



# CII\*/CII в среде с низкой металличностью <u>MNRAS Letters, 509, 26, 2022</u> <u>arXiv:2110.13591</u>

**С.А. Балашев**<sup>1</sup>, К.Н. Теликова<sup>1</sup>, Р. Noterdaeme<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург <sup>2</sup> Institute d'Astrophysique de Paris

При поддержке РНФ 18-12-00301

# Введение: С II



- Углерод один из самых распространённых элементов
- С II может быть как в ионизованной, так и в нейтральной (тёплой и холодной) межзвёздной среде
- Тонкое расщепление основного
  электронного уровня ⇒ Излучение
  в линии [С II] 158µm один из главных
  механизмов охлаждения диффузной
  нейтральное среды
- Линии С II 1334Å, С II\* 1335Å
  "удобны" для изучения DLA систем в спектрах квазаров, так как часто попадают вне Лайман-альфа леса.

# **Введение:** [С II] 158µm

- Линия [С II] 158µm одна из наиболее ярких линий излучения для звёздообразующих галактик (в суб-мм диапазоне)
- Наблюдается как в нашей Галактике, так и в галактиках на больших красных смещениях *z* > 4 (например, ALPHINE-ALMA CII)
- Линия [С II] 158µm из различных фаз: ионизованной, нейтральной, фотодиссоционных областей. Поэтому трактовка эмиссионных наблюдений неоднозначная...



## Введение: С II в абсорбции

- В DLA системах линии С II 1334Å и С II\* 1335Å лежат как правило в "чистой" области (без Lya леса) и хорошо отделяются друг от друга
- Линия С II 1334Å в DLA системах почти всегда насыщена лучевую концентрацию N(С II) практически всегда не определить.
- Линия **С II\* 1335Å** обычно относительно слабая, что **С II\*** даже не всегда идентифицируется в DLA системах.



### Введение: С II в абсорбции. Wolfe+2008

Wolfe et al. 2003-2008 предложили использовать  $N(C II^*)$  в DLA для оценок

 $l_{\text{CII}}$  — темпа охлаждения среды в линии [С II]158  $\mu$ m

$$l_{\text{CII}} \equiv \frac{N(\text{C II}^*)A_{21}h\nu_{21}}{N(\text{H I})} \quad (\text{Pottasch+1979})$$



### Введение: С II в абсорбции. Wolfe+2008

Wolfe et al. 2003-2008 продвигали идею, что бимодальность  $l_{C}$  является следствием бимодальности в темпах звездообразования в DLA

$$l_{\text{CII}} = \Lambda_{\text{tot}} = \Gamma_{\text{tot}} = \Gamma_{pe}(UV, Z) \quad \propto \quad UV, Z \quad \Longrightarrow \quad UV \quad \Rightarrow \quad \Sigma_{\text{SFR}}$$

#### Введение: С II в абсорбции. Wolfe+2008

Wolfe et al. 2003-2008 продвигали идею, что бимодальность  $l_{\mathcal{C}}$  является следствием бимодальности в темпах звездообразования в DLA

$$l_{\text{CII}} = \Lambda_{\text{tot}} = \Gamma_{\text{tot}} = \Gamma_{pe}(UV, Z) \quad \propto \quad UV, Z \quad \Longrightarrow \quad UV \quad \Rightarrow \quad \Sigma_{\text{SFR}}$$

При этом бимодальность  $l_{CII}$  также проявлялась и в других свойствах  $(Z, \Delta v_{90}, W_{SIII})$  наблюдаемой выборки DLA систем:



### Введение: Wolfe+2008. Критика

1. Наблюдения DLA указывали, что типичные  $\Sigma_{SFR}$  значительно меньше, чем измерения по C II для high-cool DLA (Fumagalli+2014).



2. DLA системы в основном трассируют теплую фазу нейтрального газа

$$l_{\text{CII}} \neq \Lambda_{\text{tot}} \approx \Lambda_{\text{Lya}} = \Gamma_{\text{tot}} = \Gamma_{\text{pe}}$$
  
 $l_{\text{CII}} = \Lambda_{\text{tot}}$  (только для холодной фазы нейтральной среды) <sub>8</sub>

#### Введение: Wolfe+2008. Критика

3. DLA системы имеют низкую металличность ( $Z \leq 0.1$ )

 $\Rightarrow$  пыли мало (DTG  $\propto Z$ )

 $\Rightarrow$  нагрев фотоэлектронами мал ( $\Gamma_{pe} \propto DTG \propto Z$ )



#### Бимодальность темпов охлаждения

Как тогда можно объяснить бимодальность  $l_{CII}$  (и других свойств) в DLA?



#### Бимодальность темпов охлаждения

Как тогда можно объяснить бимодальность  $l_{CII}$  (и других свойств) в DLA?



$$\mathcal{L}_{\text{CII}} \propto \frac{N(\text{C II}^*)}{N(\text{H I})} = \frac{N(\text{C II}^*)}{N(\text{H I})} \times \frac{Z}{Z} \propto$$
  
 $\propto \frac{N(\text{C II}^*)}{N(\text{C II})} \times Z \equiv R_{\text{C}} \times Z$ 

Тогда что объяснить бимодальность  $l_{CII}$ :

- 1. Бимодальность  $R_{C}$
- 2. Зависимость  $R_{\rm C} \propto Z^{-1}$

Как тогда можно объяснить бимодальность  $l_{CII}$  (и других свойств) в DLA?

 $l_{\rm CII} \propto R_{\rm C} \times Z$ 



# Отношение $C II^*/C II$



Для широкого диапазона физических условий населённость уровня С II<sup>\*</sup> определяется балансом между столкновительным заселением (H I, H<sub>2</sub>, e<sup>-</sup>) и спонтанным переходом:

E, cm<sup>-1</sup>

$$R_C = \frac{N(\text{C II}^*)}{N(\text{C II})} \approx \frac{n(\text{C II}^*)}{n(\text{C II})} \approx \frac{C_{12}(T)n}{A_{21}}$$

для Н I и H<sub>2</sub>: 
$$C_{12}(T) \propto T^{0.35}$$
  
+  $P_{th} = n T$   $\Rightarrow$   $R_{\rm C} \propto T^{-0.65} P_{th}$ 

Тогда наличие холодной ( $T_{\rm CNM} \approx 100$  K) и тёплой ( $T_{\rm WNM} \approx 8000$  K) фазы:

$$\Rightarrow$$
 бимодальность  $R_{\rm C}$ :  $R_{\rm C}^{\rm CNM} \approx 20 \times R_{\rm C}^{\rm WNM}$ 

(см., например, Liszt 2002, Wolfe+2003, Srianand+2005) 13

#### Фазовая диаграмма нейтральной среды

$$\Rightarrow \Gamma_{\text{tot}} = \Gamma_{\text{pe}}(Z) + \Gamma_{\text{cr}} + \Gamma_{\text{turb}} + \Gamma_{X} + \dots$$
$$\parallel \\ \Lambda_{\text{tot}} = l_{\text{CII}}(Z) + l_{\text{OI}}(Z) + \Lambda_{\text{Ly}\alpha} + \dots$$

Зависимость составляющих от металличности  $\implies$  фазовая диаграмма нейтральной среды зависит от металличности (Srianand+2003, Bialy+2019, ...)



# Зависимость $R_{\rm C} \propto Z^{-1}$

Так как характерное тепловое давление растёт с падением металличности:

$$R_C \propto T^{-0.65} P_{th} \propto T^{-0.65} Z^{-1} \quad (Z \ll 1)$$



Тогда для 
$$\begin{cases} \chi = 1 \text{ [Draine field]} \\ \zeta = 10^{-16} \text{ [s}^{-1} \text{]} \\ \Gamma_{\text{turb}} = 10^{-27} n \text{ [erg s}^{-1} \text{]} \\ \text{DTG} \propto Z^{-2} \end{cases}$$
 и давления  $P = \frac{P_{\min} + P_{\max}}{2}$ 

получаем



Тогда для  $\begin{cases} \chi = 1 \text{ [Draine field]} \\ \zeta = 10^{-16} \text{ [s}^{-1}\text{]} \\ \Gamma_{\text{turb}} = 10^{-27} n \text{ [erg s}^{-1}\text{]} \\ \text{DTG} \propto Z^{-2} \end{cases}$ 

Добавляя 0.3 dex дисперсию по каждому из параметров и  $P \sim U[P_{\min}, P_{\max}]$ :



Уровень С II<sup>\*</sup> может также эффективно населятся за счёт столкновений с  $e^-$ :

$$f_{\rm HII} > 10^{-2} \implies R_{\rm C} = \frac{C_{12}^{e}(T_{e})n_{e}}{A_{21}}$$

Тогда предполагая  $f_{HII} = 1$ ,  $T_e = 10^4$  K,  $P_{IM} = P_{th}$  (и то же сэмплирование):



Что с бимодальностью по другими свойствами (Z,  $\Delta v_{90}$ )?

- 1. Почему  $H_2$  найден только в части CNM DLA?
- 2. Почему число DLA систем, ассоциированных с CNM по C II растёт с ростом  $(Z, \Delta v_{90})$ ?



Что с бимодальностью по другими свойствами (Z,  $\Delta v_{90}$ )?

1.  $\Delta v_{90} \propto Z$  (Ledoux+2006)

2. 
$$\begin{cases} R_{C} = f_{CNM} R_{C}^{CNM} + (1 - f_{CNM}) R_{C}^{WNM} \\ Pr(CNM) \propto Z (\Delta v_{90}) & \text{(по H}_{2} - \text{см., например,} \\ Noterdaeme + 2008) \end{cases}$$
$$\frac{Pr(R_{C} \approx R_{C}^{CNM}, Z)}{Pr(R_{C} \approx R_{C}^{WNM}, Z)} \gg \frac{Pr(CNM)}{Pr(WNM)} > 0.05 \text{ (по H}_{2} - \text{Balashev} + 2018) \end{cases}$$

3. Функция селекции для выборки С II в DLA не известна

#### Заключение

- 1. Мы показали, что наблюдаемая бимодальность в темпах охлаждения С II в DLA системах на больших красных смещения является следствием
  - і. Разделения нейтральной среды на тёплую и холодную фазу
  - іі. Зависимости фазовой диаграммы нейтральной среды от металличности
- 2. Наблюдаемая зависимость  $R_{\rm C}(Z)$  воспроизводиться для характ. параметров среды (UV = 1,  $\zeta_{\rm CR} = 10^{-16}$  s<sup>-1</sup>,  $\Gamma_{\rm turb}n = 10^{-27}$  erg s<sup>-1</sup>,  $DTG \propto Z^{-2}$ )
- 3. Отношение С II\*/С II (или  $l_{CII}$ ) может быть использовано для оценок  $\zeta_{CR}$  скорости ионизации космическими лучами, а не UV (и сл-но  $\Sigma_{SFR}$ )

Однако 
$$\sqrt{\zeta_{CR}} \propto UV \propto \Sigma_{SFR}$$
 (Kosenko, SB+2021)

- 4. Холодная фаза в DLA трассируется не только  $H_2$
- 5. Отношение С II\*/С II в тёплой фазе даёт хорошую оценку на  $n \Rightarrow P_{th}$