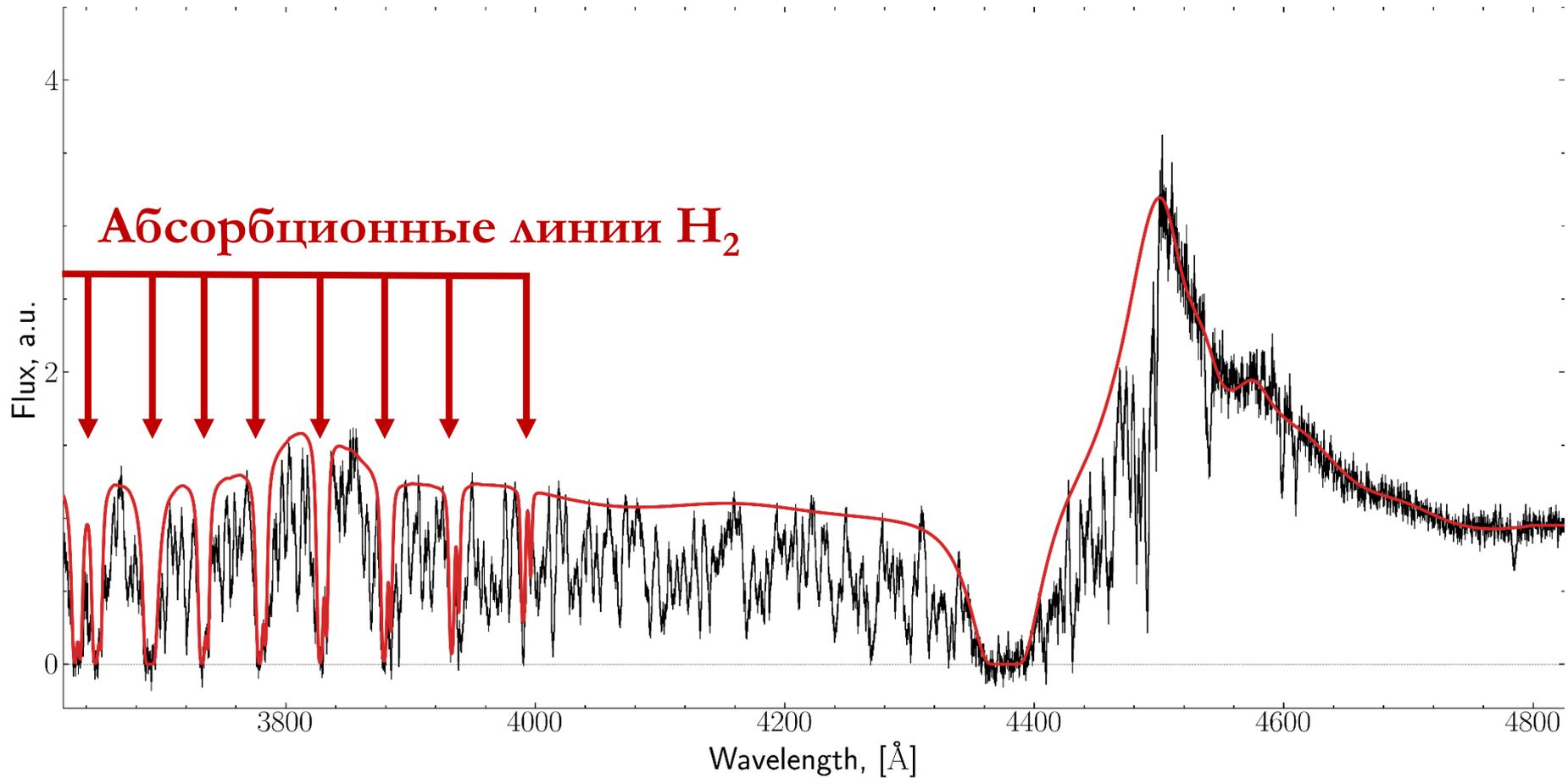
SDSS. Преселекция H₂

Идентификация DLA систем (Prochaska2009+, Noterndame2012+, Parks2018+)



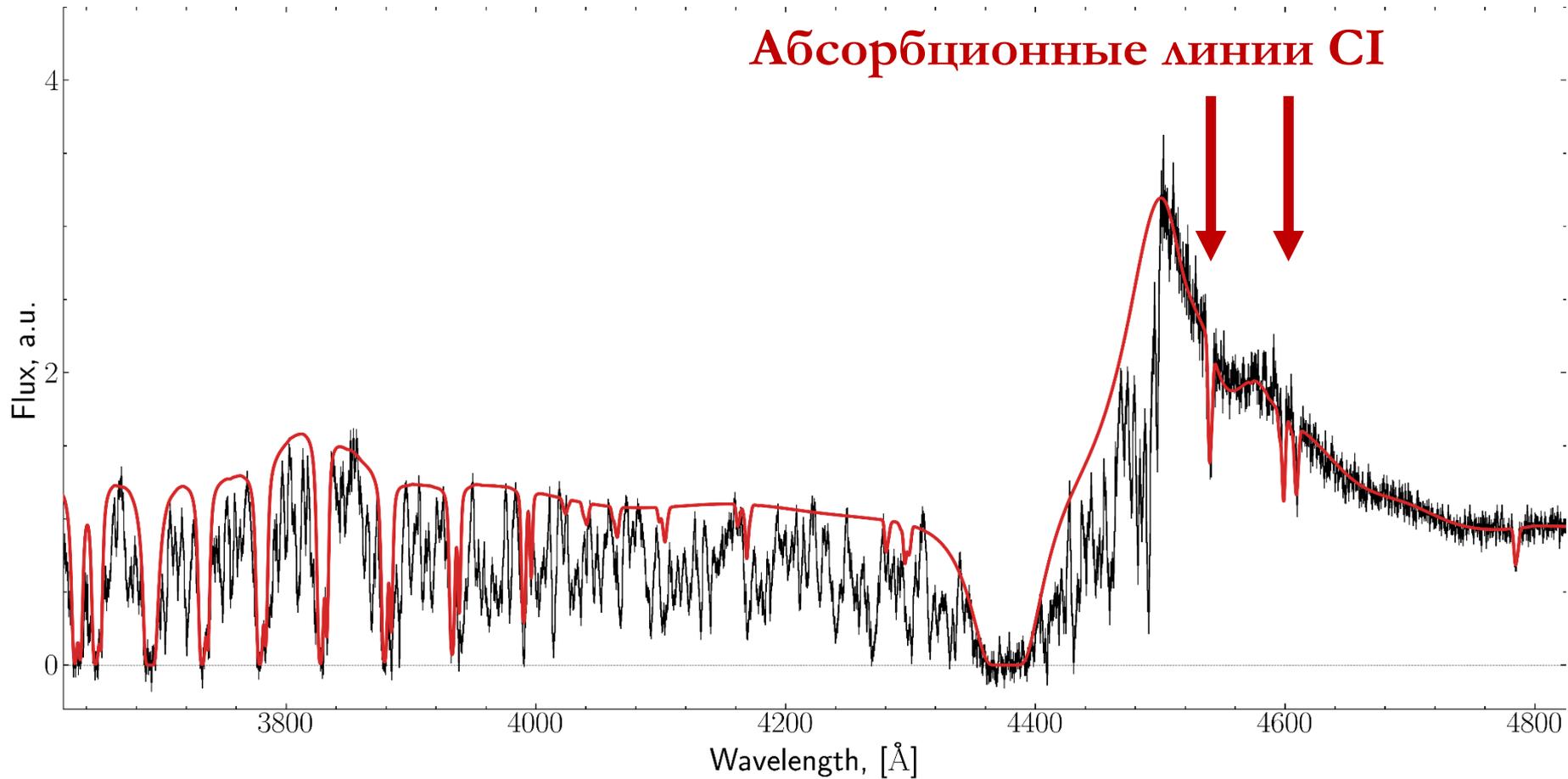
SDSS. Преселекция H_2

1. Прямая идентификация H_2 (Balashev2014+, 2017+)



SDSS. Преселекция H₂

2. Линии C I являются трейсером H₂ (Noterdaeme2009+, 2018+)



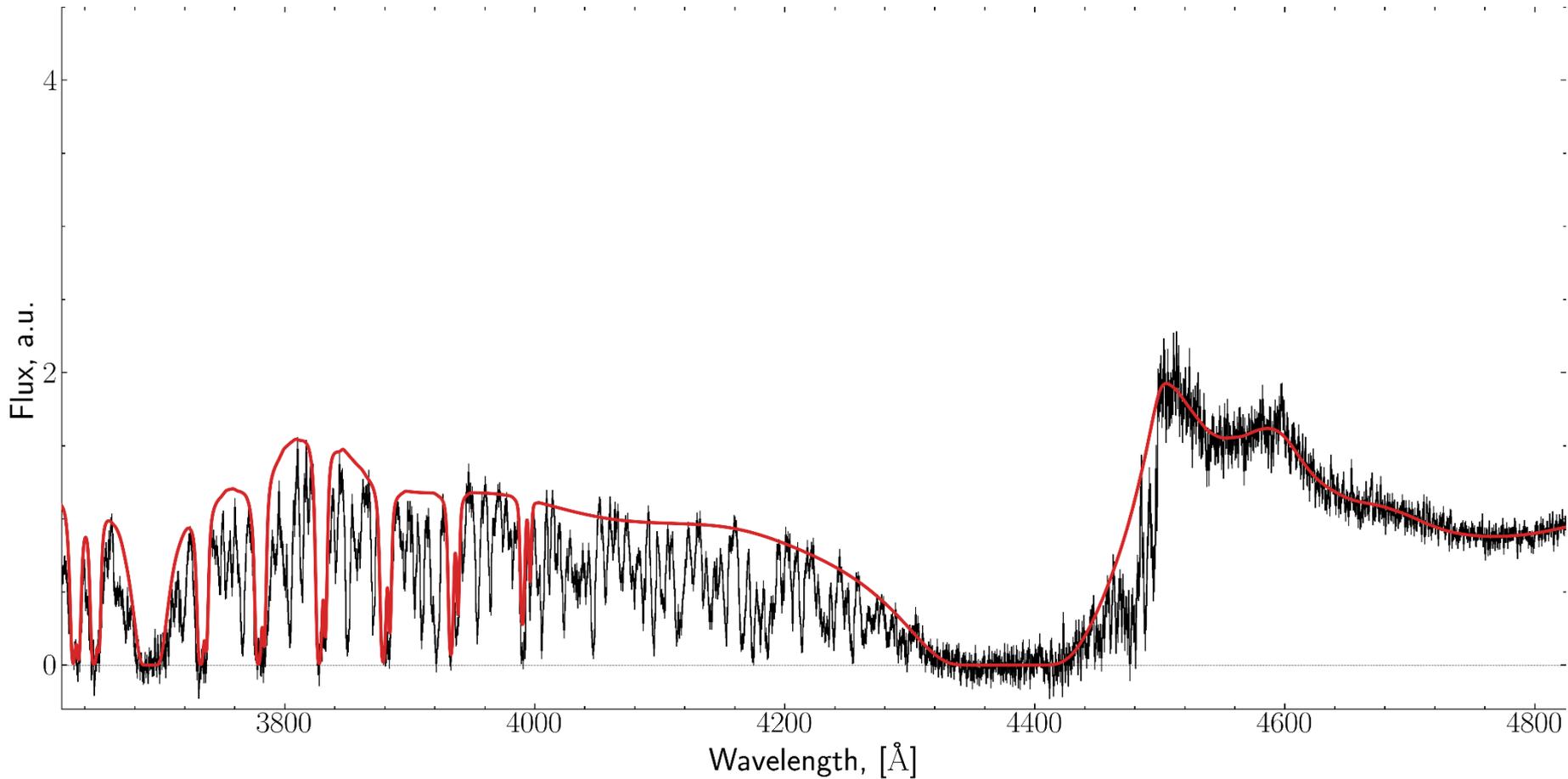
[X/H] ~ 0

CO, $A_V > 0.2$, 2175 Å

$z < 2$

SDSS. Преселекция H₂

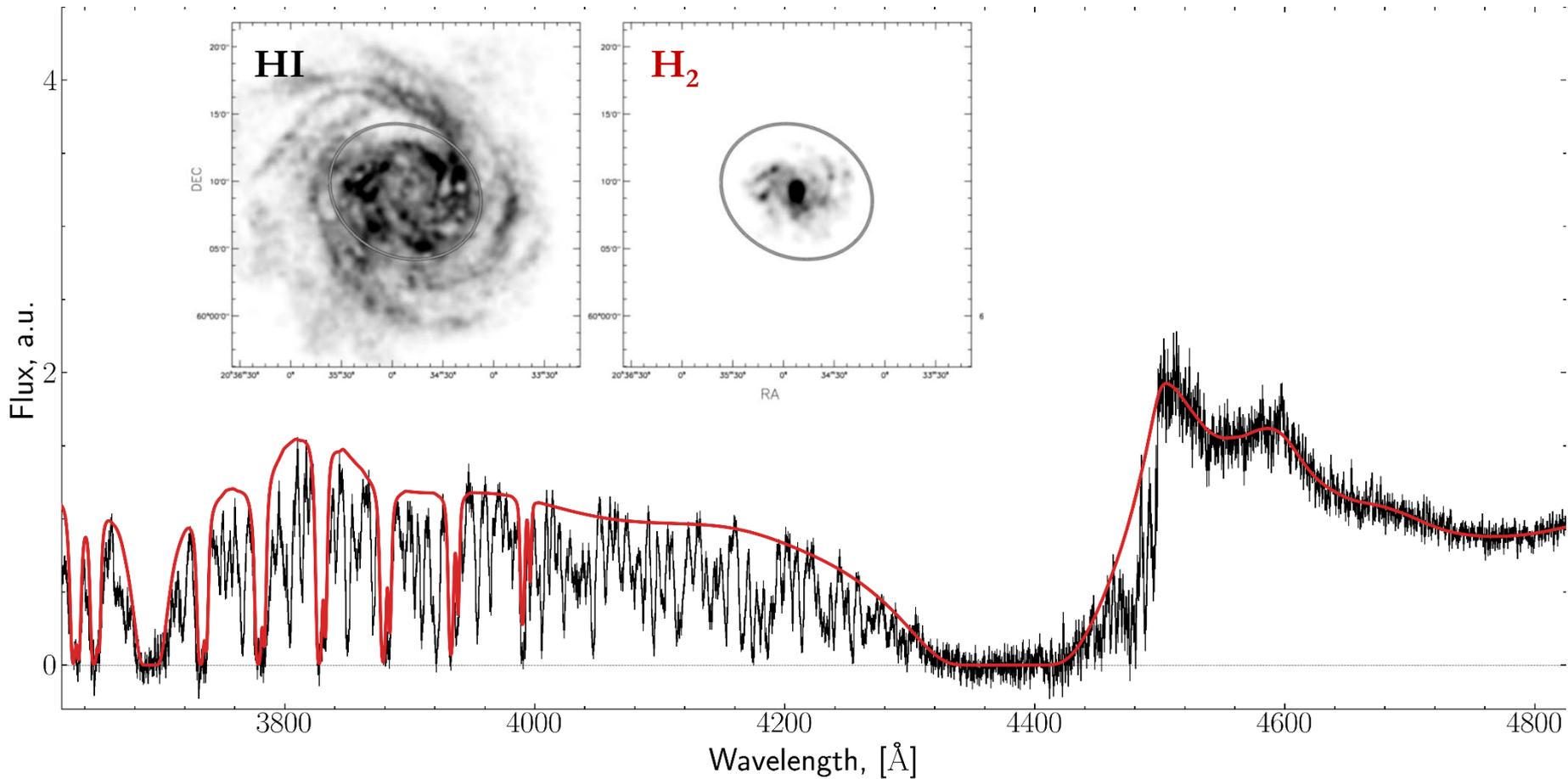
3. Extremely Saturated DLA – $\log N > 21.7$ (Noterdaeme2015+)



Малый прицельный параметр и $[X/H] < -1$

SDSS. Преселекция H₂

3. Extremely Saturated DLA – $\log N > 21.7$ (Noterdaeme2015+)

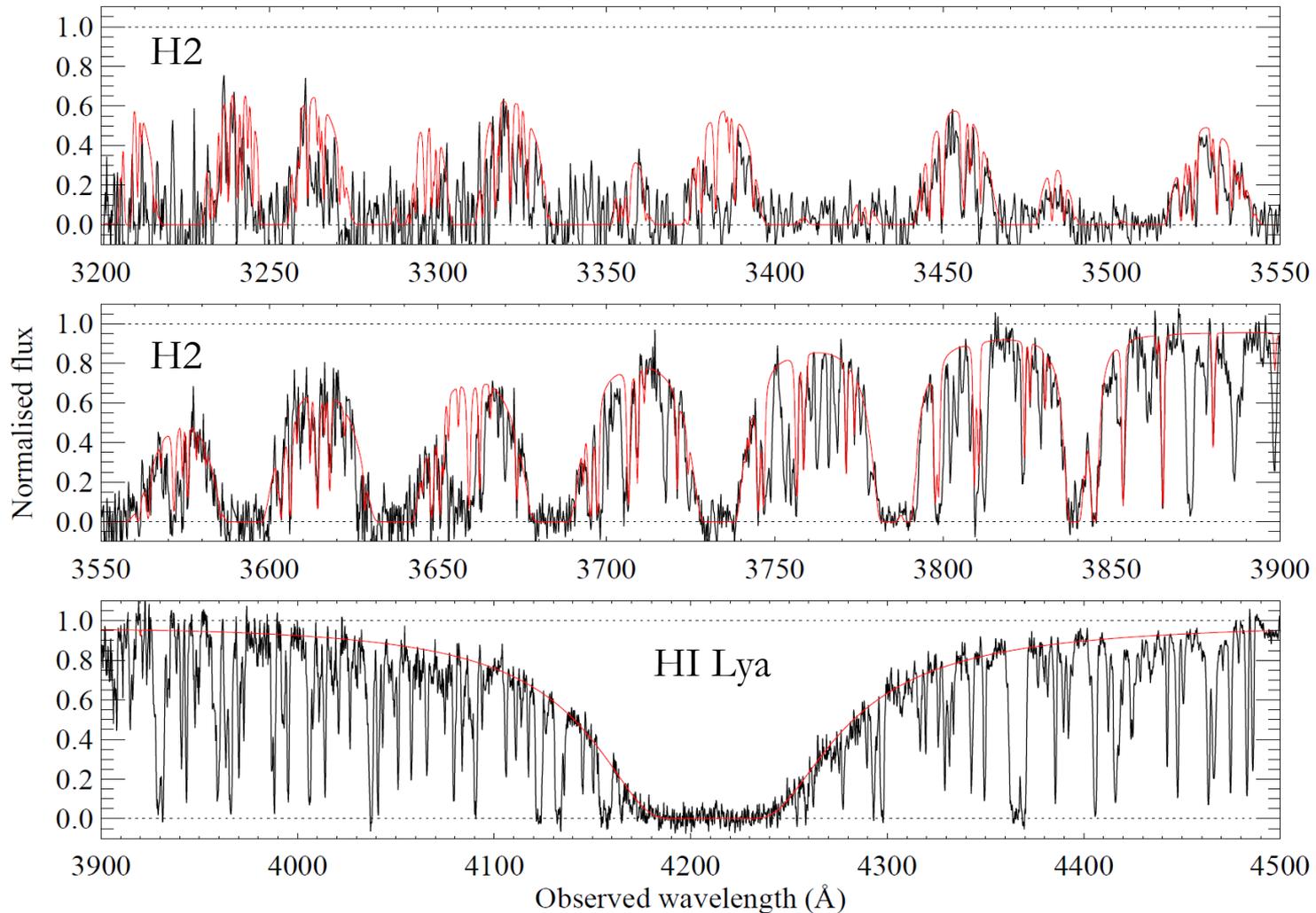


Малый прицельный параметр и $[X/H] < -1$

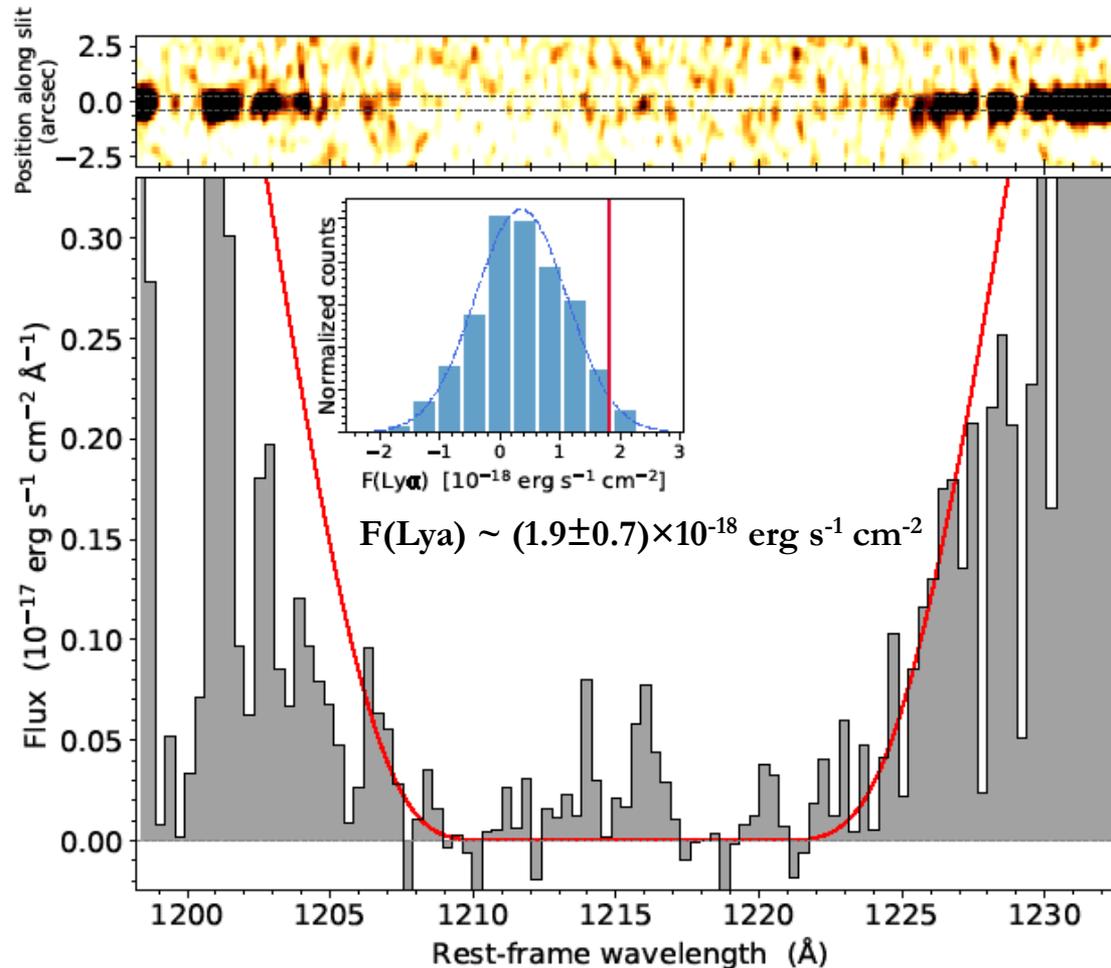
J1513+0352. Ly α эмиссия от DLA (Ranjan2018+)

ESDLA система (похожая на систему в J0843+022, Balashev2017+):

$$\log N(\text{H}_2) = 21.30 \pm 0.14$$



J1513+0352. Ly α эмиссия от DLA (Ranjan2018+)



Прицельный параметр: $b < 2 \text{ kpc}$

Скорость звездообразования: $\text{SFR} > 0.02 M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$

J1513+0352. Конверсия HI/H₂

На основе теоретической работы Sternberg2014+ можно оценить выражение для лучевой концентрации на которой происходит конверсия HI/H₂:

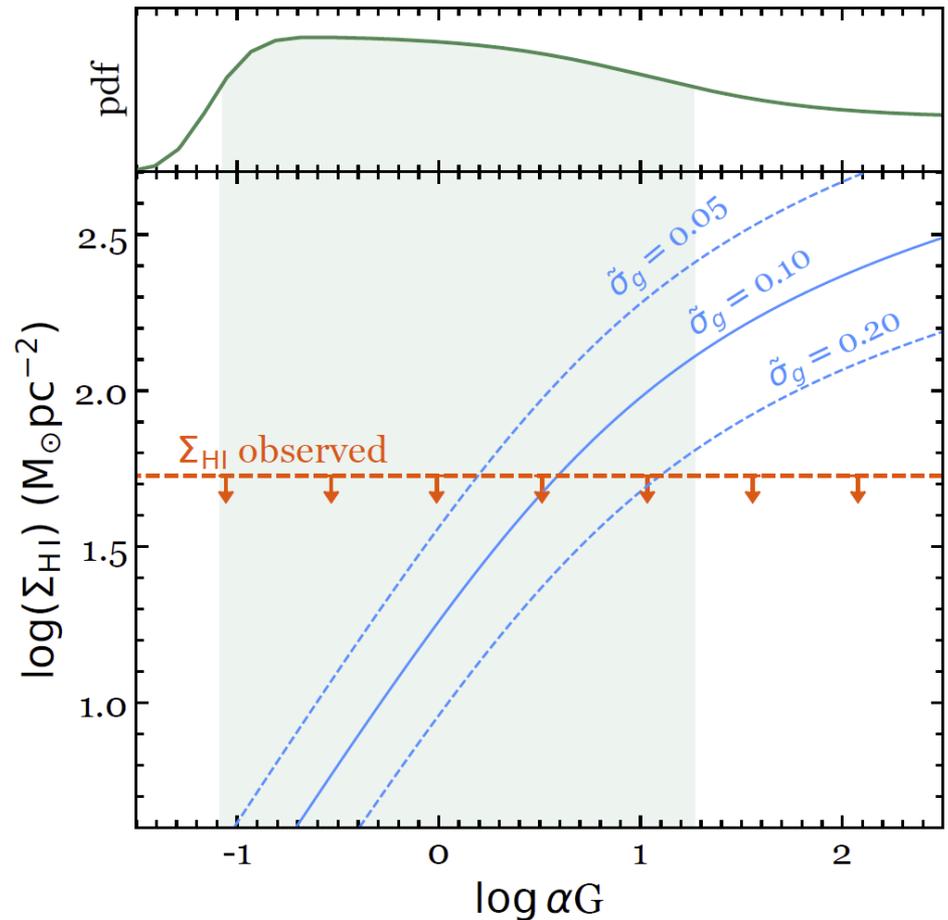
$$\Sigma_{\text{HI}} = \frac{6.71}{\tilde{\sigma}_g} \ln \left(\frac{\alpha G}{3.2} + 1 \right) M_{\odot} \text{pc}^{-2}$$

$$\alpha G = 0.59 I_{\text{UV}} \left(\frac{100 \text{ cm}^{-3}}{n_{\text{H}}} \right) \left(\frac{9.9}{1 + 8.9 \tilde{\sigma}_g} \right)^{0.37}$$

Используя измерения:

- распространённости пыли (σ_g)
- населённость уровней CI (n_{H} и I_{UV})

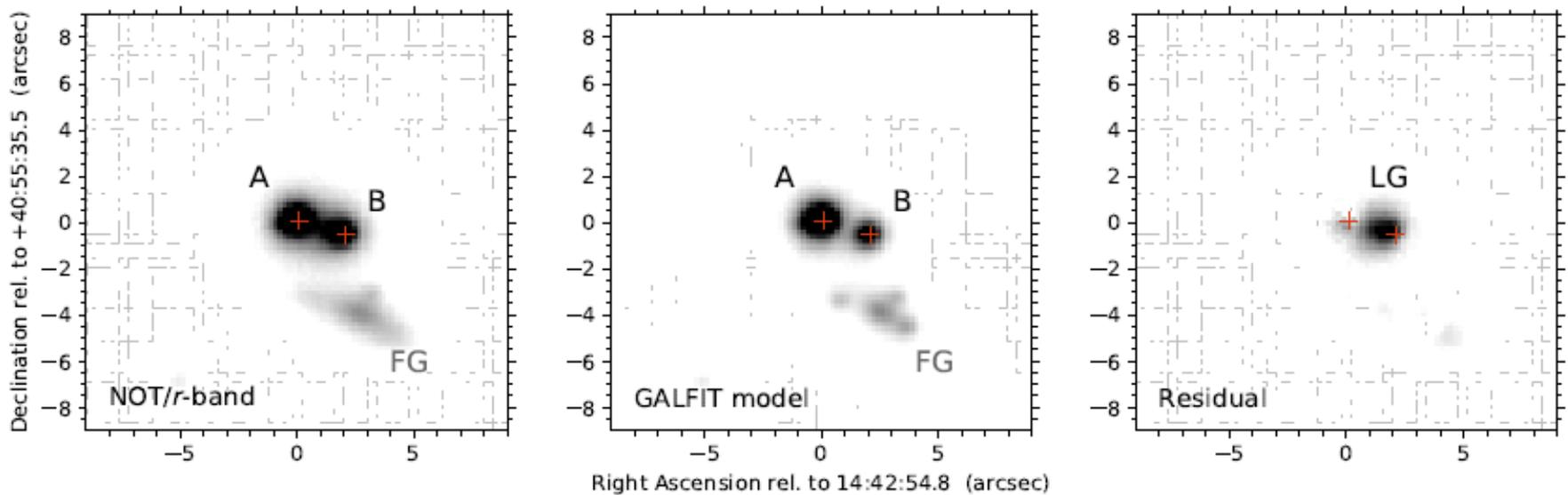
Можно оценить параметр αG



J1442+4055. DLA система в грав. линз. квазаре

(Krogager2018+)

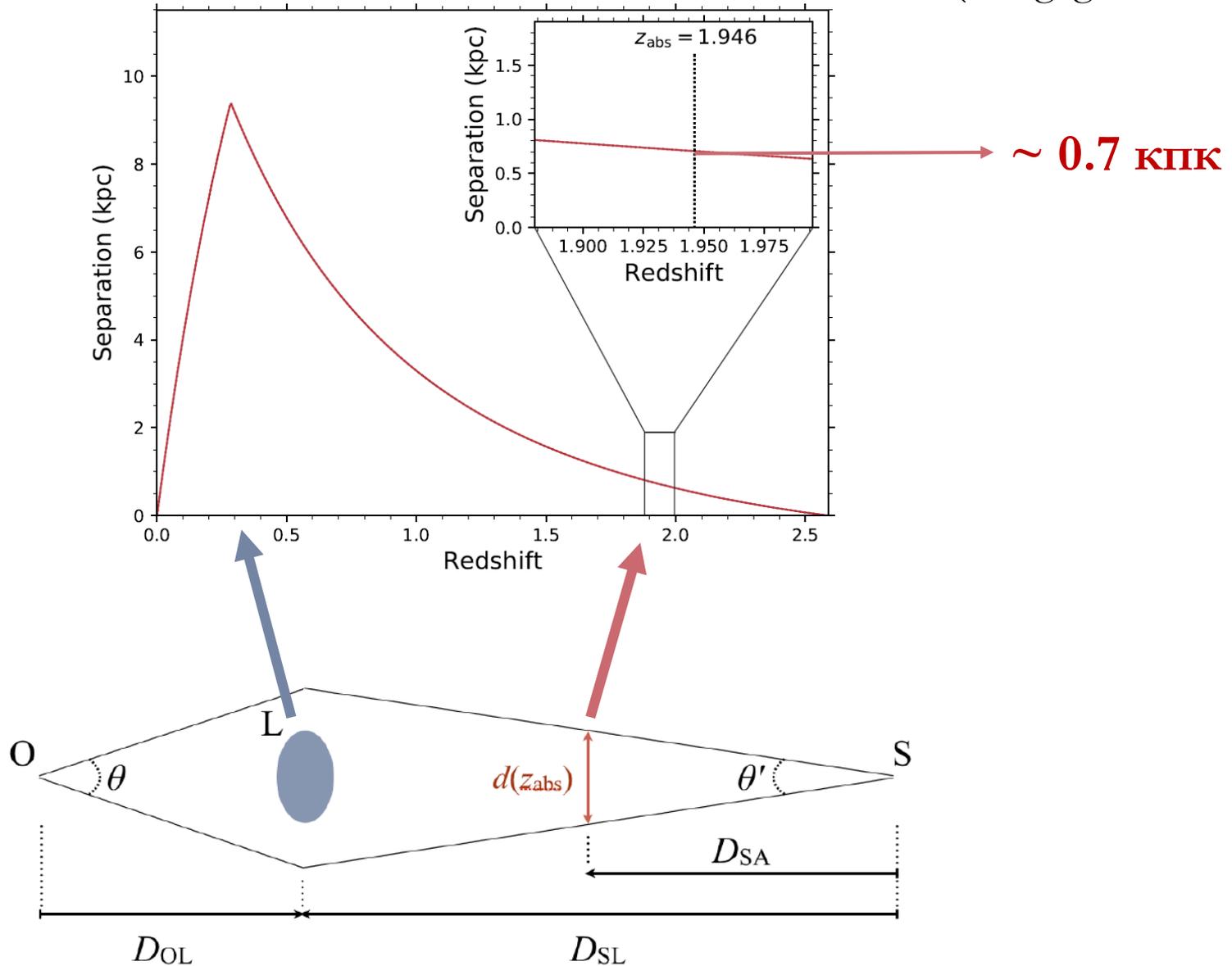
J1442+4055 – квазар с $z_{\text{QSO}}=2.59$, найденный в SDSS, гравитационно-линзированный галактикой на $z_{\text{GAL}}\sim 0.35$:



Спектры обоих изображений J1442+4055 содержат DLA систему ($z_{\text{DLA}}=1.95$), содержащую H_2 и C I , т.е. холодную фазу МЗВ удалённой галактики.

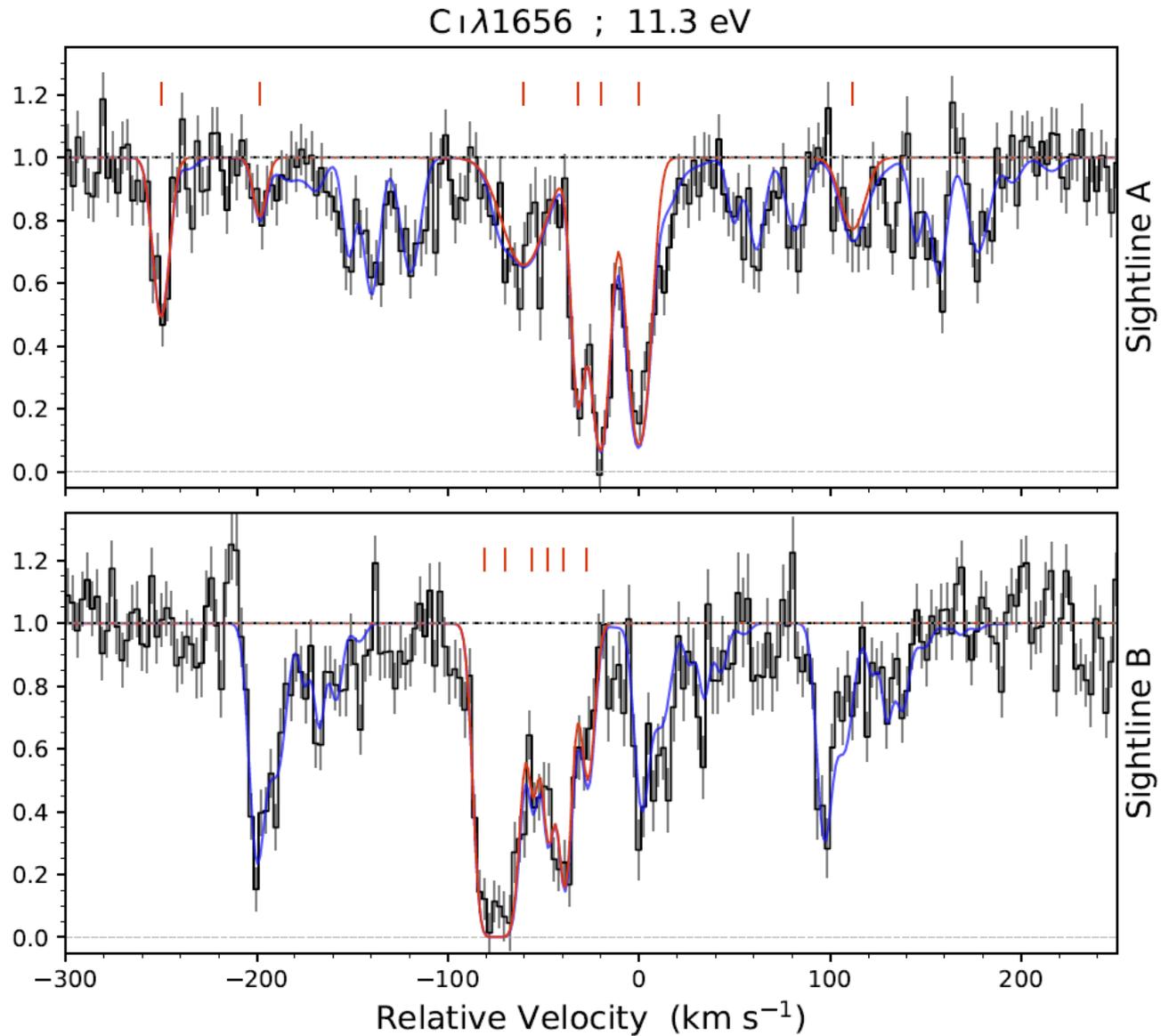
J1442+4055. DLA система в грав. линз. квазаре

(Krogager2018+)



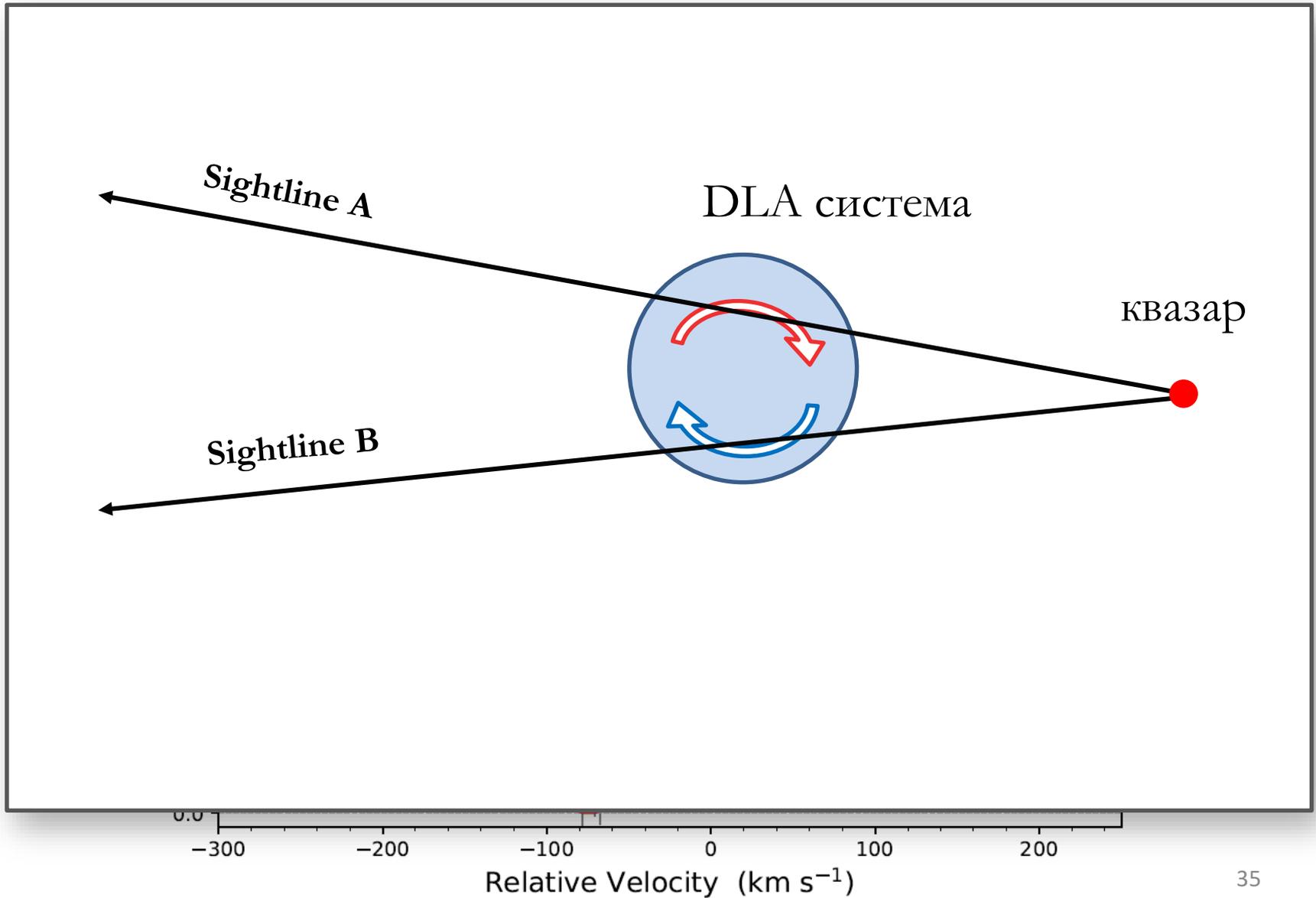
J1442+4055. Холодная фаза МЗВ.

(Krogager2018+)



J1442+4055. Холодная фаза МЗВ.

(Krogager2018+)



J1442+4055. Фактор заполнения для холодного МЗВ

Фактор заполнения холодной фазы:

$$f_{\text{vol}} = N_{\text{clouds}} \cdot \frac{l}{L}$$

Размер DLA системы:

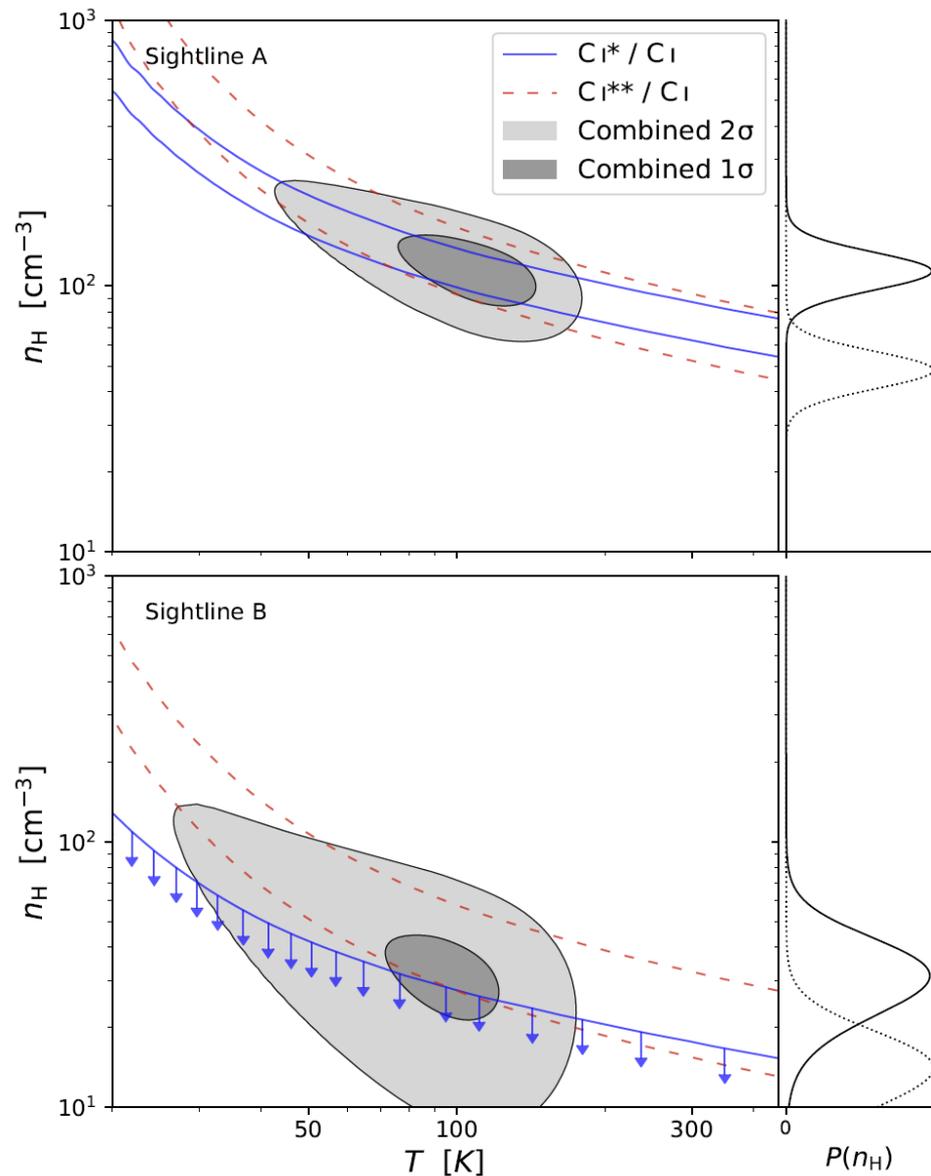
$$L \geq d_{\text{abs}} = 0.7 \text{ кpc}$$

Размер облаков CI:

$$l = \frac{2N_{\text{H}_2}}{n_{\text{H}} \cdot N_{\text{clouds}}}$$

В итоге:

$$f_{\text{vol}} < 0.002$$

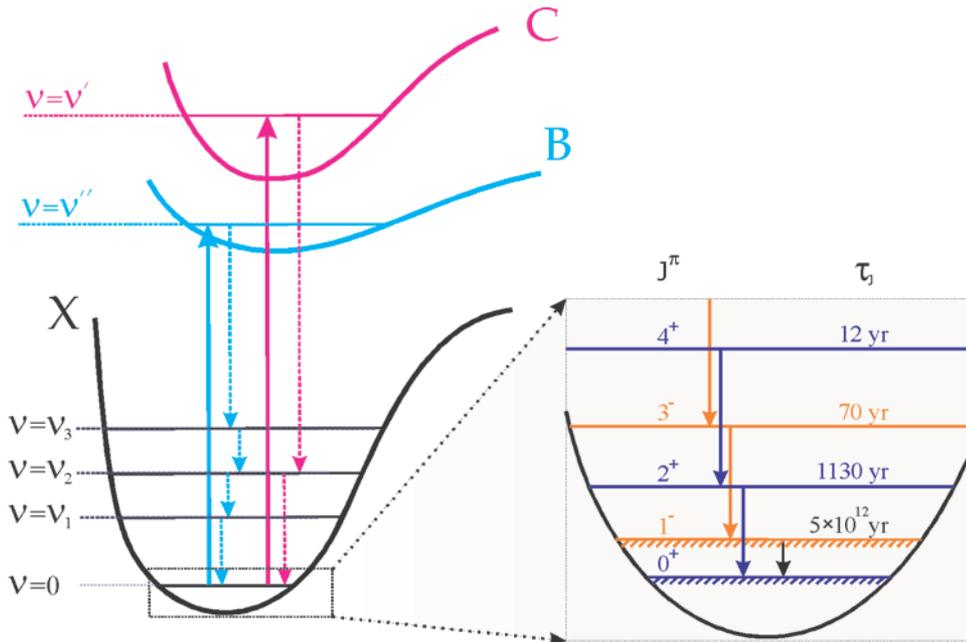


Заключение

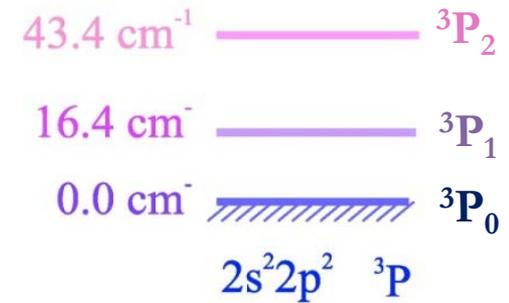
1. Холодная фаза межзвёздного вещества на больших красных смещениях может эффективно изучаться с помощью **DLA систем, содержащих молекулярный водород**
2. **SDSS** – краеугольный камень для решения такой задачи
3. На основе композитного спектра DLA систем с красными смещениями $z > 3$, частота идентификации H_2 в DLA системах равна **$3.5 \pm 1.0 \%$**
4. Относительная населенность уровней атомов и молекул даёт оценку на физические условия в МЗВ галактик ранней Вселенной.
5. Несколько примеров детального изучения **МЗВ на $z > 2$** :
 - “СО-тёмный” газ
 - излучение в линии $\text{Ly}\alpha$ от DLA системы
 - $\text{C I}/\text{H}_2$ в гравитац.-линзированном квазаре

Холодная фаза МЗВ. Определение физ. условий

Структура уровней H_2 :



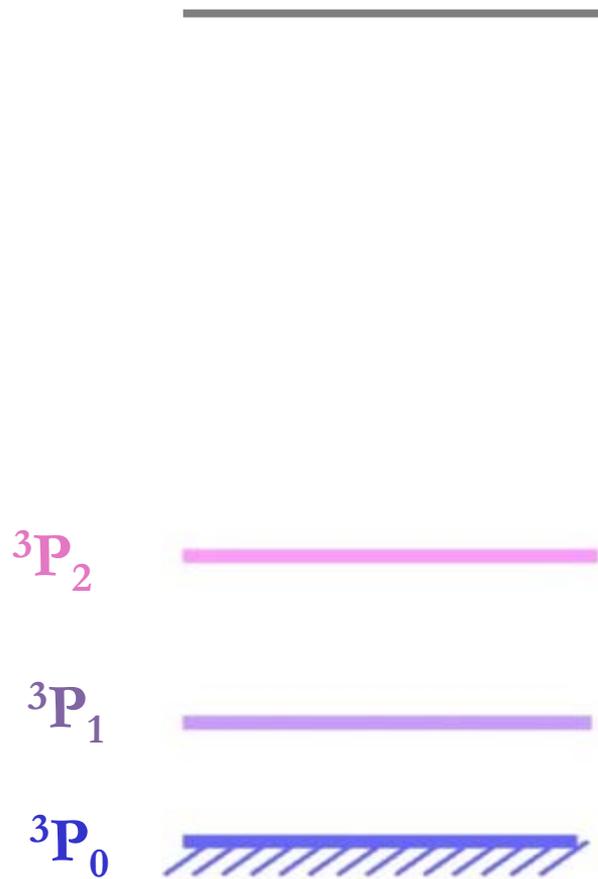
Уровни тонкой структуры Cl :



Для оценки локальных физических условий в среде можно использовать относительную населённость уровней атомов и молекул.

Холодная фаза МЗВ. Определение физ. условий

Населённость уровней CI определяется:

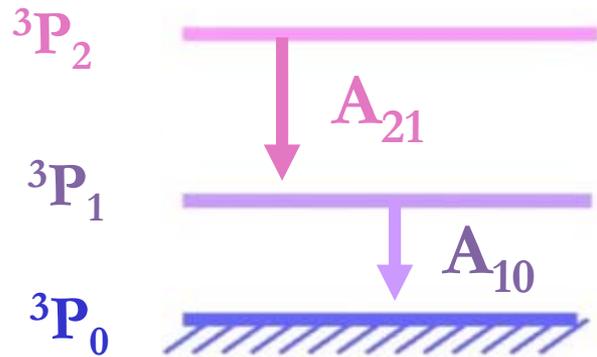


Уровни тонкой структуры CI

Холодная фаза МЗВ. Определение физ. условий

Населённость уровней СІ определяется:

1. Спонтанные переходы



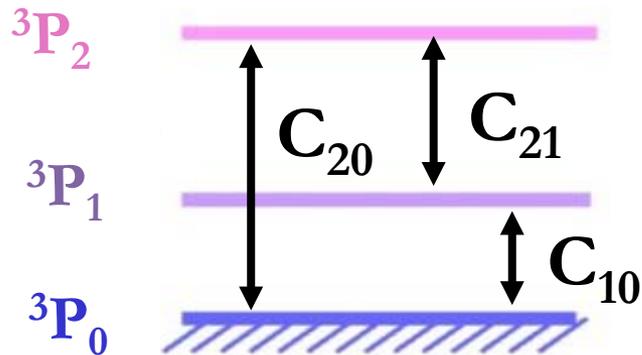
Уровни тонкой структуры СІ

Холодная фаза МЗВ. Определение физ. условий

Населённость уровней CI определяется:

1. Спонтанные переходы
2. Столкновения

плотность, температура



Уровни тонкой структуры CI

Холодная фаза МЗВ. Определение физ. условий

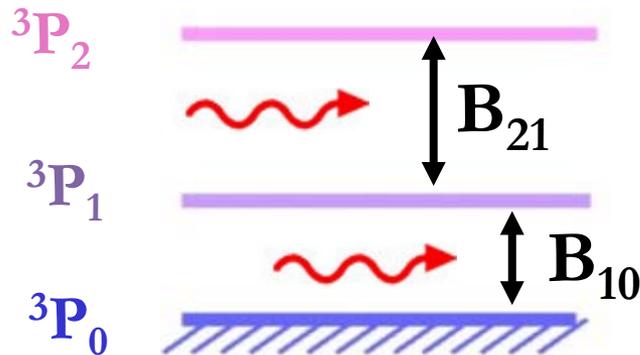
Населённость уровней CI определяется:

1. Спонтанные переходы
2. Столкновения

плотность, температура

3. Прямые радиативные переходы

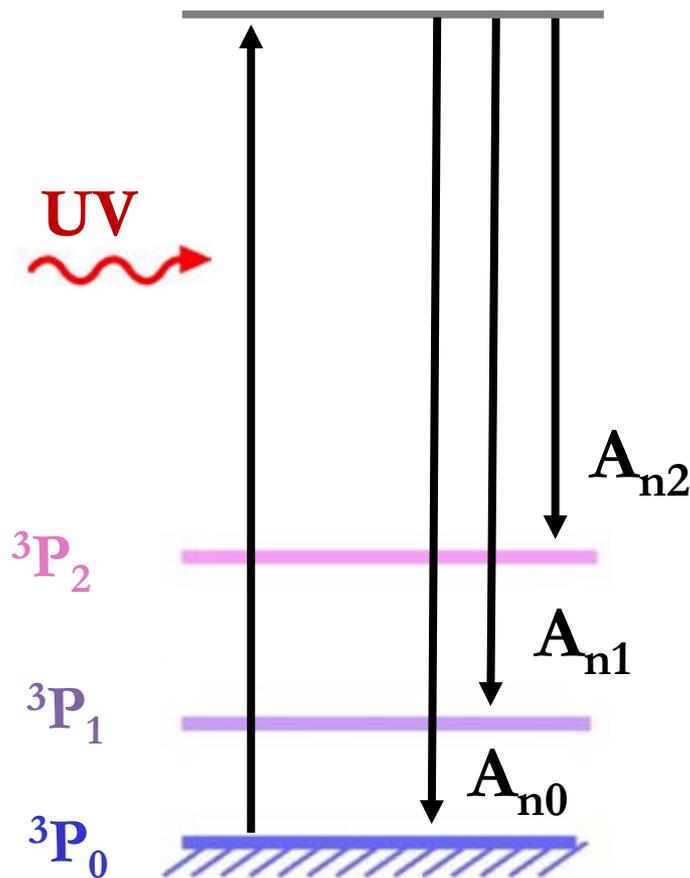
СМВ



Уровни тонкой структуры CI

Холодная фаза МЗВ. Определение физ. условий

Населённость уровней CI определяется:



1. Спонтанные переходы

2. Столкновения

плотность, температура

3. Прямые радиативные переходы

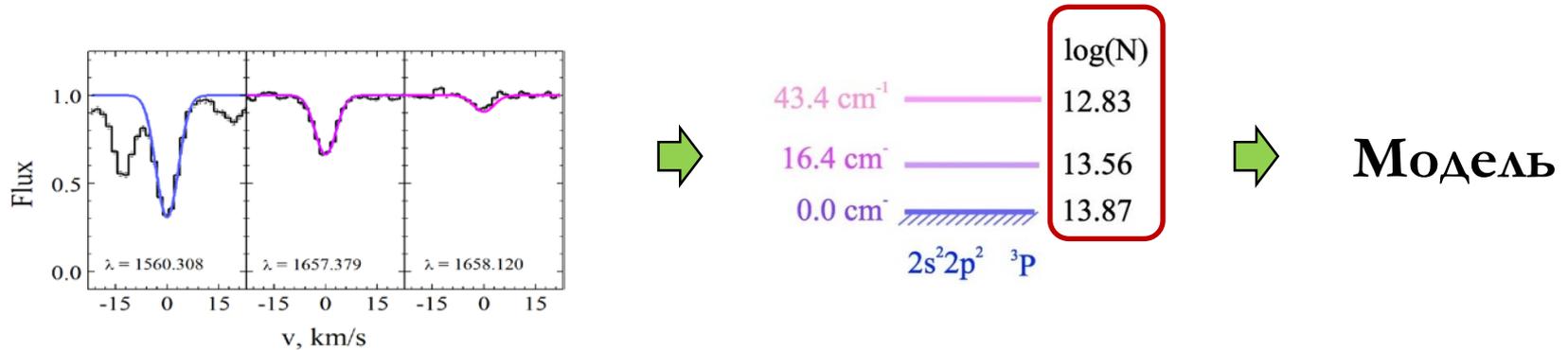
СМВ

4. Радиативная накачка

УФ фон

Уровни тонкой структуры CI

Холодная фаза МЗВ. Определение физ. условий

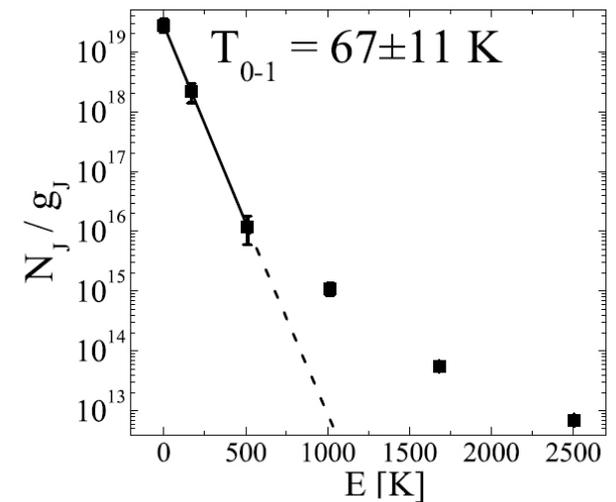
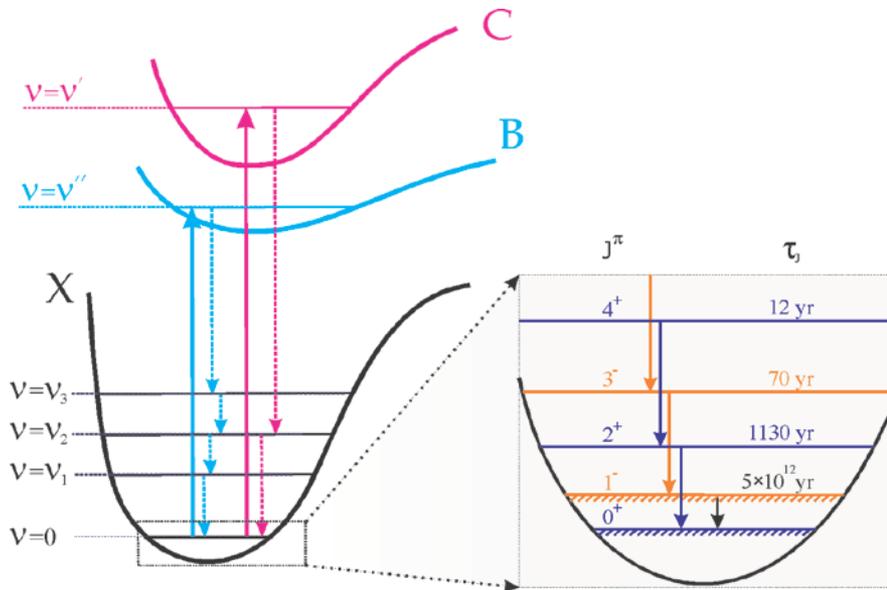


уровни	температура	плотность	фон УФ	СМВ
Тонкая структура Cl	+/-	+	+/-	?
Вращательные H ₂	+	+/-	+/-	
Вращательные HD		+		
Вращательные CO	+/-	+/-		+

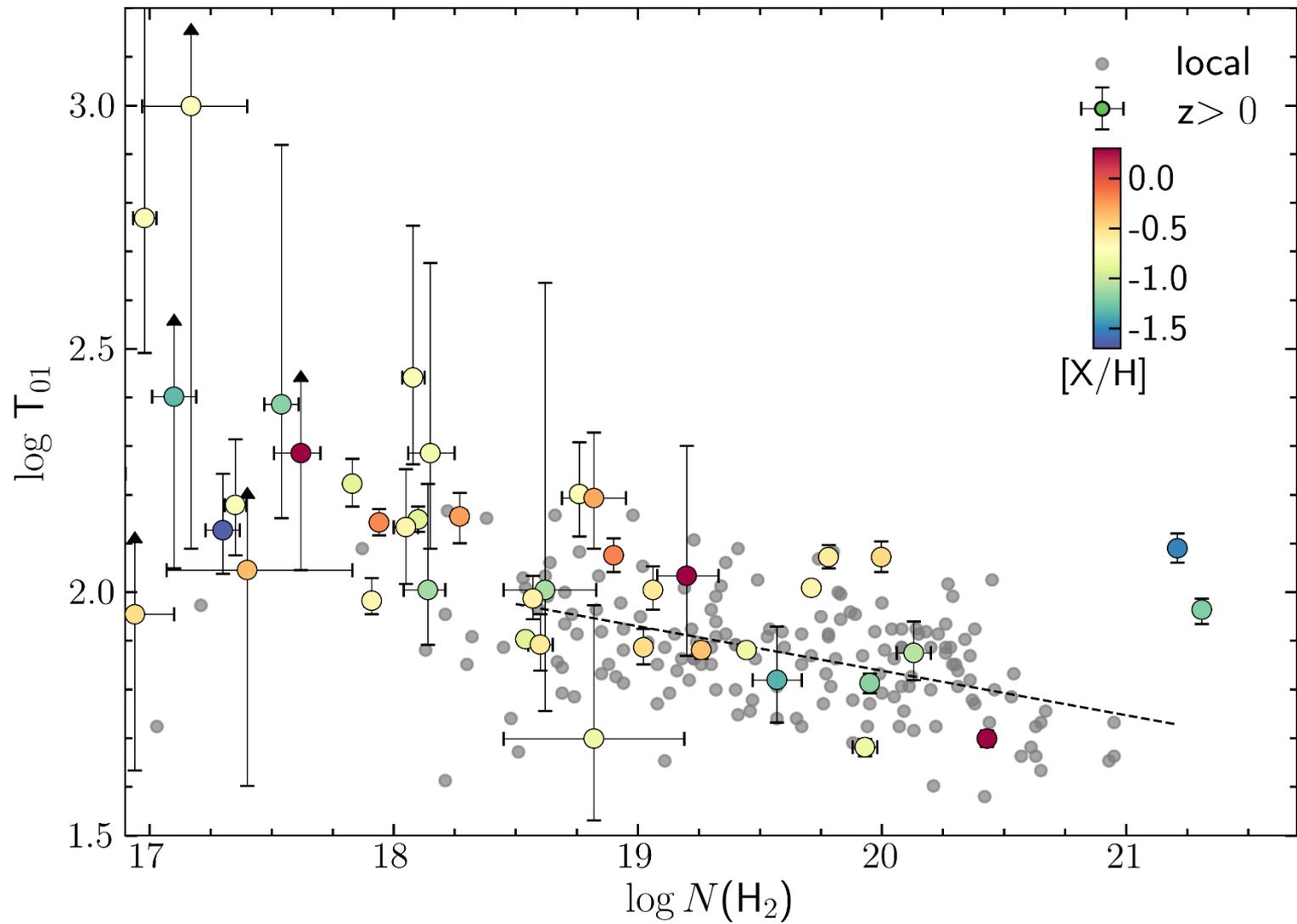
Кинетическая температура. T_{01}

Кинетическая температура в МЗВ может быть оценена на основе относительной населенности $J=1/J=0$ вращательных уровней H_2 (орто-пара водорода)

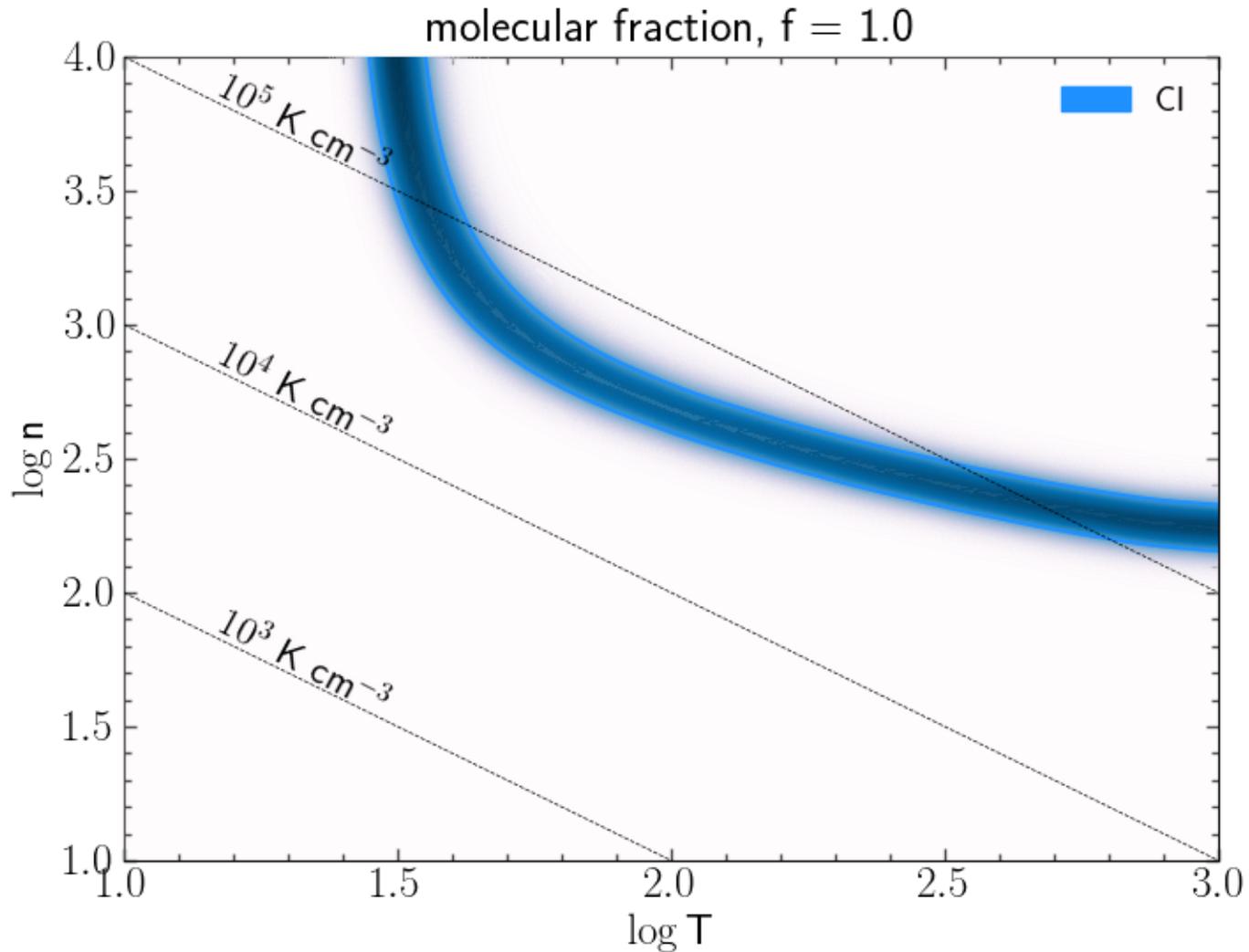
Структура уровней H_2 :



Кинетическая температура. T_{01}

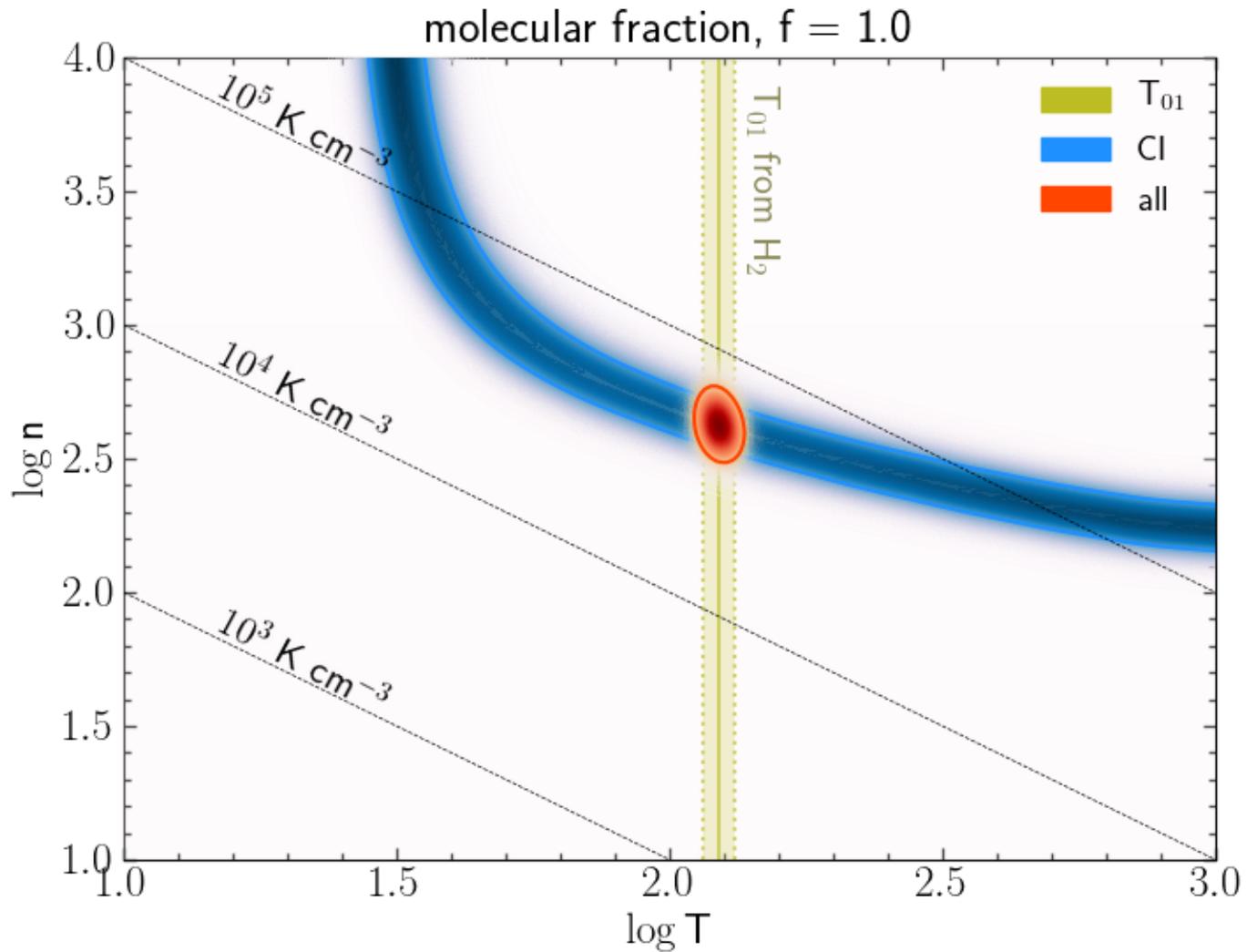


Плотность. Уровни тонкой структуры CI



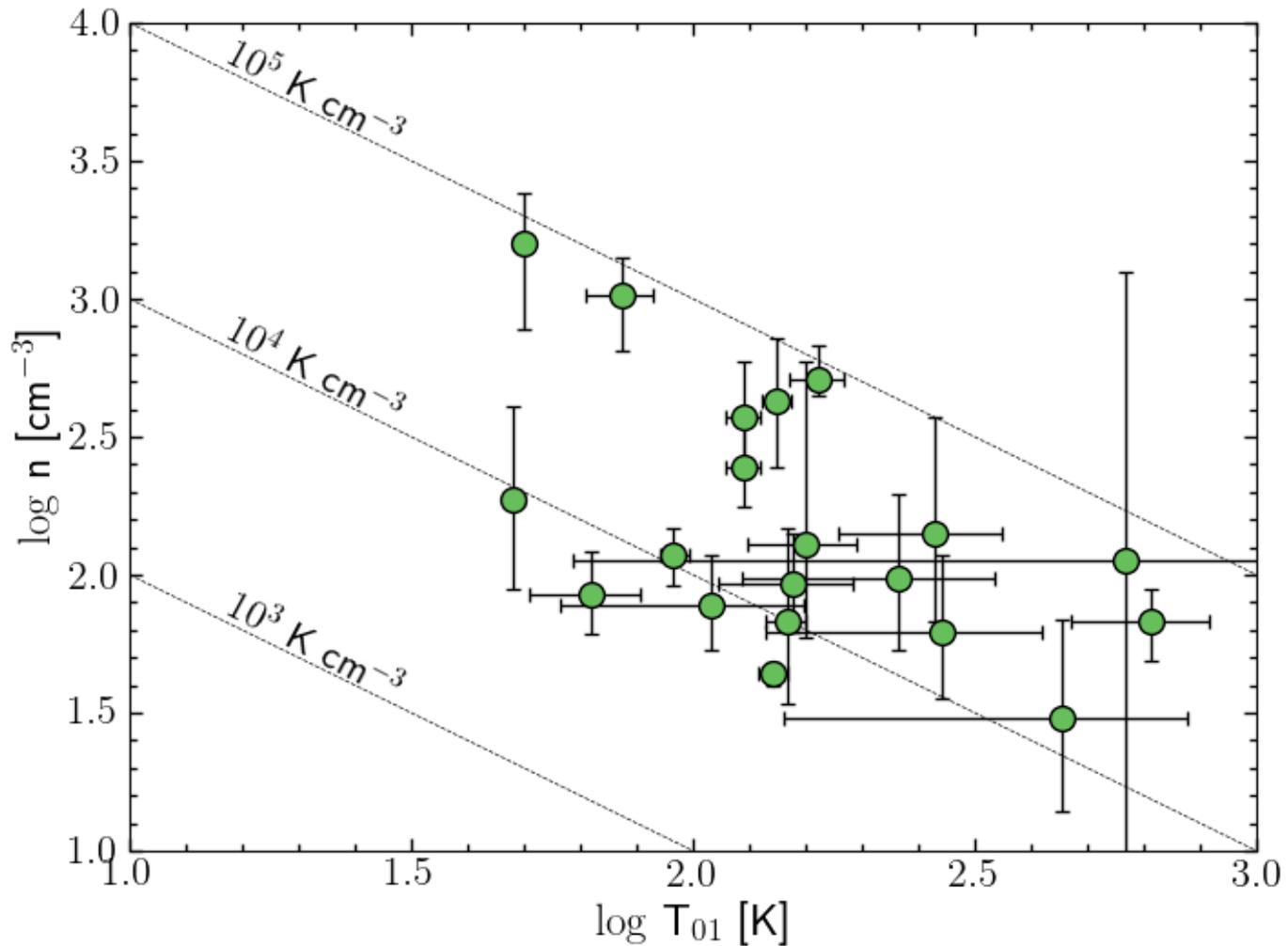
Уровни тонкой структуры CI дают оценку на плотность газа

Плотность. Уровни тонкой структуры CI



Уровни тонкой структуры CI дают оценку на плотность газа

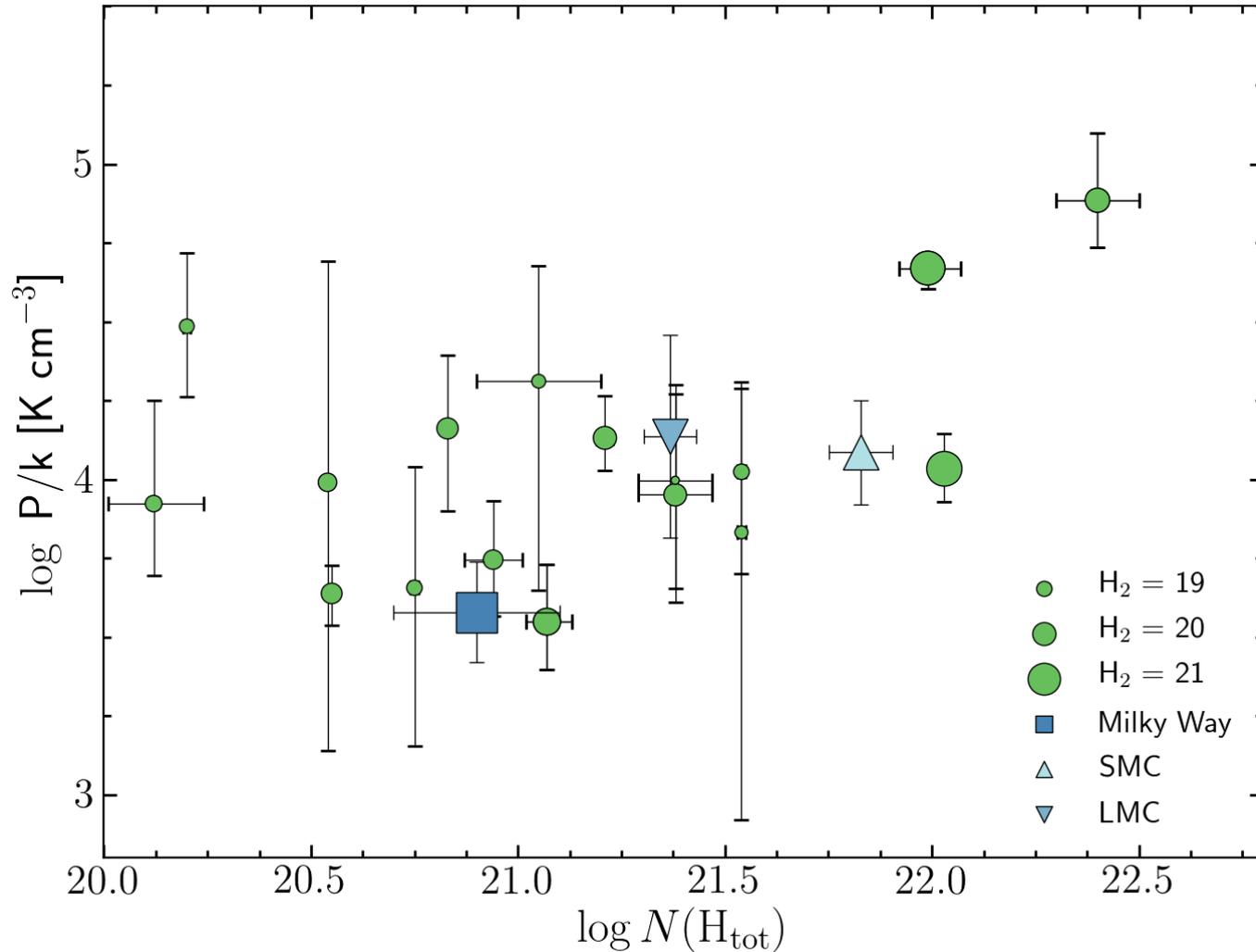
Плотность и температура. $z > 2$



Совместная оценка на плотность и температуру в DLA с $z > 2$

Тепловое давление. $z > 2$

$$P = n \cdot T$$

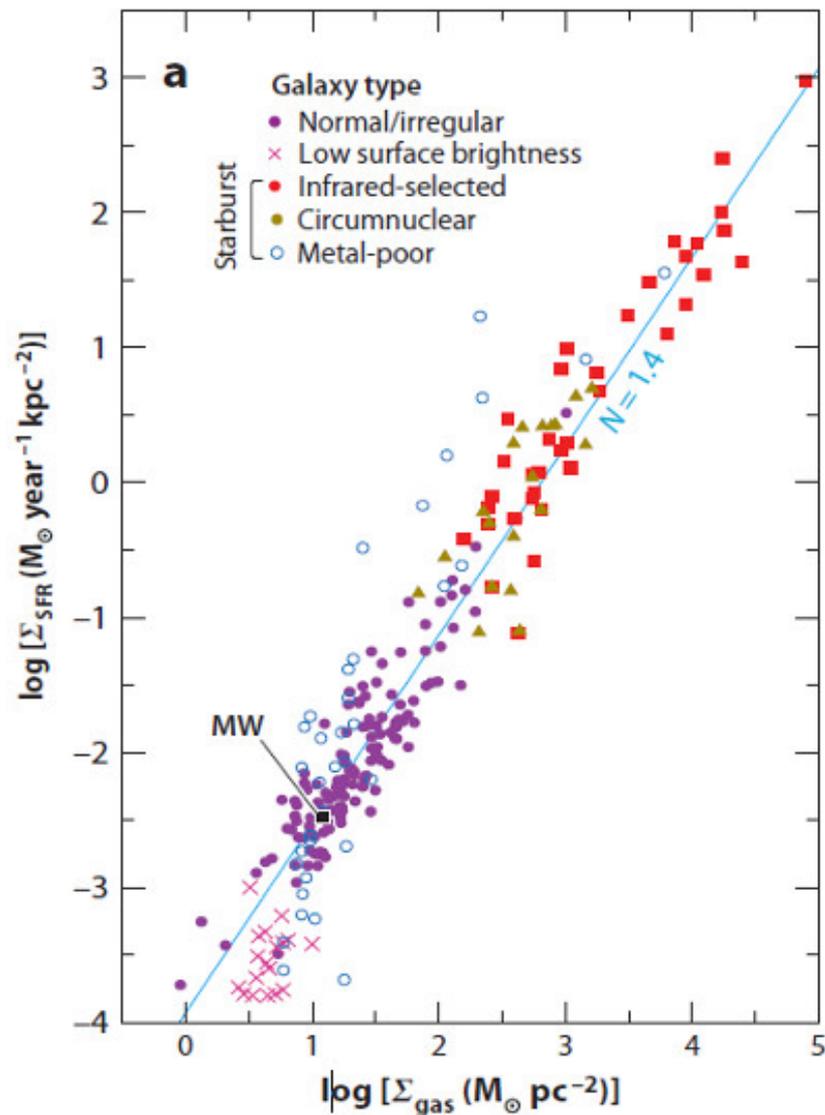


Звздообразование

Известно, что звздообразование связано с межзвёздным газом (МЗГ)

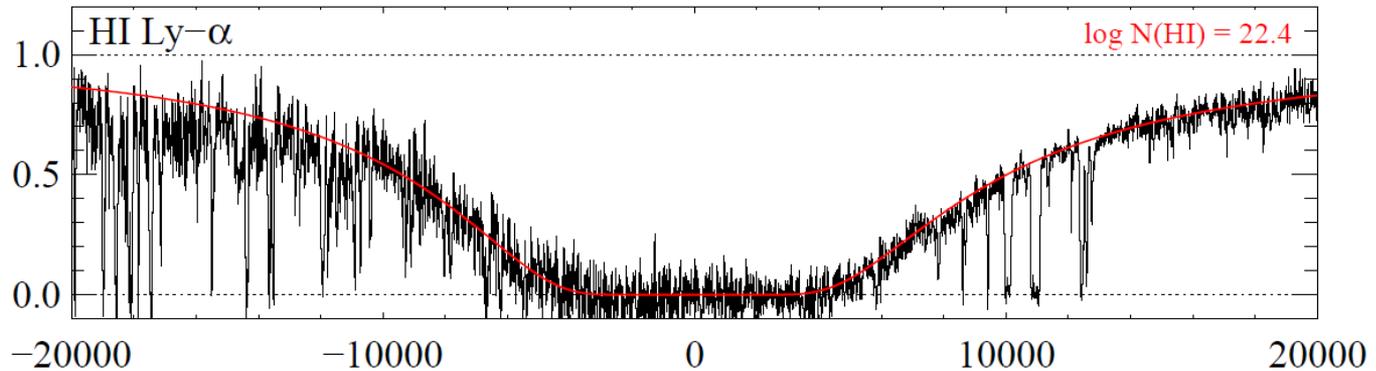
Для усреднённых по диску галактики (т.е. \sim кпк разрешением) величин установлено соотношение Кенниката-Шмидта

$$\Sigma_{\text{SFR}} \sim \Sigma_{\text{gas}}^{\alpha}, \quad \alpha \approx -1.4$$



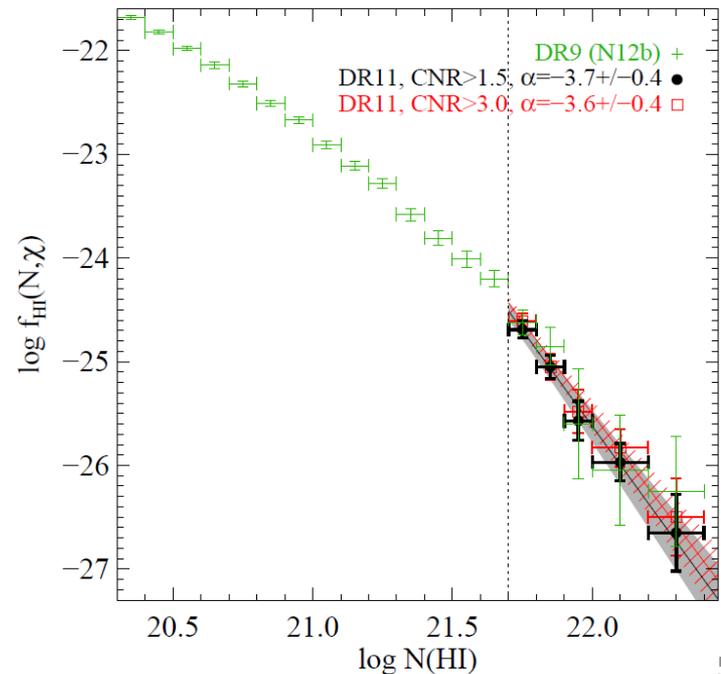
Преселекция по HI. Extremely saturated DLA

ESDLA – сверхнасыщенные DLA системы с $\log N(\text{HI}) > 21.7$:

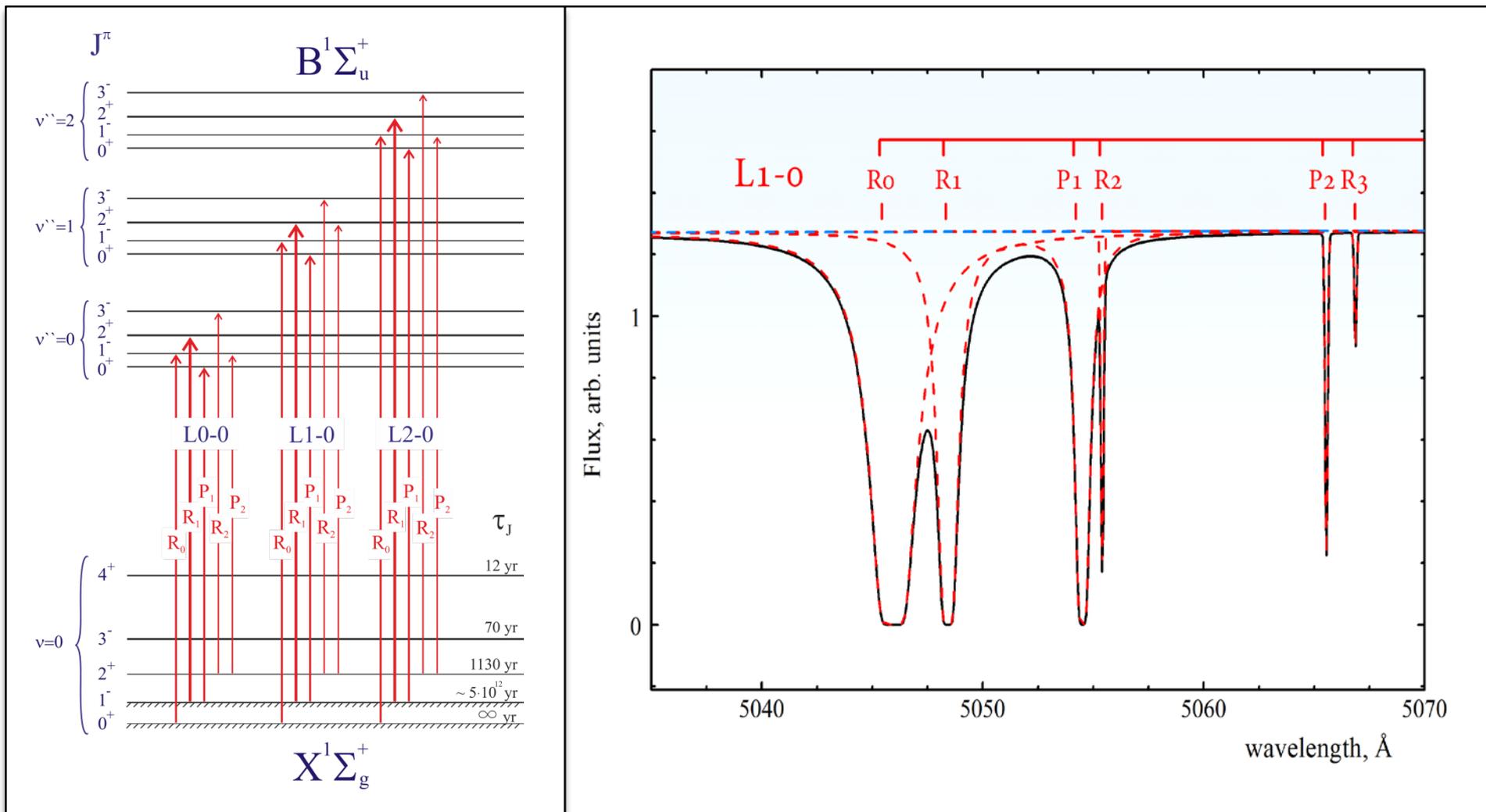


Наблюдения указывают, ESDLA системы скорее всего относятся к галактикам с малым прицельным параметром, **< неск. кпк** (Noterdaeme2012+, Noterdaeme2014+, Kulkarni2012+)

>50% ESDLA содержит H_2



Sloan Digital Sky Survey



Quasar spectrum with H_2 absorption system.

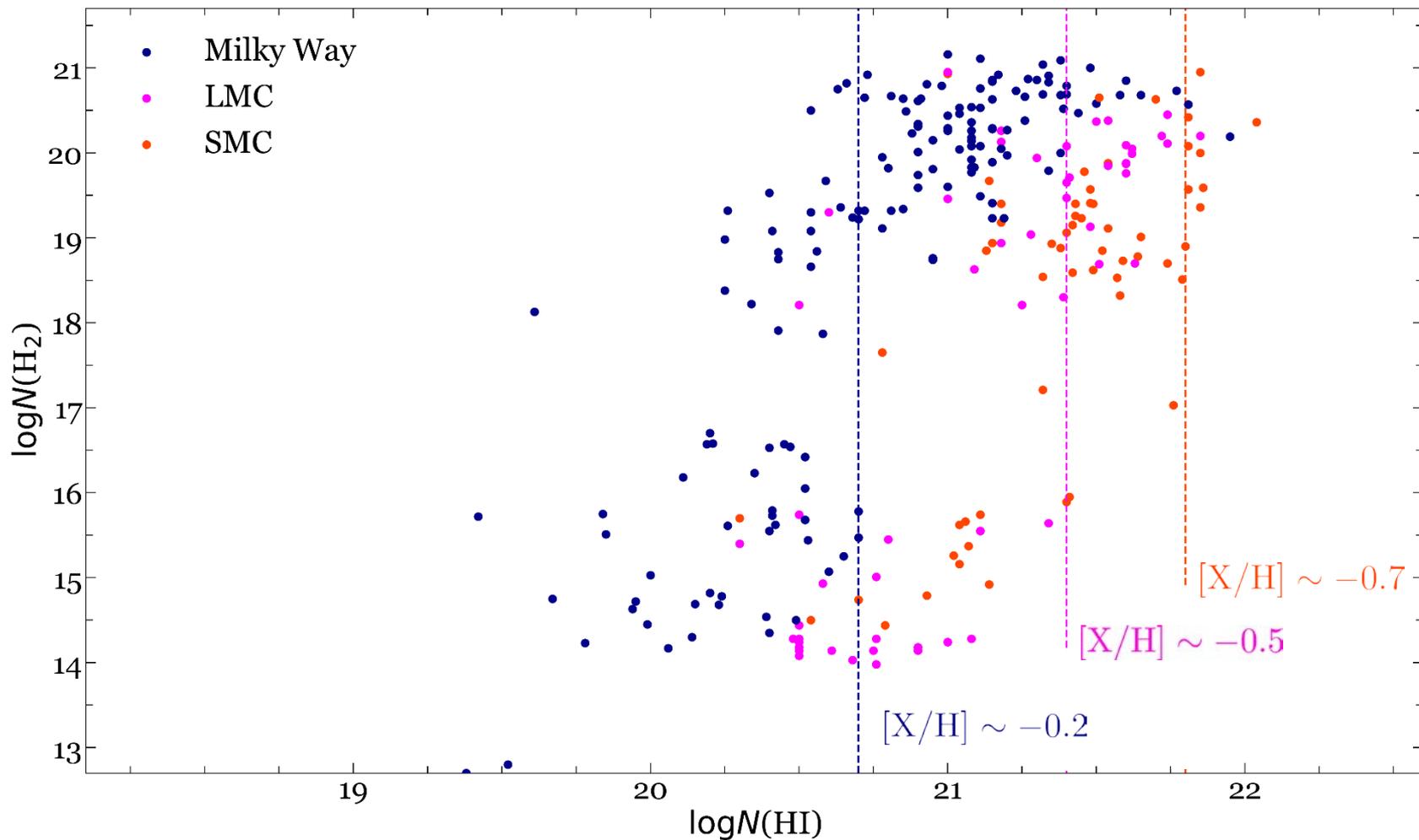
Конверсия HI/H₂

При некотором значении лучевой концентрации $N(\text{HI})$: $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$



Конверсия HI/H₂. z=0

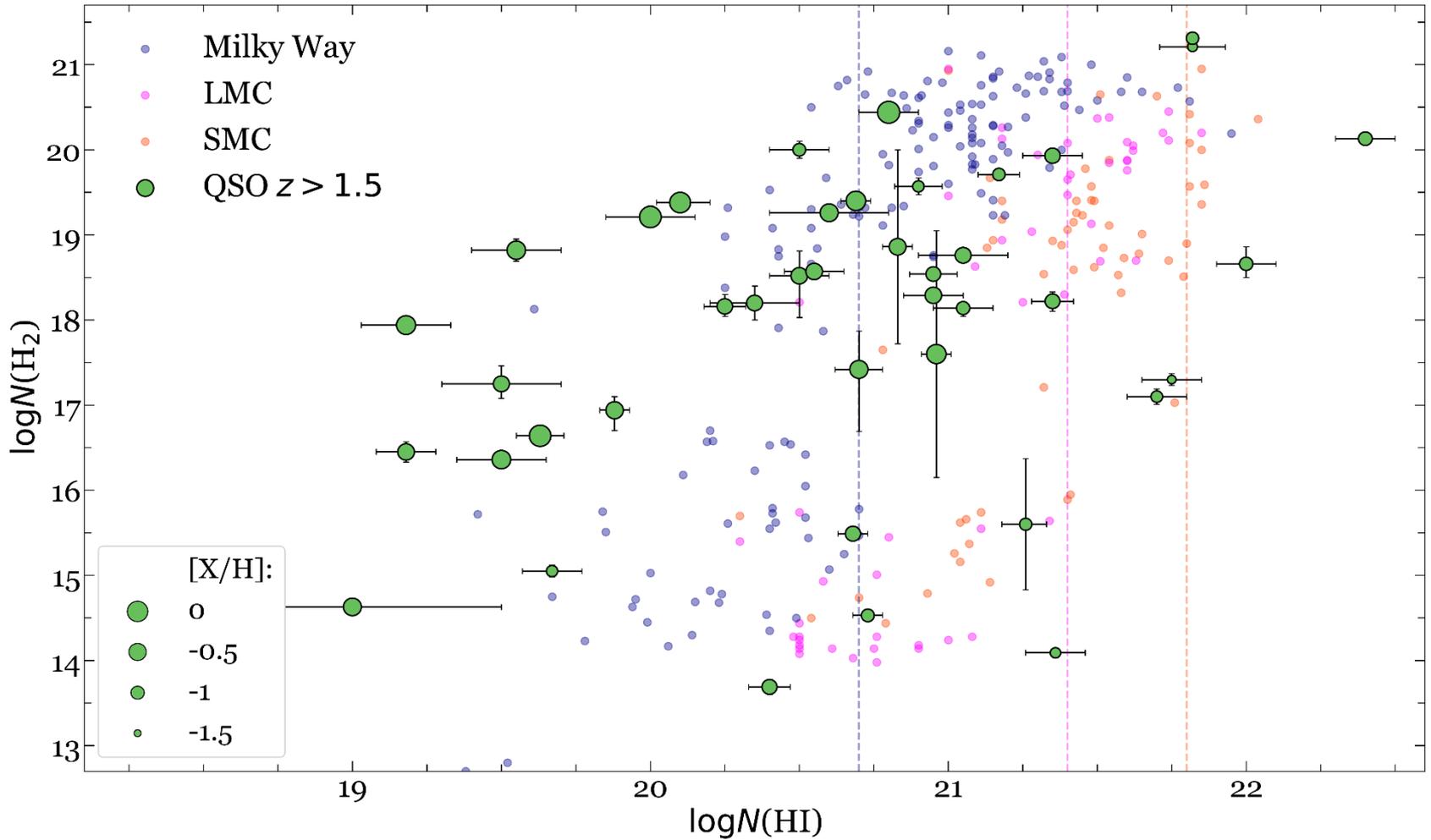
При некотором значении лучевой концентрации N(HI): HI → H₂



Значение $N(\text{H})$ при котором конверсия **зависит от** $[\text{X}/\text{H}]$, фона УФ, ...

Конверсия HI/H₂. z>0

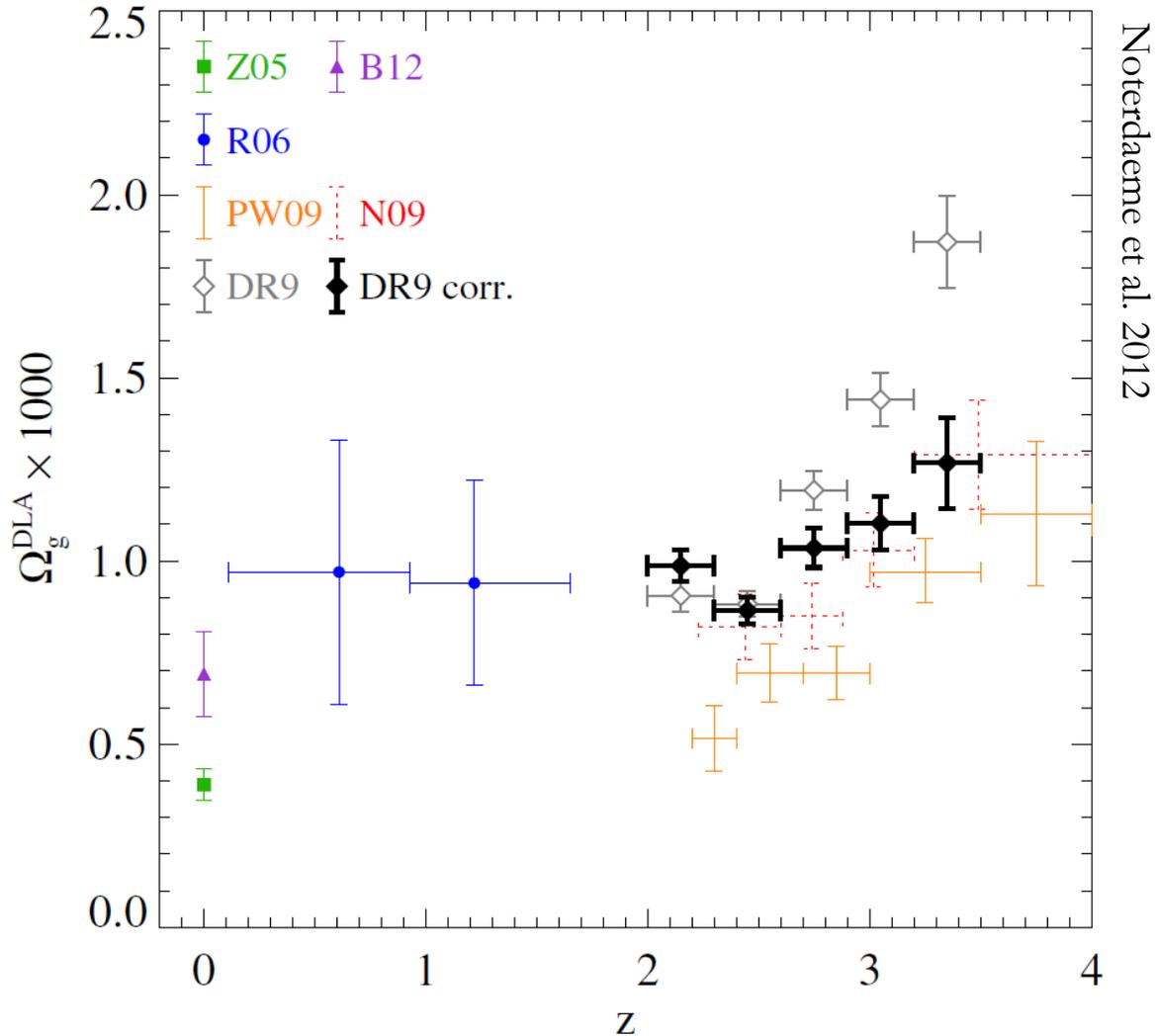
В DLA системах z>2 пока не идентифицируется конверсия HI/H₂



Скорее всего конверсия происходит при $\log N > 22$ (в силу $[X/H]$, фона УФ)

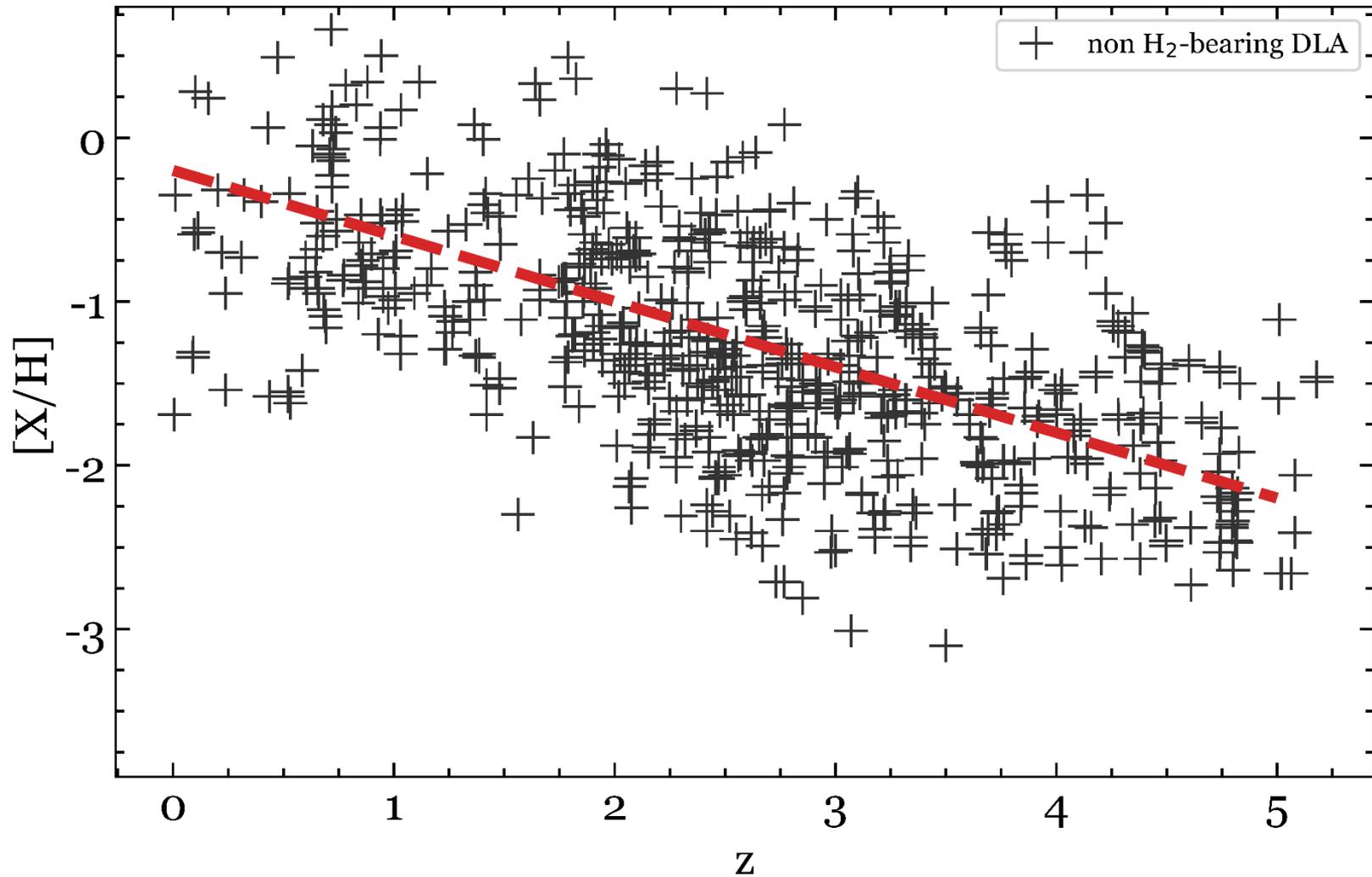
DLA системы. Ω_{HI}

DLA системы – главные резервуары атомарного газа



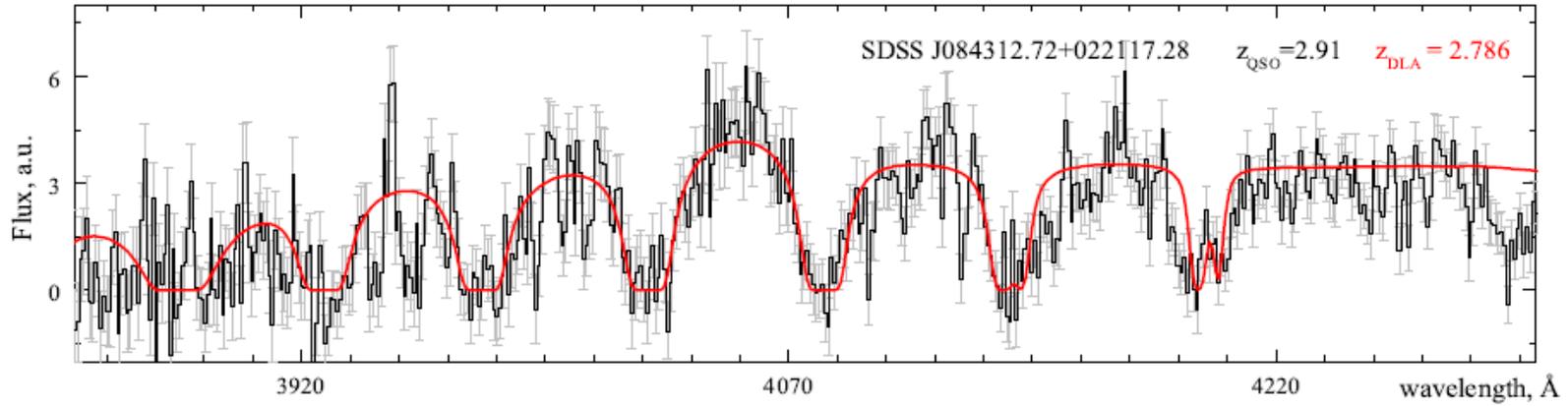
DLA системы. Металличность

Металличность эволюционирует с z

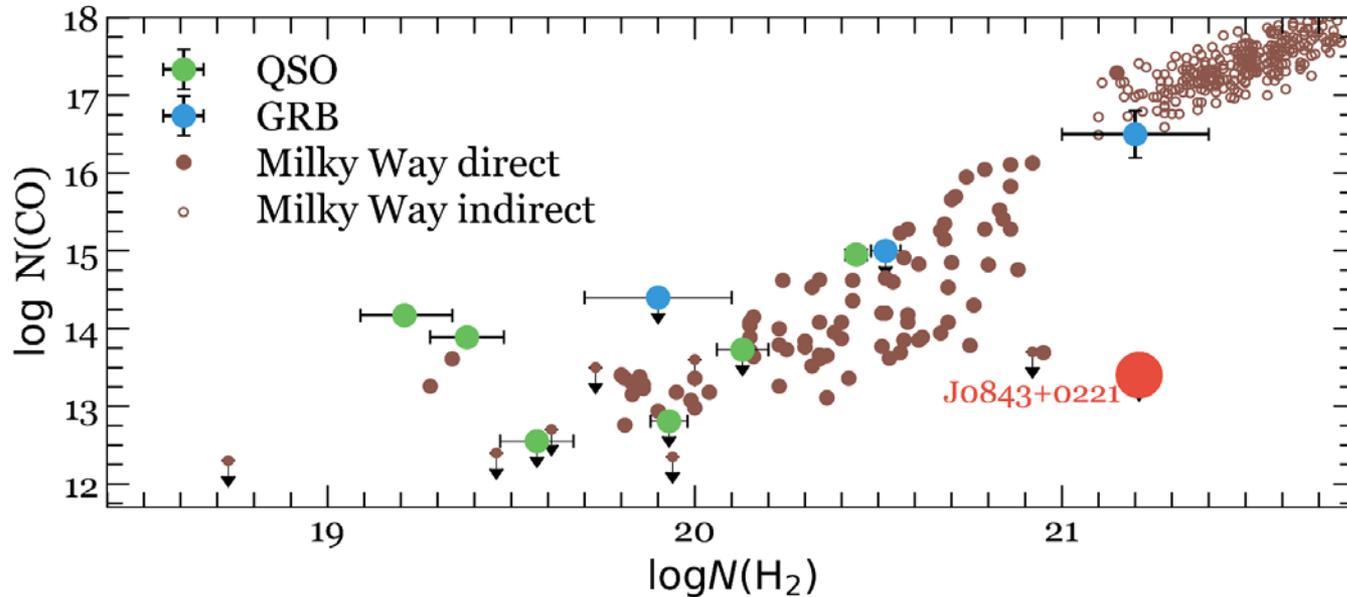


Метод прямого поиска H_2 . J0843+0221

Balashev et al. 2017

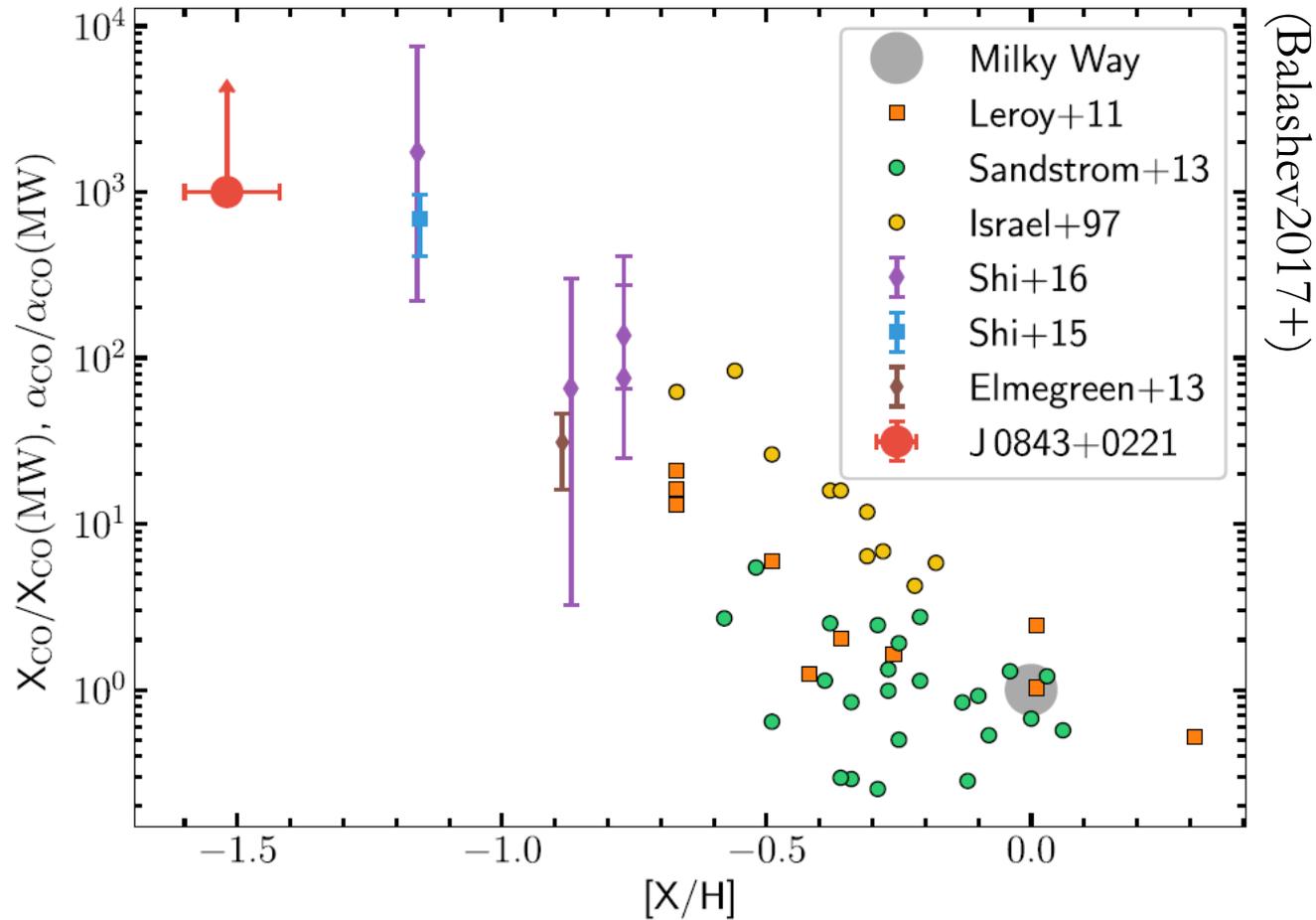


“Темный” молекулярный газ – газ, который не виден в линиях CO



J0843+0221. X_{CO} фактор

С учетом верхнего предела на $\log N(\text{CO})$ получена верхний предел на X_{CO} фактора в газе низкой металличности ($\sim 3\%$ солнечной):



$$X_{\text{CO}} = \frac{N(\text{H}_2)}{W(^{12}\text{C}^{16}\text{O}, J = 1 \rightarrow 0)} > 10^3 \times X_{\text{CO}}^{\text{MW}}$$

Метод поиска по линиям нейтрального углерода

- C I является хорошим трейсером H₂ (холодной фазы МЗВ)
- Наиболее выраженные линии C I в УФ ~1656Å, ~1560Å, ~1328Å < Lyα
- Насыщенные линии C I могут быть детектированы в SDSS (P. Noterdaeme)

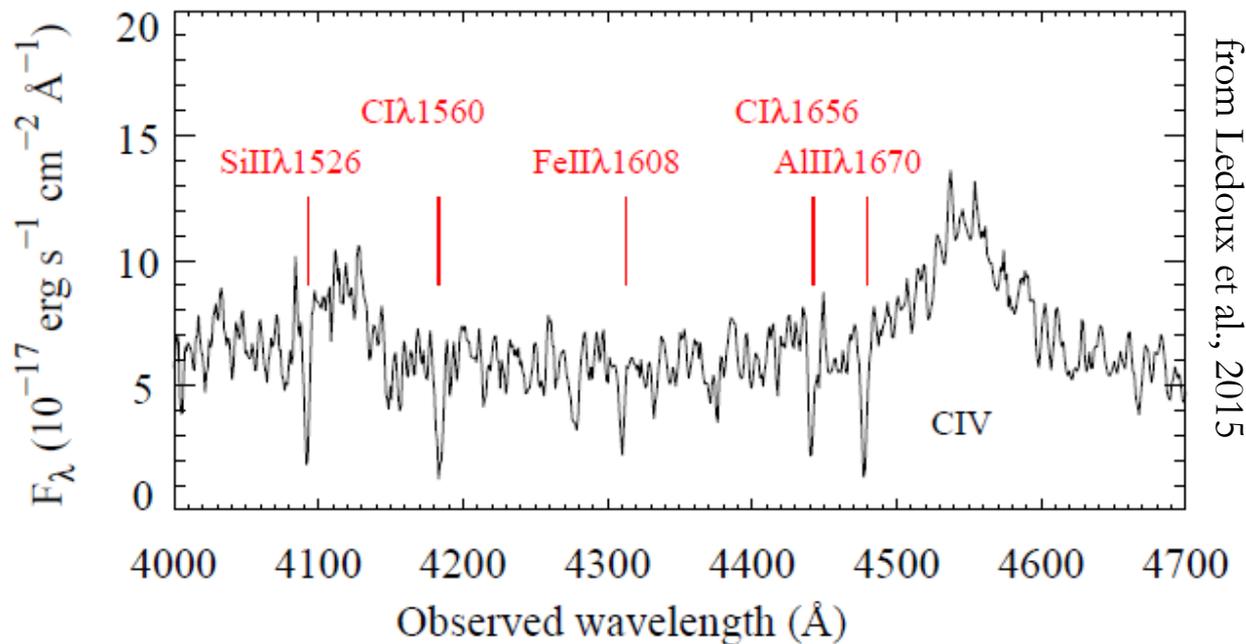
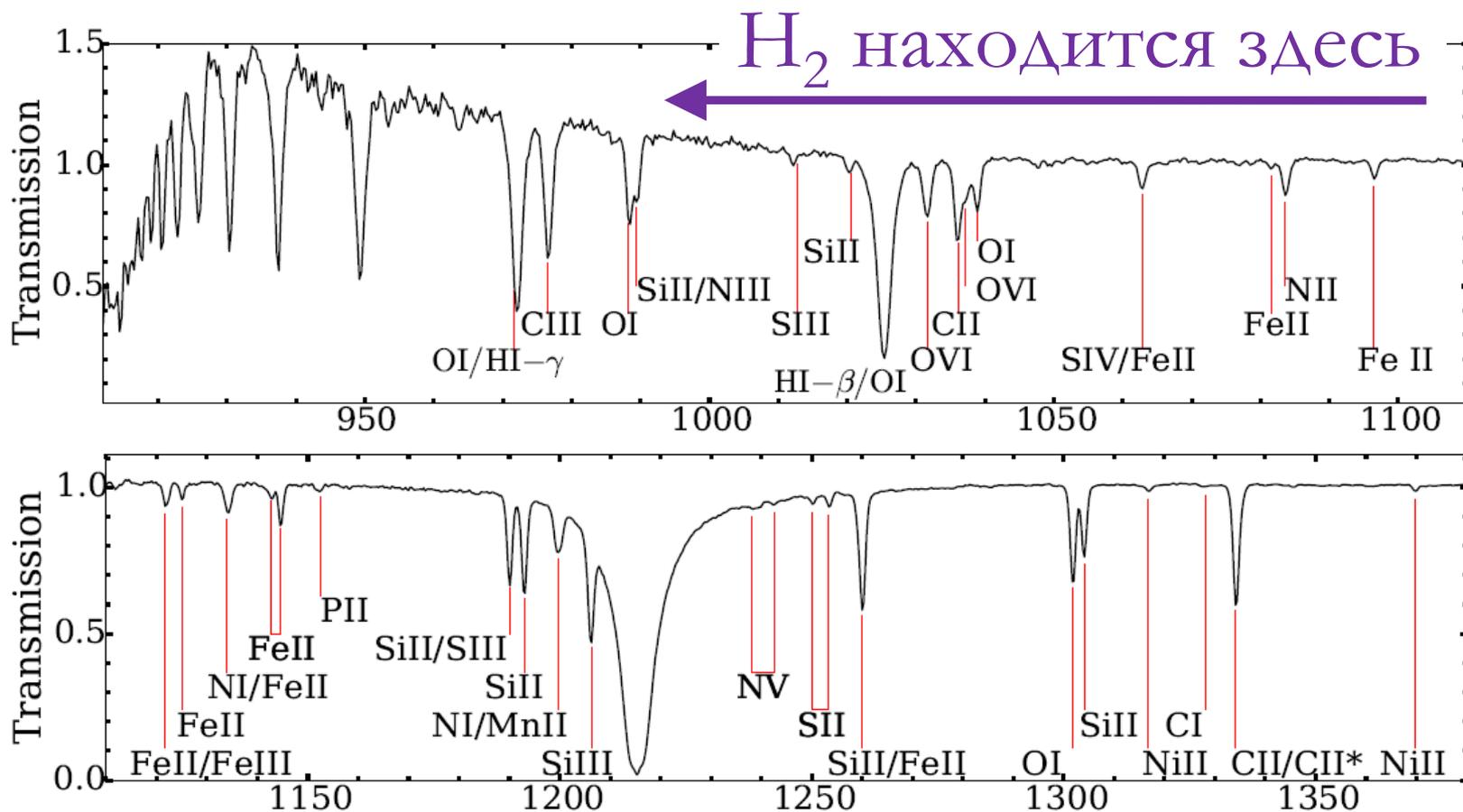


Fig. 1. SDSS spectrum of the $z_{\text{em}} = 1.94$ QSO J0815+2640.

Стек спектр DLA

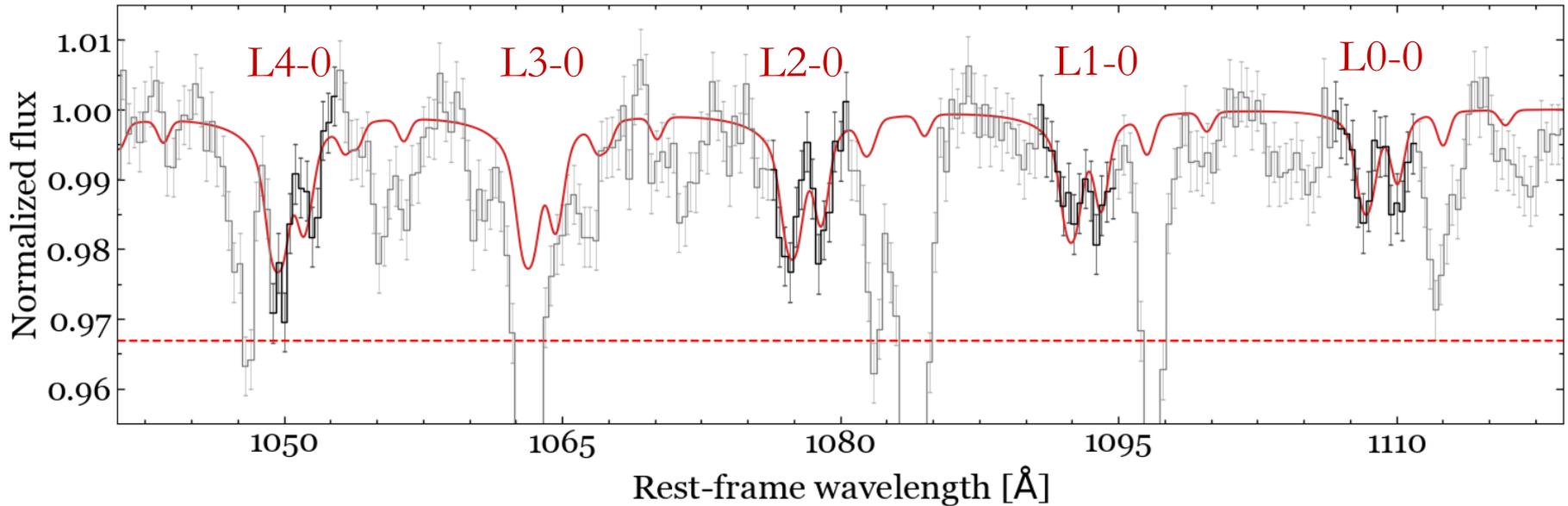
Стек-спектр – усредненный спектр по выборке DLA систем →



Mas-Ribas et al 2017

Стек спектр DLA

Мы идентифицировали линии H₂ в Stack спектре DLA систем из SDSS DR12



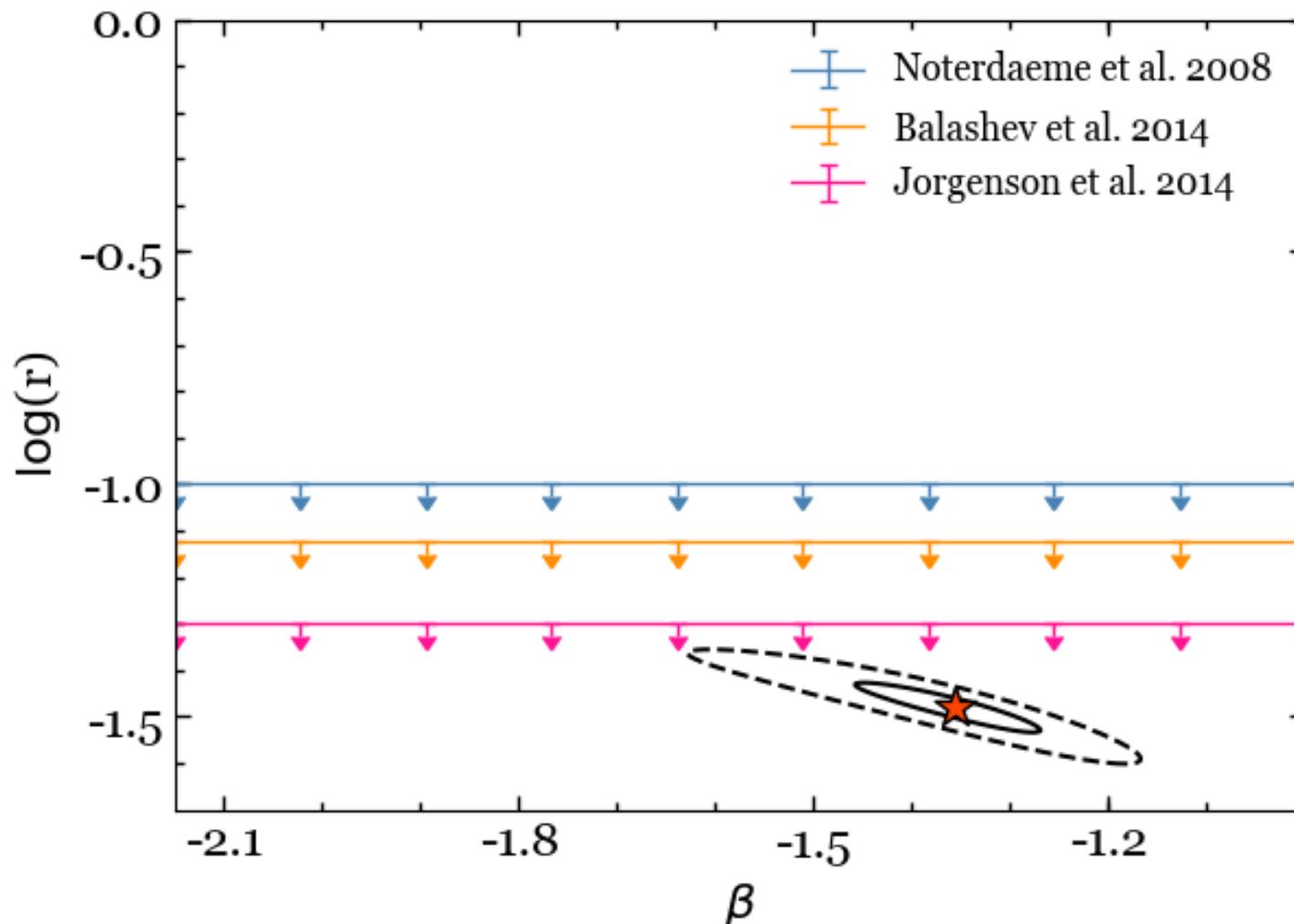
Простое приближения для фитирования Stack спектра:

$$S(\lambda) = 1 - r \cdot \left(1 - \int_{N_{\text{low}}}^{N_{\text{up}}} dN \int d\lambda' R(\lambda - \lambda') e^{-\tau_{\text{H}_2}(N, \lambda')} f_{\text{H}_2}(N) \right)$$

$$f_{\text{H}_2}(N) \sim N^\beta$$

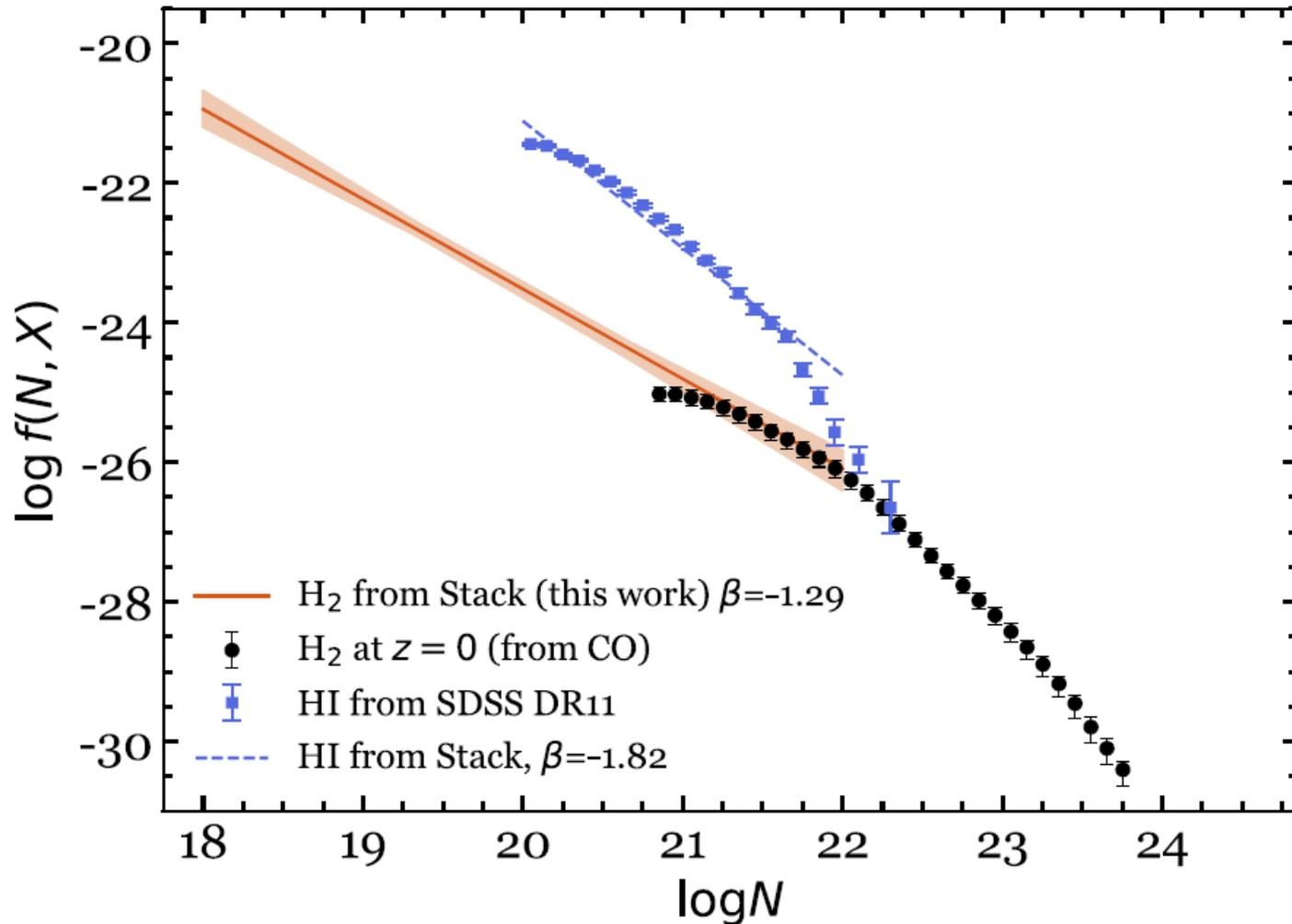
Стек спектры DLA

- β – наклон степенной зависимости распределения $N(\text{H}_2)$: $f_{\text{H}_2}(N) \sim N^\beta$
 r – доля DLA систем, содержащих H_2



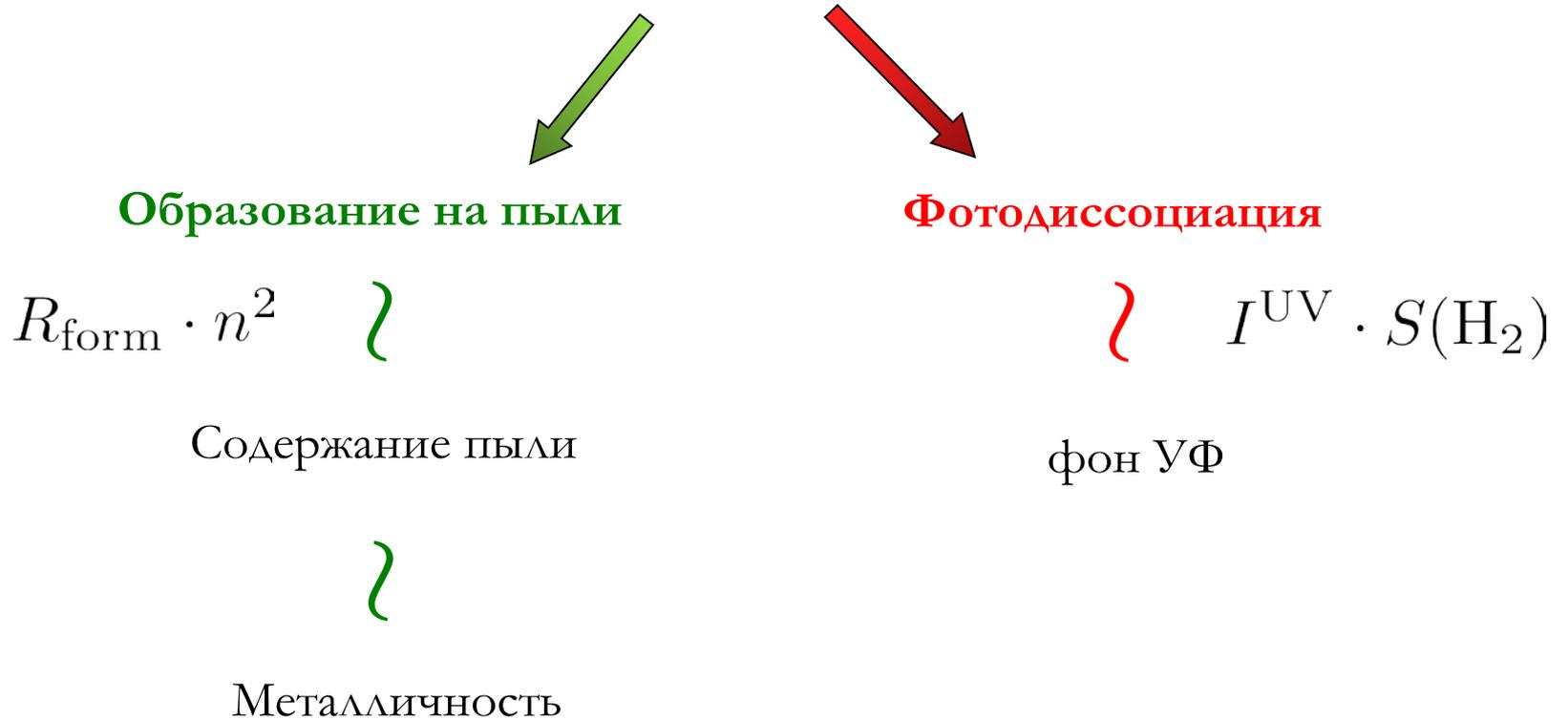
Стек спектры DLA. $f_{\text{H}_2}(\mathbf{N})$

Мы получили оценку на функцию распределения $f(\mathbf{N}_{\text{H}_2}, X) = d^2n/dXdN$ на $z > 3$



DLA системы. Почему мало H₂?

Содержание H₂ определяется балансом:

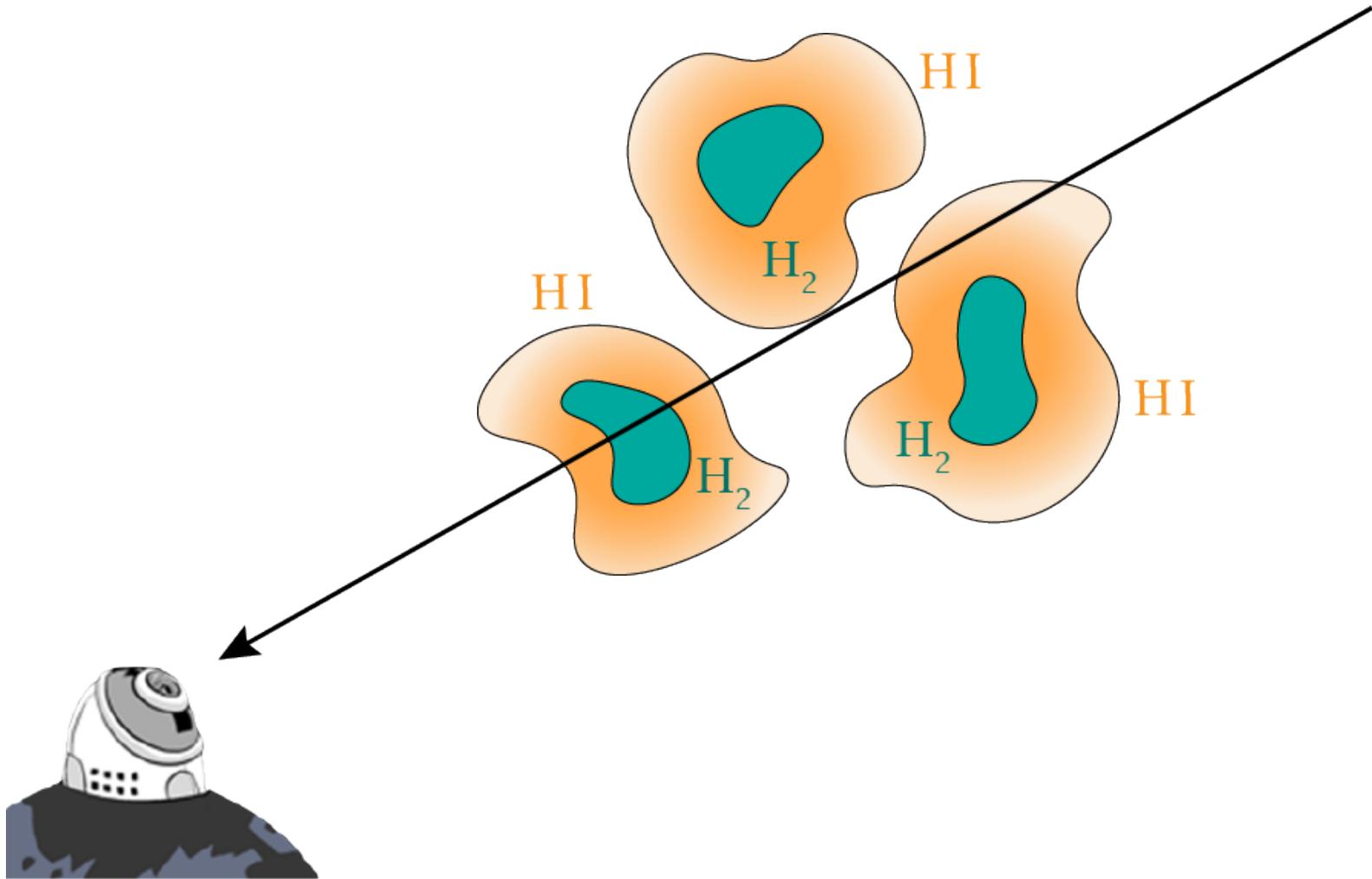


$z \sim 2$

$[X/H] \sim -1 \dots -2$

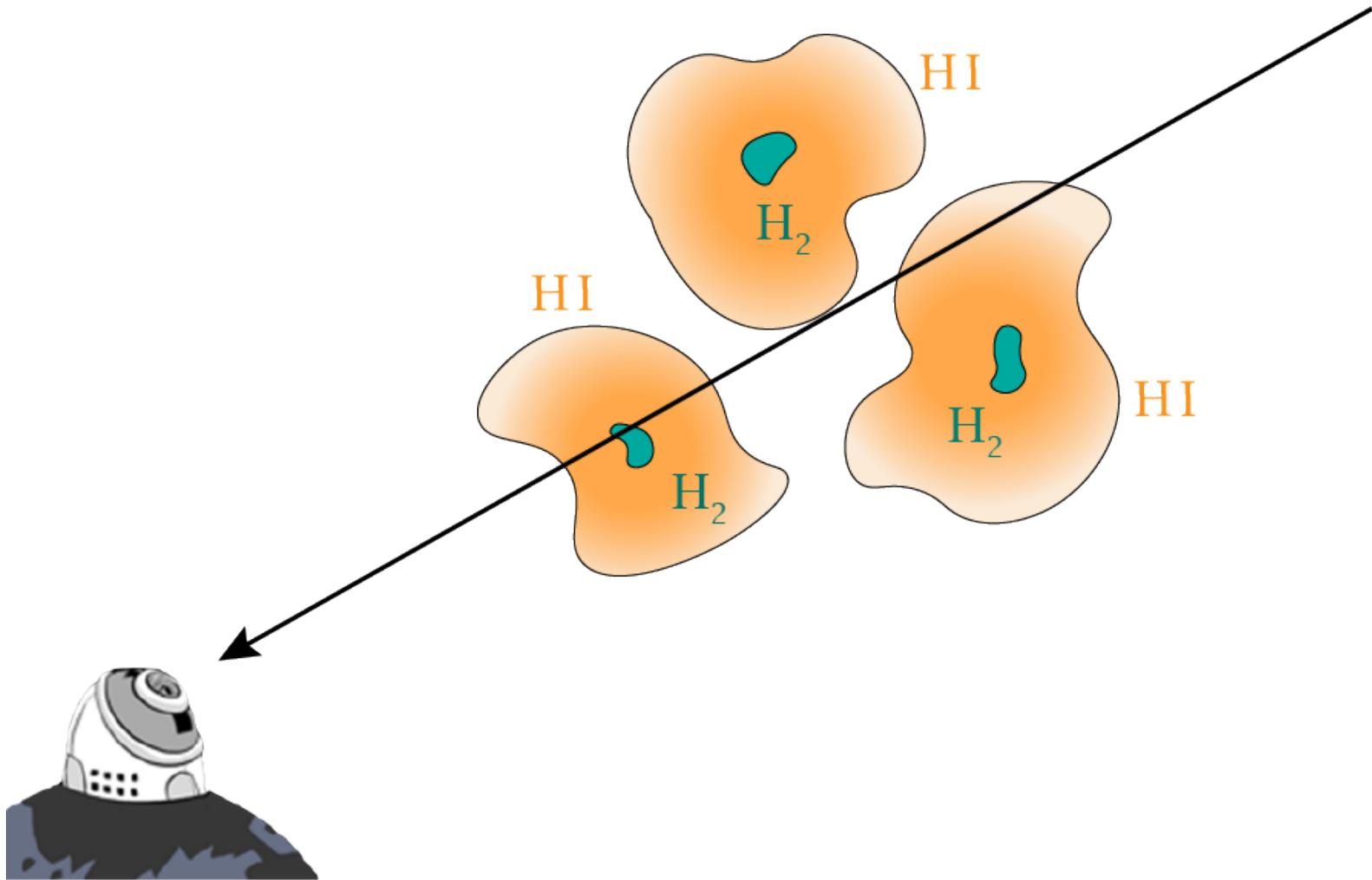
пик звездообразования:
 $\text{SFR} \sim 10 \text{ SFR}_{\text{local}}$

Конверсия HI/H₂. z=0



При некотором значении лучевой концентрации $N(\text{HI})$, H₂ самоэкранируется от диссоциирующего УФ излучения: $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$

Конверсия HI/H₂. z~2



За счет меньшей металличности и большего фона УФ сечение диффузного H₂ в галактиках на z~2 меньше, чем в локальной Вселенной.

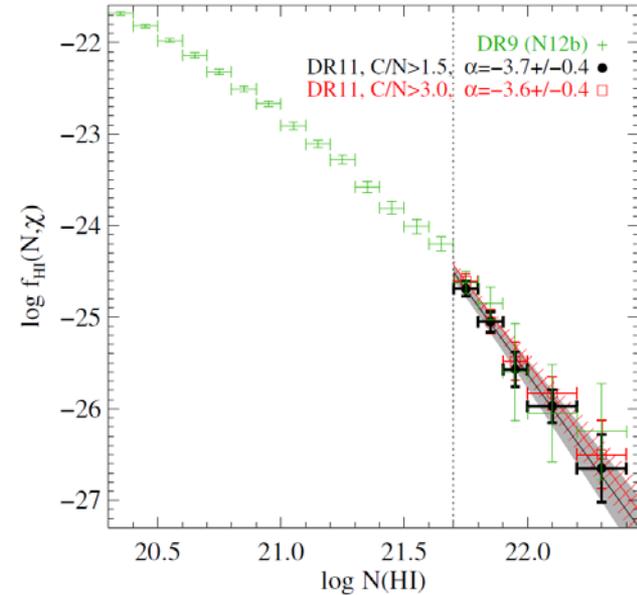
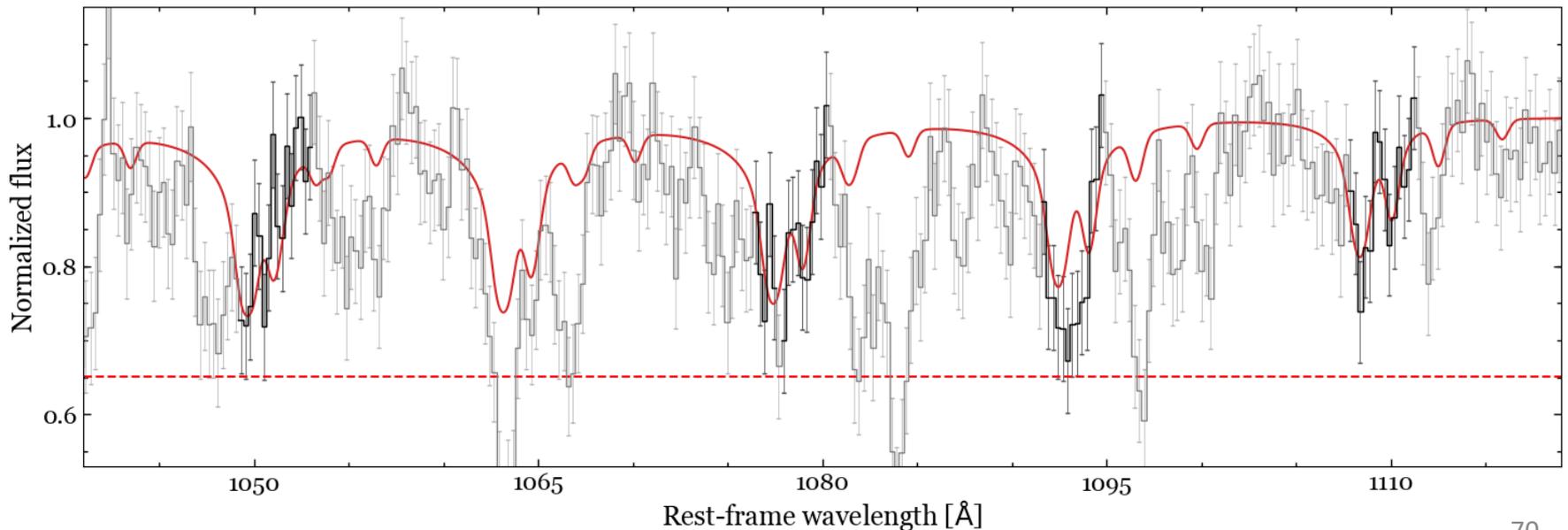
Стек спектры DLA. Конверсия HI/H2

ESDLA: $\log N(\text{HI}) > 21.7$

(обычные DLA, $\log N(\text{HI}) > 20.3$)

Скорее всего – это галактики
просечённые близко к центру (~ 1 кпк)

Стек спектр выборки ESDLA:



Noterdaeme et al. 2014

Стек спектры DLA. Конверсия HI/H2

Частота детекции H2 в ESDLA системах $35 \pm 13 \%$, что ~ 10 выше чем в DLA.

