

Научные задачи по межзвездной среде для проекта Спектр-УФ

Кирсанова М. С.
ИНАСАН

Звездообразование и планетообразование -- 2022, 16 ноября 2022, АКЦ ФИАН

Цель

- Сформировать рабочую группу по разработке программы наблюдений по МЗС для проекта *Спектр-УФ*
- Подготовить реалистичную программу наблюдений по МЗС с учетом возможностей и знаний/умений/навыков участников рабочей группы

Ближайшие задачи

- Определить перспективные задачи в УФ по МЗС, разделить по категориям (прорывные, уточняющие параметры и проч.)
- Понять реализуемы ли они на *Спектре-УФ*
- Начать прорабатывать заявки: каталоги источников, модельные спектры и проч.

Предыдущие УФ-телескопы

- *Copernicus* -- пионерские исследования распределения межзвездных H_2 , CO
- *International Ultraviolet Explorer* -- кривые межзвездного поглощения
- *FUSE* -- распределение H_2 , HD в Галактике и Магеллановых облаках
- *GALEX* -- обзоры в УФ
- *HST* -- единственный работающий в УФ сейчас

Атомарная МЗС в ультрафиолете

- Абсорбционные переходы атомов/ионов в основном электронном состоянии -> **определение содержаний элементов в МЗС**
- **Почему это до сих пор важно?** Астрохимическое моделирование большинства научных групп основано на использовании т.н. стандартных обилий элементов в моделях типа CLOUDY, Meudon и др.
- Дзета Змееносца, Хи Персея...

TABLE 1
ELEMENTAL ABUNDANCES WITH RESPECT TO n_H

Species	EA1 ¹	EA2	EA3	Reference for EA2
He.....	1.40(-1)	9.00(-2)	9.00(-2)	see text
N.....	2.14(-5)	7.60(-5)	7.60(-5)	Cardelli et al. (1993)
O.....	1.76(-4)	2.56(-4) ²	2.56(-4) ²	Meyer et al. (1998)
C ⁺	7.30(-5)	1.20(-4) ²	1.20(-4) ²	Cardelli et al. (1993)
S ⁺	8.00(-8)	1.50(-5)	1.50(-5)	Federman et al. (1993) ³
Si ⁺	8.00(-9)	1.70(-6)	0.00	Cardelli et al. (1994)
Fe ⁺	3.00(-9)	2.00(-7)	1.50(-8)	Savage et al. (1992)
Na ⁺	2.00(-9)	2.00(-7)	2.00(-7)	Savage & Sembach (1996)
Mg ⁺	7.00(-9)	2.40(-6)	0.00	Savage et al. (1992)
Cl ⁺	1.00(-9)	1.8(-7)	1.80(-8)	Savage & Sembach (1996) ⁴
P ⁺	2.00(-10)	1.17(-7)	1.17(-7)	Savage & Sembach (1996) ⁴
F ⁺	6.68(-9) ⁵	1.8(-8)	6.68(-9) ⁵	Federman et al. (2005)

Table 15 Stored Abundance Sets

	Atom	H II Region	Planetary	Nova	Cameron	Primordial	ISM
	key	HII, H II	PLANetary	NOVA	CAMERon	PRIMordial	_ISM
2	He	0.095	0.10	0.098	0.0677	0.072	0.098
3	Li	5.4(-11)	1(-20)	2.05(-9)	2.20(-9)	1(-10)	5.4(-11)
4	Be	1(-20)	1(-20)	2.62(-11)	4.50(-11)	1(-16)	1(-20)
5	B	8.9(-11)	1(-20)	7.60(-10)	3.40e-10	-	8.9(-11)
6	C	3(-4)	7.8(-4)	9.40(-3)	4.22(-4)	-	2.51(-4)

Hazy, intro to CLOUDY, G J Ferland

Атомарная МЗС в ультрафиолете

определение содержания элементов в МЗС

- [CII] @ $\lambda = 2325\text{\AA}$
250 пк от Солнца, астрохимические модели для Ориона -- 400 пк от Солнца
- Дзета Змееносца $x[\text{C}] = 1.32 \pm 0.32 \times 10^{-4}$ Cardelli et al. 1993; Savage & Sembach 1996
- $x[\text{C}] = 1.62 \pm 0.39 \times 10^{-4}$ Sota et al. 2004
- Хи Персея $x[\text{C}] = 2.45 \times 10^{-4}$ Cardelli et al. 1993; Savage & Sembach 1996
- $x[\text{C}] = 2.7 \times 10^{-4}$ -- тоже используют для Ориона Rubin et al. (1991) and Osterbrock, Tran & Veilleux (1992)
- $x[\text{C}] = 8 \times 10^{-5}$ -- по мм-линиям углеродосодержащих молекул в TMC-1 Fuente et al. 2019
- и проч и проч...

Атомарная МЗС в ультрафиолете

определение содержаний элементов в МЗС

TABLE 1
ELEMENTAL ABUNDANCES WITH RESPECT TO n_H

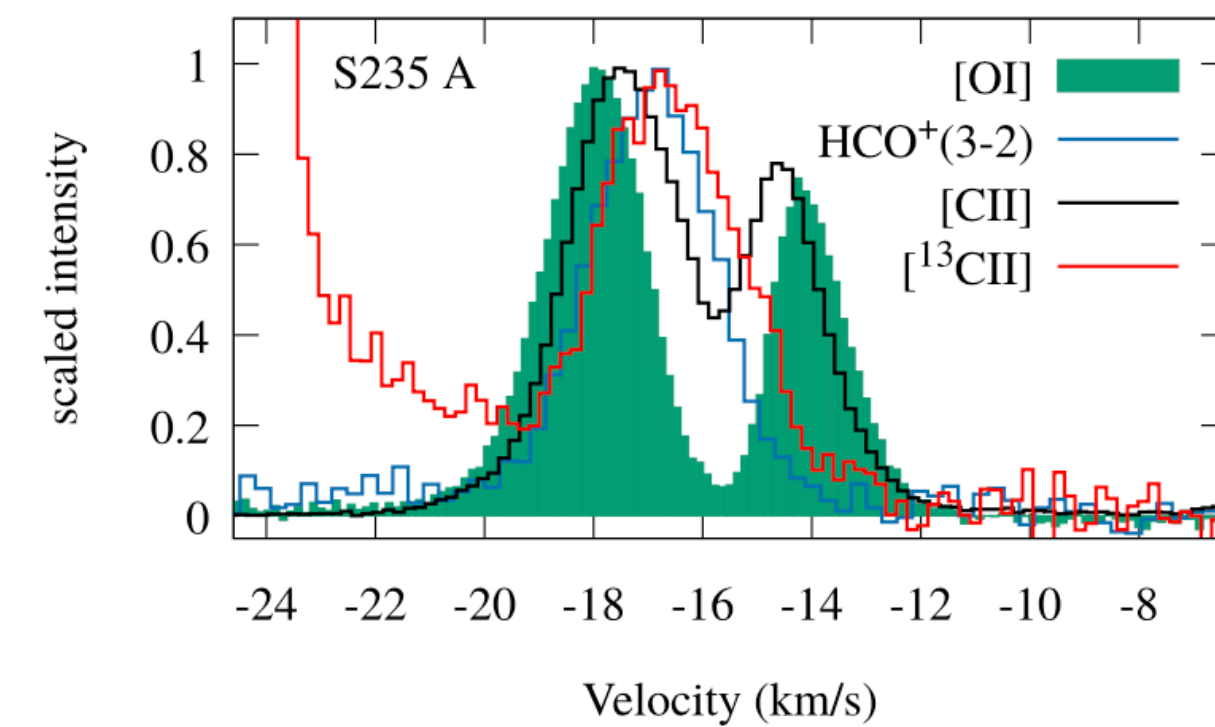
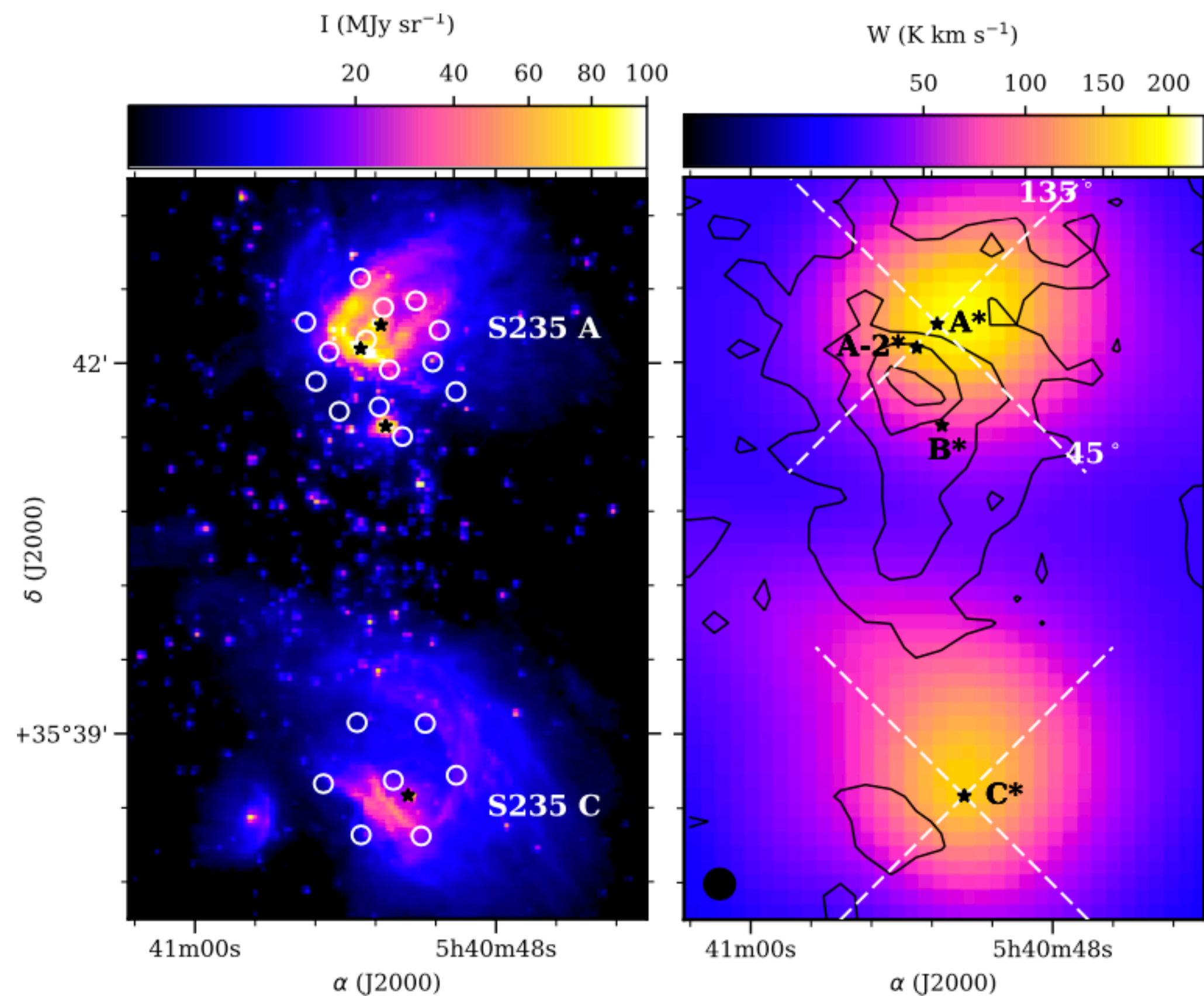
Species	EA1 ¹	EA2	EA3	Reference for EA2
He.....	1.40(-1)	9.00(-2)	9.00(-2)	see text
N.....	2.14(-5)	7.60(-5)	7.60(-5)	Cardelli et al. (1993)
O.....	1.76(-4)	2.56(-4) ²	2.56(-4) ²	Meyer et al. (1998)
C ⁺	7.30(-5)	1.20(-4) ²	1.20(-4) ²	Cardelli et al. (1993)
S ⁺	8.00(-8)	1.50(-5)	1.50(-5)	Federman et al. (1993) ³
Si ⁺	8.00(-9)	1.70(-6)	0.00	Cardelli et al. (1994)
Fe ⁺	3.00(-9)	2.00(-7)	1.50(-8)	Savage et al. (1992)
Na ⁺	2.00(-9)	2.00(-7)	2.00(-7)	Savage & Sembach (1996)
Mg ⁺	7.00(-9)	2.40(-6)	0.00	Savage et al. (1992)
Cl ⁺	1.00(-9)	1.8(-7)	1.80(-8)	Savage & Sembach (1996) ⁴
P ⁺	2.00(-10)	1.17(-7)	1.17(-7)	Savage & Sembach (1996) ⁴
F ⁺	6.68(-9) ⁵	1.8(-8)	6.68(-9) ⁵	Federman et al. (2005)

Wakelam & Herbst, 2008

- определяют уменьшение обилий элементов по сравнению со стандартом -- Солнцем
- обилия в МЗС < солнечных
- фактор 2-4 для С, N, O, фактор 100-1000 для более тяжелых
- если элементов нет в газовой фазе, значит они на пыли!
- не прямое определение состава межзвездной пыли

Атомарная и молекулярная МЗС в ультрафиолете

Пример: почему важно определять содержания элементов



- как получить оптически-толстые линии [CII] на 158 микрон в моделях?
- $\tau_{\text{[CII]}}$ -- до 10 величин
- ФДО окружены клочковатой холодной нейтральной средой
- или обилие углерода в хим. модели занижено...

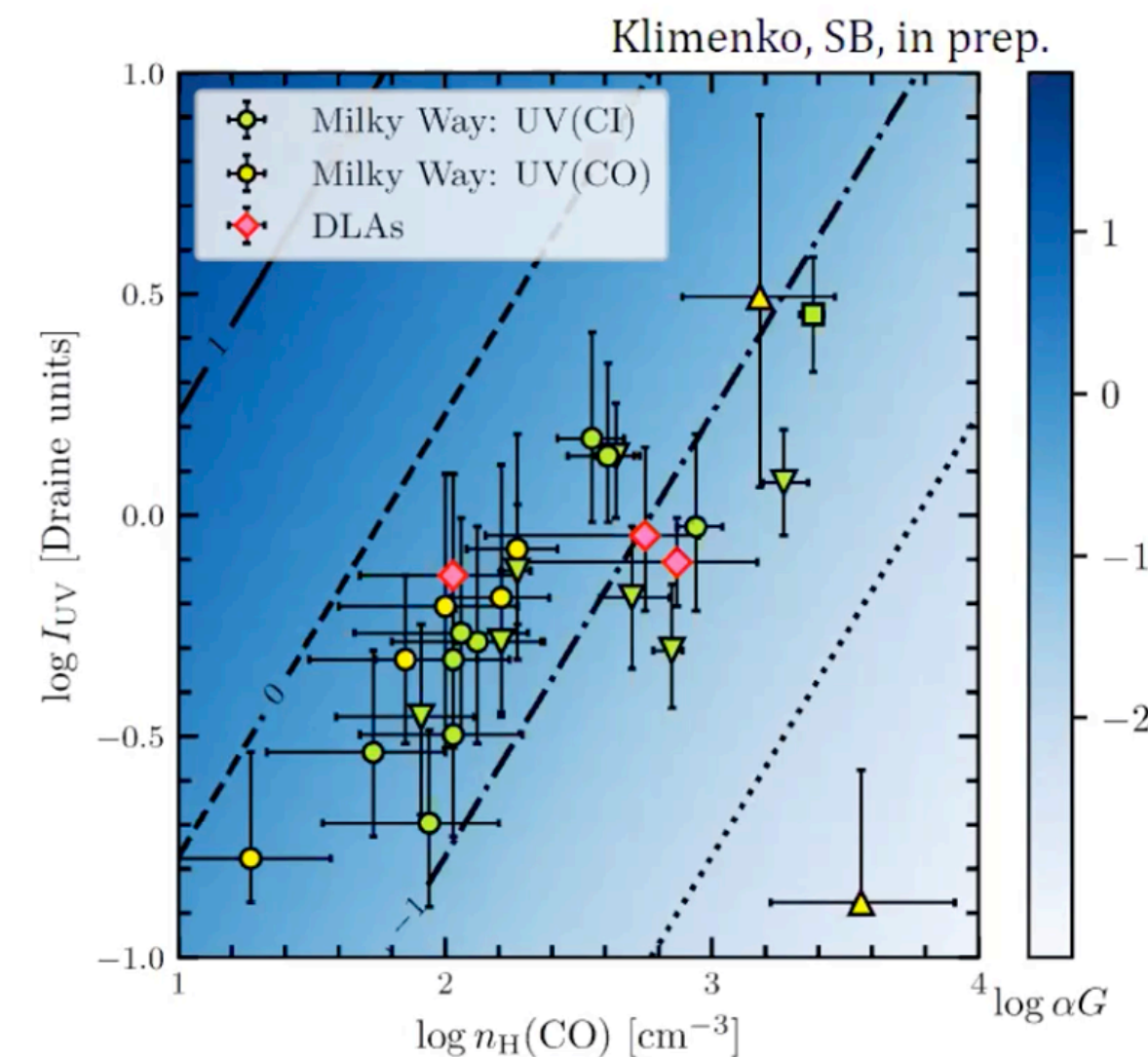
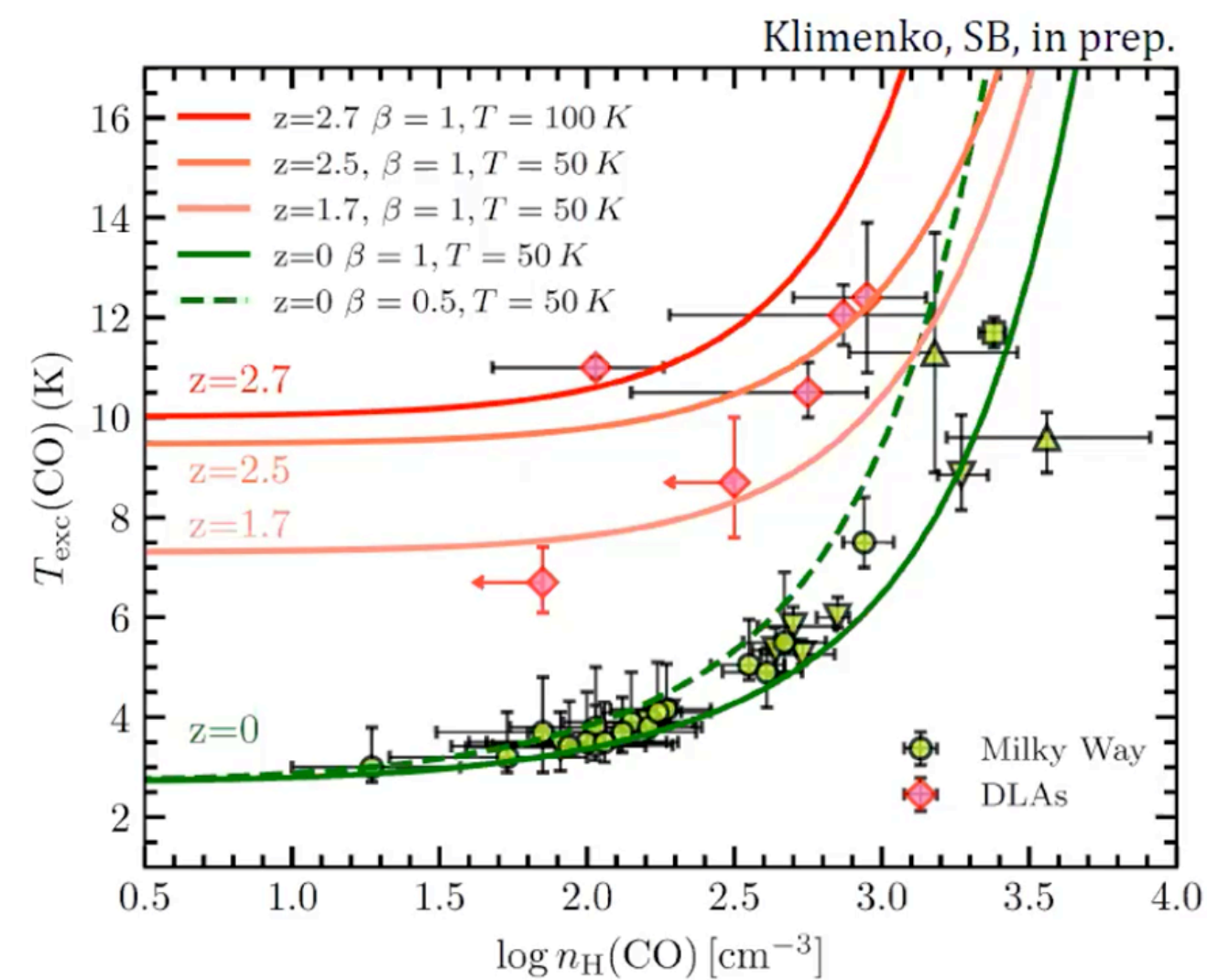
Атомарная и молекулярная МЗС в ультрафиолете

определение физических условий в диффузных облаках

- доклады С. А. Балашева, Д. Н. Косенко

Физические условия. Молекула CO

Молекула CO также может использоваться для оценок объемной плотности газа (но в основном на малых z – в нашей Галактике):



Помимо, теплового баланса, $\frac{I_{\text{UV}}}{n} \propto \alpha G$ (Sternberg+2014) определяет распространённости молекул.

Межзвездные молекулы в ультрафиолете

- Молекулы в УФ - только для изучения диффузного газа, не для темных холодных облаков с ранними стадиями звездообразования
- Столкновения в дифф. облаках редки, молекулы находятся в основном электронном состоянии
- Населены нижние вращательные уровни основного колебательного и электронного состояний, исключение -- области, освещенные УФ-излучением -- области фотодиссоциации
- Несколько ключевых молекул для МЗС лучше всего наблюдать по их электронным переходам в диффузных облаках: H_2 , HD (доклады 15/11)
- Известны частоты для электронных переходов CO, OH, H_2O
- Органика в диффузных облаках в УФ -- **нужны частоты переходов**

Межзвездные молекулы в ультрафиолете

- Межзвездная пыль -- поглощает излучение в т.ч. молекул от ИК до УФ
- Межзвездный H_2 -- поглощает в УФ для $\lambda < 1110\text{\AA}$ в полосах Лаймана-Вернера
- Звезды, наблюдаемые на просвет -- сами имеют сложные спектры в УФ + переменный уровень континуума

Молекулы H₂

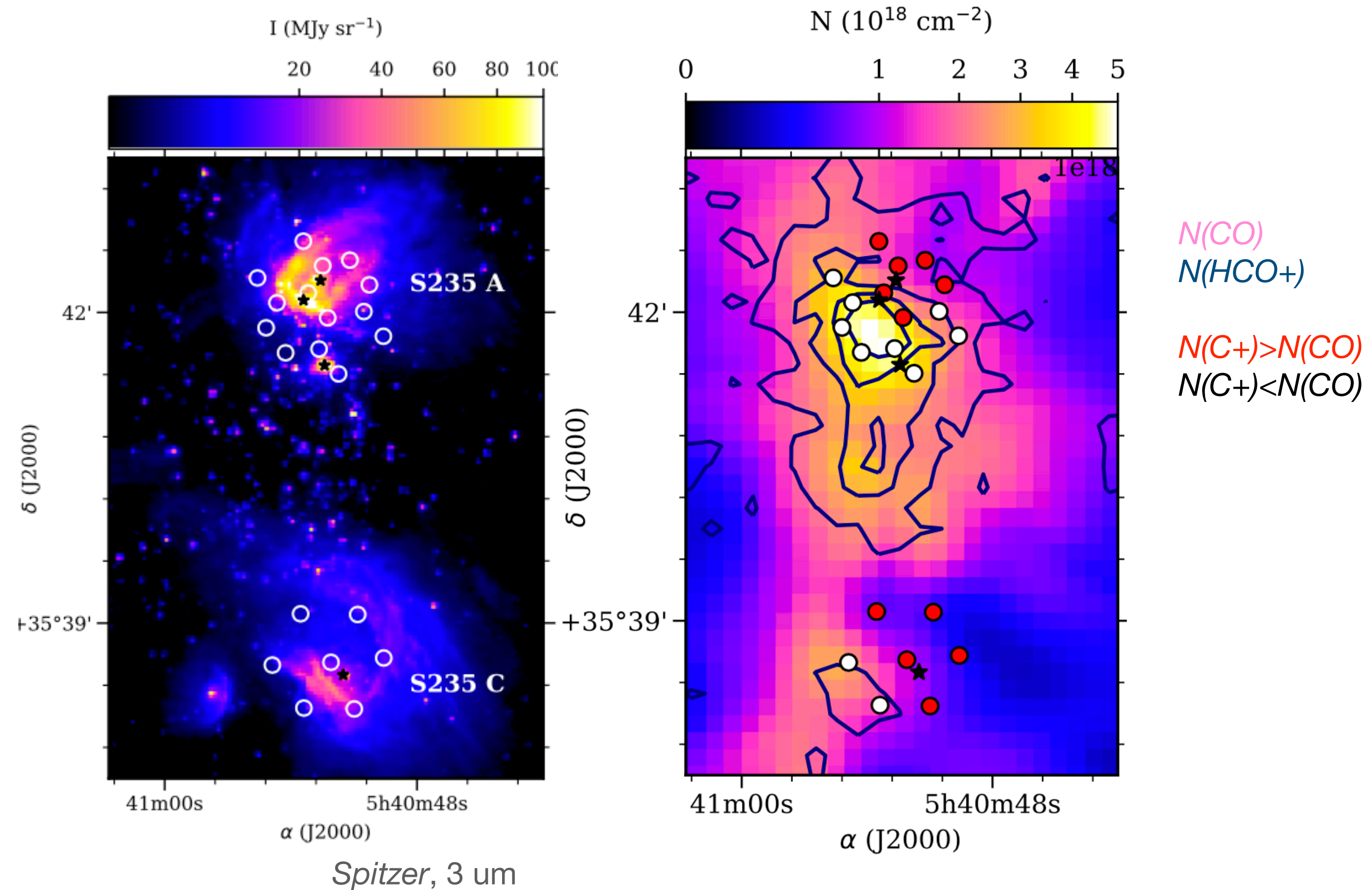
H₂ не имеет вращательных переходов и не видна напрямую в холодных облаках

- в УФ не было найдено направления, где бы не наблюдалось полос поглощения H₂
- $10^{14} \text{ см}^{-2} < N(\text{H}_2) < X \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ -- по УФ
- $0.01 < N(\text{H}_2)/N(\text{H}) < 0.8-0.9$ -- по УФ
- существуют ли облака, где $N(\text{H}_2)/N(\text{H}) = 1$?
- на луче зрения всегда смесь атомарного и молекулярного водорода
- $N(\text{H}_2) \approx 5 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$ -- эффект самоэкранирования

Молекулы CO

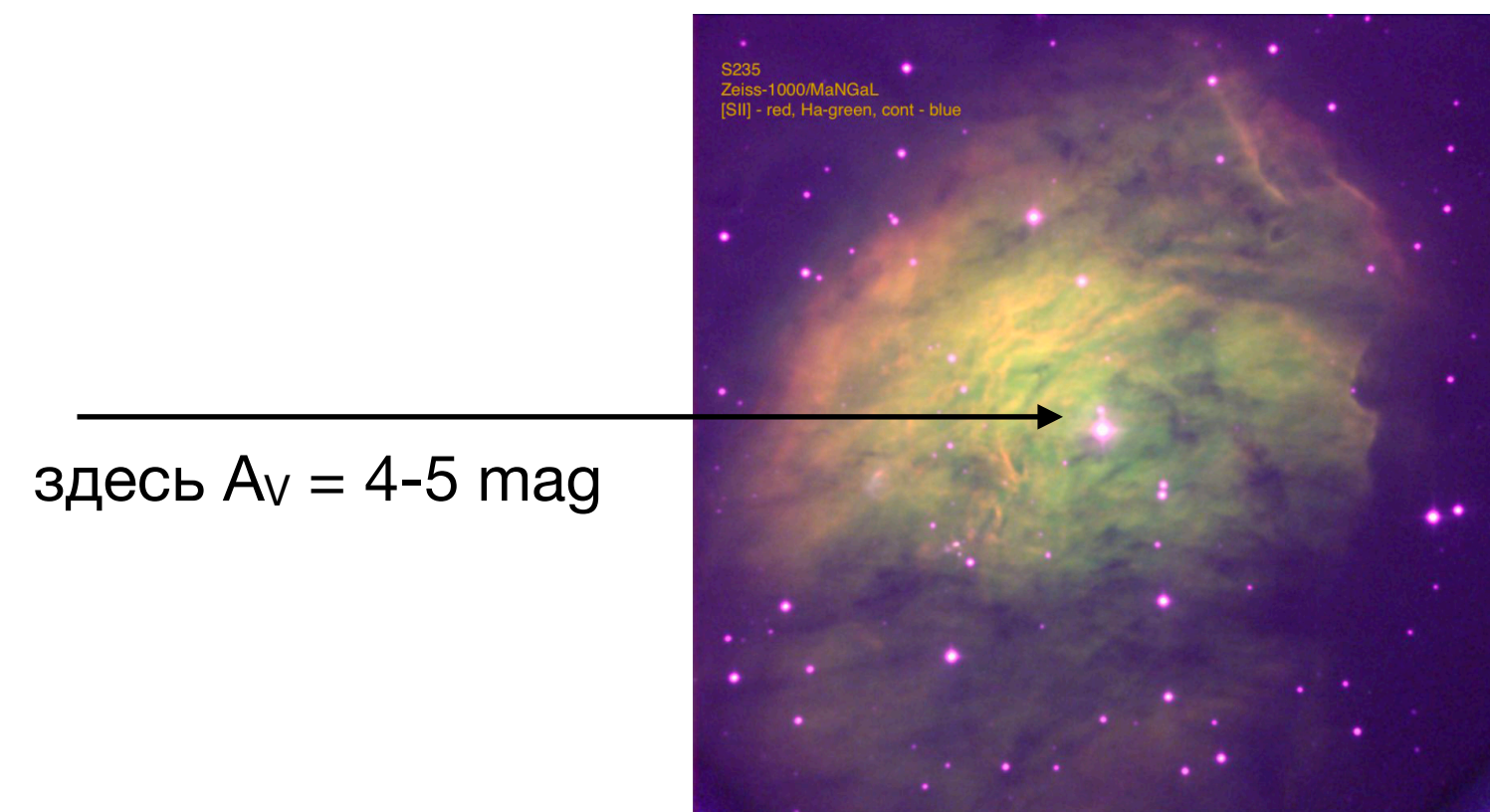
CO имеет и вращательные, и колебательные и электронные переходы

- CO используется для "суррогатного" определения $N(\text{H}_2)$ с помощью пересчета типа $N(\text{H}_2) = N(\text{CO}) \times 10^4$
- Но не везде, где есть CO, есть и H_2 -- т.н. **CO-темный газ** не экзотика



Молекулы CO

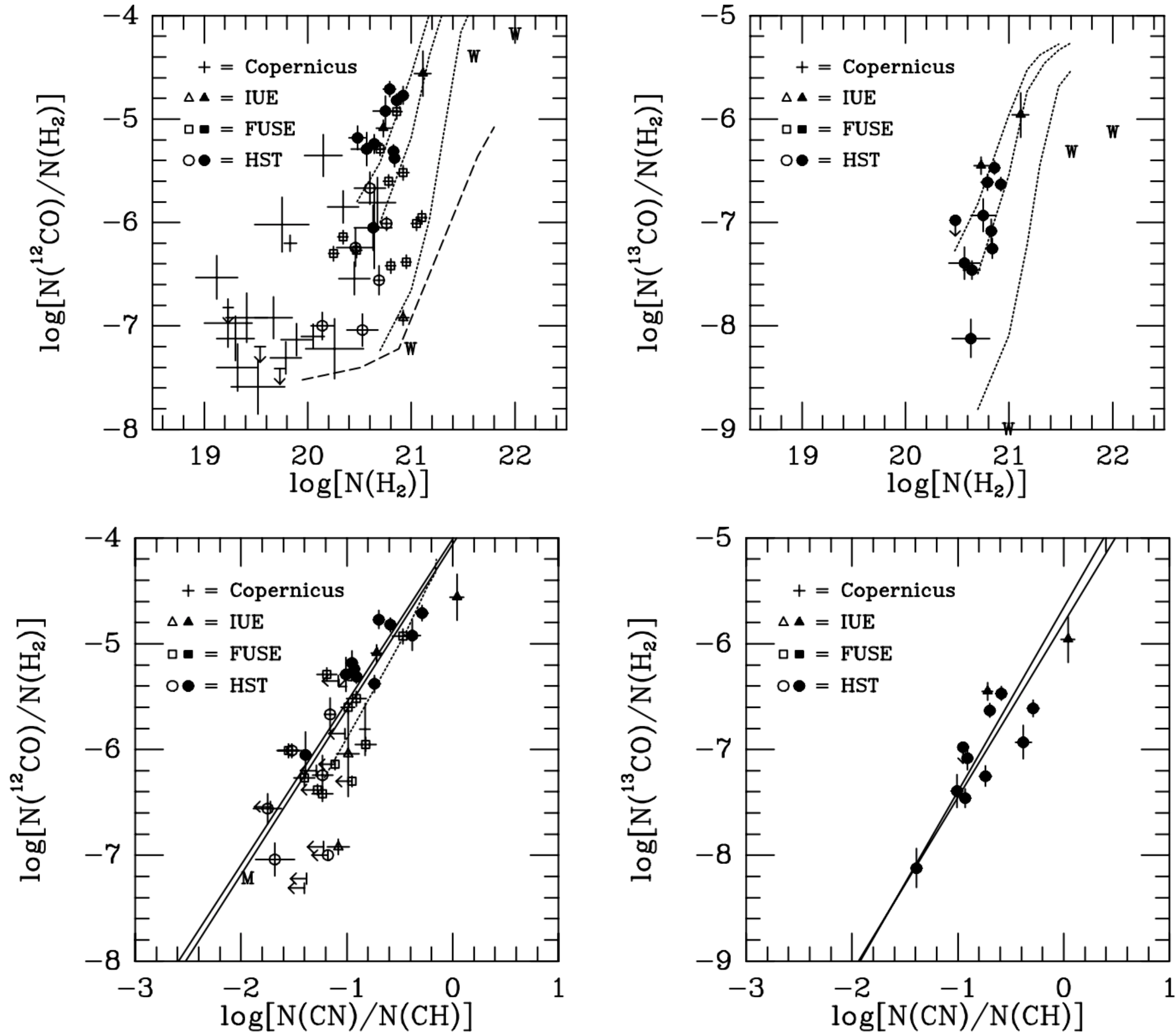
- $N(\text{H}_2) = N(\text{CO}) \times 10^4$ -- используется "везде и всеми"
- $N(\text{HI} + \text{H}_2) = A_V \times 1.87 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ -- Bohlin et al., 1978 *Corernicus*, используется "везде и всеми"
- $\langle N(\text{HI} + \text{H}_2)/E(B - V) \rangle = 5.8 \times 10^{21} \text{ шт см}^{-2} \text{ величин}^{-1}$ -- измерено для звезд с $E(B - V) \leq 0.5$
- $N(\text{HI} + \text{H}_2) = A_V \times 1.9 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ -- для $R_V = 3.1, A_V \leq 5, \text{ FUSE}$ Rachford et al., 2009



Молекулы CO

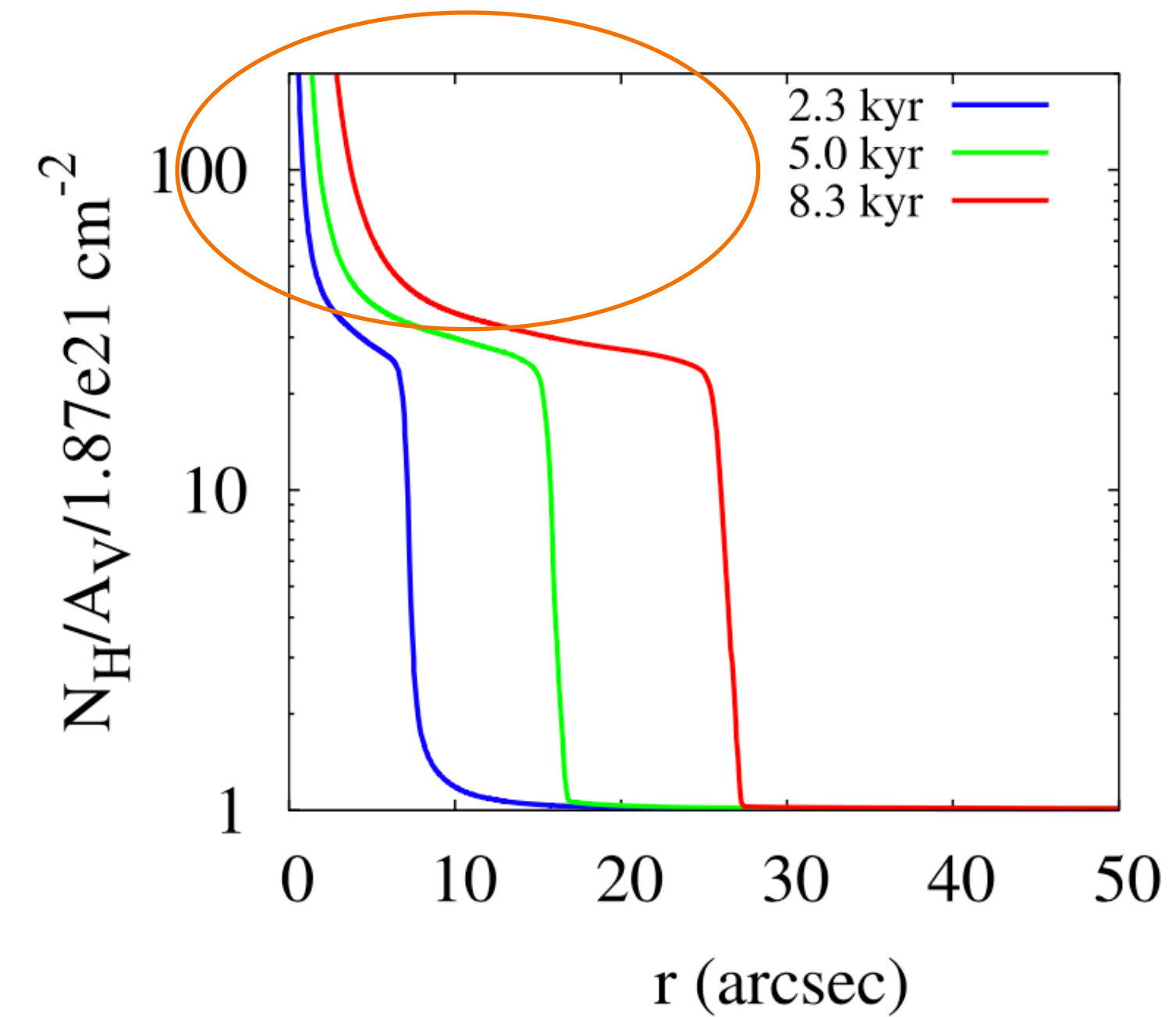
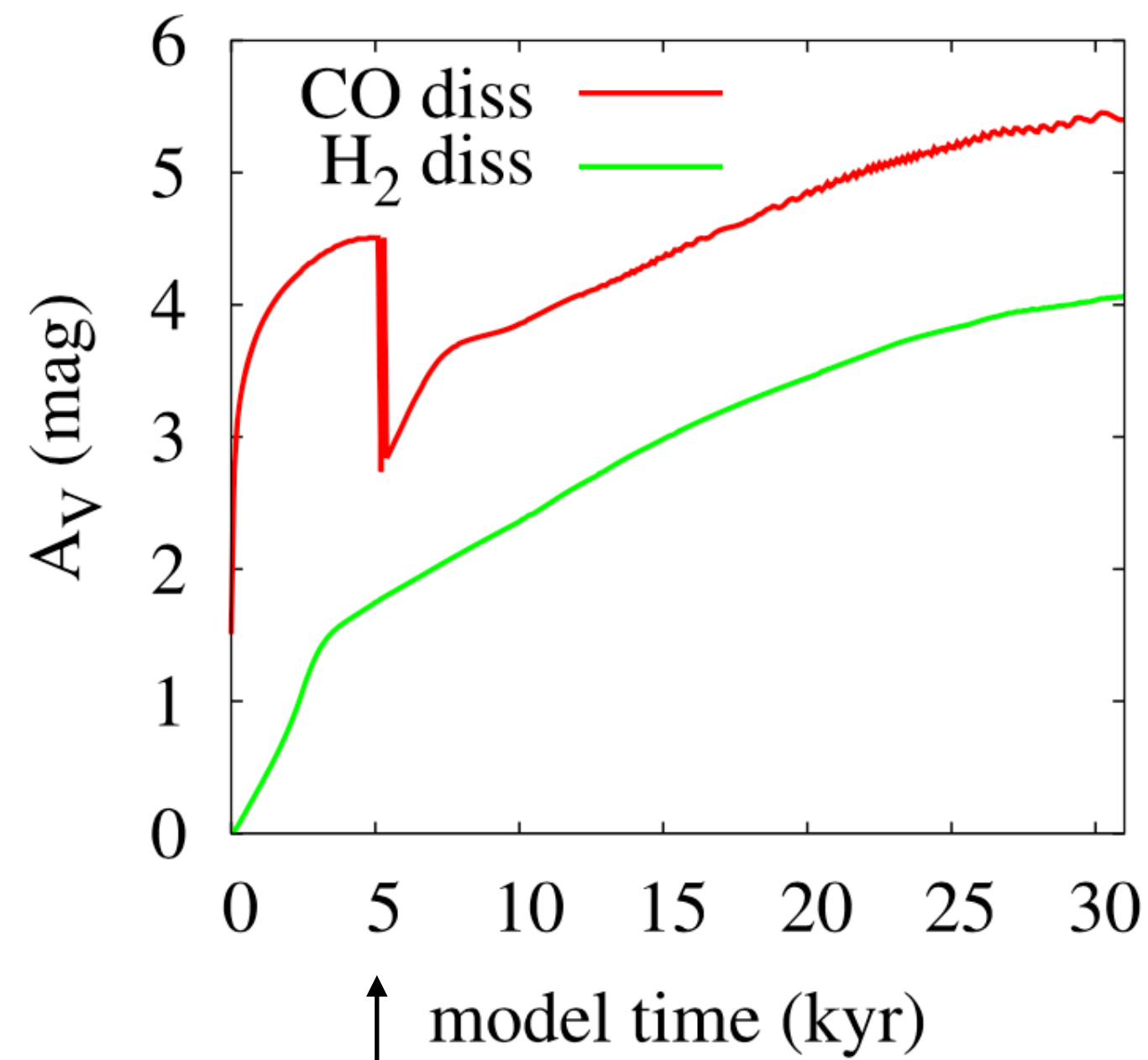
- соотношения между $N(\text{HI} + \text{H}_2)$ и A_V зависят от размера и свойств пыли ($R_V = 3.1, 4, 5$ и проч.)
- необходимо измерять $N(\text{CO})$ и $N(\text{H}_2)$ в одних и тех же направлениях с известным законом покраснения-- это возможно в УФ
- Сложности: самоэкранирование H_2 , взаимное экранирование H_2 и CO -- появляется на пределе возможностей УФ
- селективное экранирование для CO , ^{13}CO , C^{18}O , C^{17}O
- Эта задача хороша для модельных расчетов: разные свойства пыли, разная плотность газа, металличности

Молекулы CO и H₂



Молекулы CO и H₂ в ФДО

нарушается стандартное соотношение между $N(\text{HI}+\text{H}_2)$ и A_V



выметается мелкая пыль
из-за давления излучения

Межзвездные молекулы в ультрафиолете

определение содержаний молекул в МЗС

- OH, C₂, N₂, CO₂, HCl⁺ -- обнаружены в диффузных облаках в УФ
- H₂O -- нет, даже по спектрам *STIS/HST* Spaans et al., 1998
- модели диффузных облаков дают $x(\text{H}_2\text{O}) \approx 10^{-8}$ van Dishoeck and Black, 1988
- водяной лед формируется на пыли и затем испаряется, в т.ч. за счет фотореакций, индуцированных КЛ, в диффузном газе должно быть $x(\text{H}_2\text{O}) \approx 10^{-8}$
- F -- легко реагирует с H₂, экзотермическая реакция, но спектр HF трудно извлечь из спектра H₂
- и т.д.

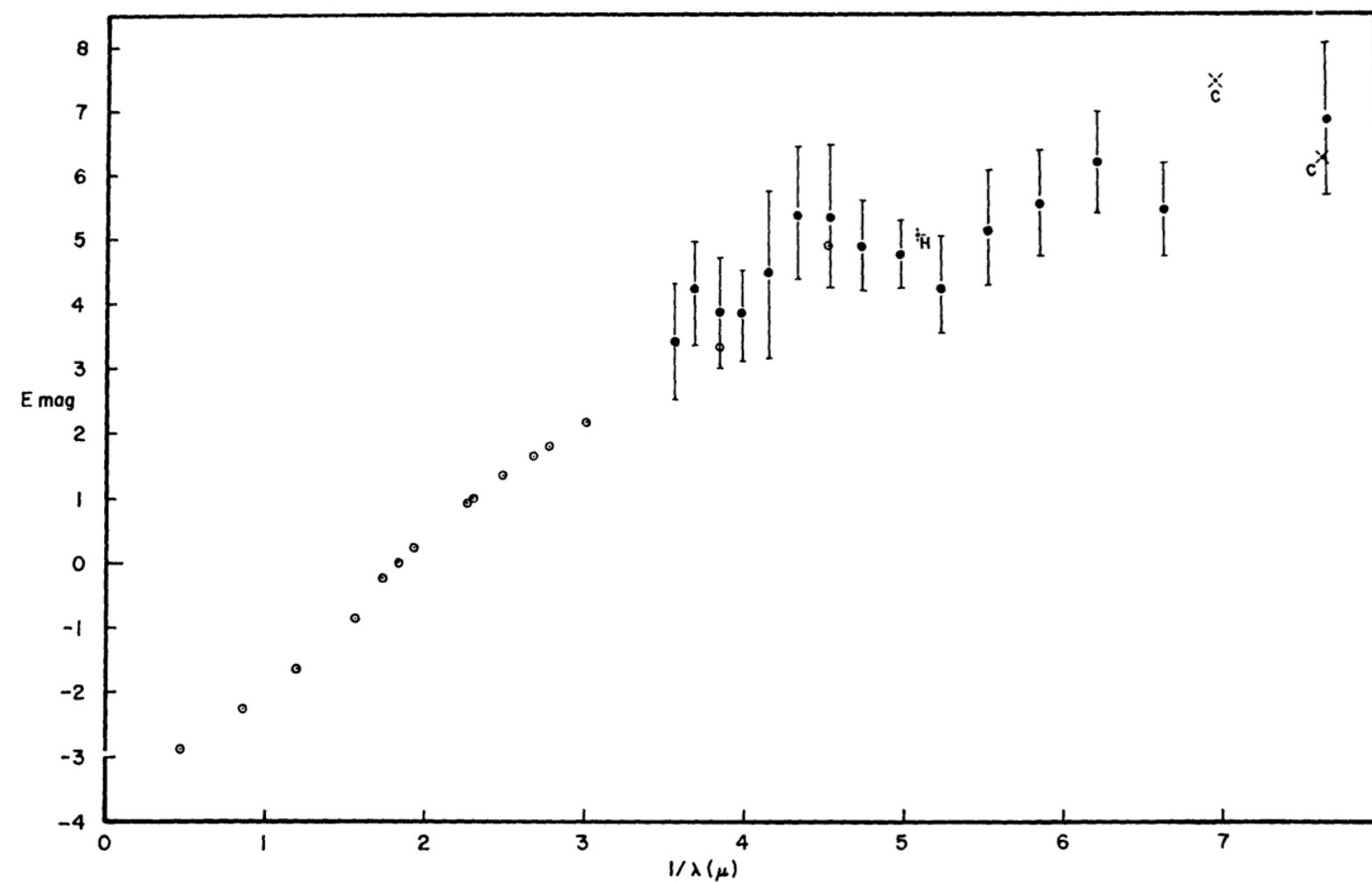
Абсорбционная спектроскопия

- доступны данные о распределении A_V и CO по всему небу
- доступны каталоги ярких точечных источников
- => каталоги источников для абсорбционной спектроскопии для разных расстояний, A_V , галактических координат

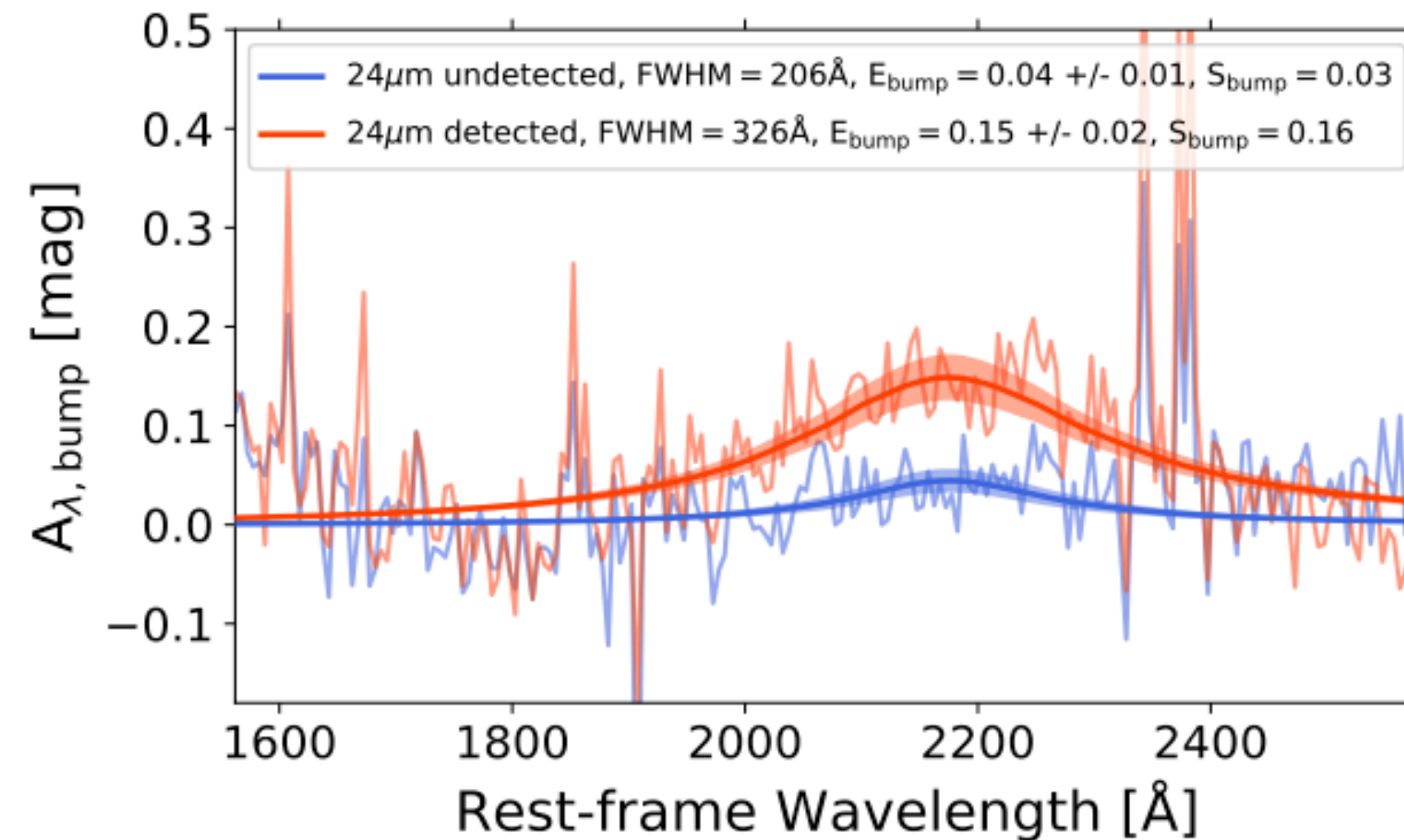
Диффузные полосы в МЗС

- более 100 полос в УФ, оптике и ИК
- связаны с ПАУ? прочими углеводородами?
- обладают "подструктурой" -- как если бы молекула состояла из смеси атомов ^{12}C и ^{13}C
- сложности в УФ: богатые УФ-спектры OB-звезд, значительное поглощение света в УФ по сравнению с оптикой -- мЕньшие значения A_V могут изучаться в УФ
- нужны лабораторные измерения высокой точности для однозначной идентификации

Форма кривой межзвездного поглощения есть что-то интересное?

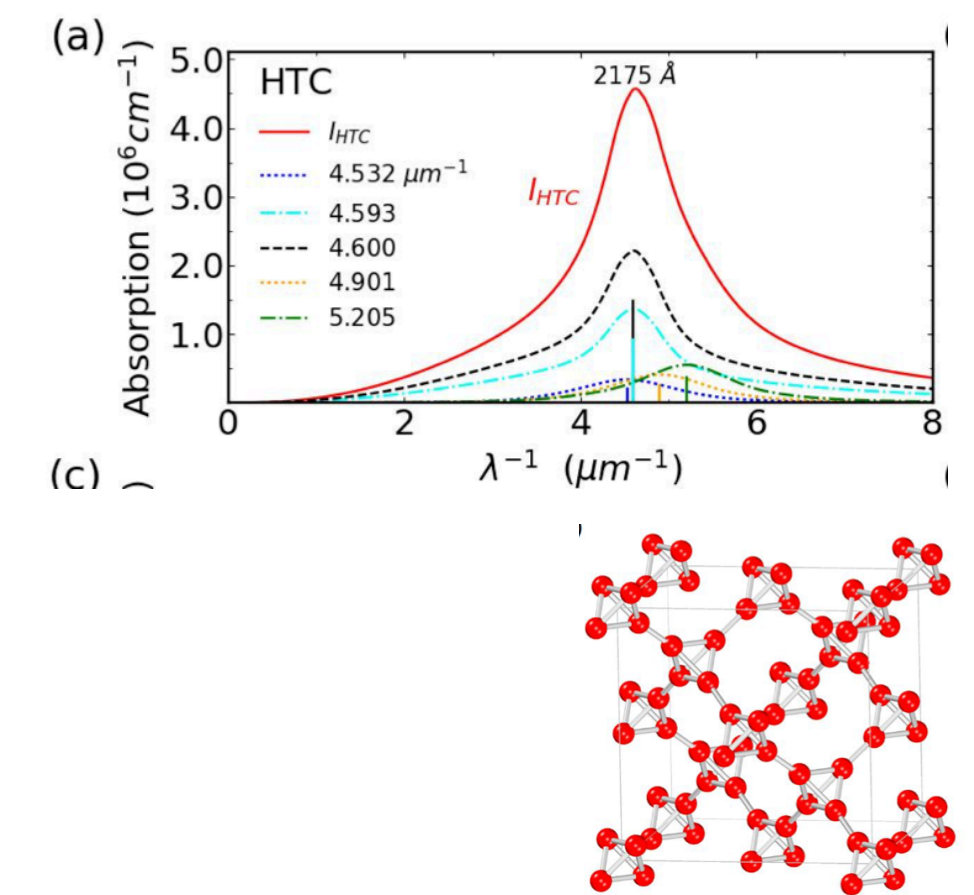


Stecher, 1965



Shivaei et al., 2022

положительная корреляция с ПАУ



Ma et al., 2020

Заключение

- Потенциальное обнаружение молекул в УФ зависит от чувствительности *Спектра-УФ* по сравнению с *HST*
- В МЗС остается много задач, связанных с анализом линий H_2 , CO: физика аккреции, истечения звезд типа Т Тельца, внутренние области протозвездных/протопланетных дисков
- Аминокислоты в УФ-спектрах комет...

Заключение

- Предлагается подумать над интересными возможными задачами для УФ, собраться на совещание в феврале-марте 2023 г и сформировать рабочую группу по задачам МЗС в УФ