



Ограничения на тепловое состояние межгалактической среды с учётом пространственной структуры облаков

J. Phys.: Conf. Ser. 2103 012028 (2021)

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2103/1/012028>

К. Н. Теликова*, П.С. Штернин, С.А. Балашев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

* k.telikova@gmail.com

При поддержке РФФИ 18-12-00301

Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2021 (НЭА-2021)

21-24 декабря

Введение: уравнение состояния межгалактического вещества

На красных смещениях $z < 6$ межгалактическое вещество практически полностью ионизовано, $x_{\text{HI}} \approx 10^{-6} - 10^{-4}$

Зависимость температуры от плотности определяется балансом процессов:

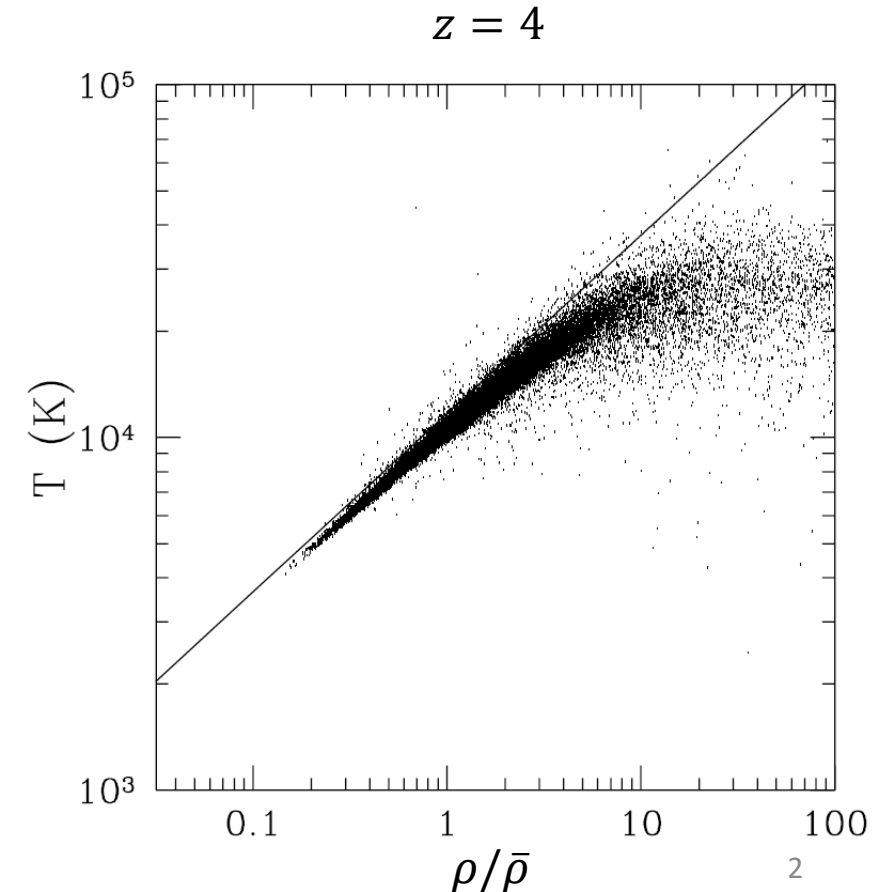
- Адиабатическое охлаждение при расширении Вселенной
- Фотоионизация УФ фоновым излучением

$$T = T_0 \Delta^{\gamma-1}, \quad \Delta = \frac{\rho}{\bar{\rho}}$$

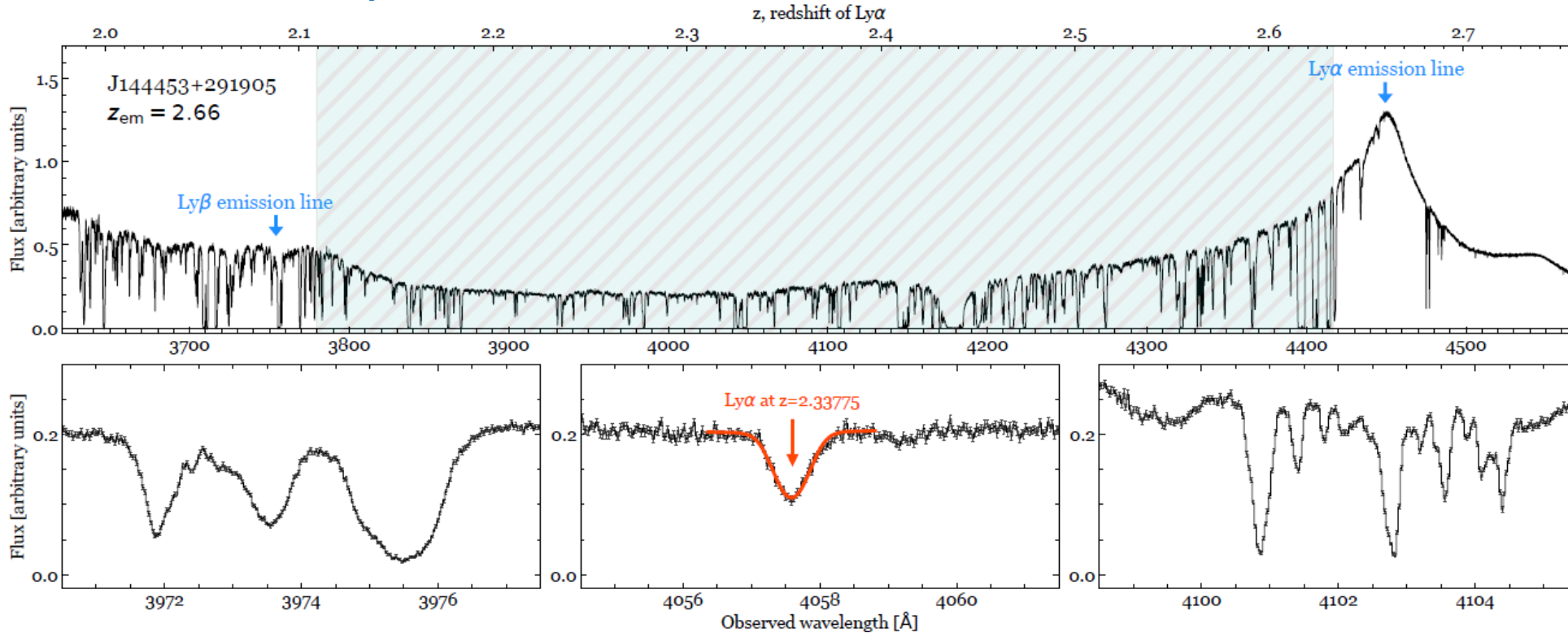
Hui, L., Gnedin, N. Y., 1996

Теоретические предсказания (в упрощенном сценарии однородной реионизации)

1. $\gamma-1 \approx 0.6$ «вдали» от процессов реионизации
2. $\gamma-1 \rightarrow 0$ при реионизации



Введение: Ly α лес



Спектр квазара на $z=2.66$.

Заштрихованная область – Ly α лес

Автоматическая процедура по поиску и анализу одиночных линий Ly α леса в спектрах квазаров

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-\tau_{ik}(\lambda)}$$

$$\tau_{ik}(\lambda) = \frac{\sqrt{\pi}e^2}{m_e c} \frac{\lambda_{ik} f_{ik} N}{b} H(a, \xi)$$

$H(a, \xi)$ - функция Фойгта (свёртка функций Лоренца и Гаусса)

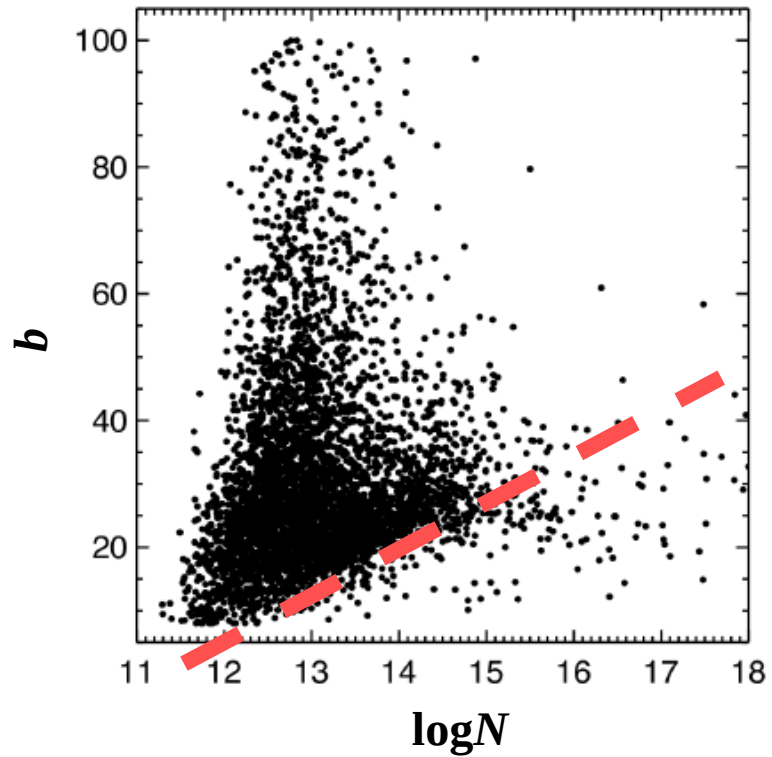
$$\xi = \frac{(\lambda - \lambda_{ik})c}{\lambda_{ik} b}, \quad a = \frac{\Delta v_R \lambda_{ik}}{b}$$

Параметры абсорбционных систем:

• Лучевая концентрация N

• Параметр Доплера b

Введение: распределение систем Ly α леса



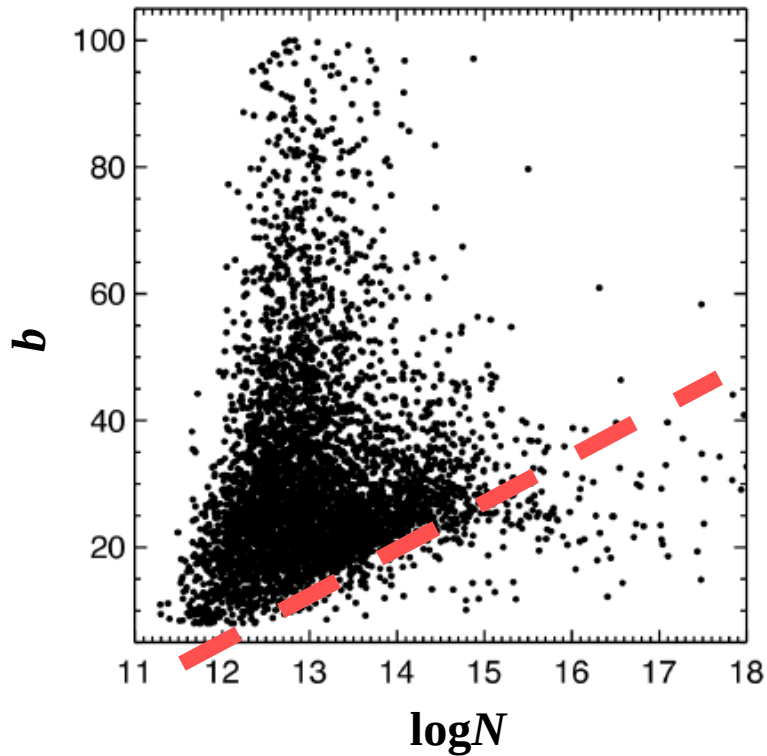
Rudie, G. C. et al., 2012, ApJ, 757, L30

Наблюдается явно выраженная нижняя граница

Обычно связывается с чисто тепловым уширением абсорбционных линий

$$T = T_0 \Delta^{\gamma-1}$$

Введение: распределение систем Ly α леса



Rudie, G. C. et al., 2012, ApJ, 757, L30

Стандартный подход

Минимально возможное уширение абсорбционных линий МГС определяется **тепловым движением** поглощающих атомов в системе

Параметр Доплера $b^2 = \frac{2k_B T}{m} + b_{\text{add}}^2$

При $b_{\text{add}} \rightarrow 0$ $b \rightarrow b_{\text{th}}$

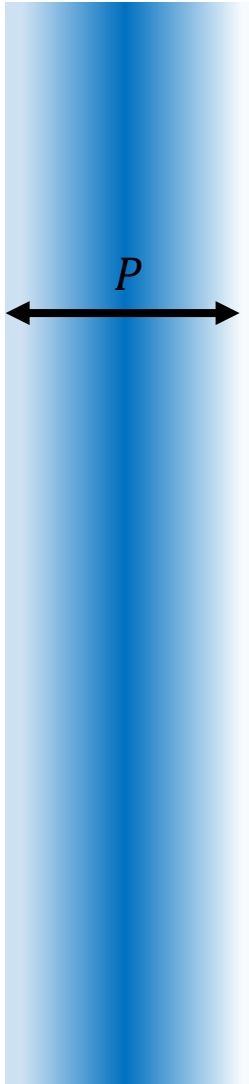
$$b_{\text{th}}^2 = \frac{2k_B T}{m}$$

$$T = T_0 \Delta^{\gamma-1}$$

Параметр γ определяется наклоном нижней границы распределения ($\log N$, $\log b$)

$$b_{\text{th}} \propto N^{\xi-1}, \quad \xi - 1 = \frac{\gamma - 1}{3 - 0.44(\gamma - 1)}$$

Введение: дополнительный механизм уширения линий Ly α леса



Филаменты не в точности следуют за темной материей, из-за давления газа сжатие останавливается и происходит сглаживание распределения барионной материи

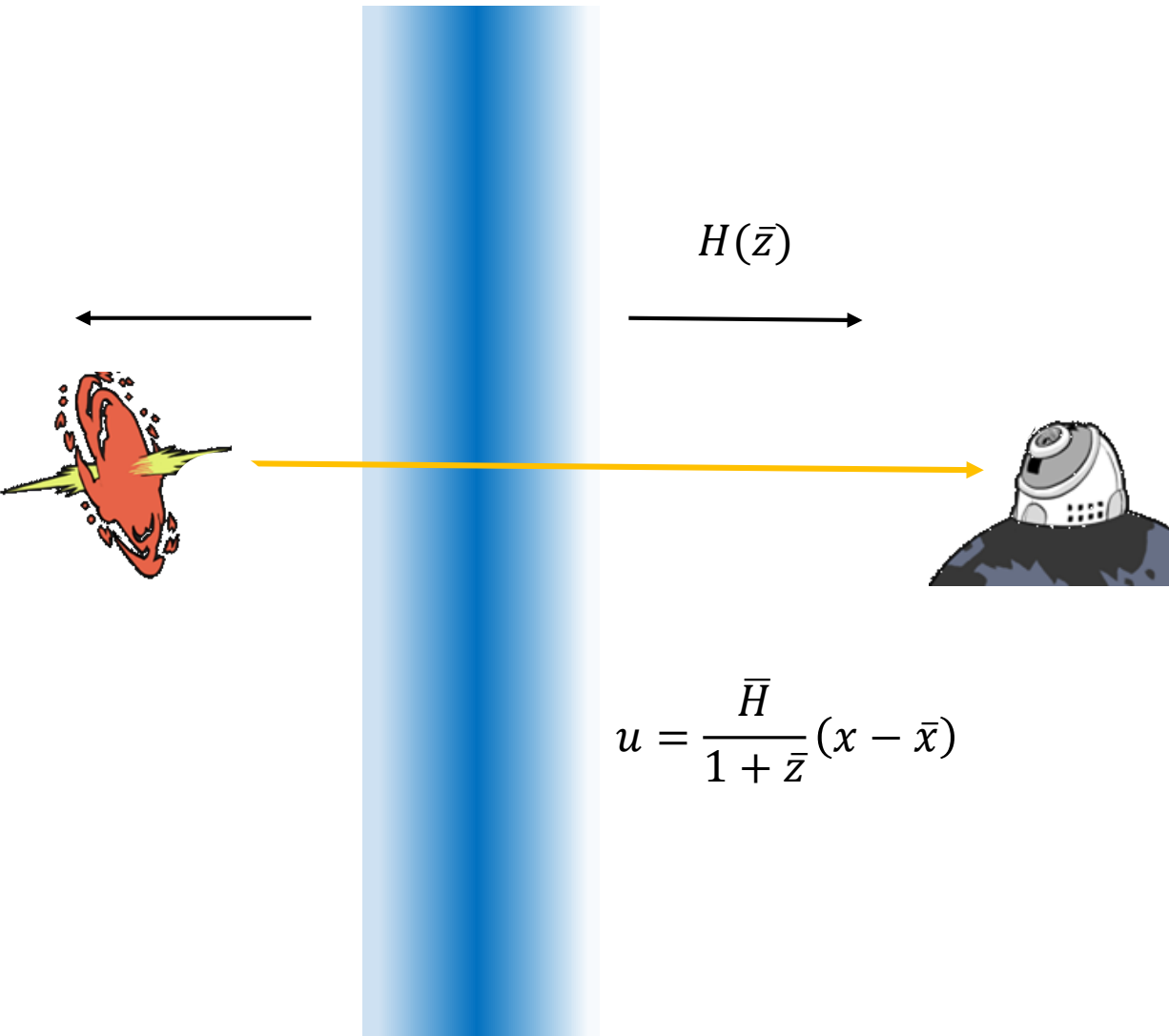
Размер филаментов порядка джинсовской длины

$$\lambda_J = \frac{c_s \sqrt{\pi}}{\sqrt{G \rho_{tot}}}$$

$$\lambda_J = \pi \left(\frac{40}{9} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{3\gamma}{5} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{k_B}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \mu^{-\frac{1}{2}} H_0^{-1} (1+z)^{-\frac{3}{2}} \Omega_m^{-\frac{1}{2}} T^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho}{\bar{\rho}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

размер облака = f_J x джинсовская длина

Введение: дополнительный механизм уширения линий Ly α леса



Модель:

Филамент с гауссовым профилем плотности

$$\frac{\rho(u)}{\rho_0} = \exp\left(-\frac{(u - u_0)^2}{b_\rho^2}\right) \quad (\text{Garzilli et al. 2015, 2019})$$

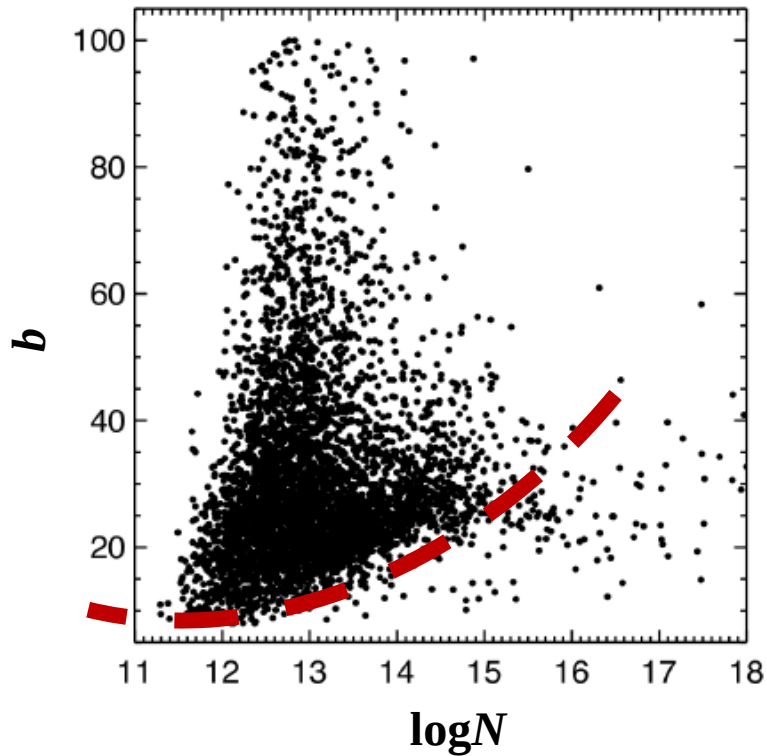
Дополнительное уширение за счёт хаббловского расширения филамента МГС

$$b_\rho \sim f_J \lambda_J H(\bar{z})$$

С учётом этого

$$b_{\min}^2 = b_{\text{th}}^2 + b_\rho^2$$

Введение: распределение систем Ly α леса



Rudie, G. C. et al., 2012, ApJ, 757, L30

$$T = T_0 \left(\frac{\rho}{\bar{\rho}} \right)^{\gamma-1}$$

Параметр γ определяется наклоном **тепловой**
компоненты нижней границы распределения ($\log N$, $\log b$)

Другой подход

Минимально возможное уширение абсорбционных линий
МГС

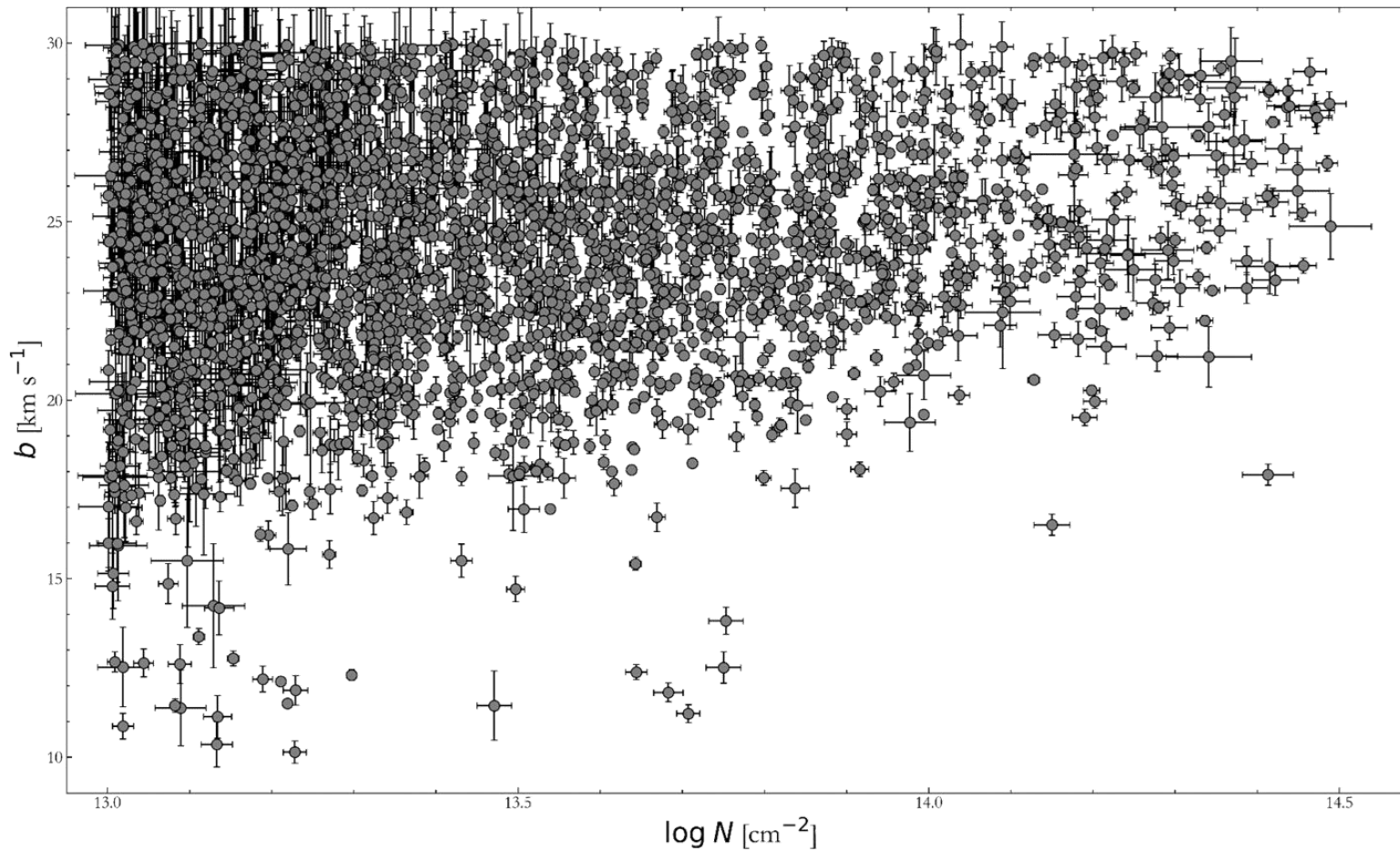
- Тепловое
- За счет хаббловского расширения филаментов

Параметр Доплера $b^2 = \frac{2k_B T}{m} + b_{\text{add}}^2 + b_\rho^2$

При $b_{\text{add}} \rightarrow 0$ $b^2 \rightarrow b_{\text{th}}^2 + b_\rho^2$

Важно: b_{th} , как и b_ρ , зависит от параметра f_J

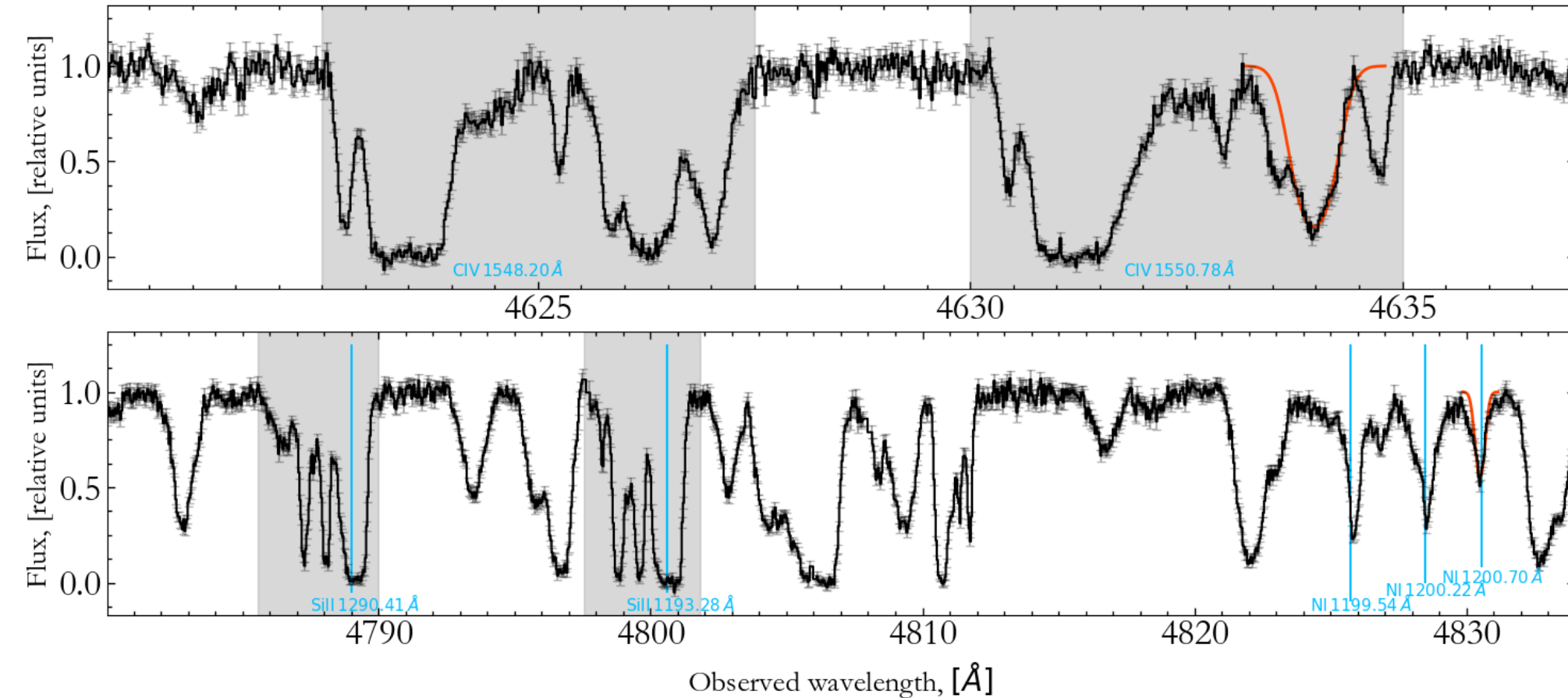
Анализ: выборка систем Ly α леса



- 98 спектров высокого разрешения (~ 50000) с $S/N \sim 20 - 100$ из KODIAQ (<https://koa.ipac.caltech.edu/Datasets>) и SQUAD (https://github.com/MTMurphy77/UVES_SQUAD_DR1)
- 2670 систем Ly α леса на красных смещениях $z \sim 1.6 - 4.3$

Анализ: прополка выборки от линий металлов

В область Ly α леса неизбежно попадают линии металлов из межзвёздной и окологалактической среды



Зная характерные $\Delta\lambda$ и силы осцилляторов, можно идентифицировать линии металлов, ложно отождествленных с линиями водорода

Анализ: функция правдоподобия

Распределение абсорбционных систем

- по лучевым концентрациям: $f(N) \propto N^\beta$
- по b_{add} : $f(b_{\text{add}}) \propto b_{\text{add}}^p$



Совместная функция распределения по N и b

$$f(N, b) = \int f(N) f(b_{\text{add}}) \delta\left(b - \sqrt{b_{\text{min}}^2(N) + b_{\text{add}}^2}\right) db_{\text{add}},$$

$$b_{\text{min}}^2 = b_{\text{th}}^2 + b_{\rho}^2 \equiv \frac{2k_{\text{B}}T}{m} + \left(f_{\text{J}} \frac{\lambda_{\text{J}} H(z)}{2\pi}\right)^2,$$

Модель

$$L_{\text{data}}(N_i, b_i) = \underbrace{f(N, b)}_{\text{истинное распределение}} \otimes \underbrace{P_{\text{meas}}(N_i, b_i | N, b)}_{\text{ошибки измерений}} \otimes \underbrace{I(N_i, b_i \in \text{box})}_{\text{учёт ограниченности выборки}}$$

истинное распределение

ошибки измерений

учёт ограниченности выборки

Модель + распределение статистических выбросов

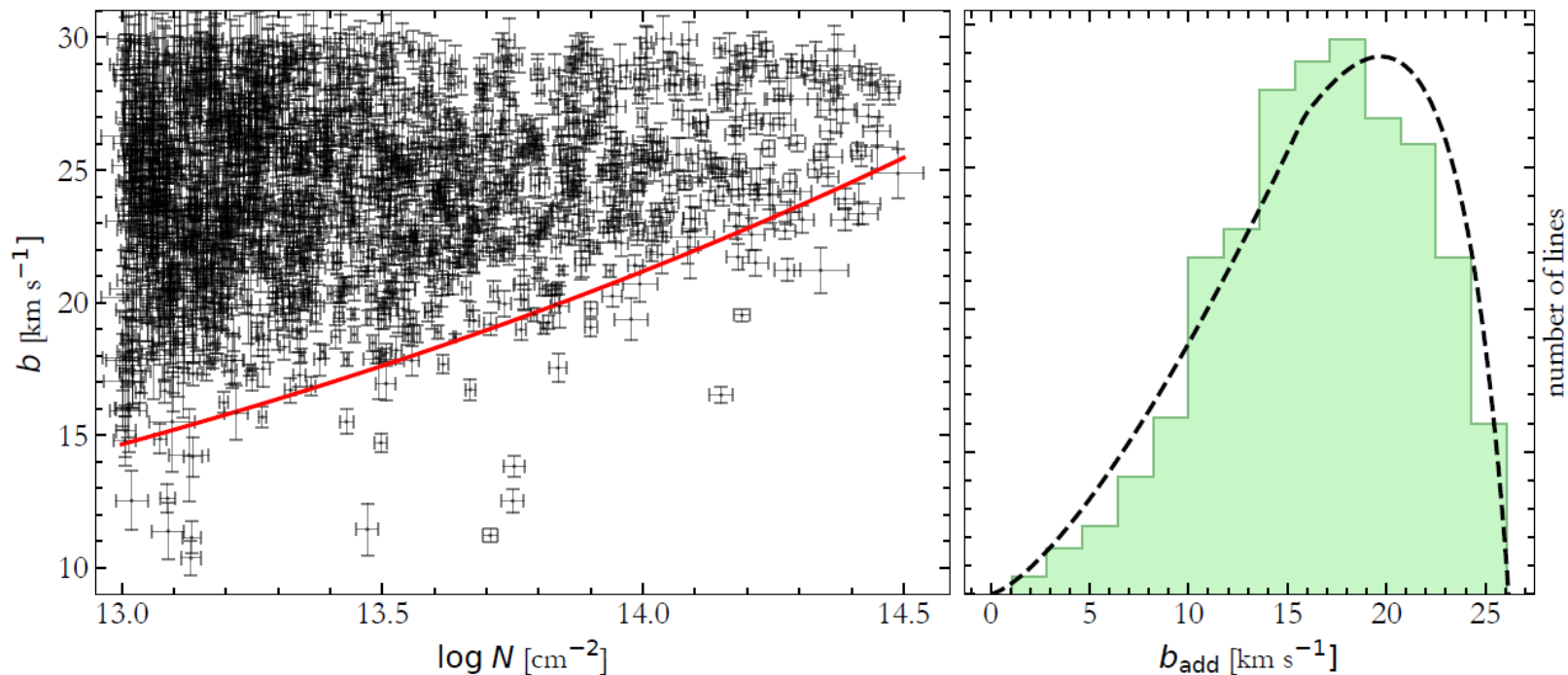
$$L = \prod_i [(1 - P_{\text{out}}) L_{\text{data}}(N_i, b_i) + P_{\text{out}} L_{\text{out}}(N_i, b_i)]$$

Анализ: распределение систем по b_{add}

$$f(b_{\text{add}}) \propto b_{\text{add}}^p$$

Обоснование выбора степенного распределения систем по b_{add} : колоколообразная форма распределения – селективный эффект

$$f(b_{\text{add}}) \propto \int_{N^{\min}}^{N^{\max}} N^{\beta} b_{\text{add}}^p dN$$



Анализ: связь температуры и скорости фотоионизации водорода. Дополнительные ограничения на T_0 и Γ

Тепловая компонента нижней границы распределения (N, b)

$$b_{\text{th}} = b_0 \left(\frac{N}{10^{12} \text{cm}^{-2}} \right)^{\xi-1} \left(\frac{1+z}{3.4} \right)^{-\frac{9(\xi-1)}{2}}$$

$$b_0 = 12.8 \left(\frac{\Gamma_{-12}}{17} \right)^{\xi-1} \left(\frac{T_0}{10^4 \text{K}} \right)^{1/2+0.22(\xi-1)} \left(\frac{2}{f_J} \right)^{\xi-1} \left(\frac{3\gamma}{5} \right)^{-\frac{\xi-1}{2}} \text{ км/с}$$

Определяем положение нижней границы распределения



Получаем ν, f_J и $b_0(T_0, \Gamma, f_J)$

Γ – скорость фотоионизации водорода

Как развязать комбинацию
 $T_0(z)$ и $\Gamma(z)$?

Анализ: связь температуры и скорости фотоионизации водорода.

Дополнительные ограничения на T_0 и Γ

Наблюдательный параметр $\tau_{eff}(T_0, \Gamma)$
– усреднённое поглощение в Ly α лесу

Аналитическое описание

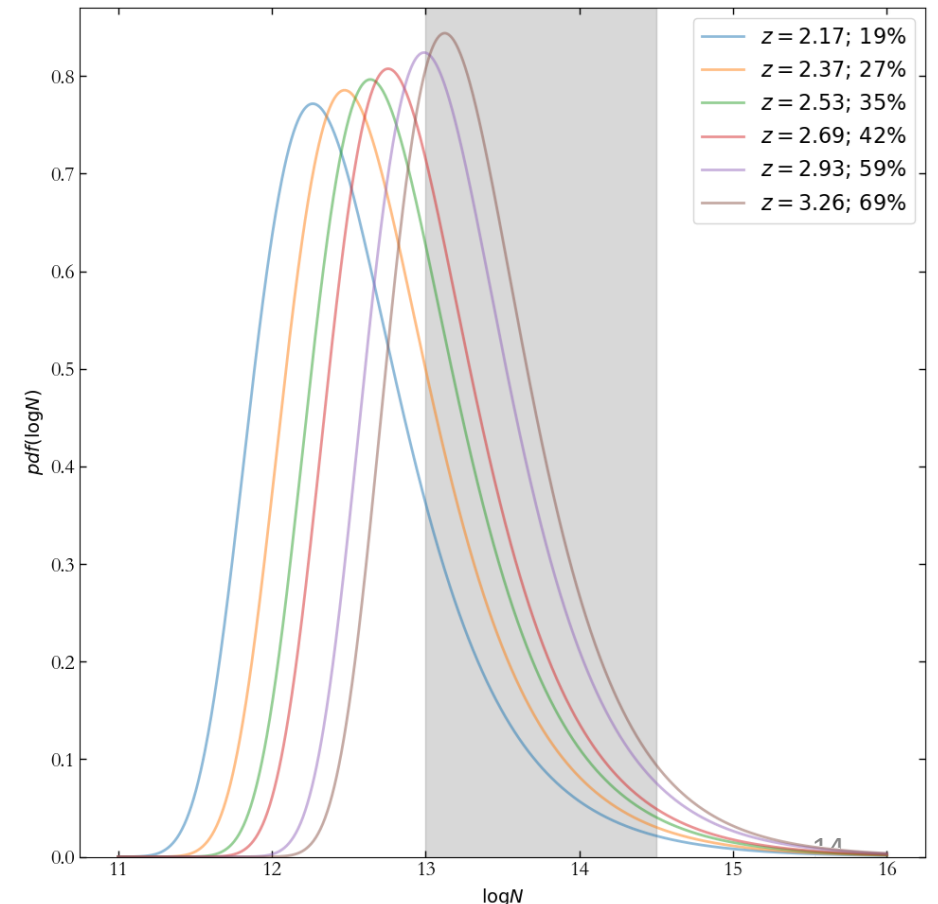
$$\tau_{eff} = -\ln\left[\int_0^\infty P(\Delta, z) \exp(-\tau(z)) d\Delta\right]$$

$$\tau = \frac{\pi f}{m_e v} \frac{1}{H(z)} \frac{R(T)}{\Gamma} n_{HII} n_e$$

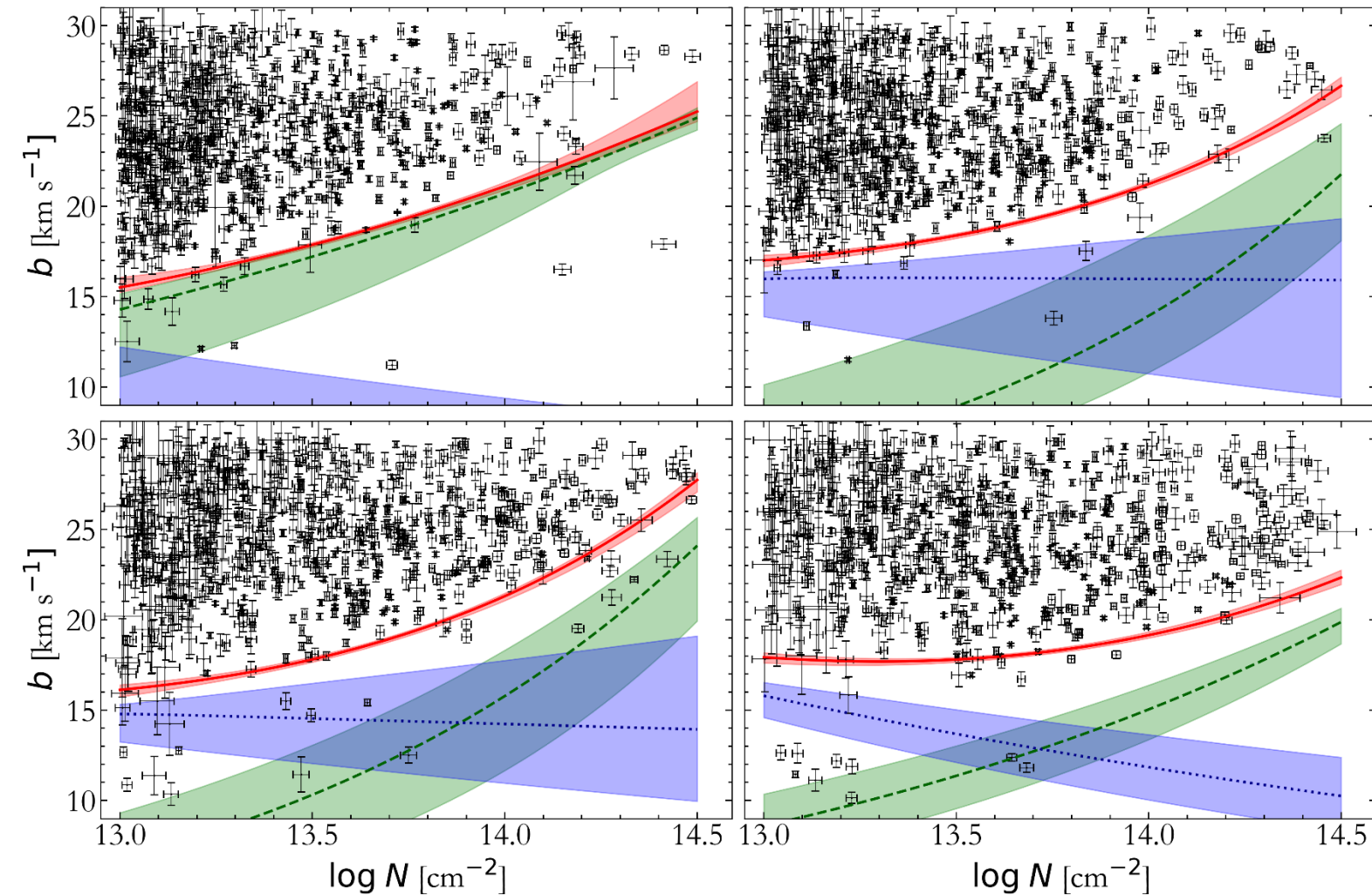
Измерения $\tau_{eff}(T_0, \Gamma)$ из *Faucher-Giguere et al. 2008* в качестве дополнительного ограничения на T_0 и Γ

$$P(\Delta, z) = A \exp\left(-\frac{\left(\Delta^{-\frac{2}{3}} - C_0\right)^2}{2\left(\frac{2\delta_0}{3}\right)^2}\right) \Delta^{-\zeta}$$

Miralda-Escude et al. 2000, Faucher-Giguere et al. 2008



Результаты: 4 диапазона по красному смещению



Распределение линий $\text{Ly}\alpha$ леса в пространстве параметров (N, b) для 4 диапазонов по красному смещению;

- Красные кривые – нижние границы распределений с учётом доп. механизма уширения
- Вклад теплового уширения в нижнюю границу показан зеленой кривой.
- Синие кривые – вклад дополнительного механизма уширения

! Вклад дополнительного уширения существенен для всего диапазона лучевых концентраций

Результаты: размер филаментов

Минимально возможное уширение
абсорбционных линий МГС

- **Тепловое**
- **За счет хаббловского расширения
филаментов конечного размера**
(Garzilli et al. 2015, 2019)

Нижняя граница распределения (N , b)

$$b_{\min}^2 = b_{\text{th}}^2 + b_{\rho}^2 \equiv \frac{2k_B T}{m} + \left(f_J \frac{\lambda_J H(z)}{2\pi}\right)^2,$$

При этом $b_{\text{th}} \propto \Delta^{\gamma-1}$, $b_{\rho} \propto \Delta^{\gamma-2}$

$$b_{\min} \approx \begin{cases} b_{\rho}, \Delta \leq 1, \\ b_{\text{th}}, \Delta > 1. \end{cases}$$

Наша работа

$$\Delta(N, z, \Gamma, T_0, \gamma, f_J)$$

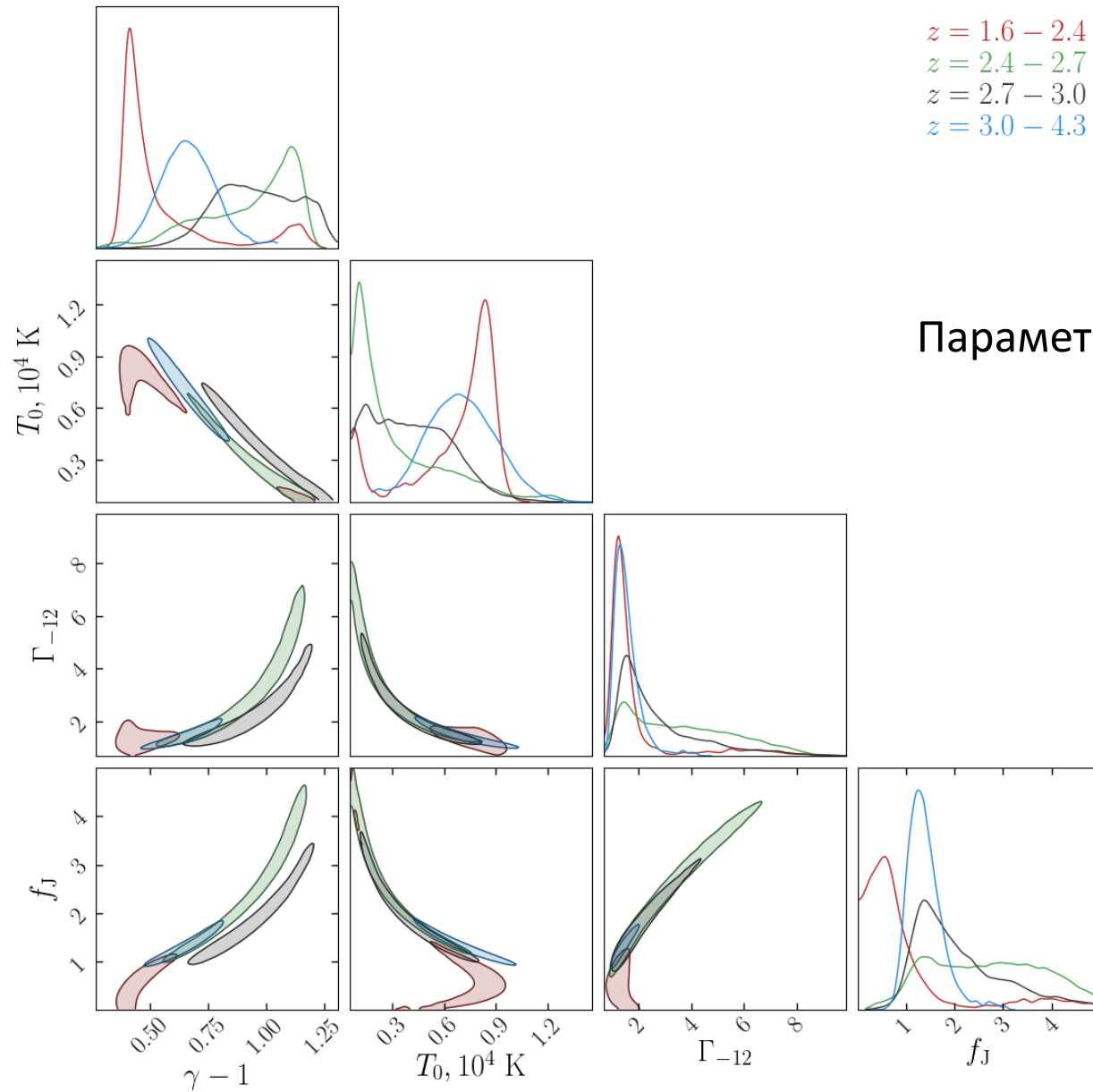
Характерные значения джинсовской длины на $\langle z \rangle = 3.3$

$$N = 10^{13} - 10^{14.5} \implies \Delta = 0.5 - 7$$

$\lambda_J = 0.2 \text{ Мpc}$	$\lambda_J = 0.1 \text{ Мpc}$
$b_{\rho} \approx 16 \text{ km/s}$	$b_{\rho} \approx 10 \text{ km/s}$

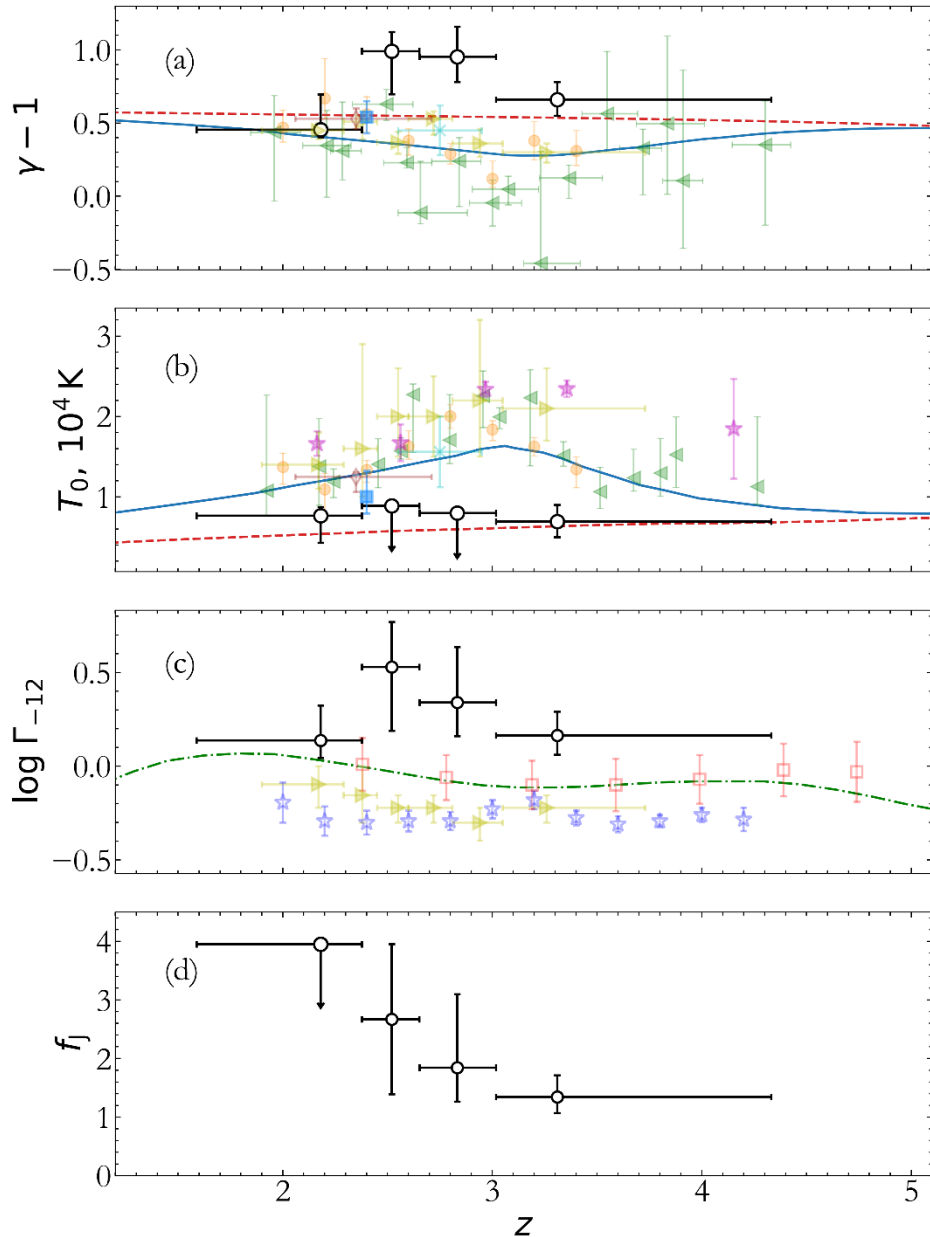
С увеличением плотности минимальный размер филаментов
уменьшается, вклад b_{ρ} ослабевает

Результаты: 1D и 2D постериорные распределения параметров



Параметры сильно скоррелированы

Результаты: γ , T_0 , Γ , f_j



Измерения согласуются с **отсутствием** реионизации HeII.
Возможные причины?

— Model with HeII reionization

- - - Model w/o HeII reionization

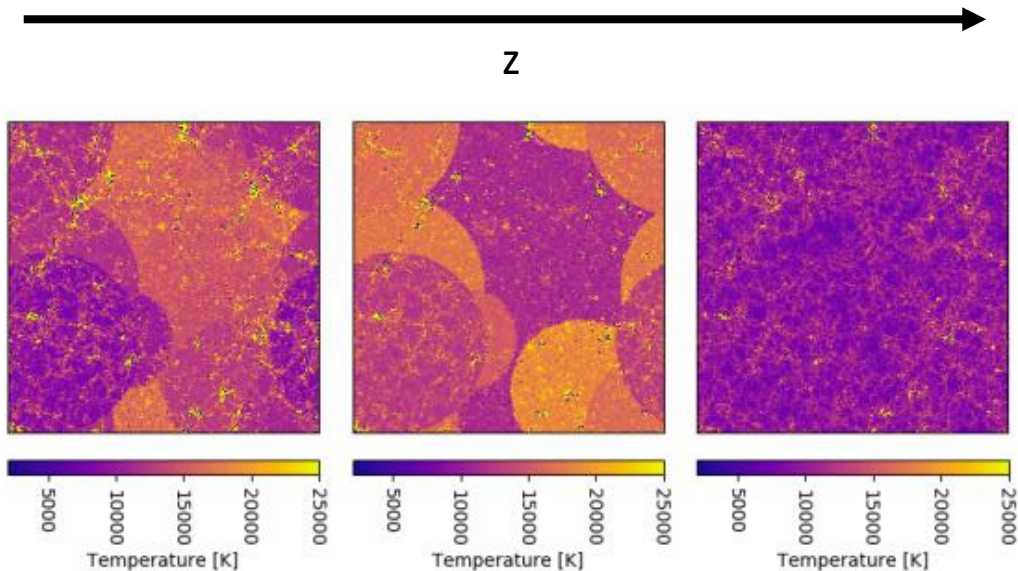
Upton Sanderbeck et al. 2016

— Model from Khaire et al. 2019

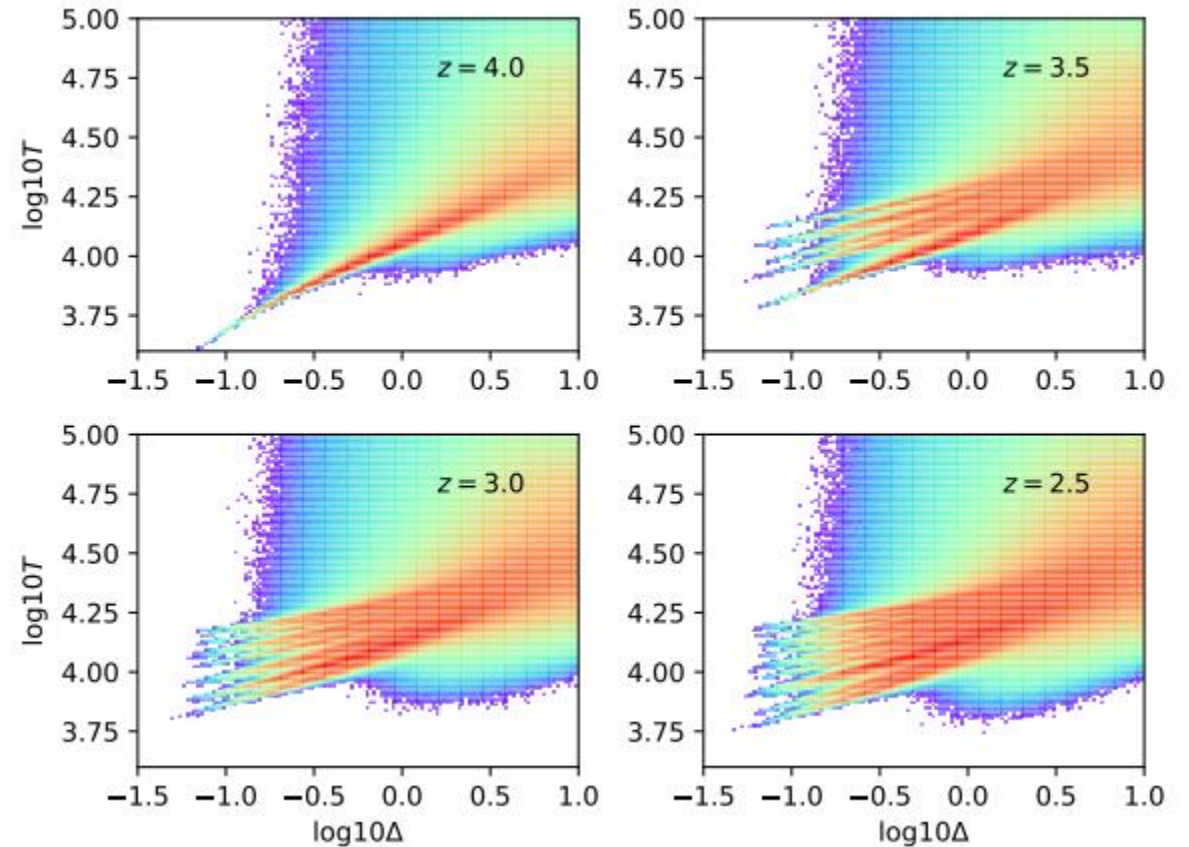
Результаты: ограничения на метод

Upton Sanderbeck et al. 2020.

Неоднородная реионизация → пузыри
ионизованного горячего газа вокруг
источников излучения



Возникает набор зависимостей T - Δ с разными параметрами. Минимальная температура соответствует не ионизованным областям.



В режиме неоднородной реионизации метод не чувствителен к ионизованным областям газа

Заключение

При помощи анализа распределения систем $L\alpha$ леса было проанализировано влияние дополнительного механизма уширения абсорбционных линий, связанного с хаббловским расширением филаментов МГС.

Для того, чтобы уменьшить вырожденность искомым параметров, дополнительно в анализ были включены результаты измерений эффективной оптической толщины $L\alpha$ леса.

- Оценен характерный размер филаментов МГС на $z = 2-4$;
- Вклад дополнительного механизма уширения **значителен** во всём диапазоне исследуемых лучевых концентраций – **им нельзя пренебрегать**;
- Пространственная **неоднородность** реионизации накладывает дополнительные ограничения на методы определения теплового состояния МГС, использующие минимальное уширение абсорбционных линий – **необходима калибровка** методов по результатам моделирования, учитывающего **неоднородный** характер реионизации;