

Панорамная спектроскопия близких галактик со SCORPIO в эпоху больших IFU обзоров

Олег Егоров

Heidelberg University (ZAH/ARI)

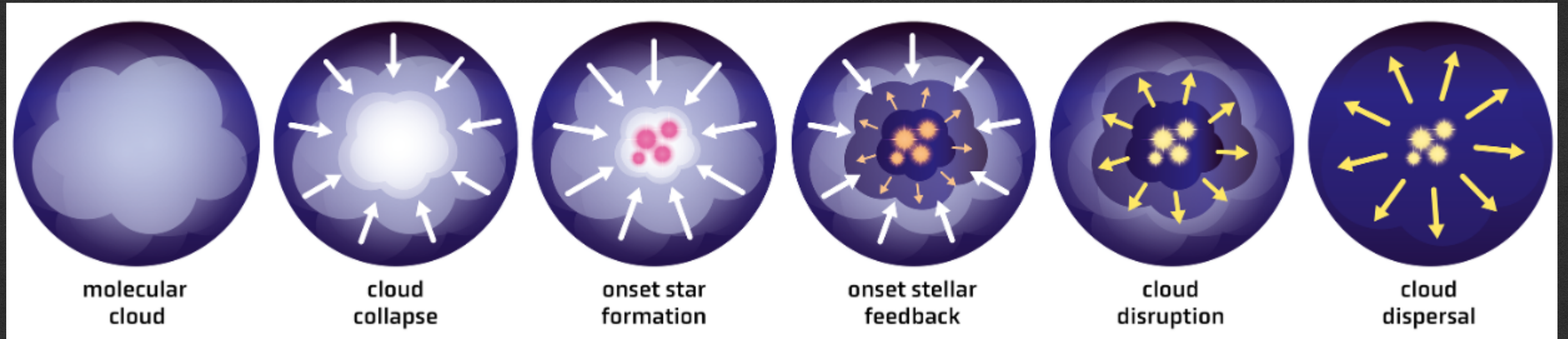
+ex. ГАИШ/САО



UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUKUNFT
SEIT 1386



Stellar feedback at small scales



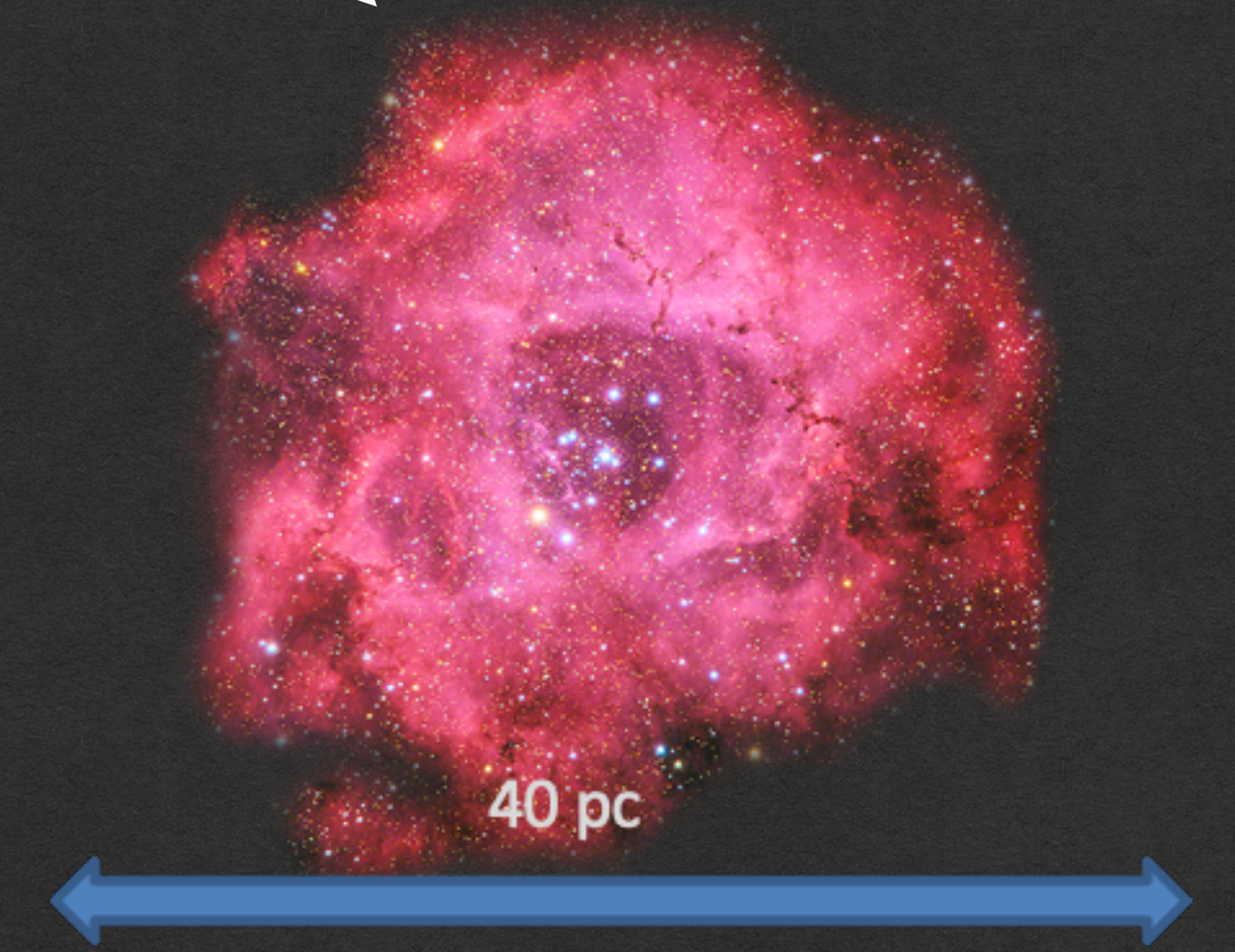
Schinnerer & Leroy (2024)

Energy injection scales are not resolved in distant extragalactic targets.

Targeting star-forming regions in our and nearby galaxies with high spatial and spectral resolution instruments is essential to understand how stellar feedback works from observations



Flame nebula



Rosette nebula

Оболочки и сверхоболочки в близких галактиках



- Оболочки: вокруг отдельных массивных звезд, остатки сверхновых (<50 пк)
- Сверхоболочки: вокруг скоплений/ОВ ассоциаций (<500 пк)
- Гигантские сверхоболочки: эффект действия нескольких поколений звезд (до 3 кпк)

Панорамная спектроскопия необходима для:

- Морфология/распределение ЗО
- Кинематика газа (скорости расширения, возраст, энергия)
- Ионизационная структура туманностей
- Точные измерения физических и химических параметров

Оболочки и сверхоболочки в близких галактиках



- Оболочки: вокруг отдельных массивных звезд, остатки сверхновых (<50 пк)
- Сверхоболочки: вокруг скоплений/ОВ ассоциаций (<500 пк)
- Гигантские сверхоболочки: эффект действия нескольких поколений звезд (до 3 кпк)

Панорамная спектроскопия необходима для:

- Морфология/распределение ЗО
- Кинематика газа (скорости расширения, возраст, энергия)
- Ионизационная структура туманностей
- Точные измерения физических и химических параметров

Scorpio/ИФП

Оболочки и сверхоболочки в близких галактиках



- Оболочки: вокруг отдельных массивных звезд, остатки сверхновых (<50 пк)
- Сверхоболочки: вокруг скоплений/ОВ ассоциаций (<500 пк)
- Гигантские сверхоболочки: эффект действия нескольких поколений звезд (до 3 кпк)

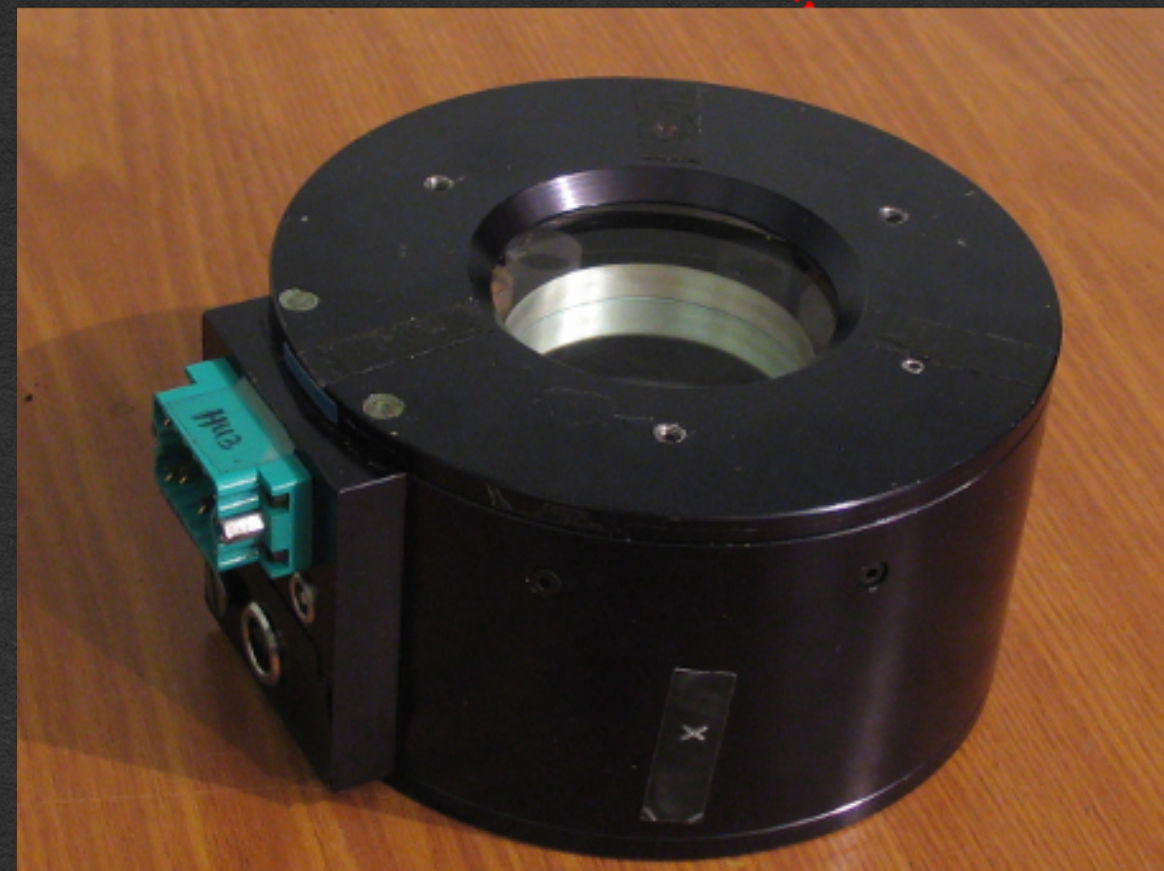
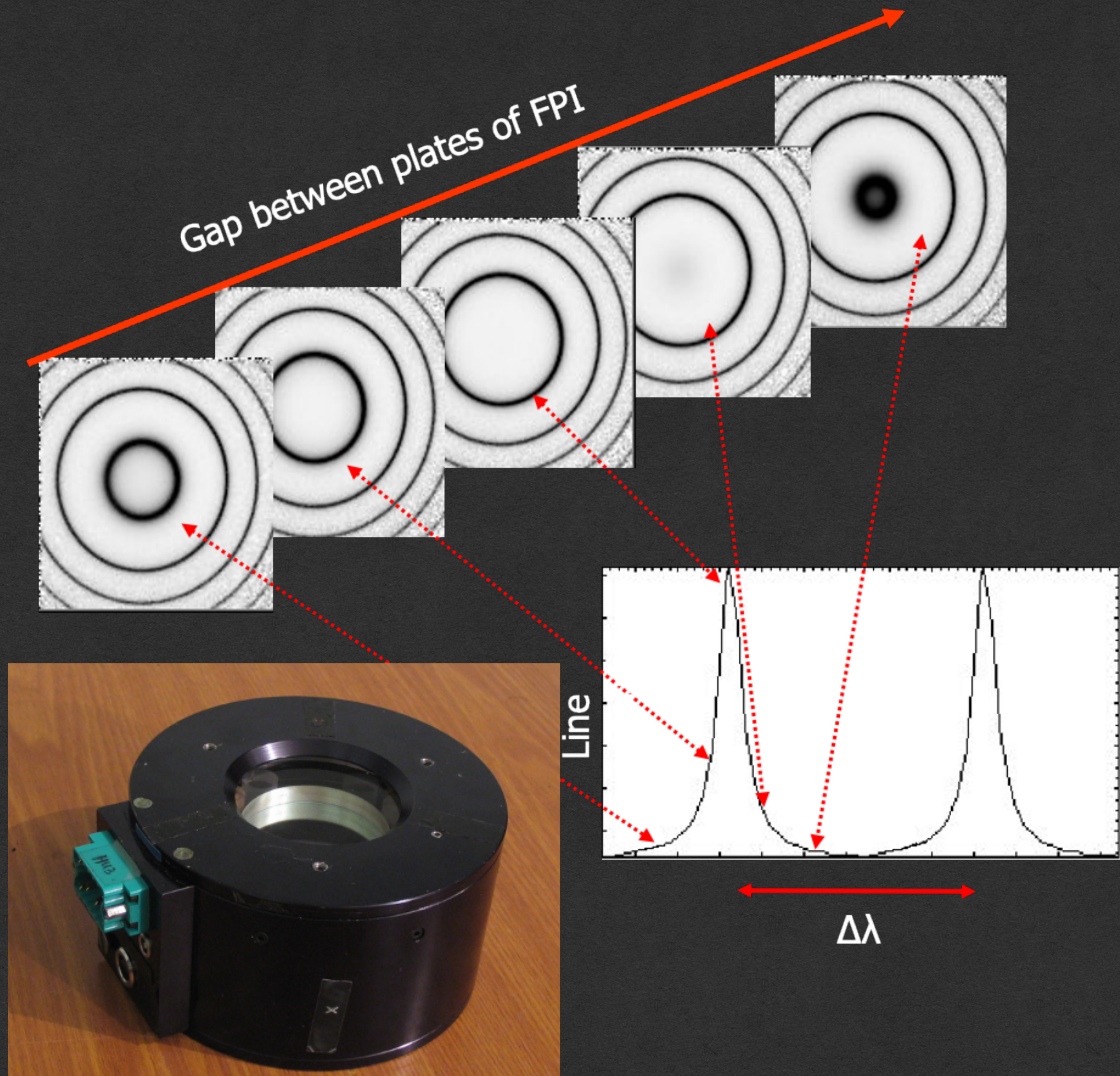
Панорамная спектроскопия необходима для:

- Морфология/распределение ЗО
- Кинематика газа (скорости расширения, возраст, энергия)
- Ионизационная структура туманностей
- Точные измерения физических и химических параметров

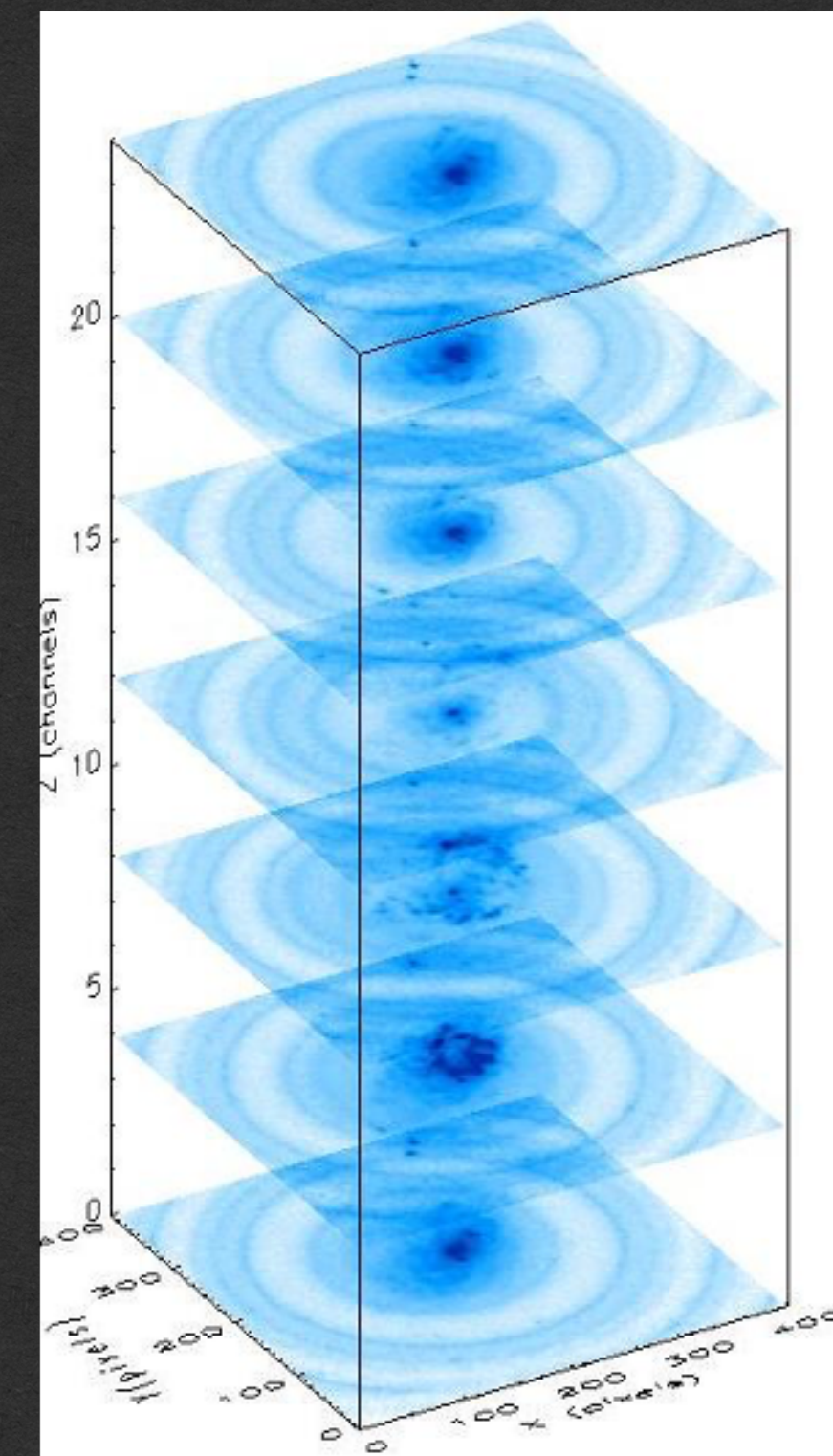
Scorpio/ИФП

Классические IFU (MPFS, Scorpio-2/IFU на БТА)

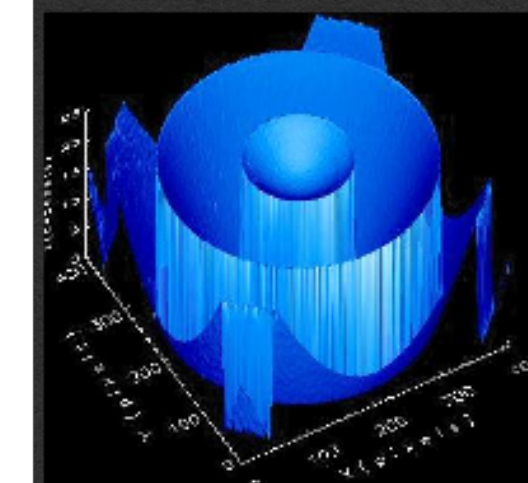
Панорамная спектроскопия с ИФП



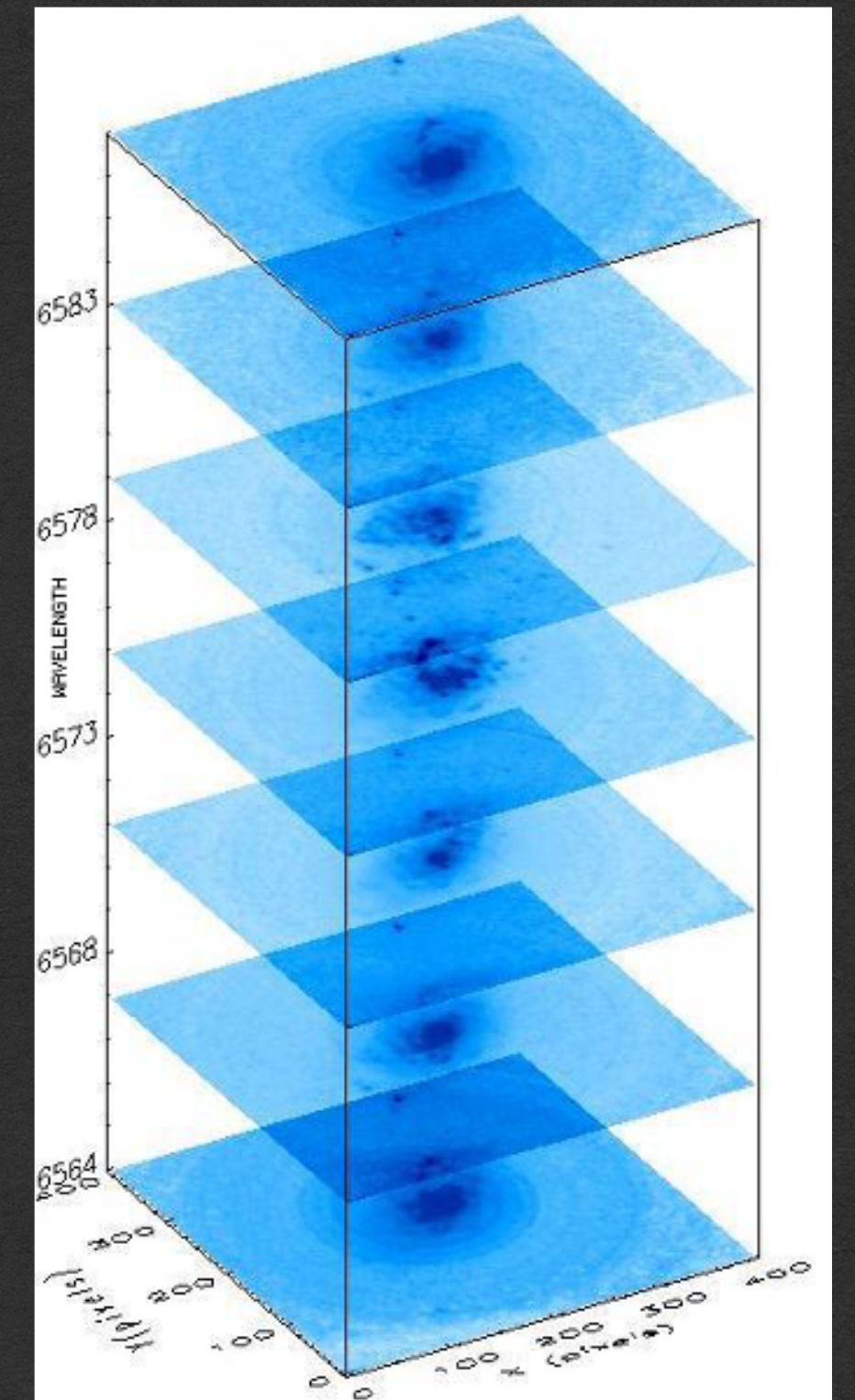
Z=channels



Phase correction



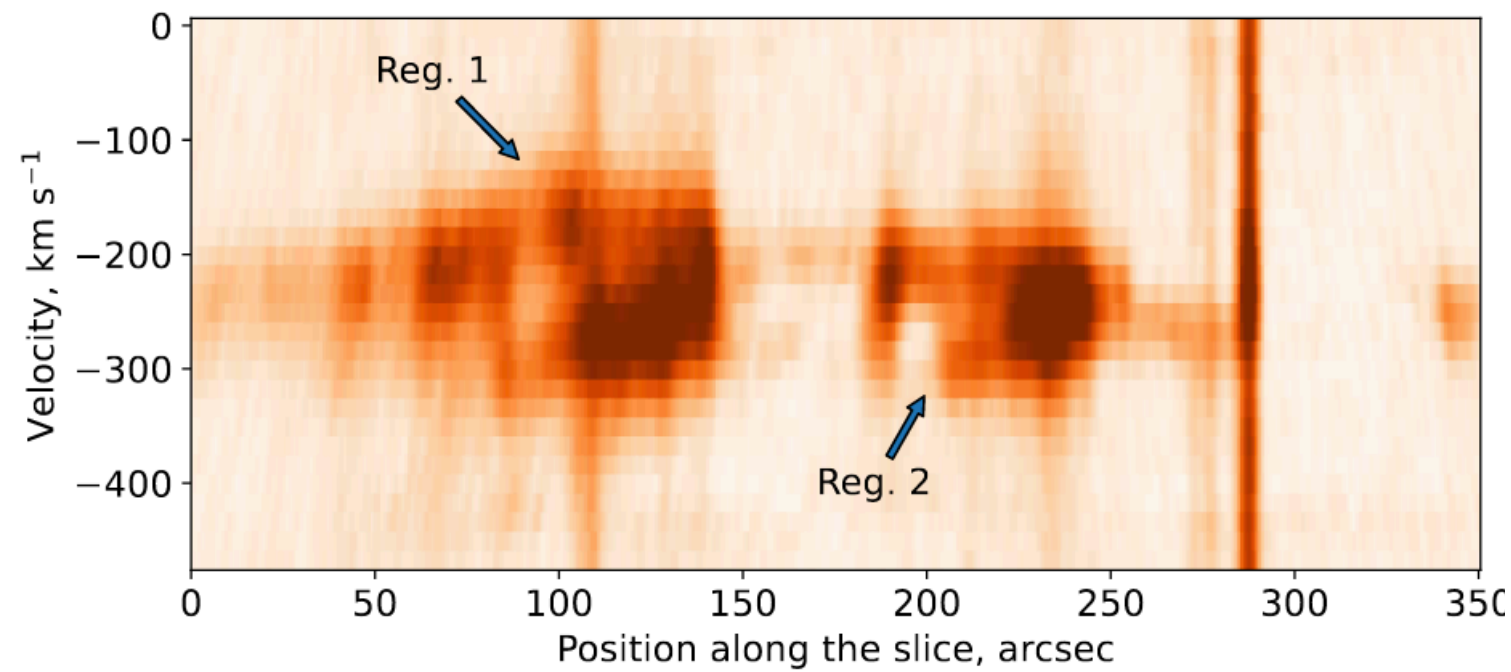
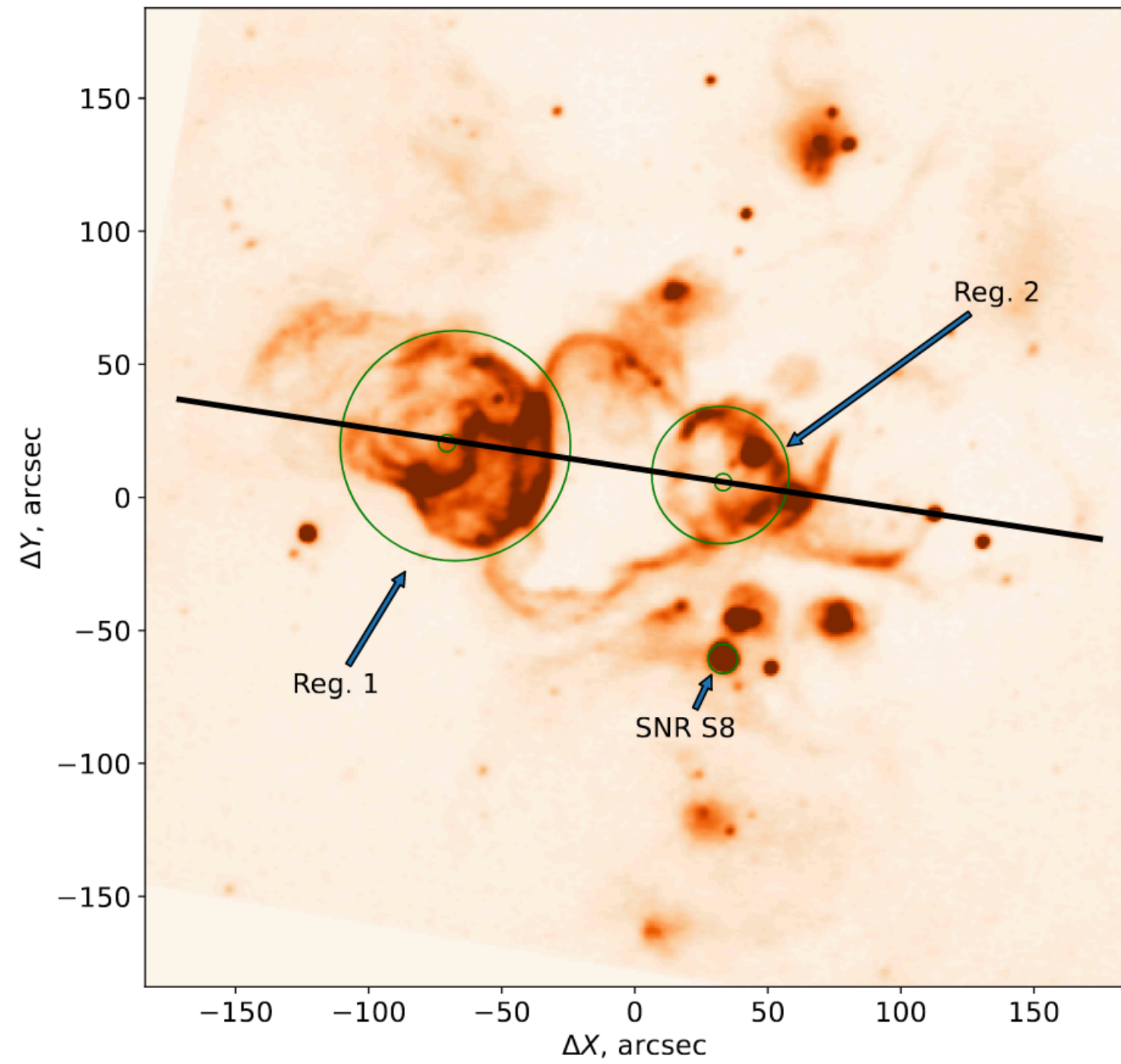
Z=Wavelength



Moiseev (2002);
Moiseev, OE (2008)
Moiseev (2015)

Kinematical signatures of expanding superbubbles

IC1613



Smirnov-Pinchukov & Egorov (2021)

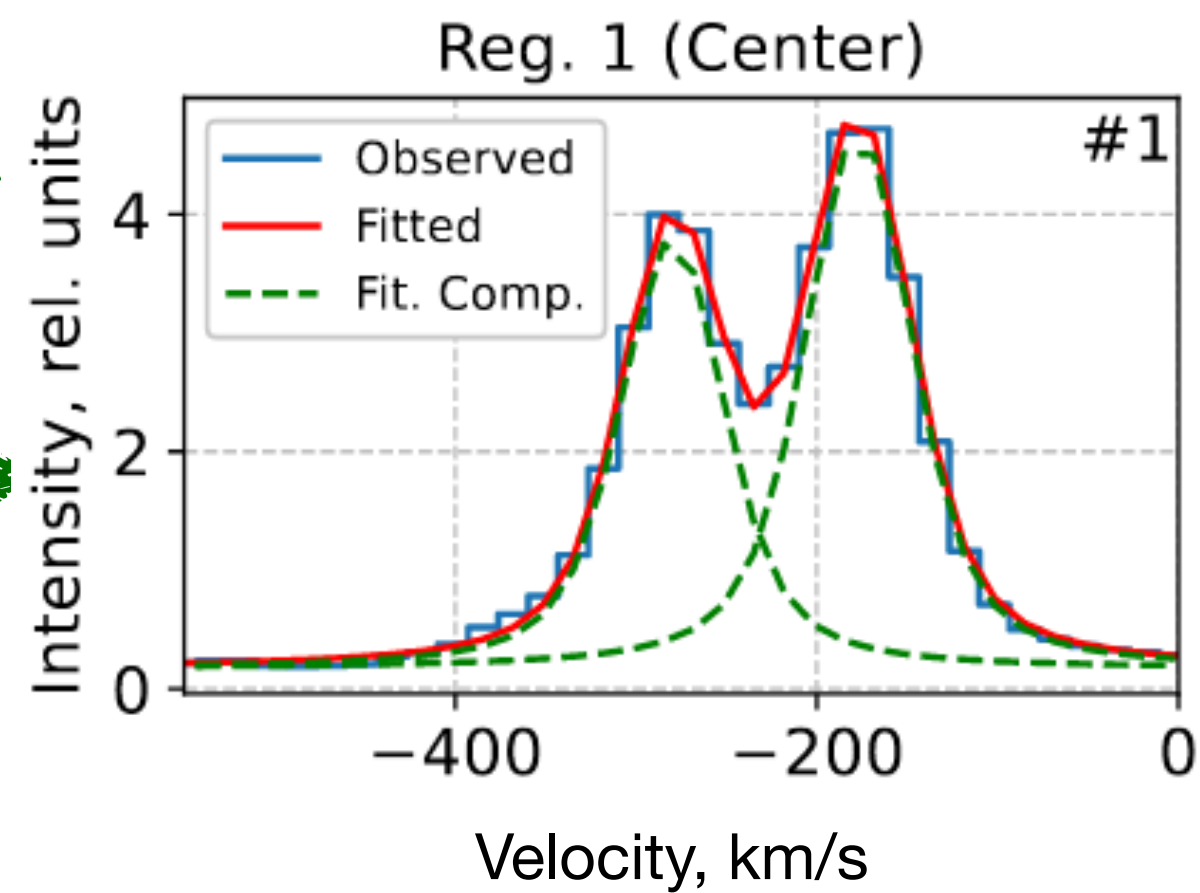
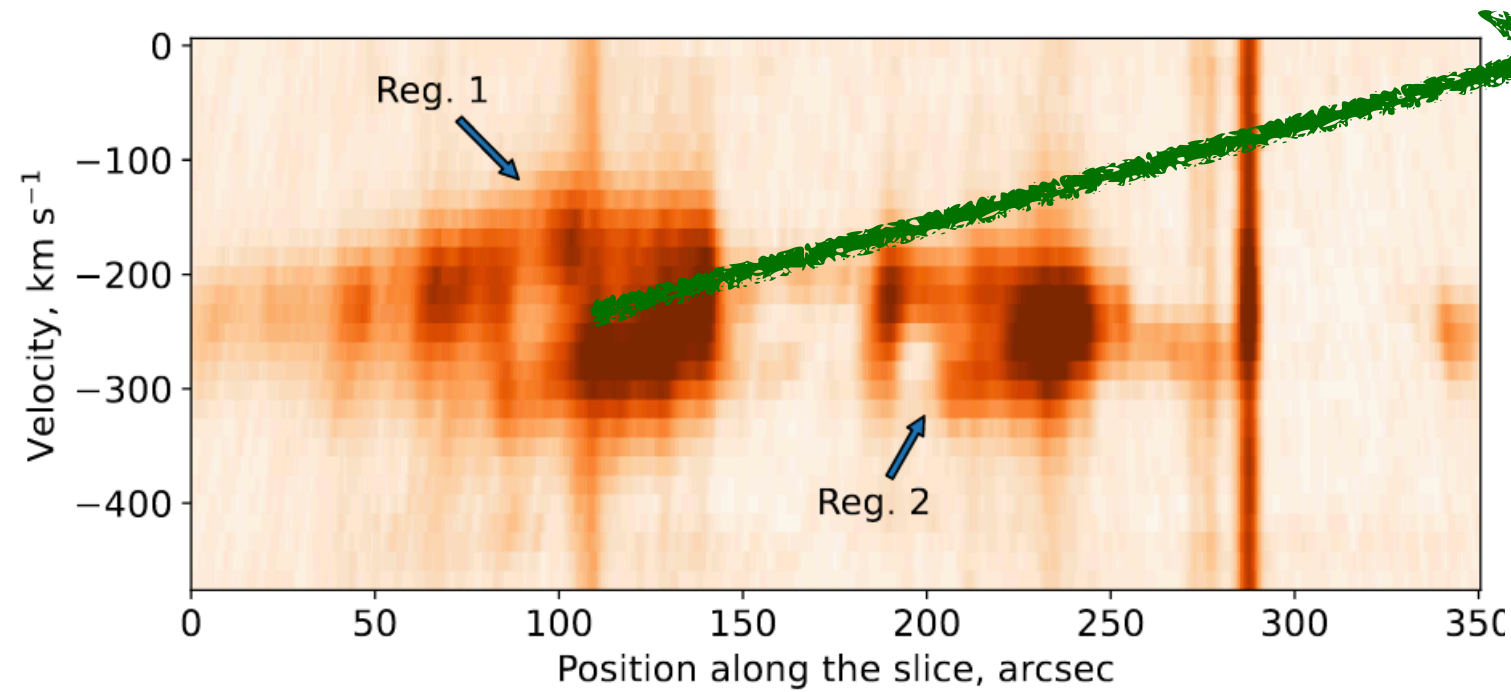
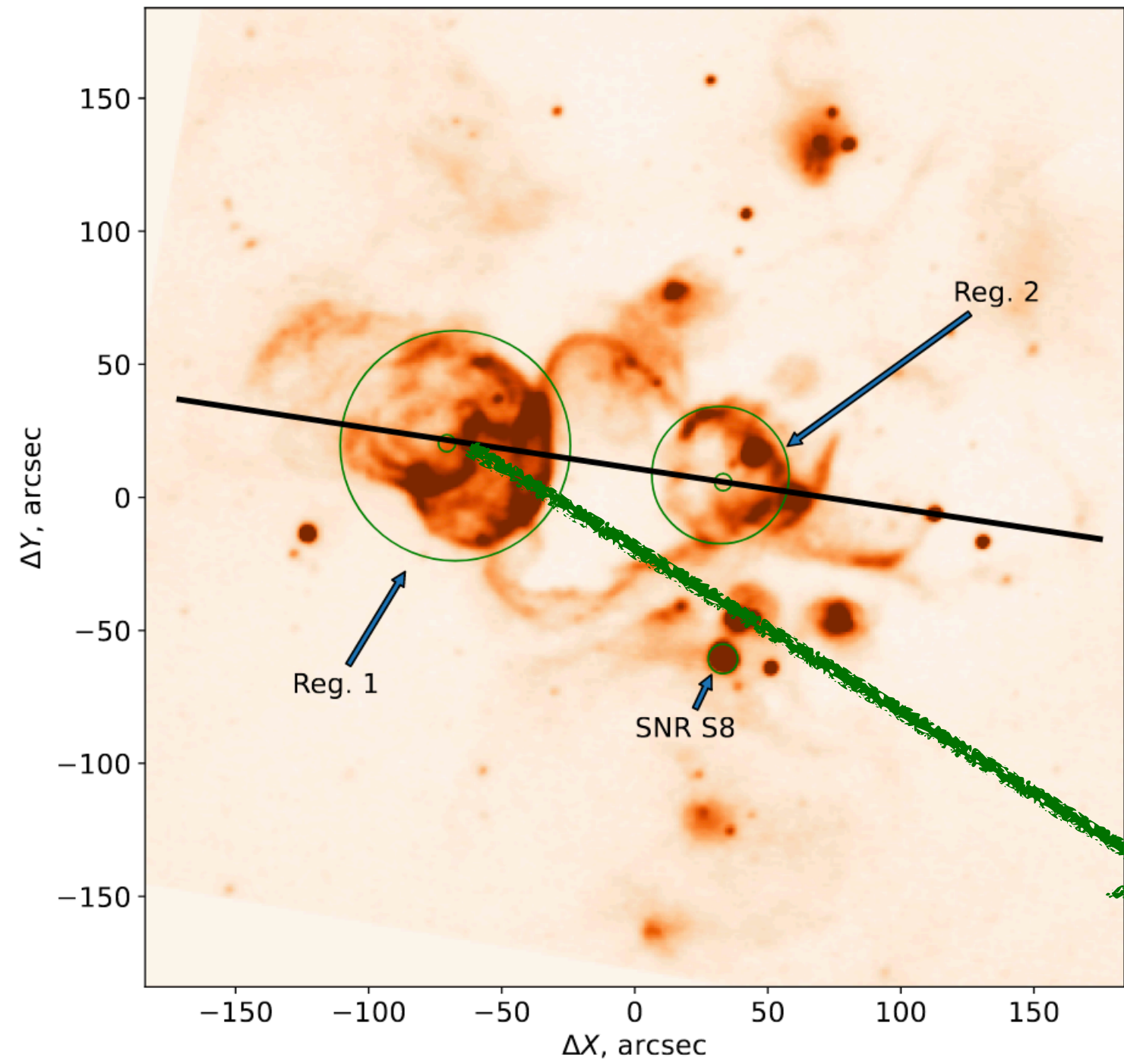
Insufficient spectral or angular resolution doesn't allow to decompose line profiles to kinematically distinct components.

Broadened line profile is characteristic feature of expanding superbubbles

From line separation and/or velocity dispersion => velocities of the bubbles and gas turbulent motions => **constraints on the energetics of the ionized ISM**

Kinematical signatures of expanding superbubbles

IC1613



Insufficient spectral or angular resolution doesn't allow to decompose line profiles to kinematically distinct components.

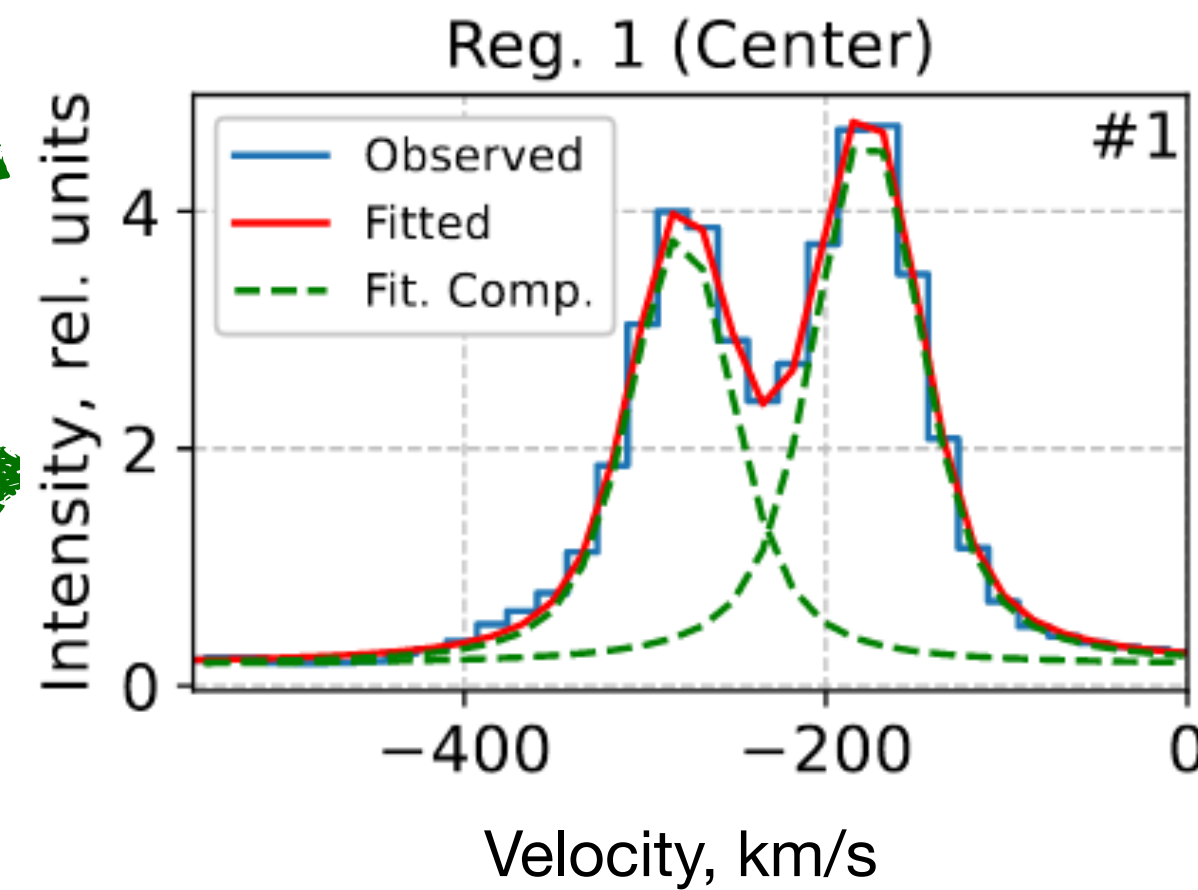
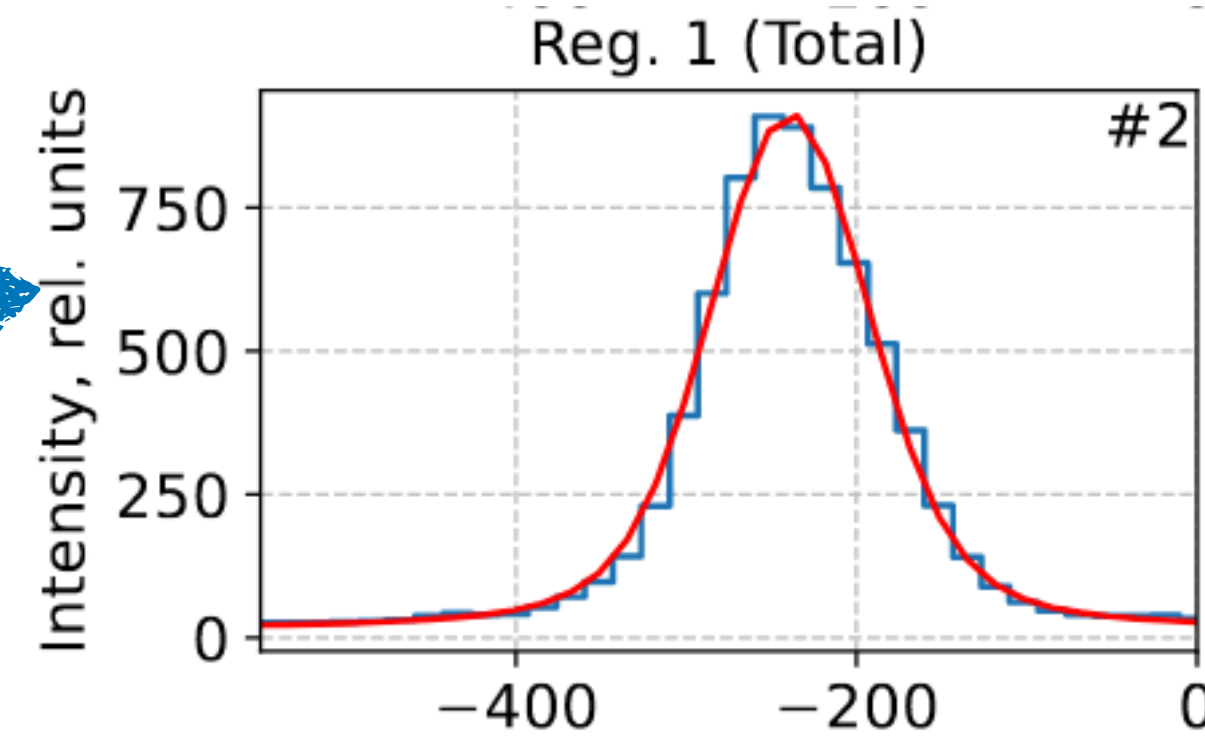
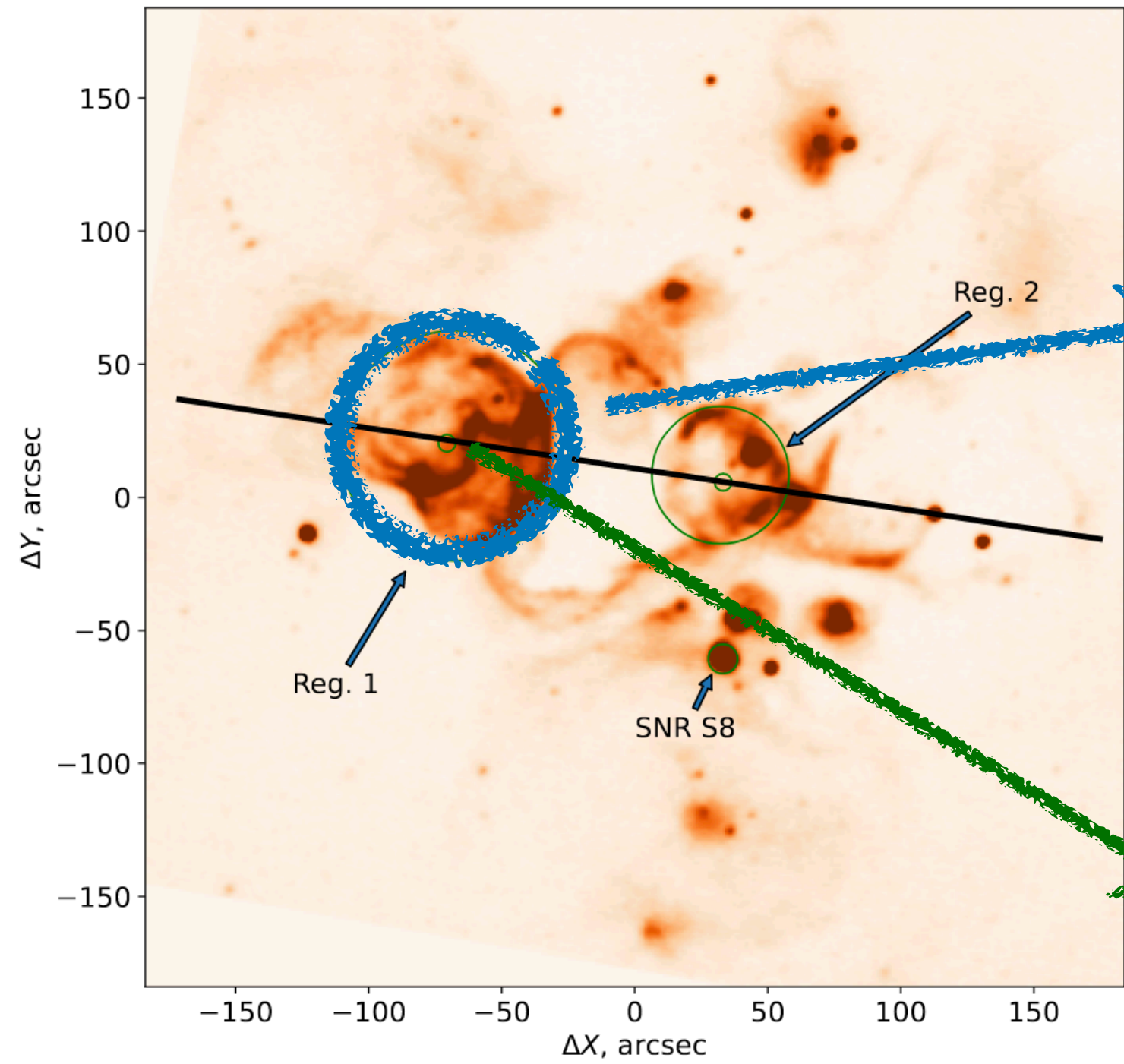
Broadened line profile is characteristic feature of expanding superbubbles

Smirnov-Pinchukov & Egorov (2021)

From line separation and/or velocity dispersion => velocities of the bubbles and gas turbulent motions => **constraints on the energetics of the ionized ISM**

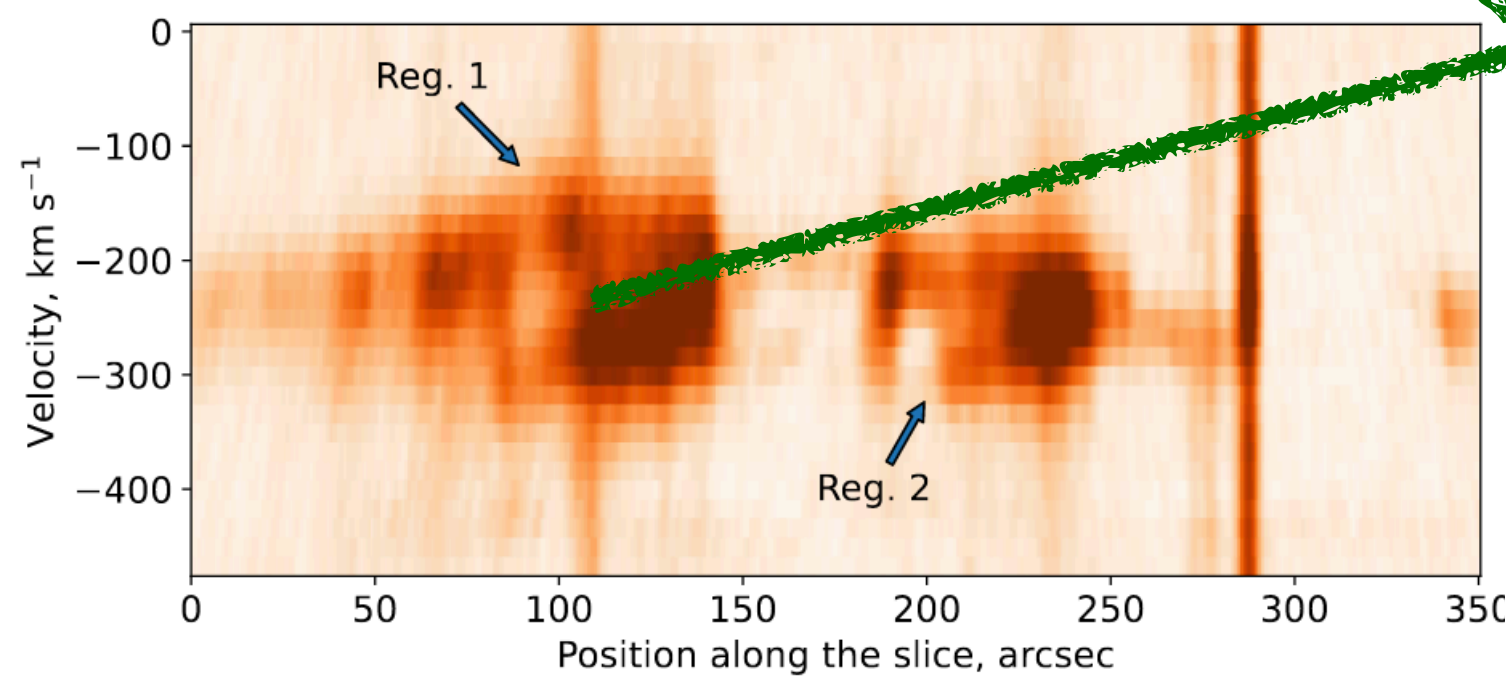
Kinematical signatures of expanding superbubbles

IC1613



Insufficient spectral or angular resolution doesn't allow to decompose line profiles to kinematically distinct components.

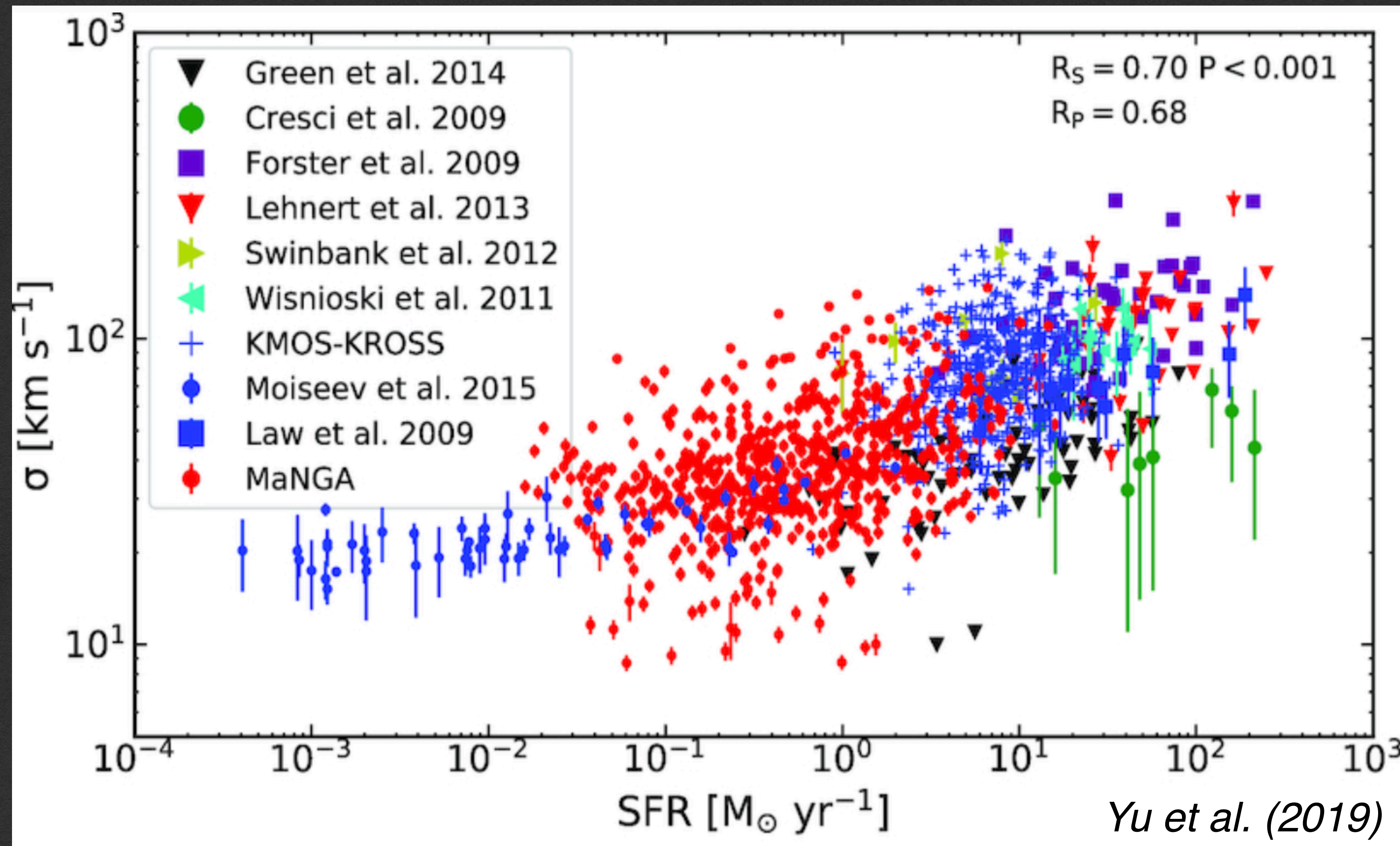
Broadened line profile is characteristic feature of expanding superbubbles



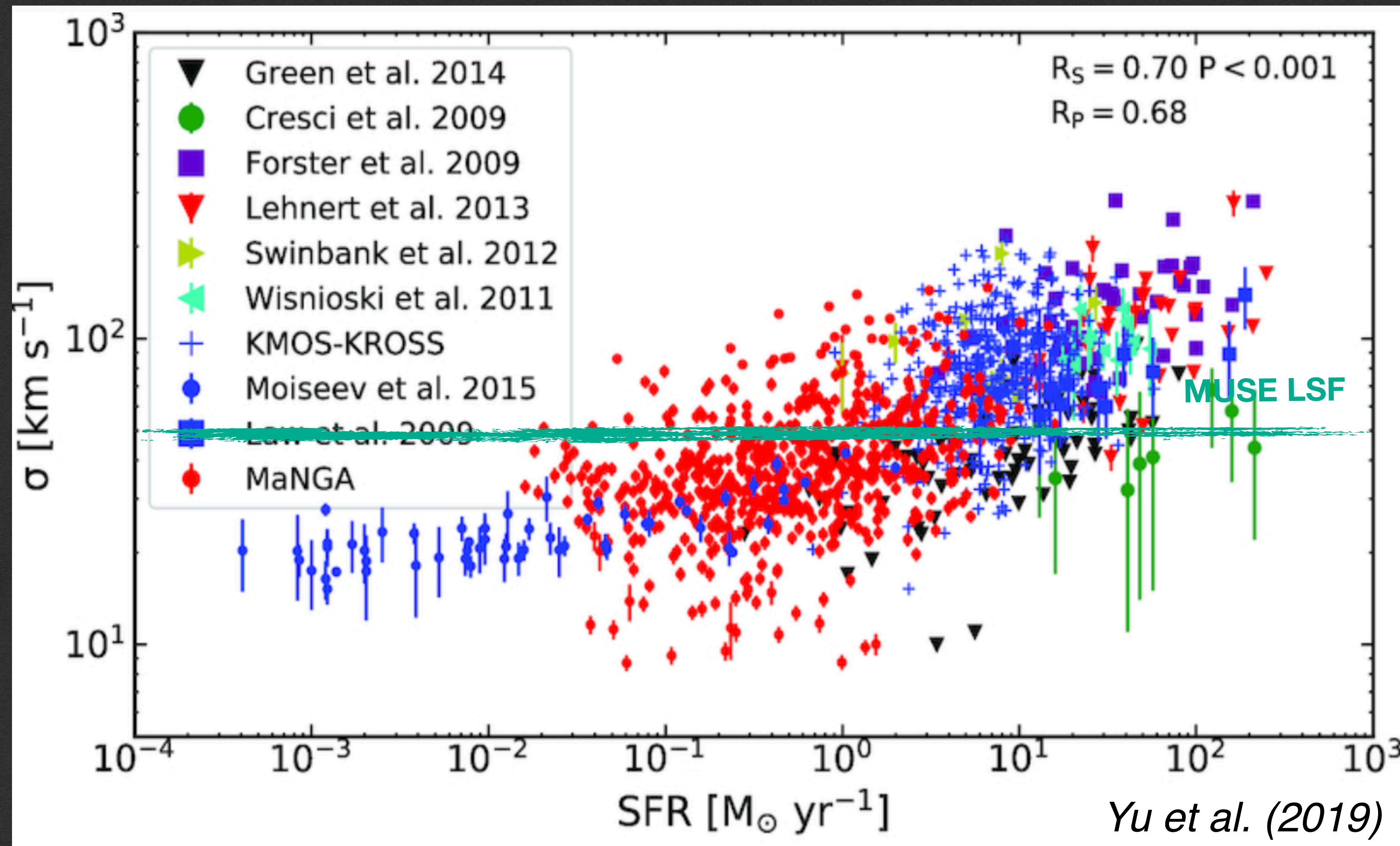
Smirnov-Pinchukov & Egorov (2021)

From line separation and/or velocity dispersion => velocities of the bubbles and gas turbulent motions => **constraints on the energetics of the ionized ISM**

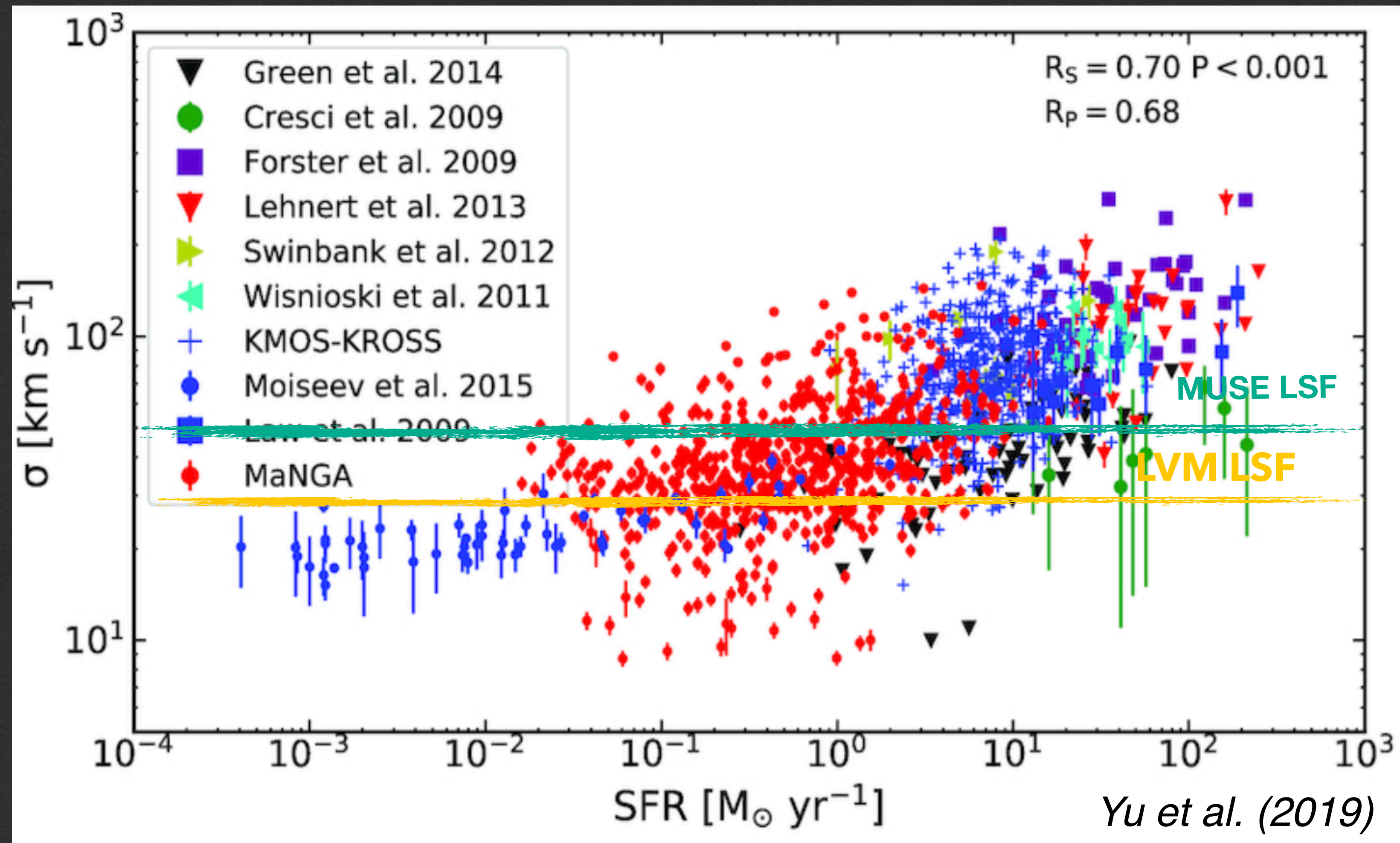
Дисперсия скоростей ионизованного газа в HI областях



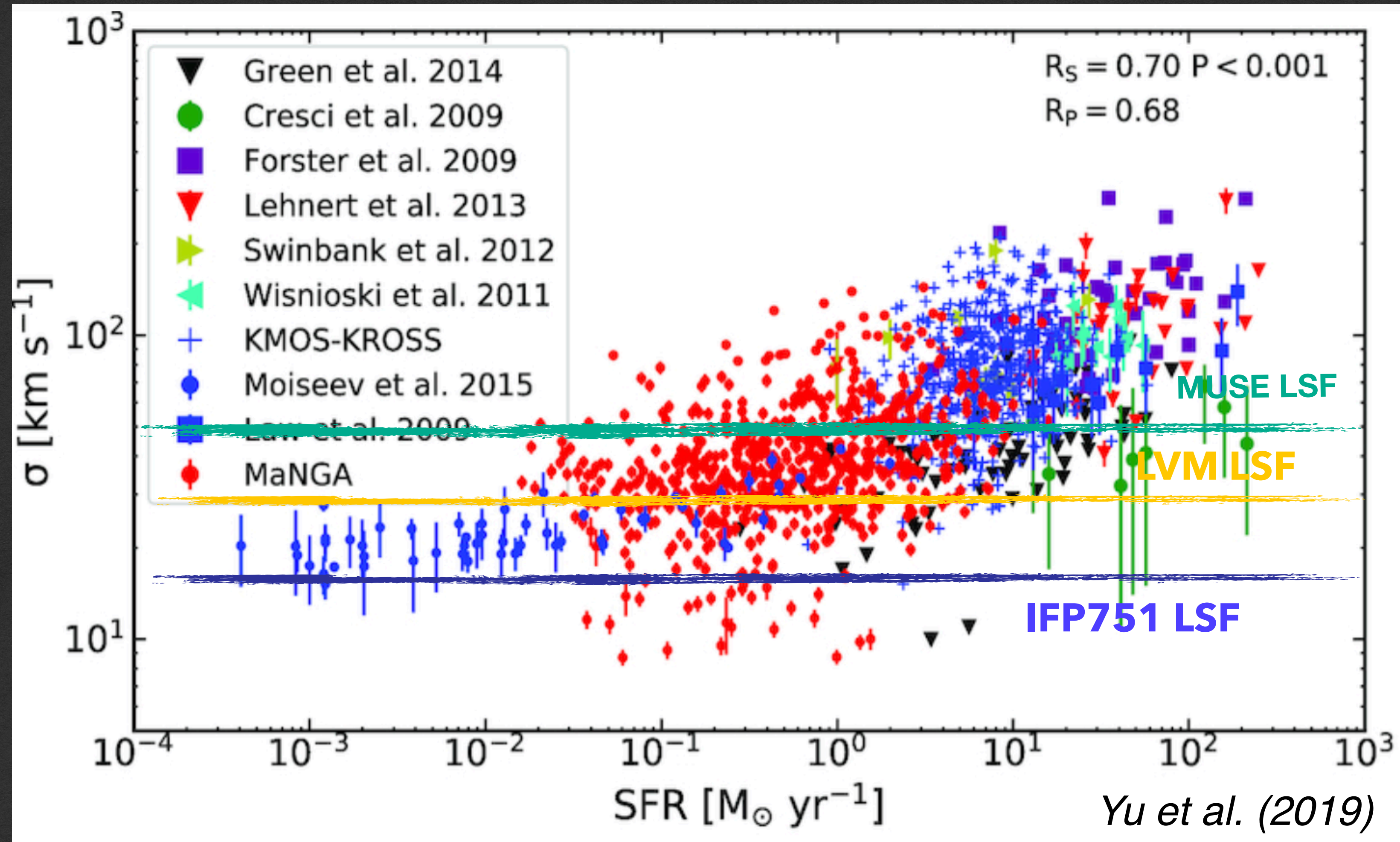
Дисперсия скоростей ионизованного газа в HI областях



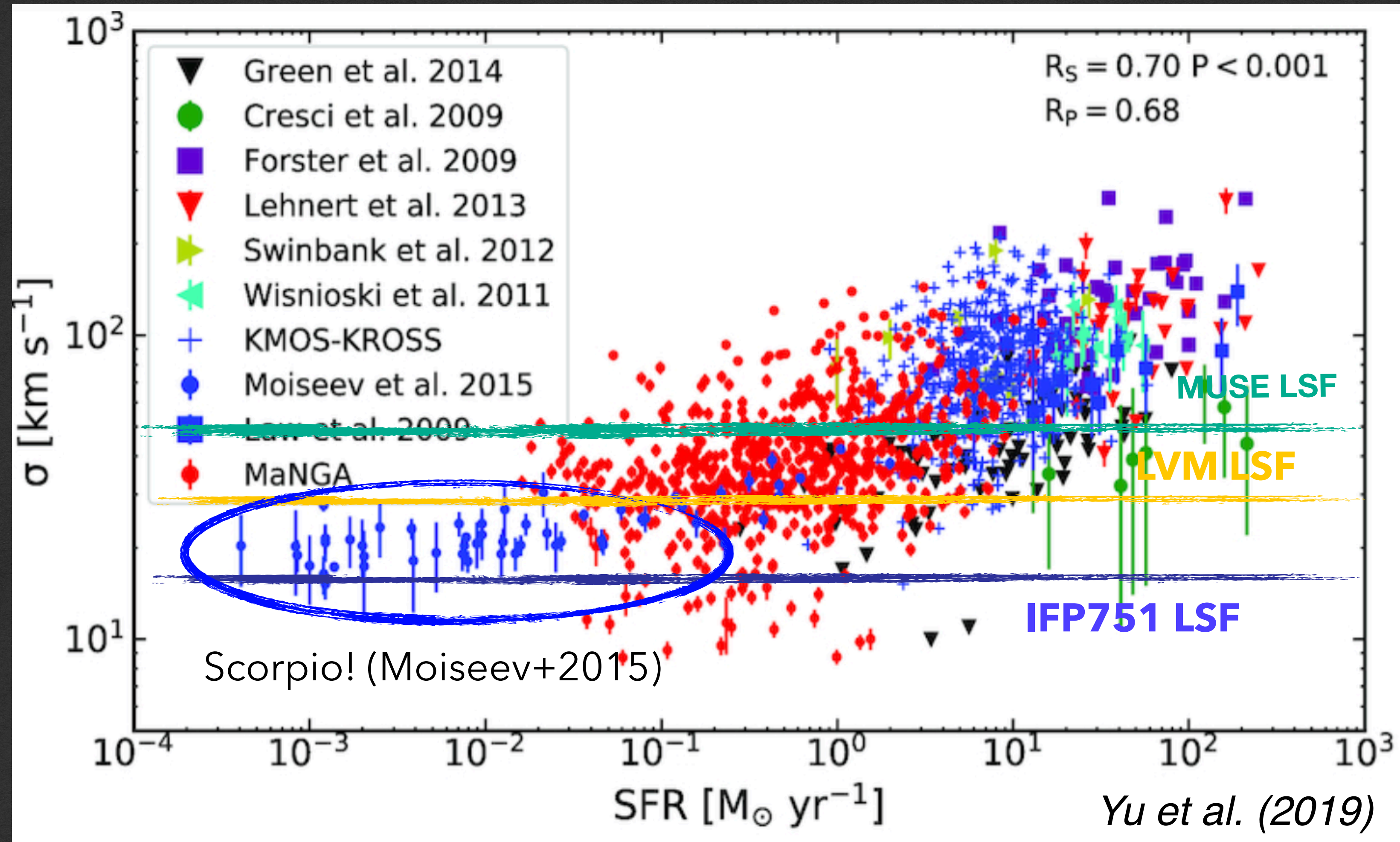
Дисперсия скоростей ионизованного газа в HI областях



Дисперсия скоростей ионизованного газа в HI областях



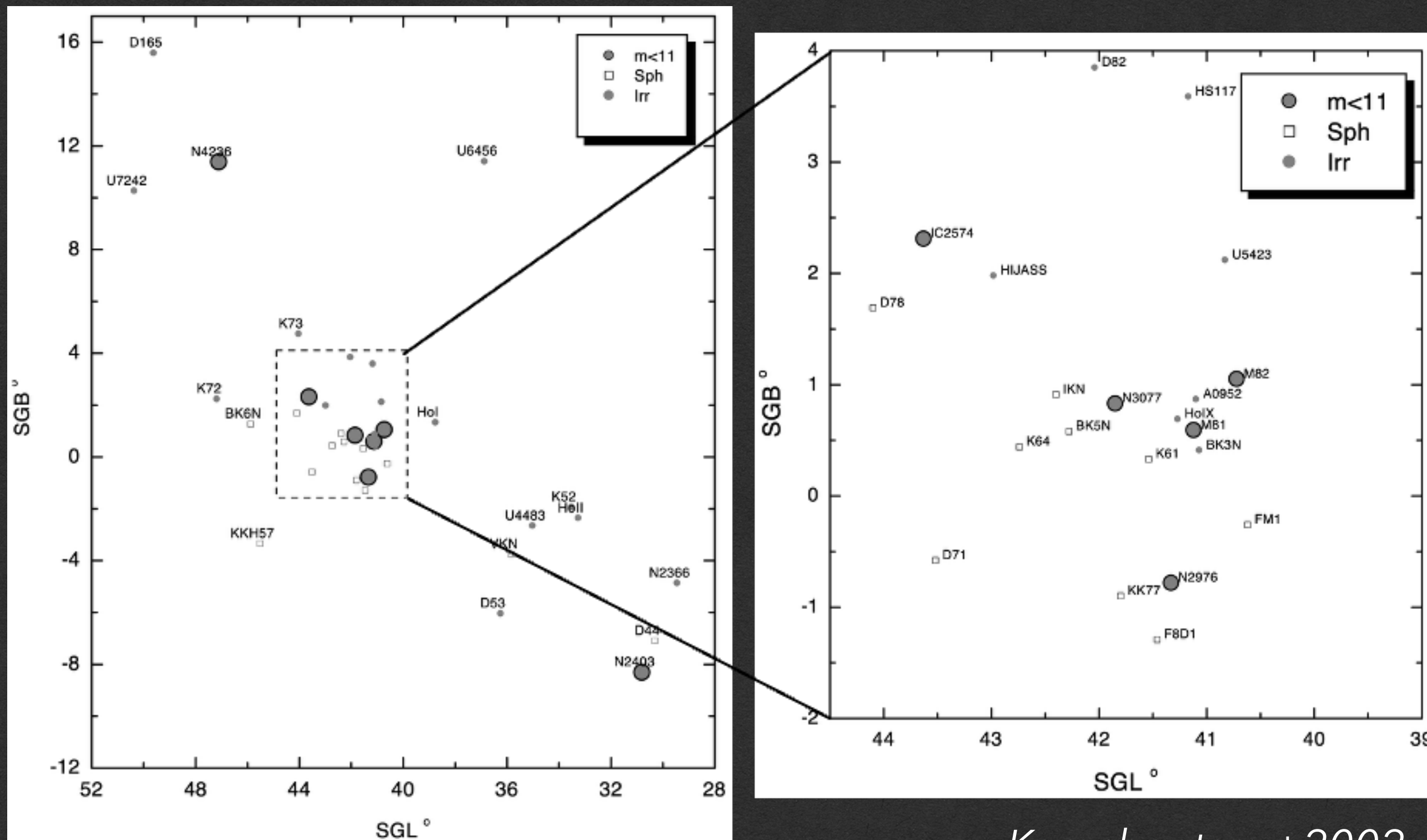
Дисперсия скоростей ионизованного газа в HI областях



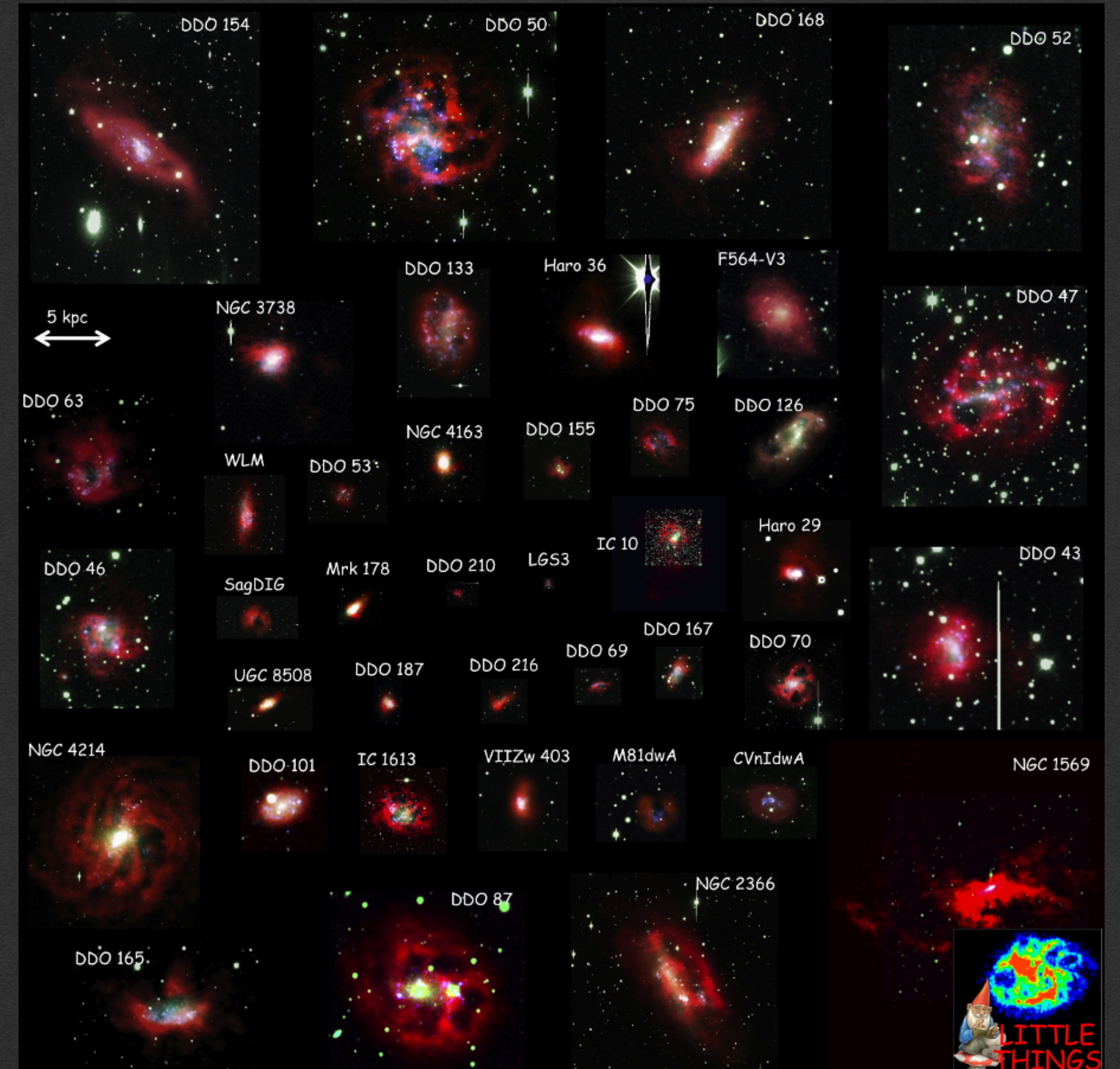
Локальная кинематика газа в МЗС карликовых галактик

- Близкие карликовые галактики с доступными данными HI 21 см
- Желательно: доступные HST данные
- Местная группа и группа M81 - идеальные объекты

Наблюдения по программе Т.А. Лозинский

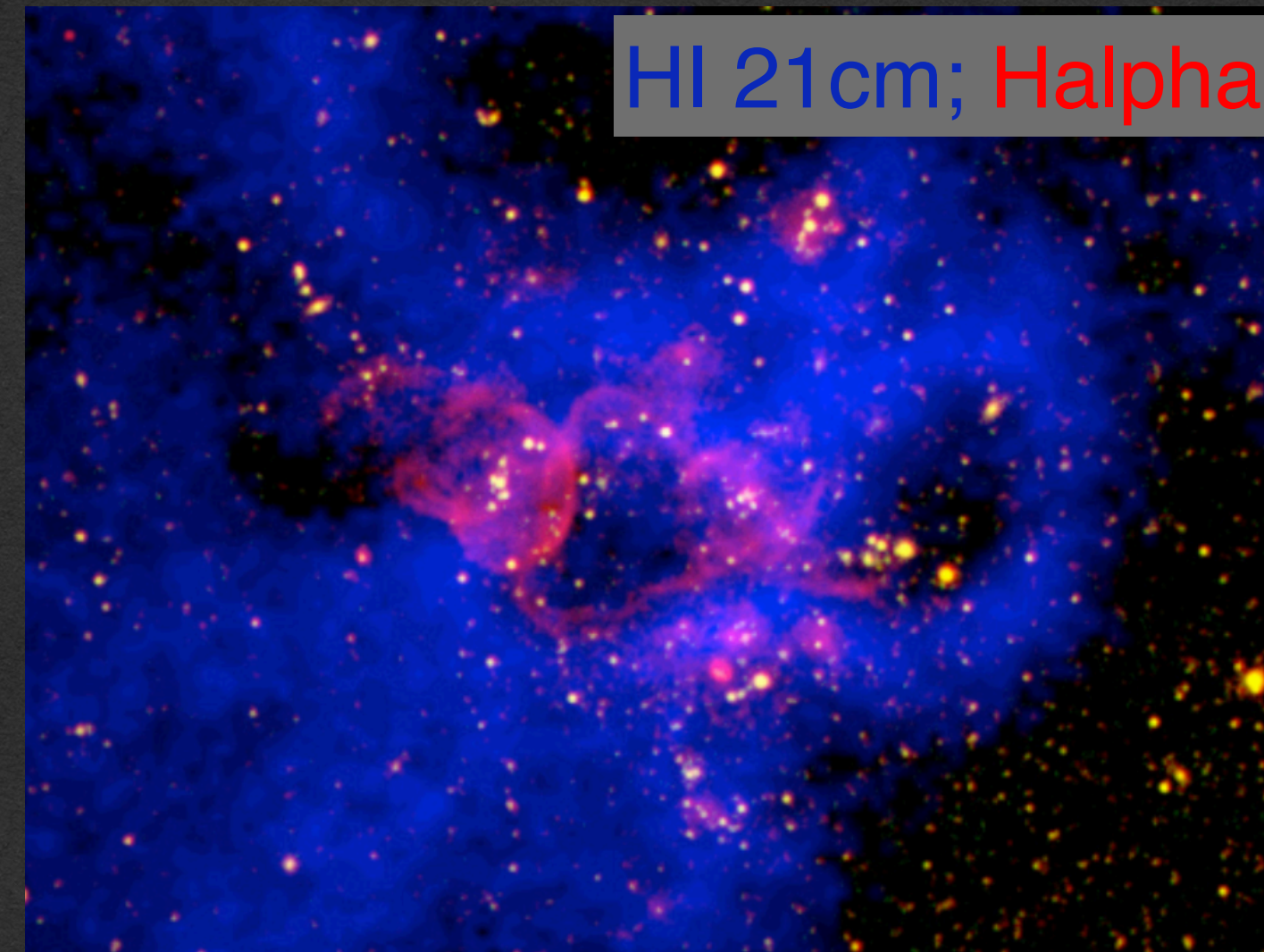
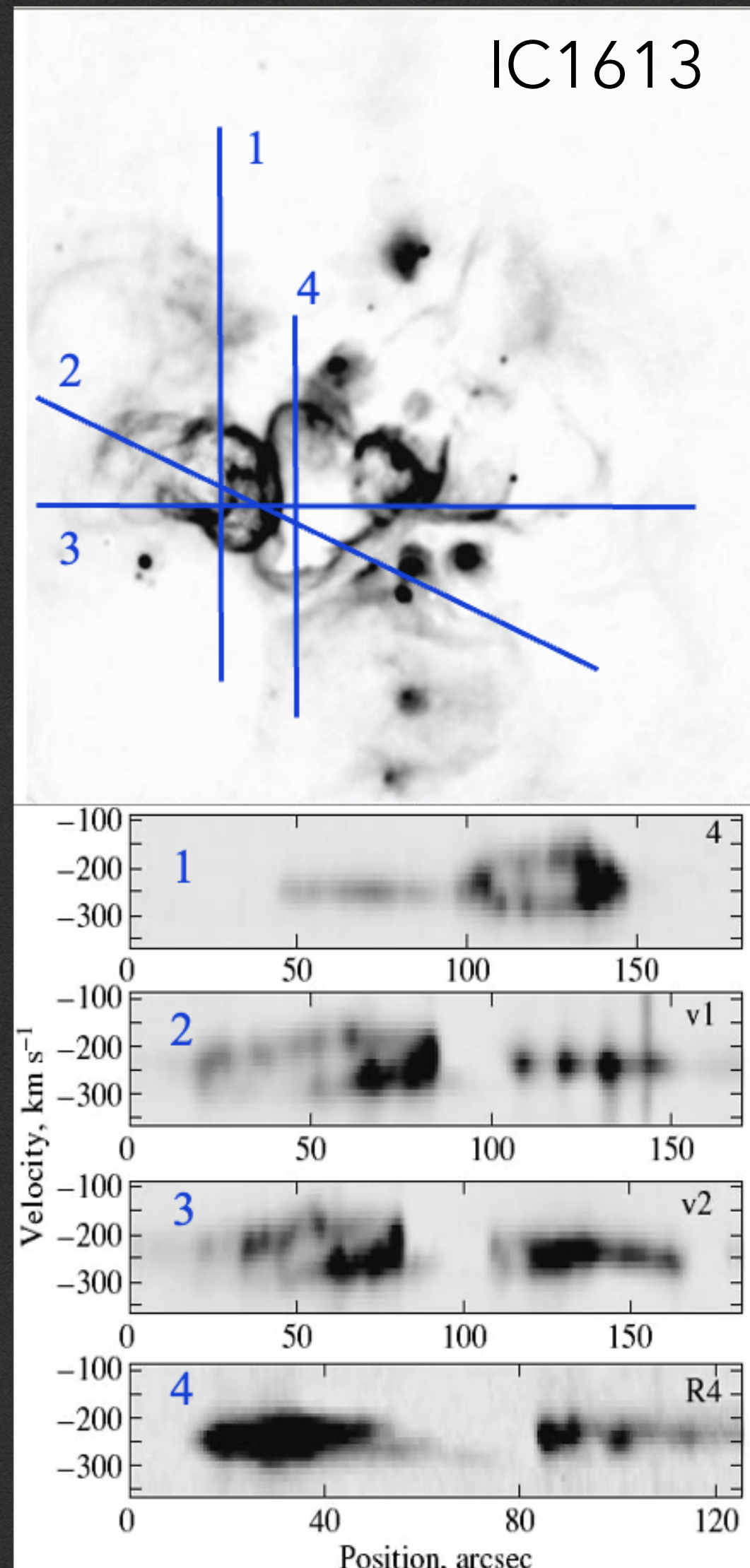


Karachentsev+2002



Hunter+2012

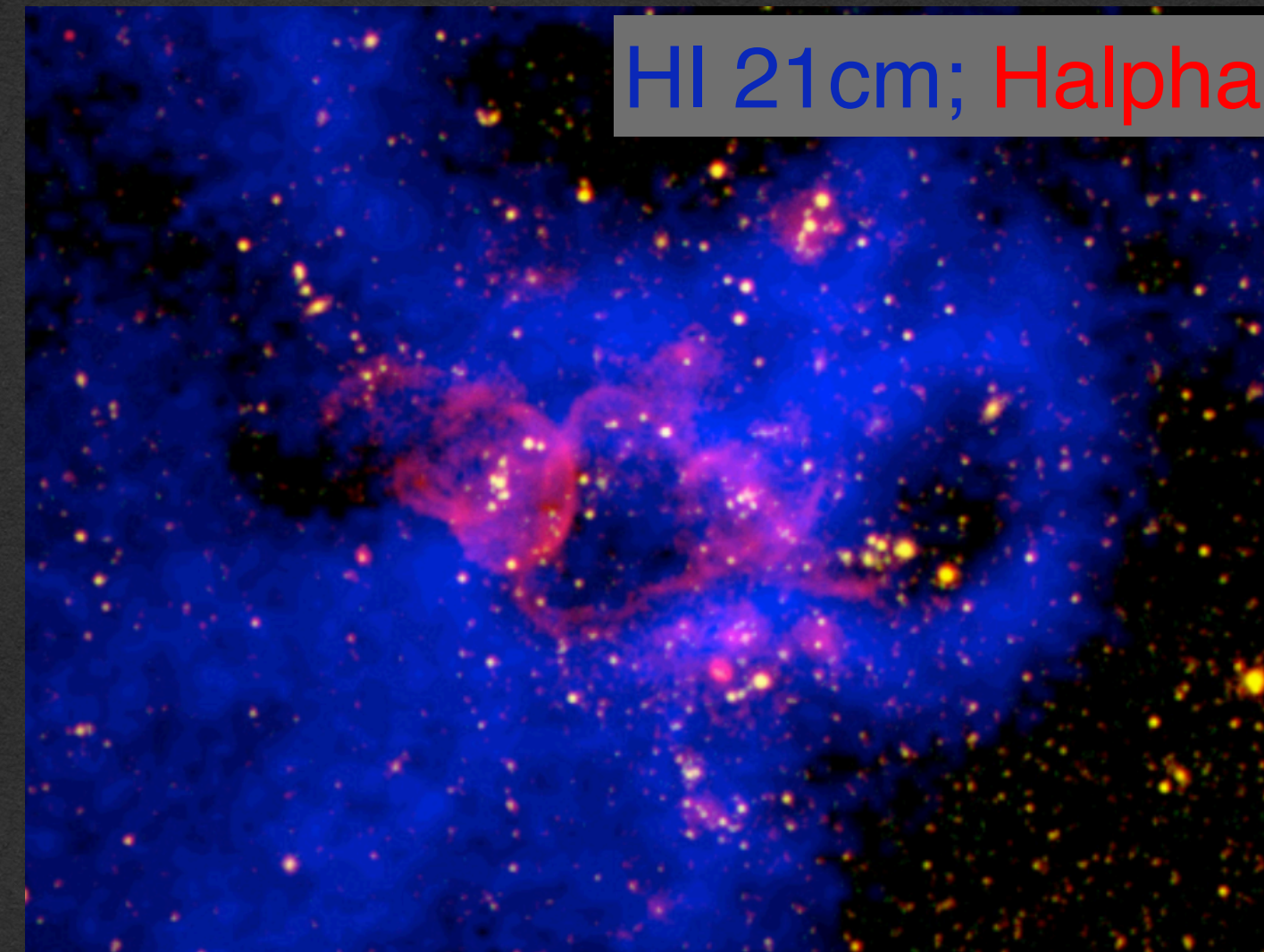
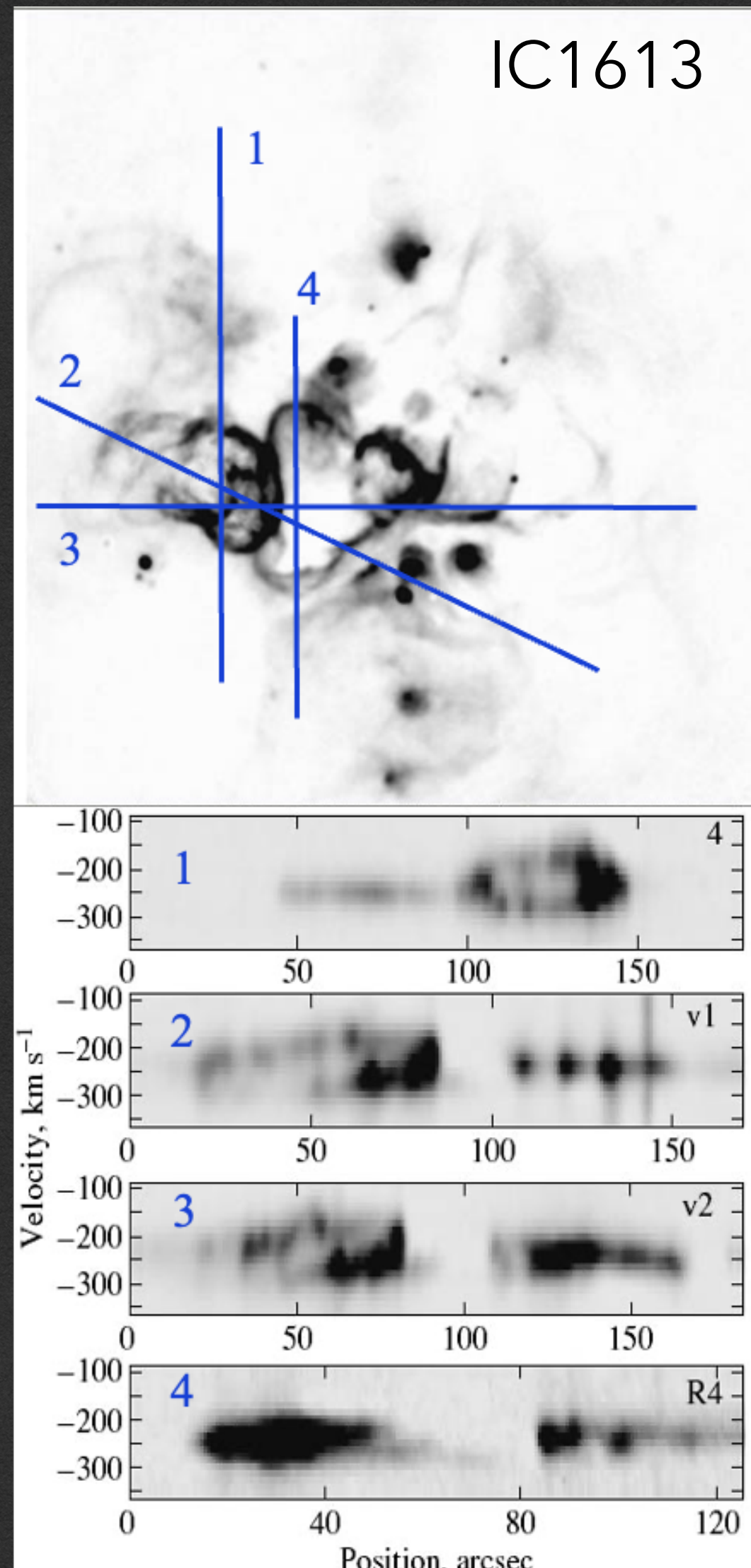
Иницированное ЗО в стенках сверхоболочек



Кинематический возраст оболочек HI и HII
(~5.5 и <2 млн лет)

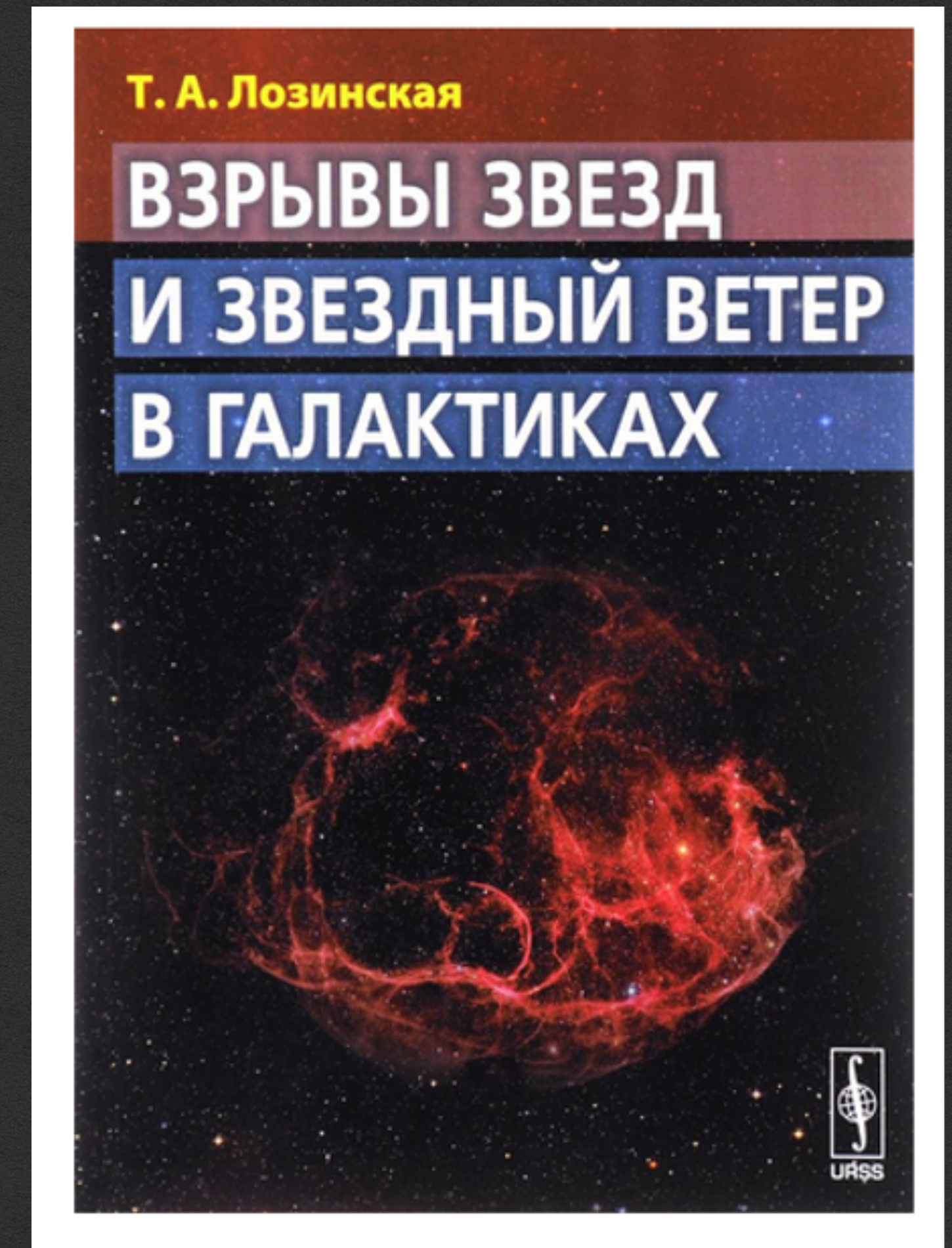
→ выводы об иницированном
звздообразовании в результате
расширения и взаимодействия
сверхоболочек HI

Иницированное ЗО в стенках сверхоболочек

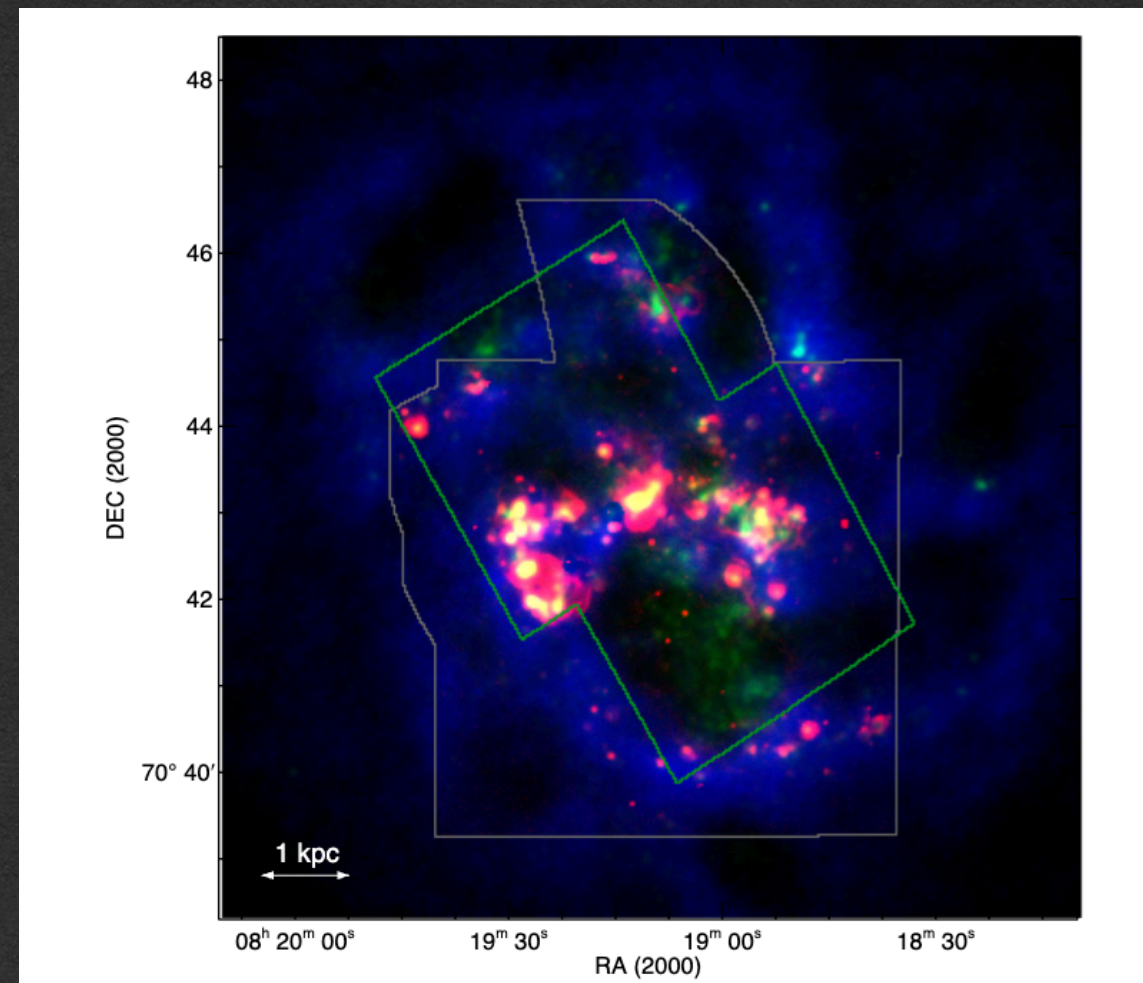


Кинематический возраст оболочек HI и HII
(~5.5 и <2 млн лет)

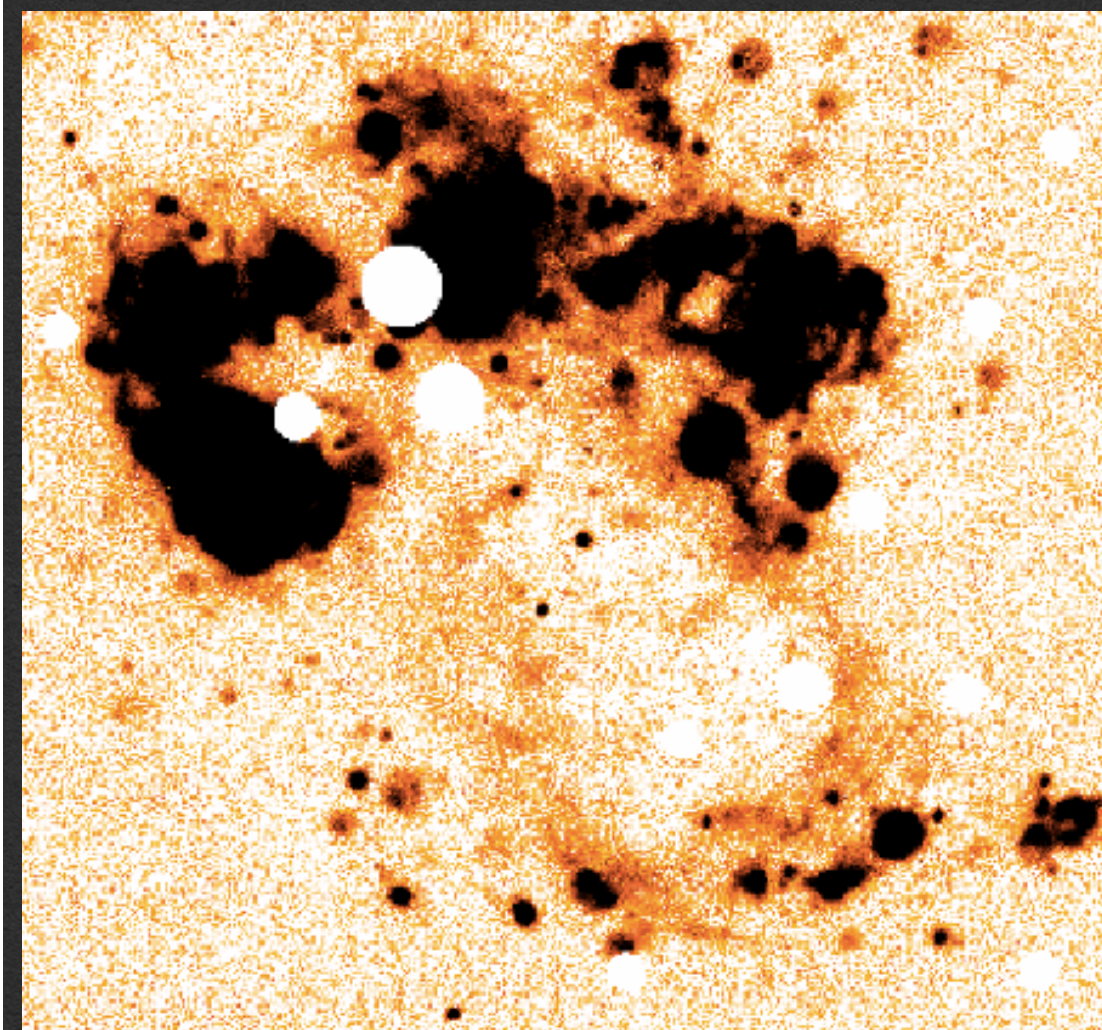
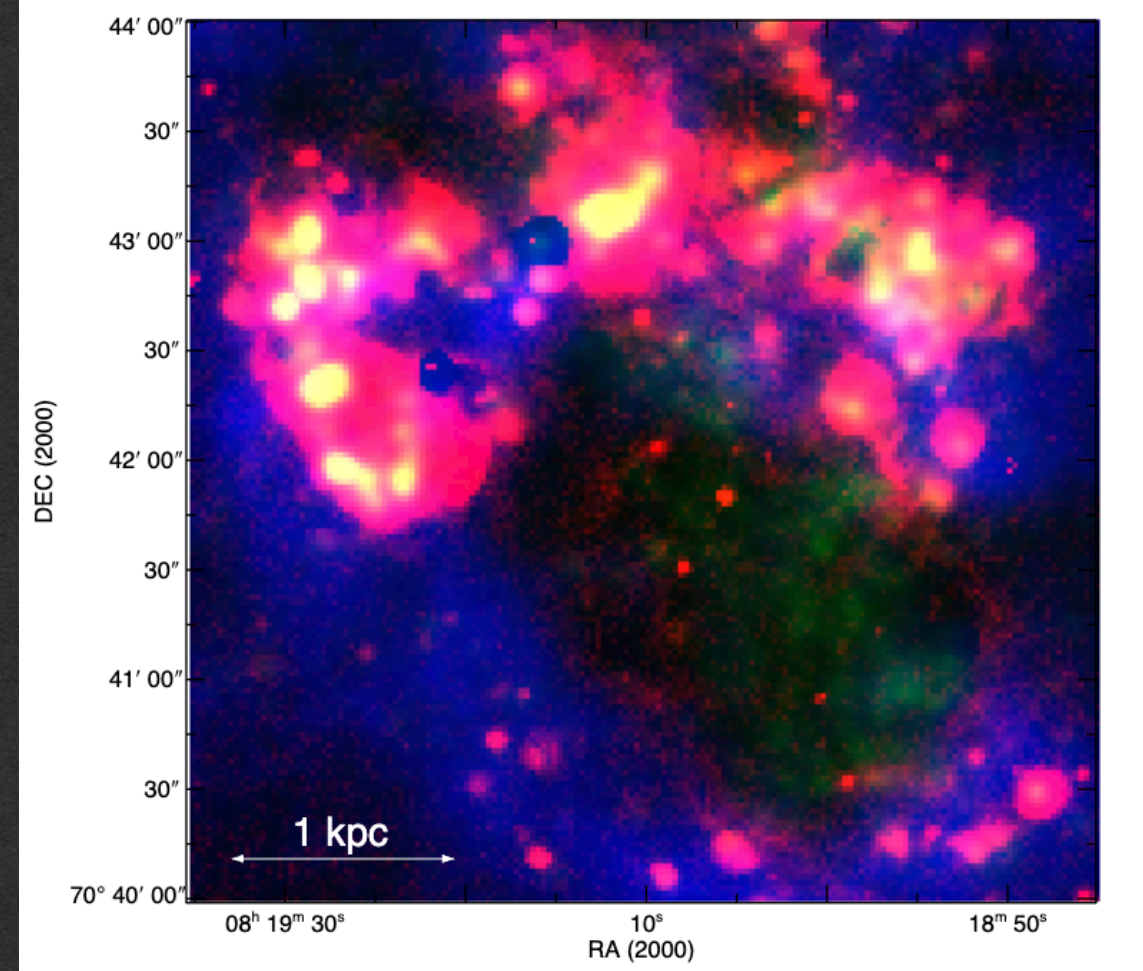
→ выводы об иницированном
звздообразовании в результате
расширения и взаимодействия
сверхоболочек HI



Инициированное ЗО в стенках сверхоболочек

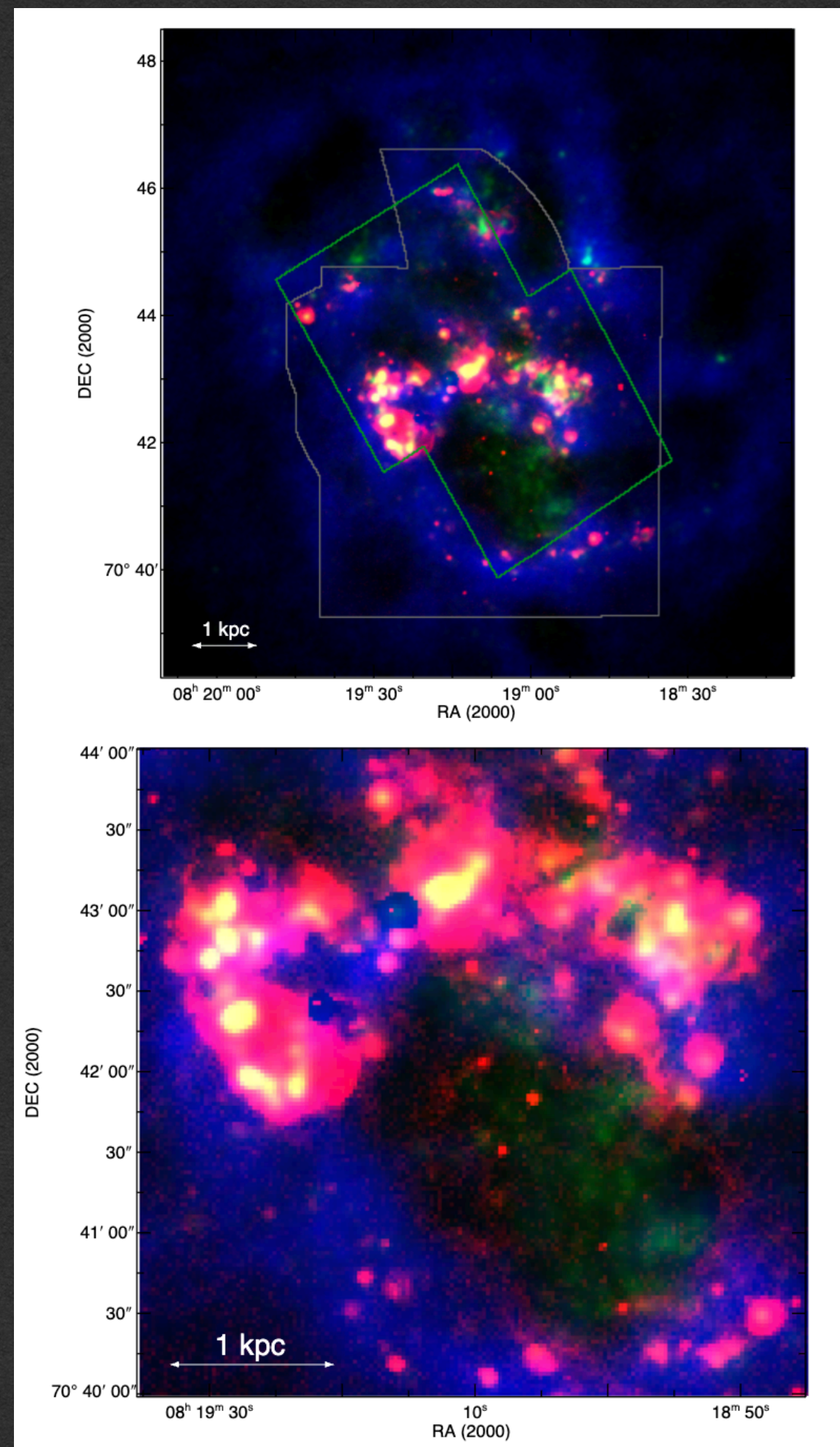


Scorpio/IMA



Egorov+(2017a)

Иницированное ЗО в стенках сверхоболочек



Scorpio/IMA

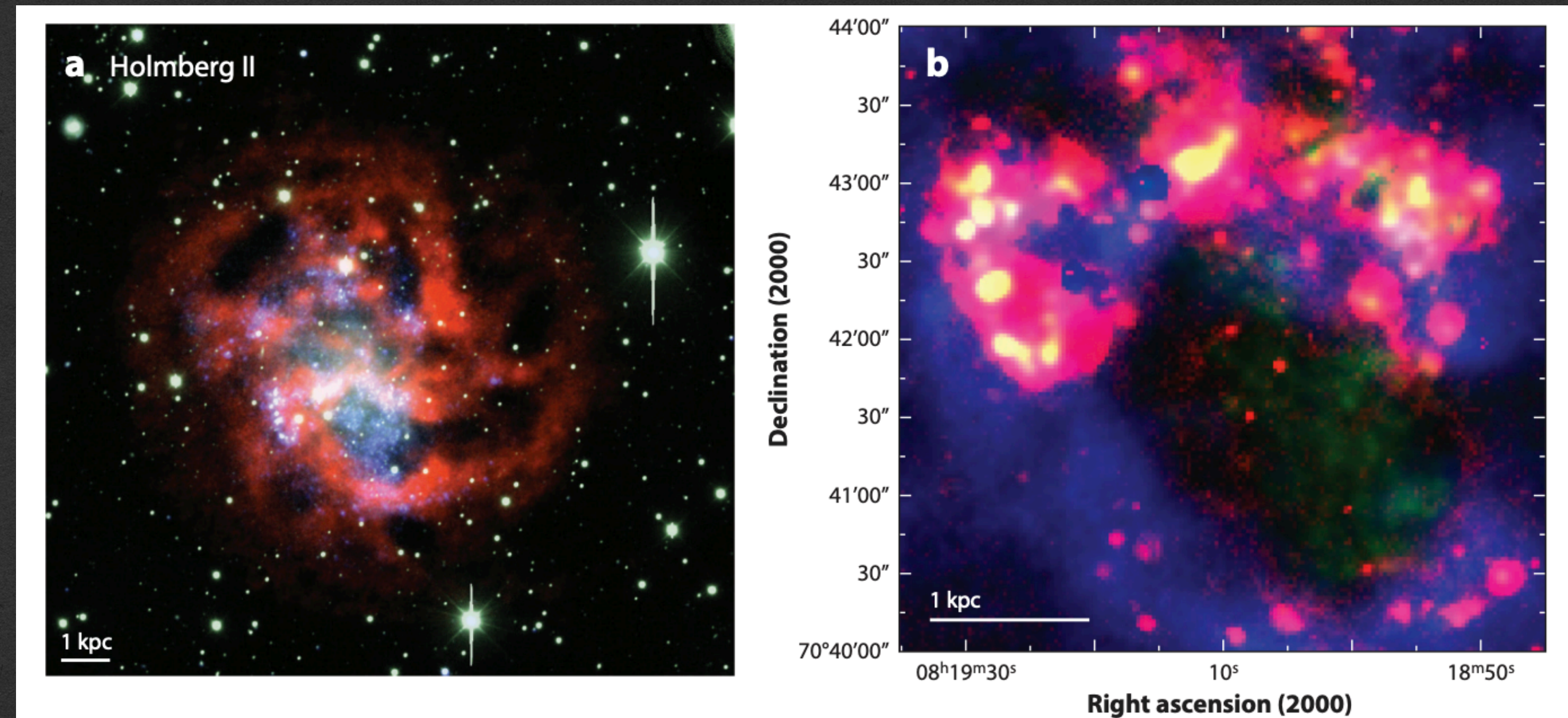
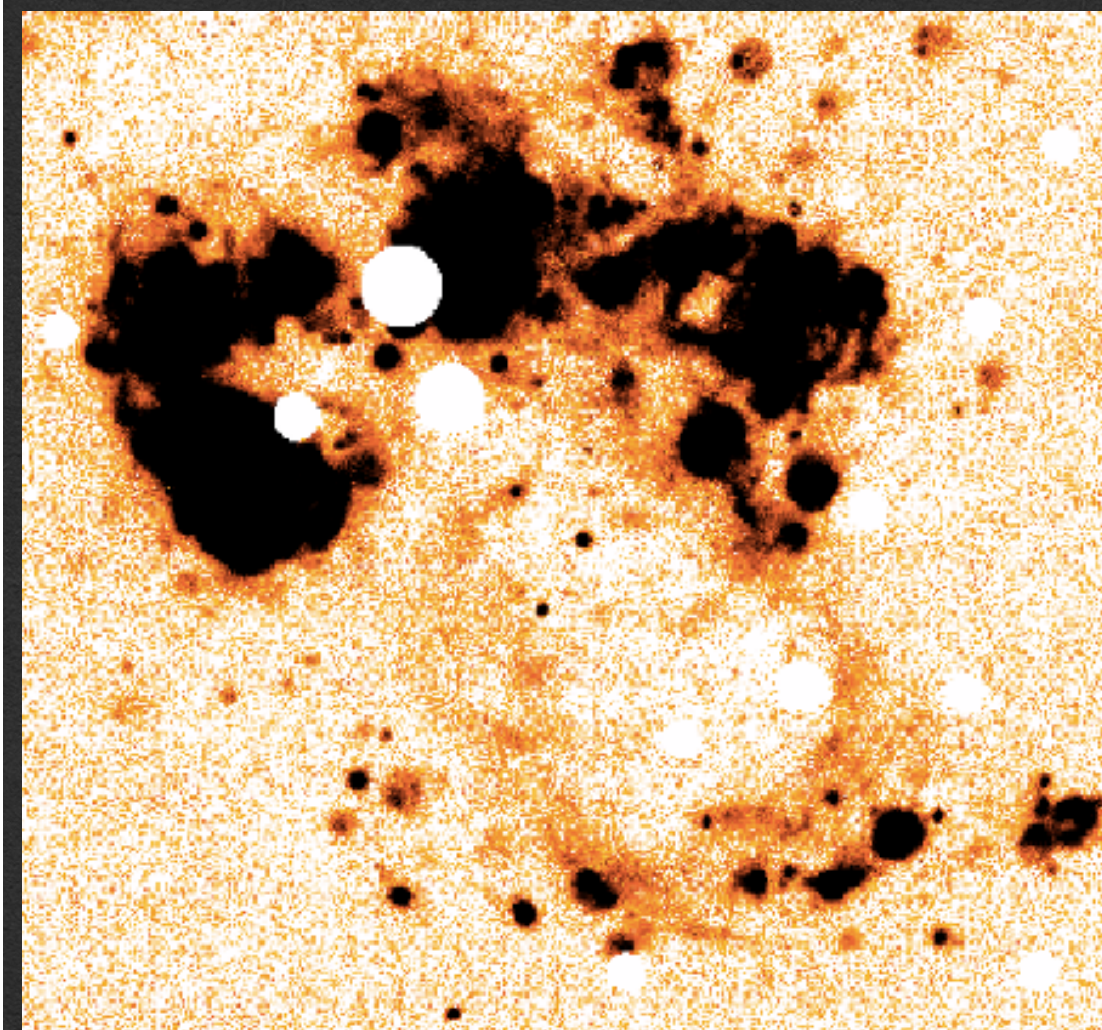


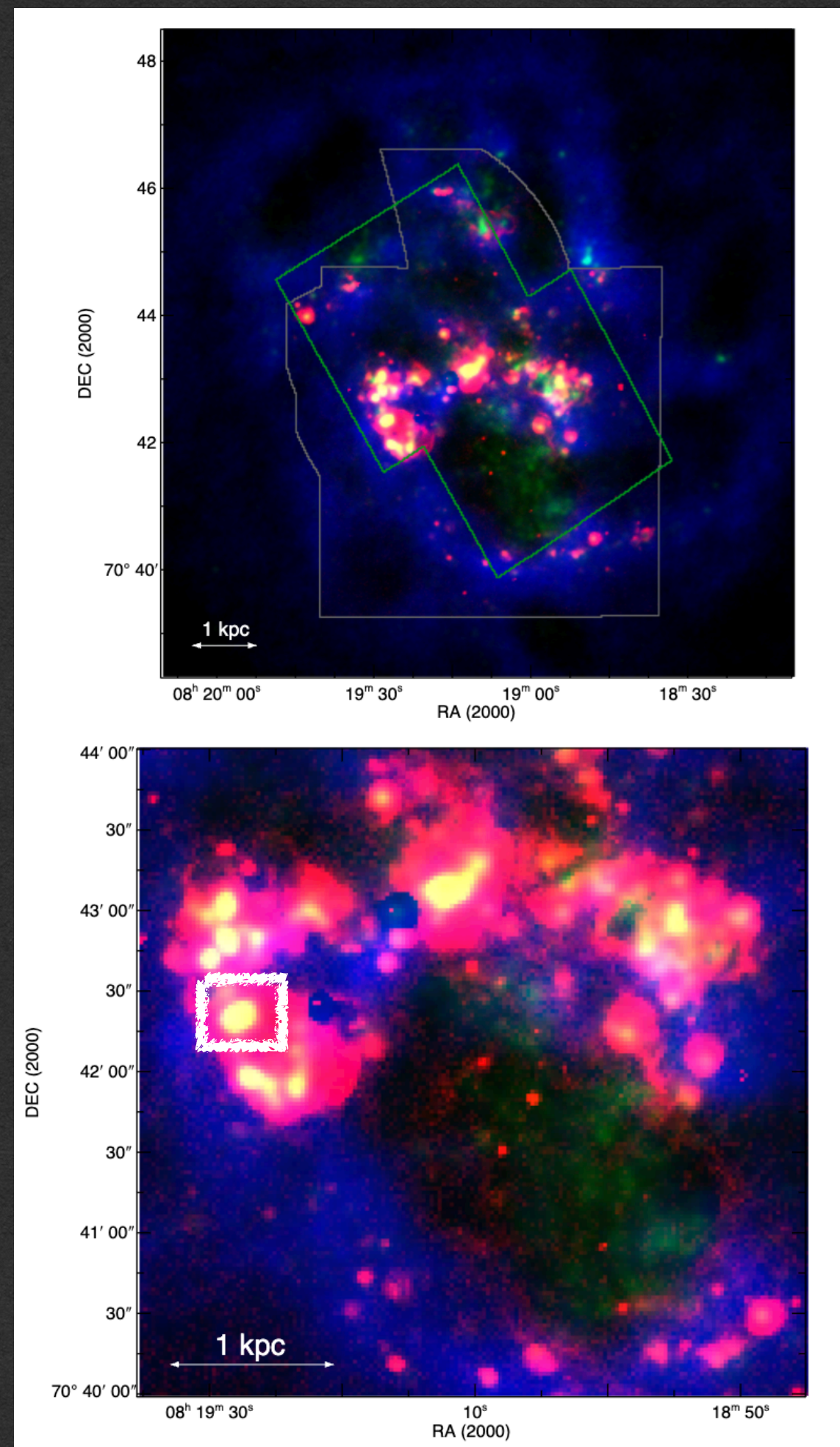
Figure 3

(a) False-color image of Holmberg II. Blue is far-ultraviolet emission, green is V -band emission, and red is atomic hydrogen gas emission. (b) Giant gas shell with peripheral star formation in Holmberg II, with red, green, and blue corresponding to $H\alpha$, far-ultraviolet (GALEX), and $H\text{I}$ 21-cm (LITTLE THINGS) emission, respectively. This shell is centered on the prominent hole just south of the center of the galaxy. We thank Lauren Hill for producing panel *a*. Panel *b* adapted from Egorov et al. (2017) with permission from the lead author and OUP. Abbreviations: GALEX, *Galaxy Evolution Explorer*; LITTLE THINGS, Local Irregulars That Trace Luminosity Extremes–The $H\text{I}$ Nearby Galaxy Survey.

118 Hunter et al. Hunter, Elmegreen, Madden, *AnnRevAA* 2024

Egorov+(2017a)

Инициированное ЗО в стенках сверхоболочек



Scorpio/IMA

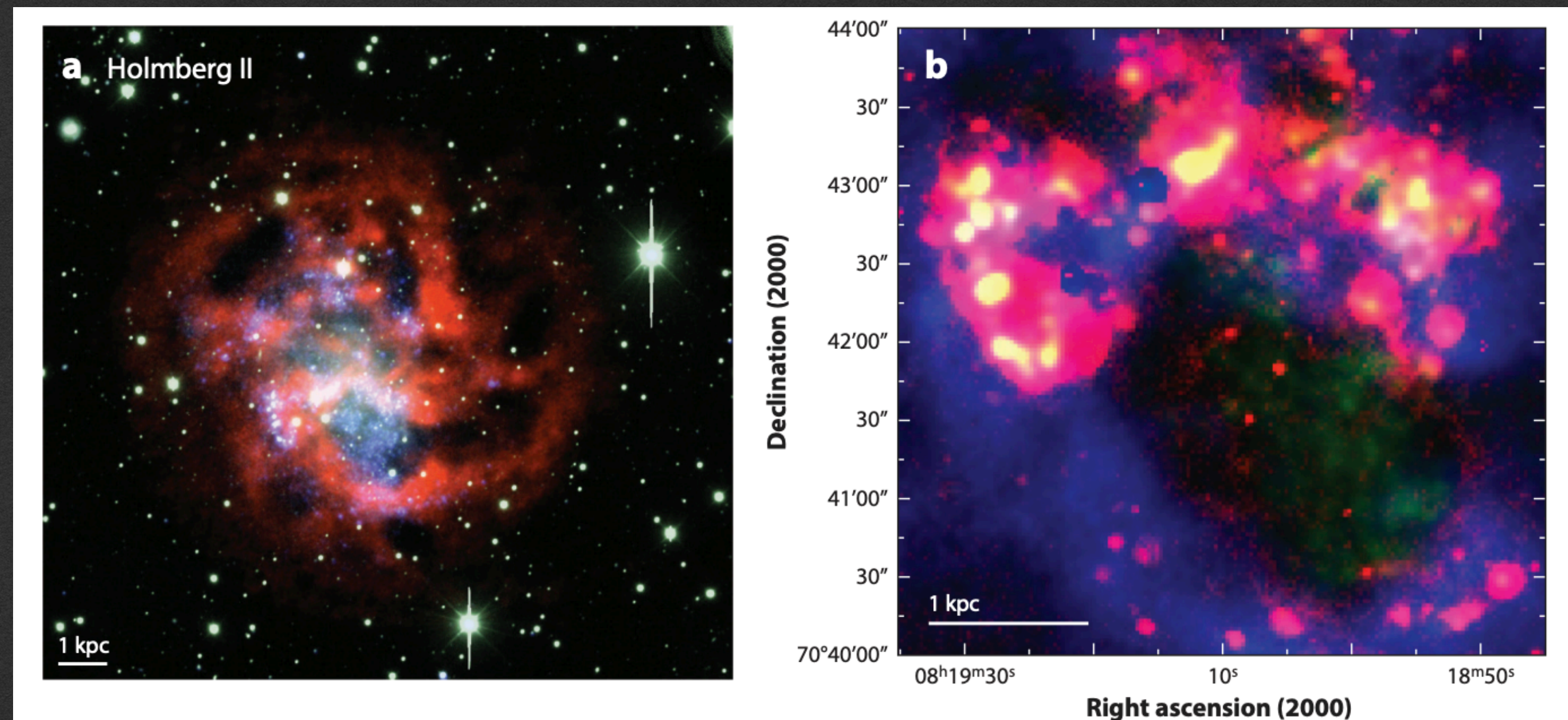
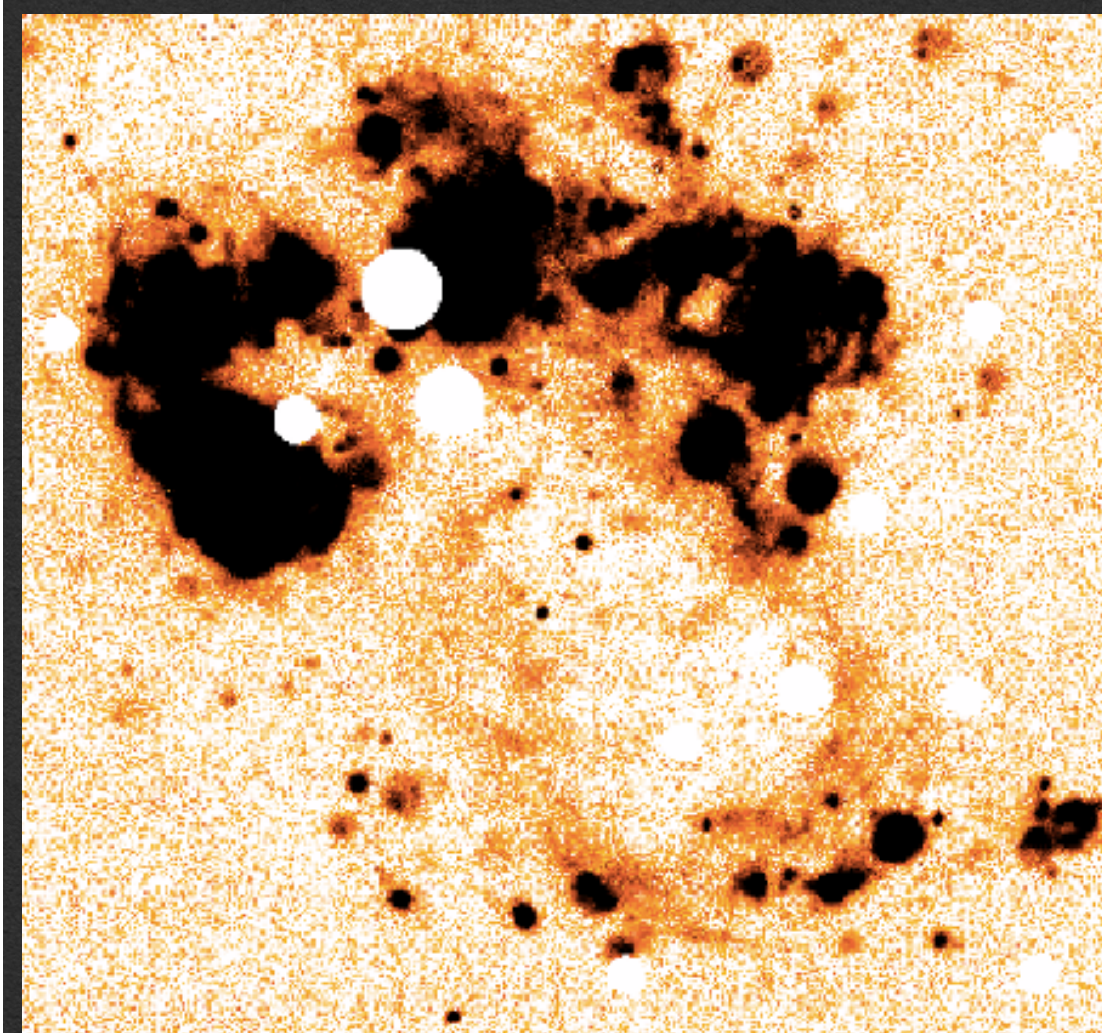


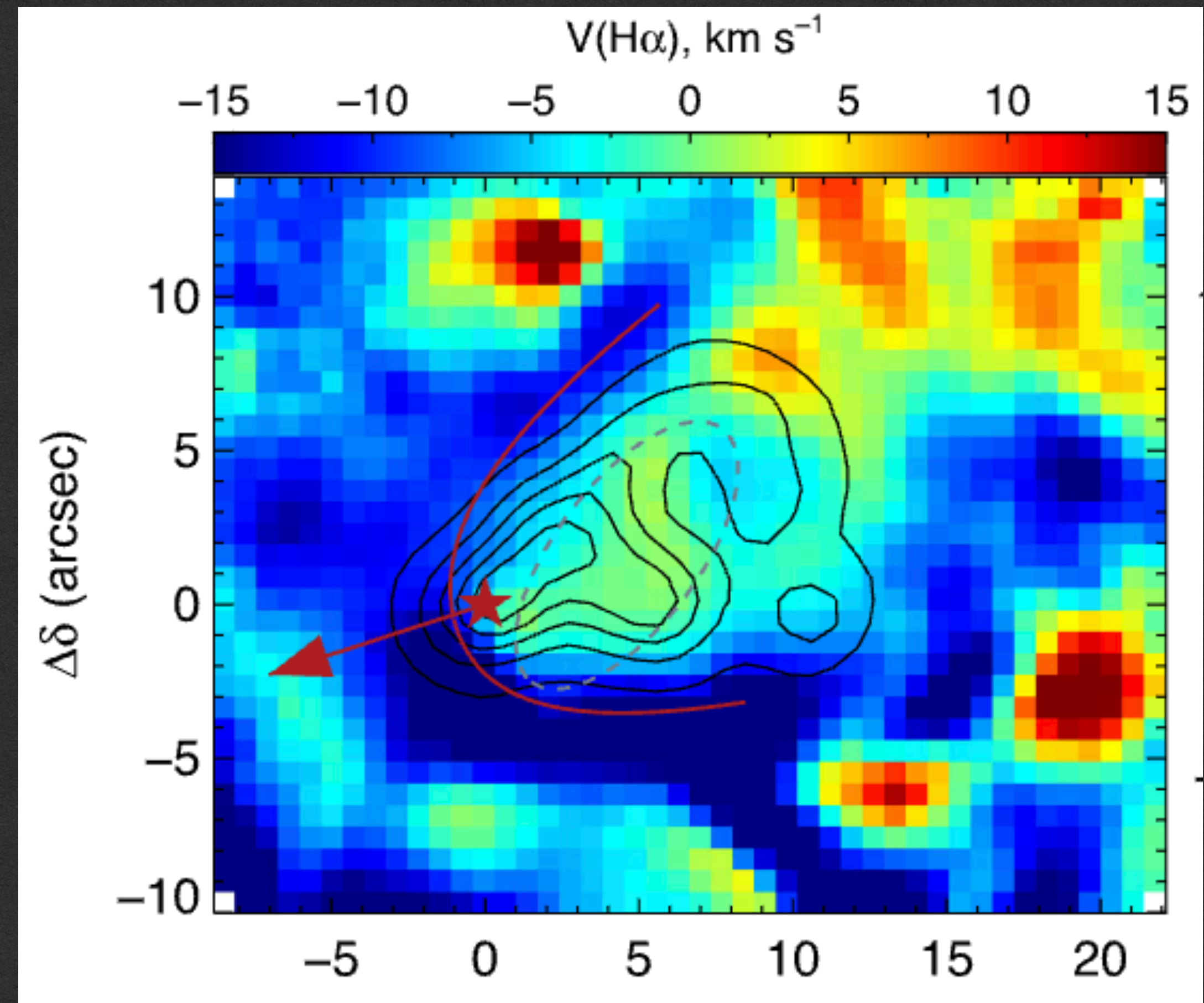
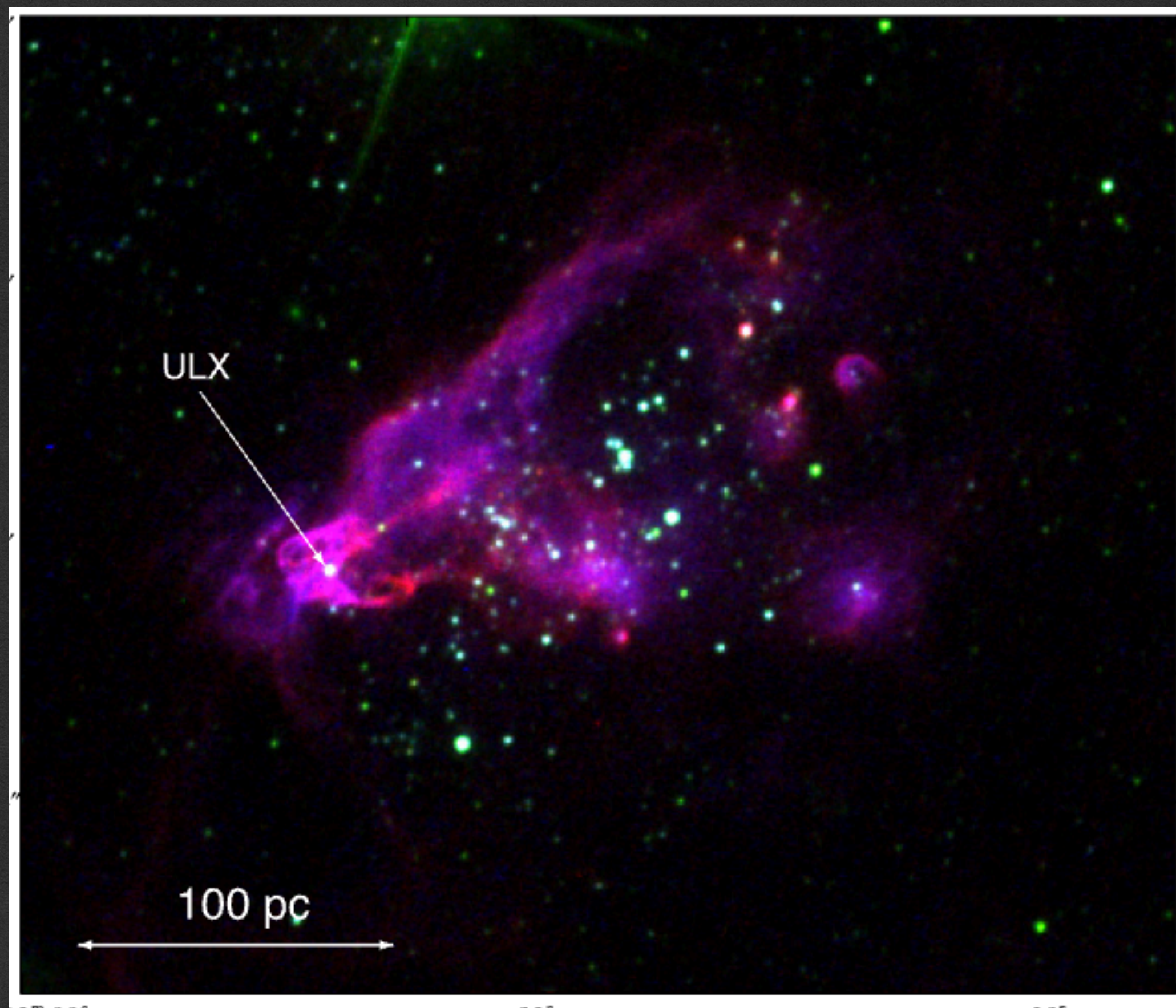
Figure 3

(a) False-color image of Holmberg II. Blue is far-ultraviolet emission, green is V -band emission, and red is atomic hydrogen gas emission. (b) Giant gas shell with peripheral star formation in Holmberg II, with red, green, and blue corresponding to $H\alpha$, far-ultraviolet (GALEX), and $H\text{I}$ 21-cm (LITTLE THINGS) emission, respectively. This shell is centered on the prominent hole just south of the center of the galaxy. We thank Lauren Hill for producing panel *a*. Panel *b* adapted from Egorov et al. (2017) with permission from the lead author and OUP. Abbreviations: GALEX, *Galaxy Evolution Explorer*; LITTLE THINGS, Local Irregulars That Trace Luminosity Extremes–The $H\text{I}$ Nearby Galaxy Survey.

118 Hunter et al. Hunter, Elmegreen, Madden, *AnnRevAA* 2024

Egorov+(2017a)

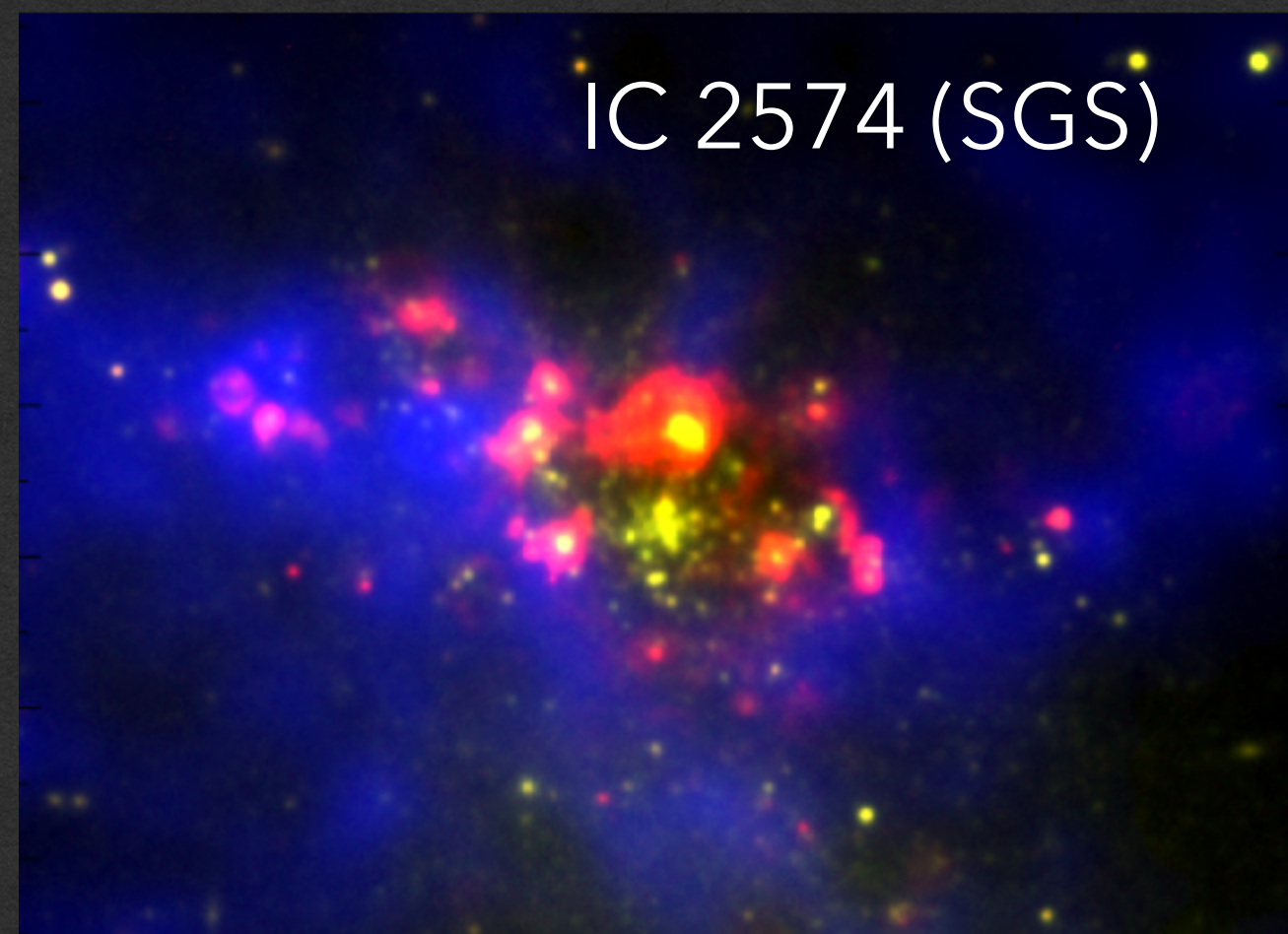
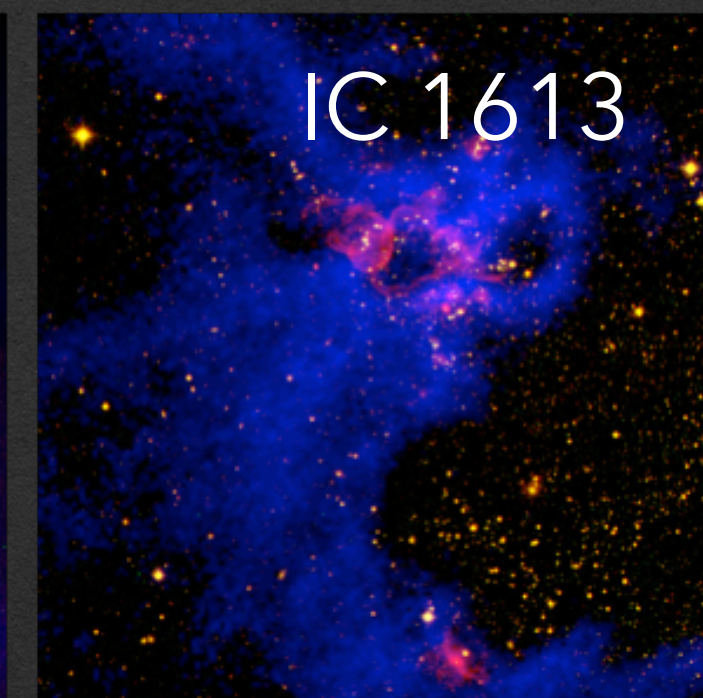
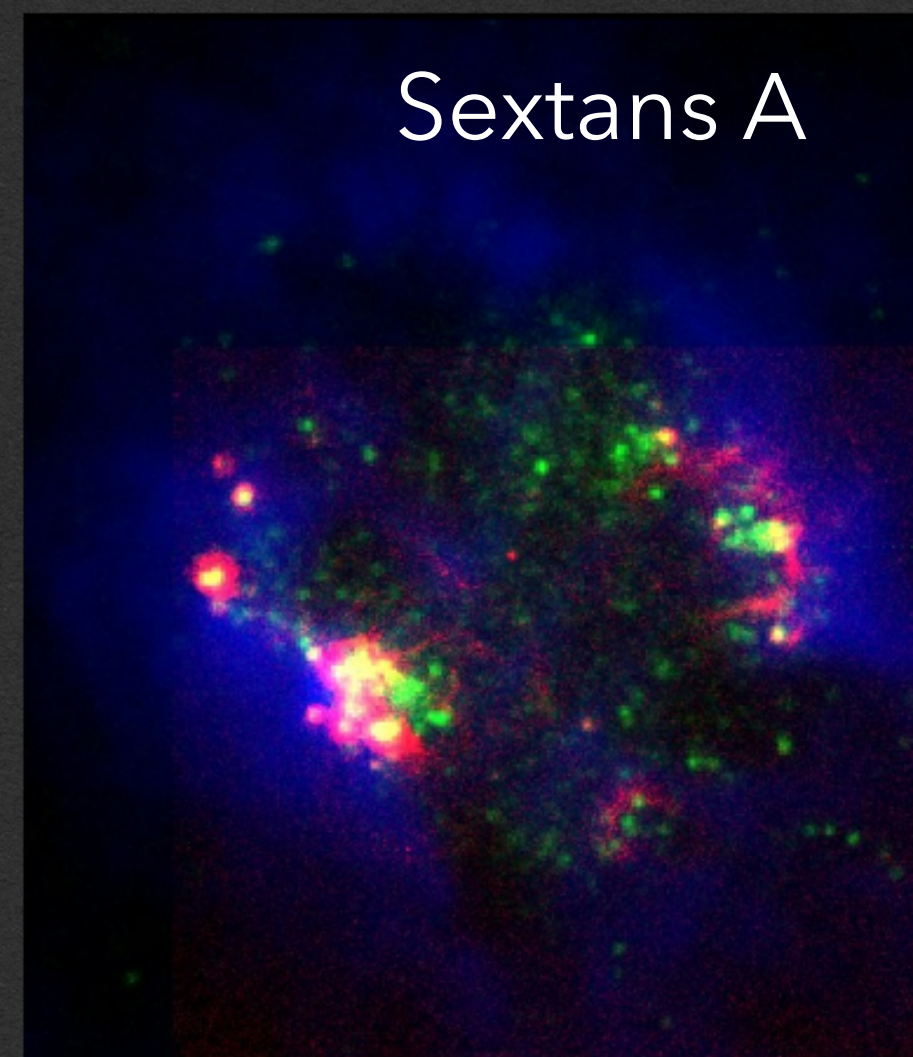
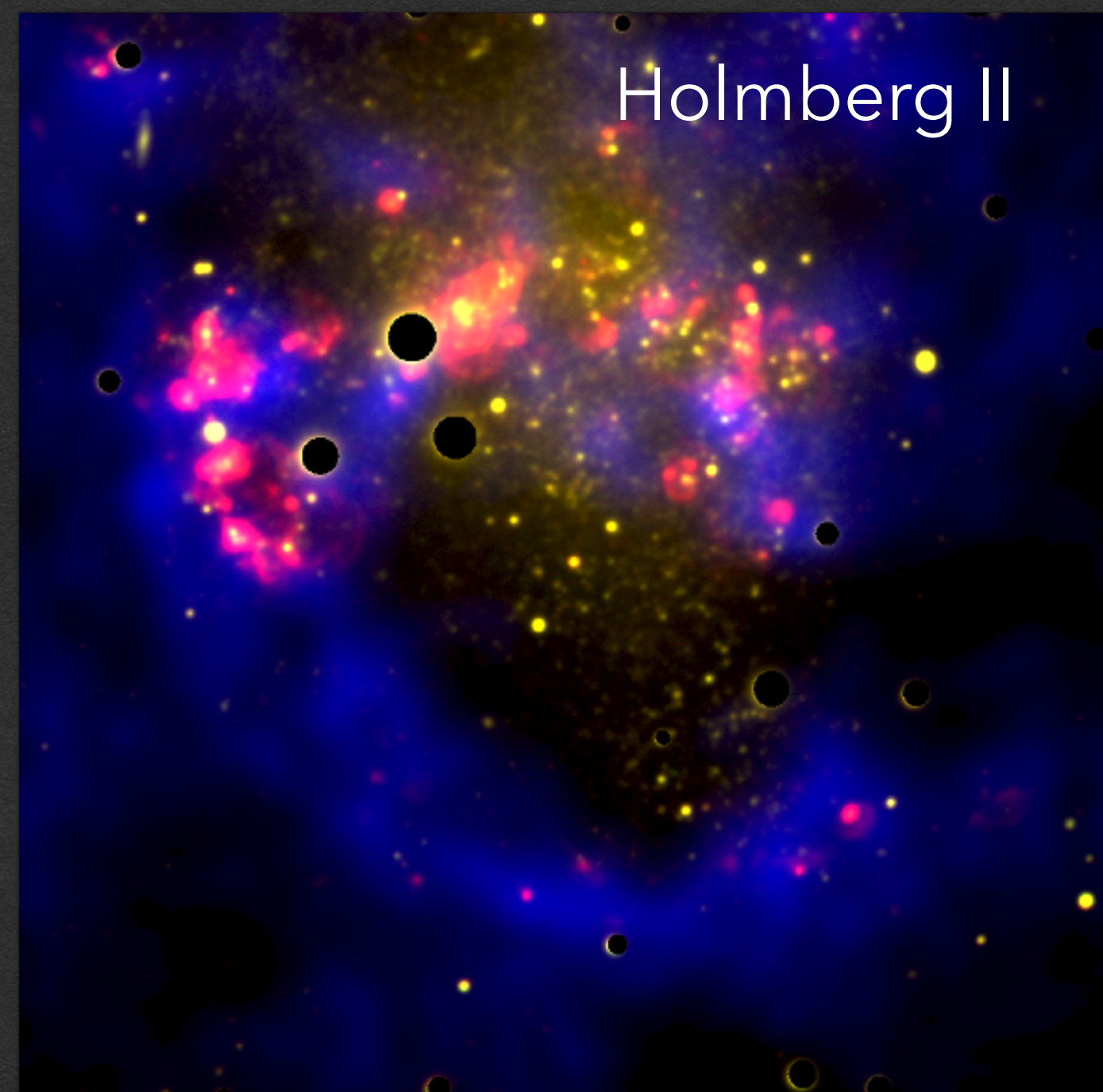
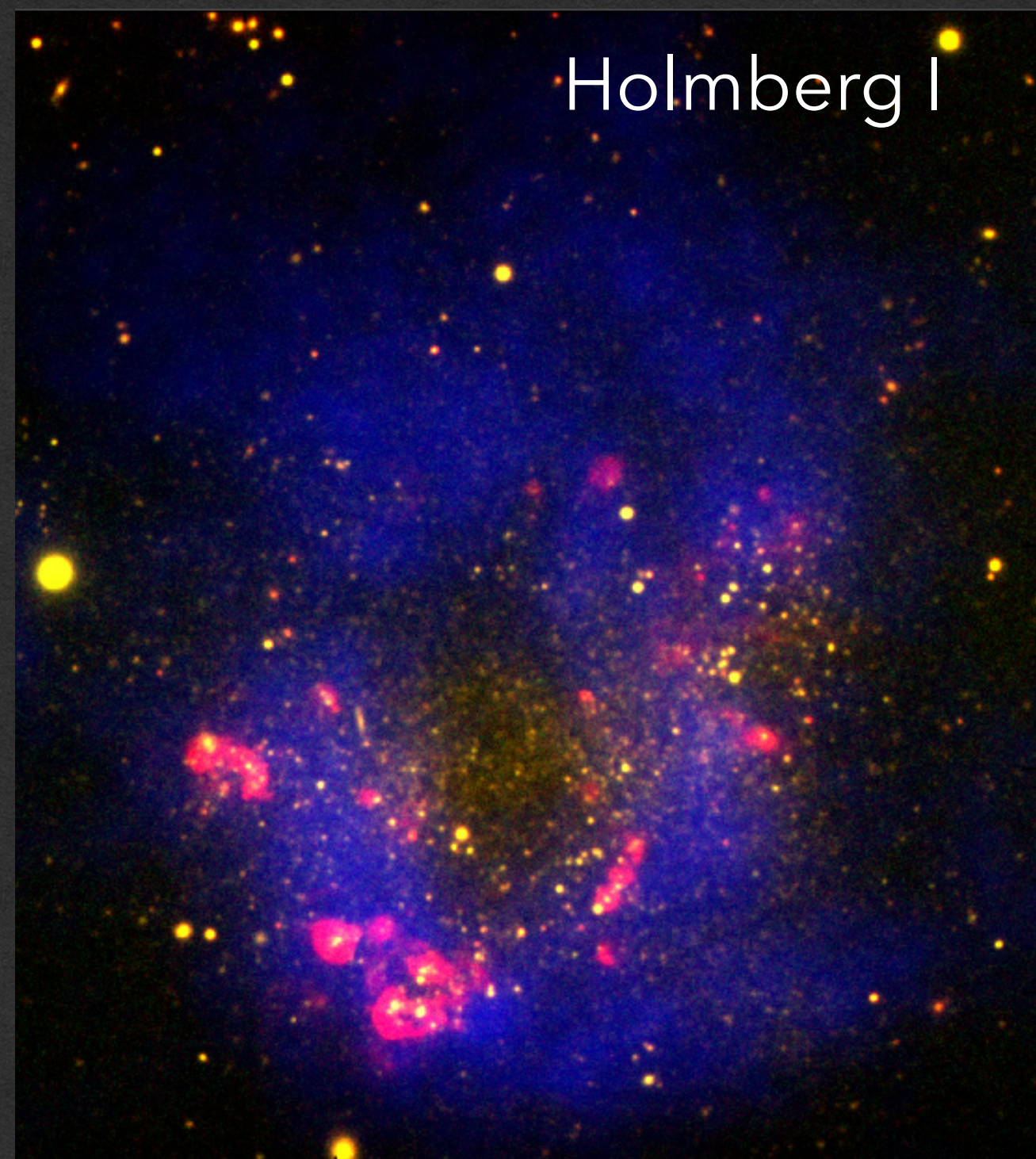
ULX HoII X-1: kinematic evidence of its escape from a cluster



Модель bow-shock в предположении, что ULX был выброшен из ближайшего скопления, прекрасно описывает наблюдаемую кинематику в H α , [OIII] и [SII]

Egorov+(2017b)

Где происходит звездообразование в близких карликовых галактиках?



1kpc
←→

H-alpha

HI 21cm

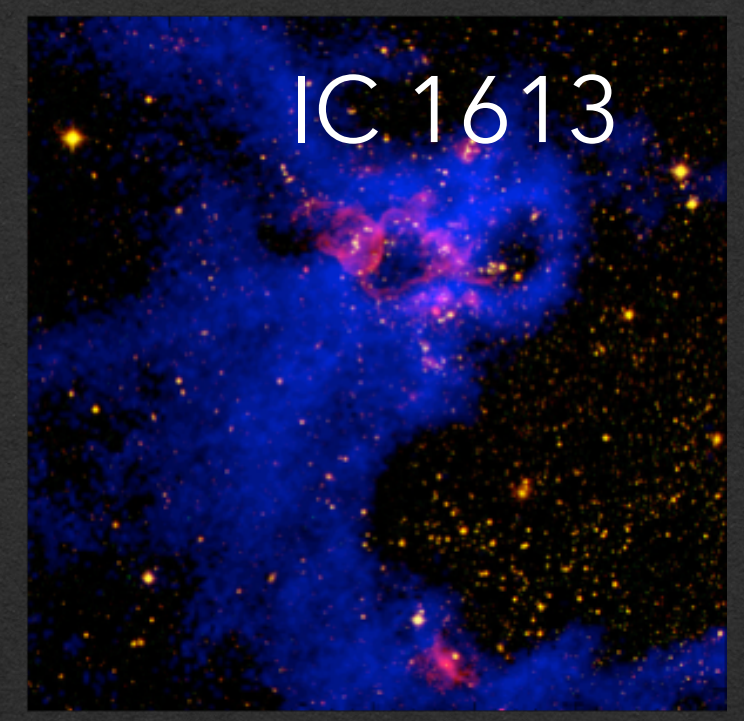
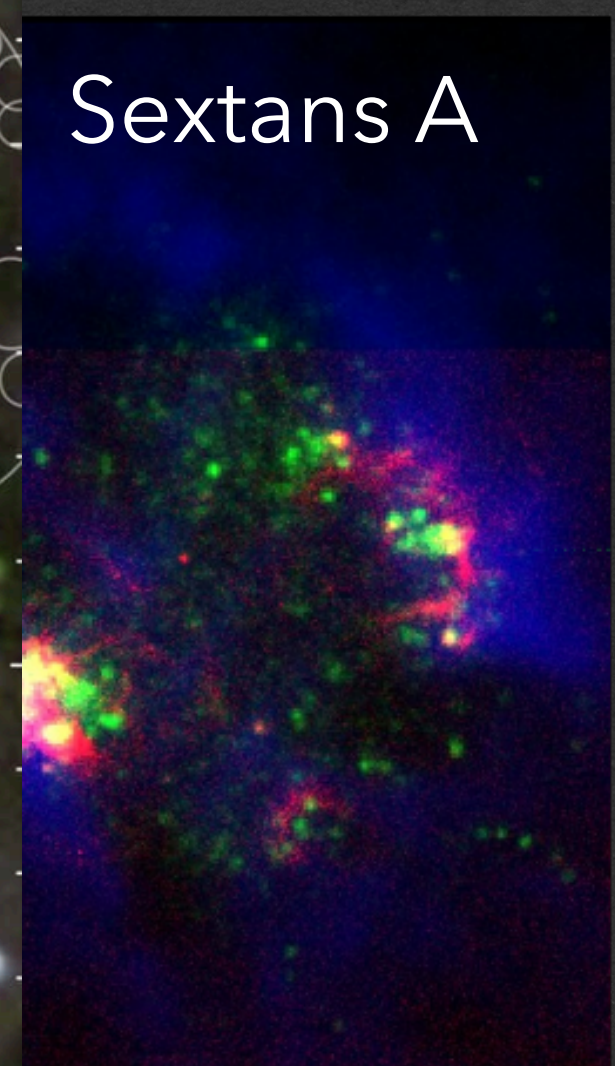
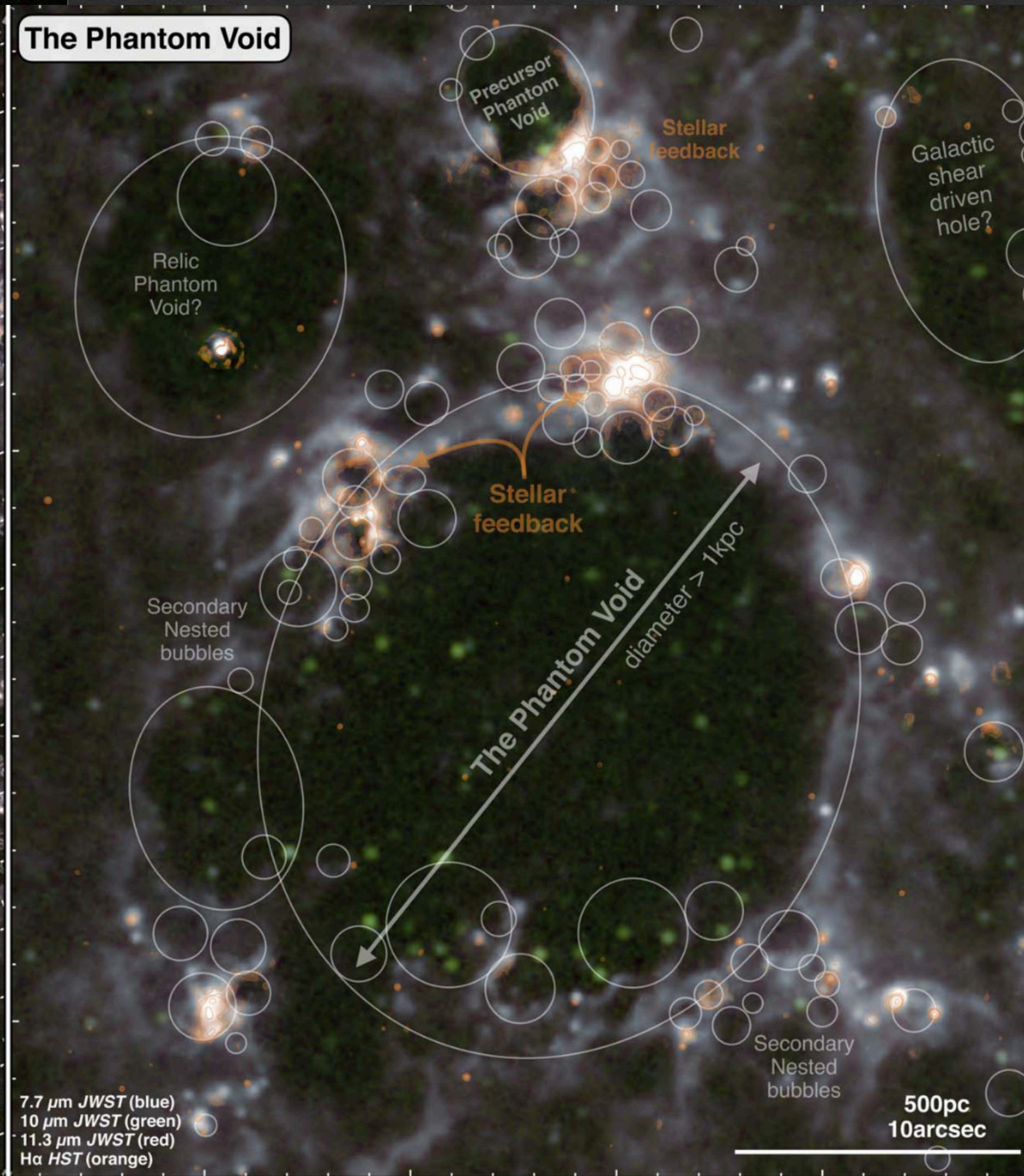
stars

Гигантские сверхоболочки HI (до 2 кпк) наблюдаются повсеместно в карликовых галактиках

Текущее звездообразование в основном происходит в их стенках

Признаки более молодых расширяющихся оболочек ионизованного газа в комплексах текущего ЗО

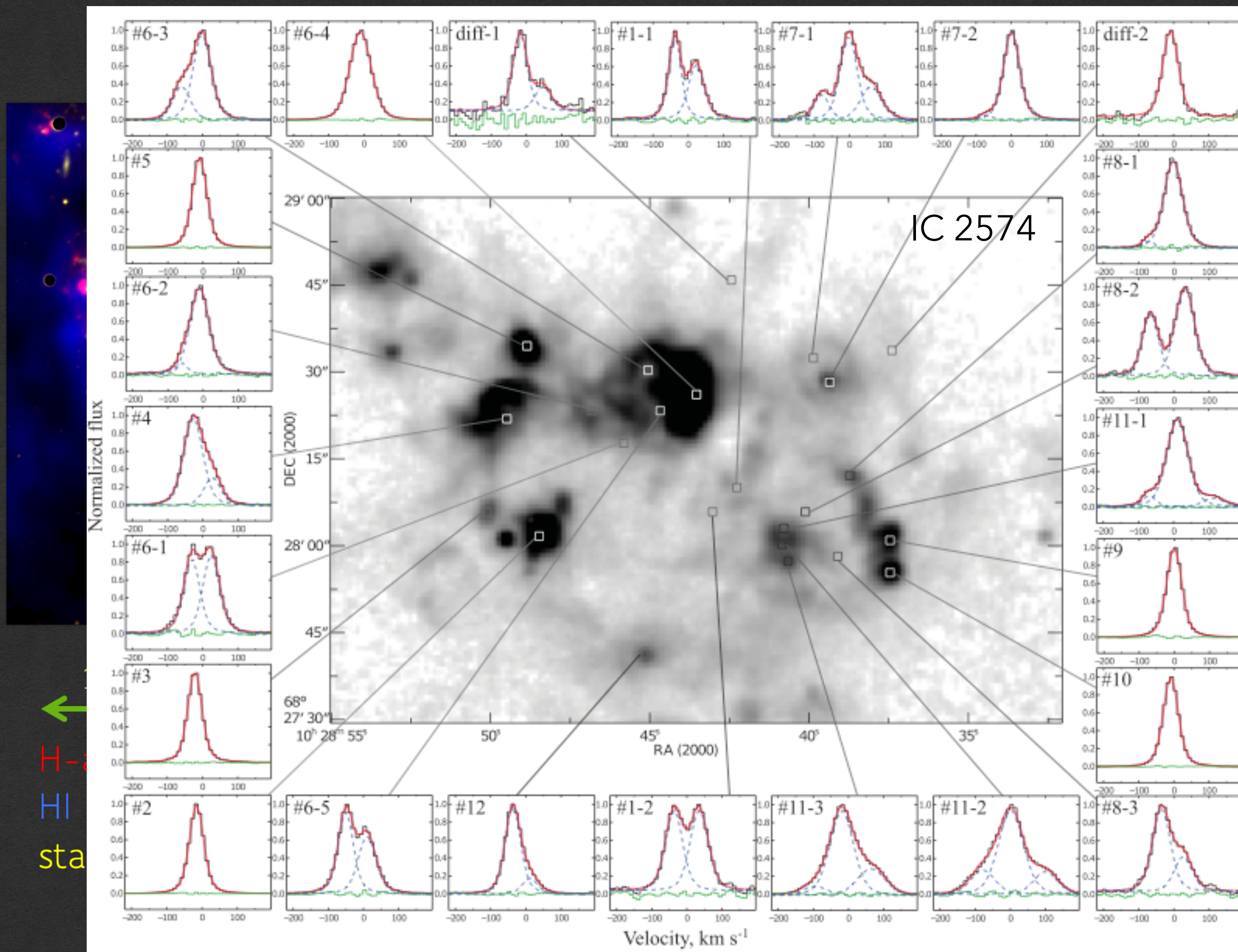
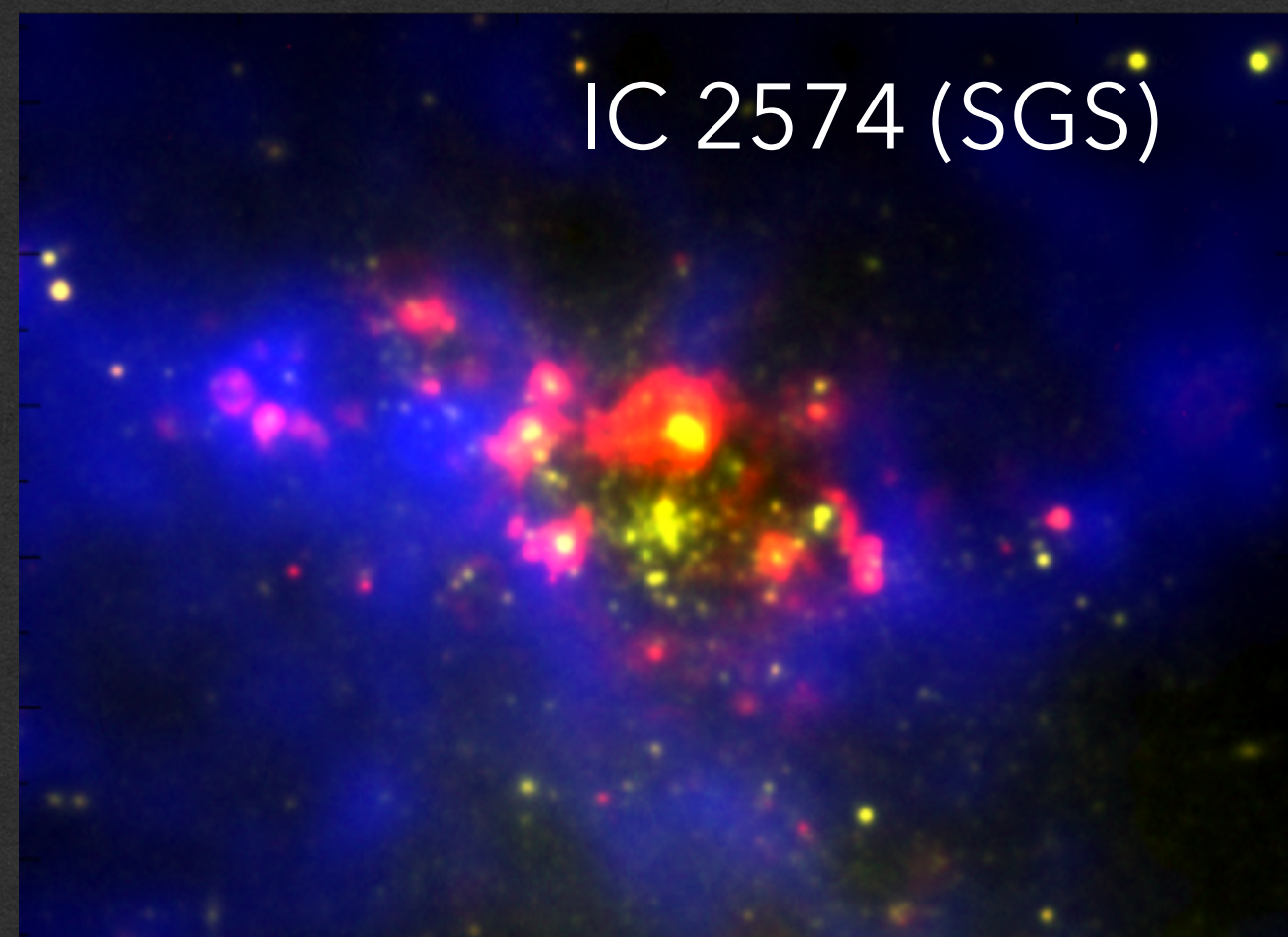
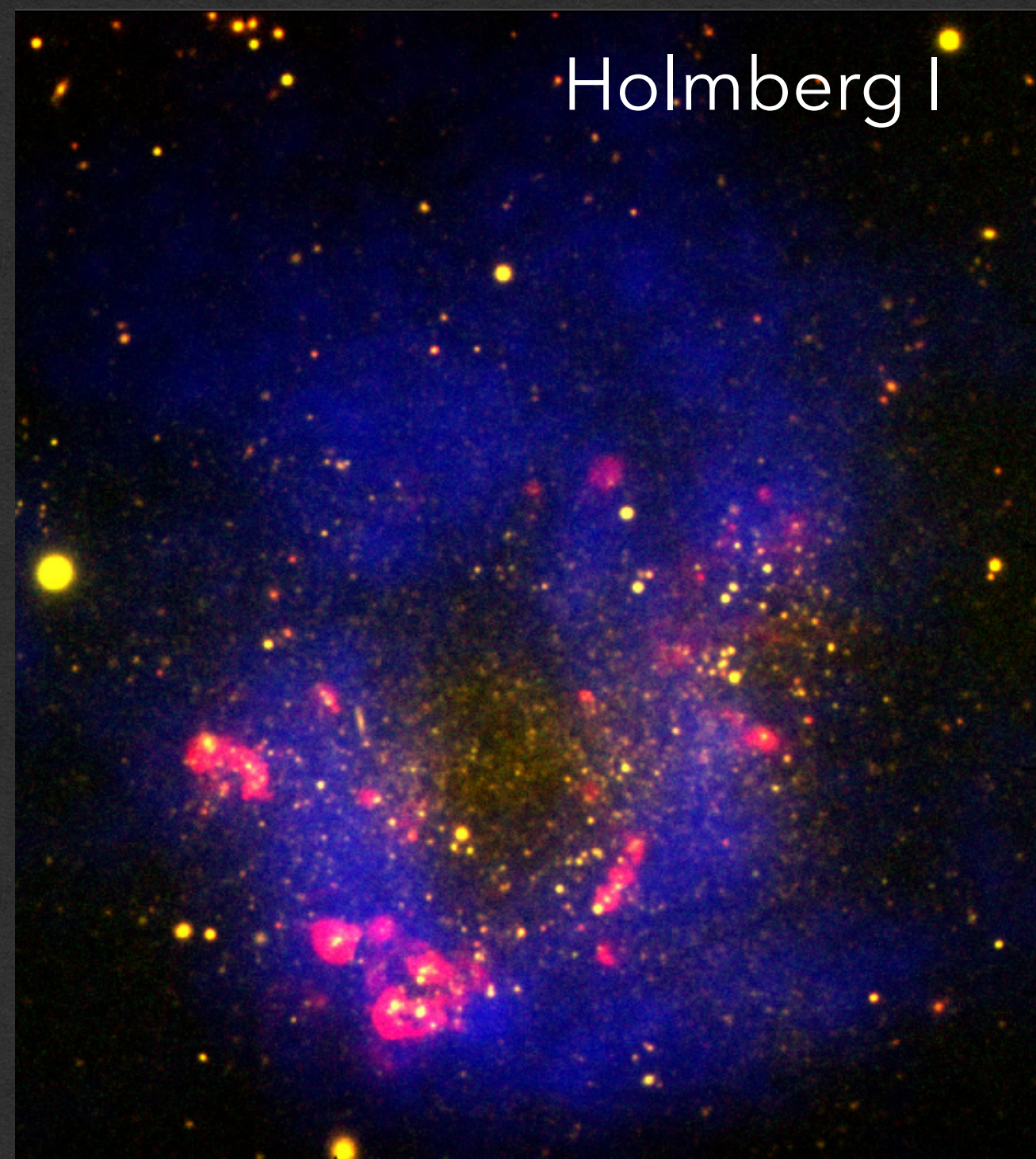
Где происходит звездообразование в близких карликовых галактиках?



ские сверхоболочки HI (до 2 кпк)
даются повсеместно в карликовых галактиках
е звездообразование в основном
одит в их стенках
ки более молодых расширяющихся оболочек
ионизованного газа в комплексах текущего ЗО

Barnes+2023 (JWST+MUSE)

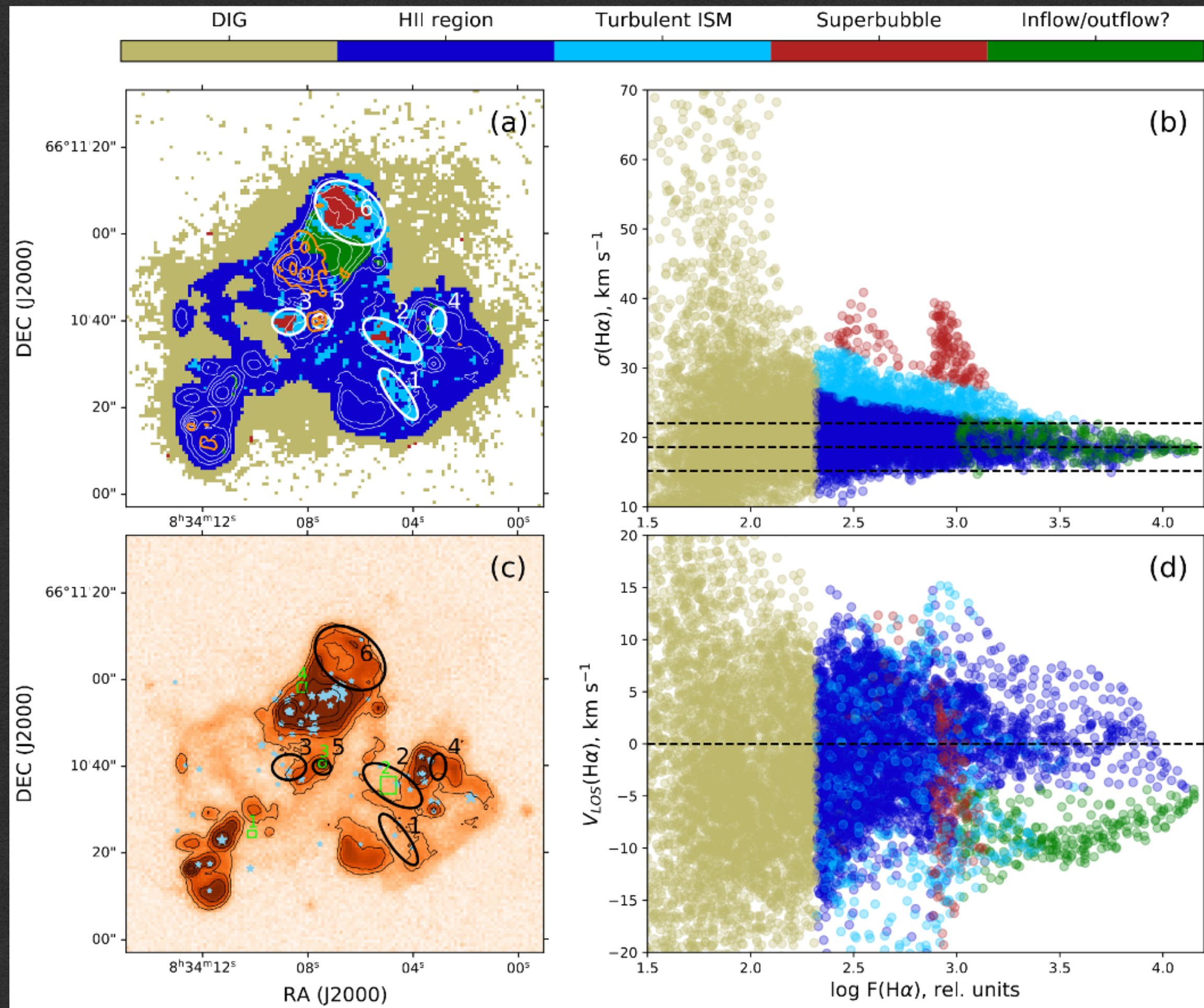
Где происходит звездообразование в близких карликовых галактиках?



иках

очек

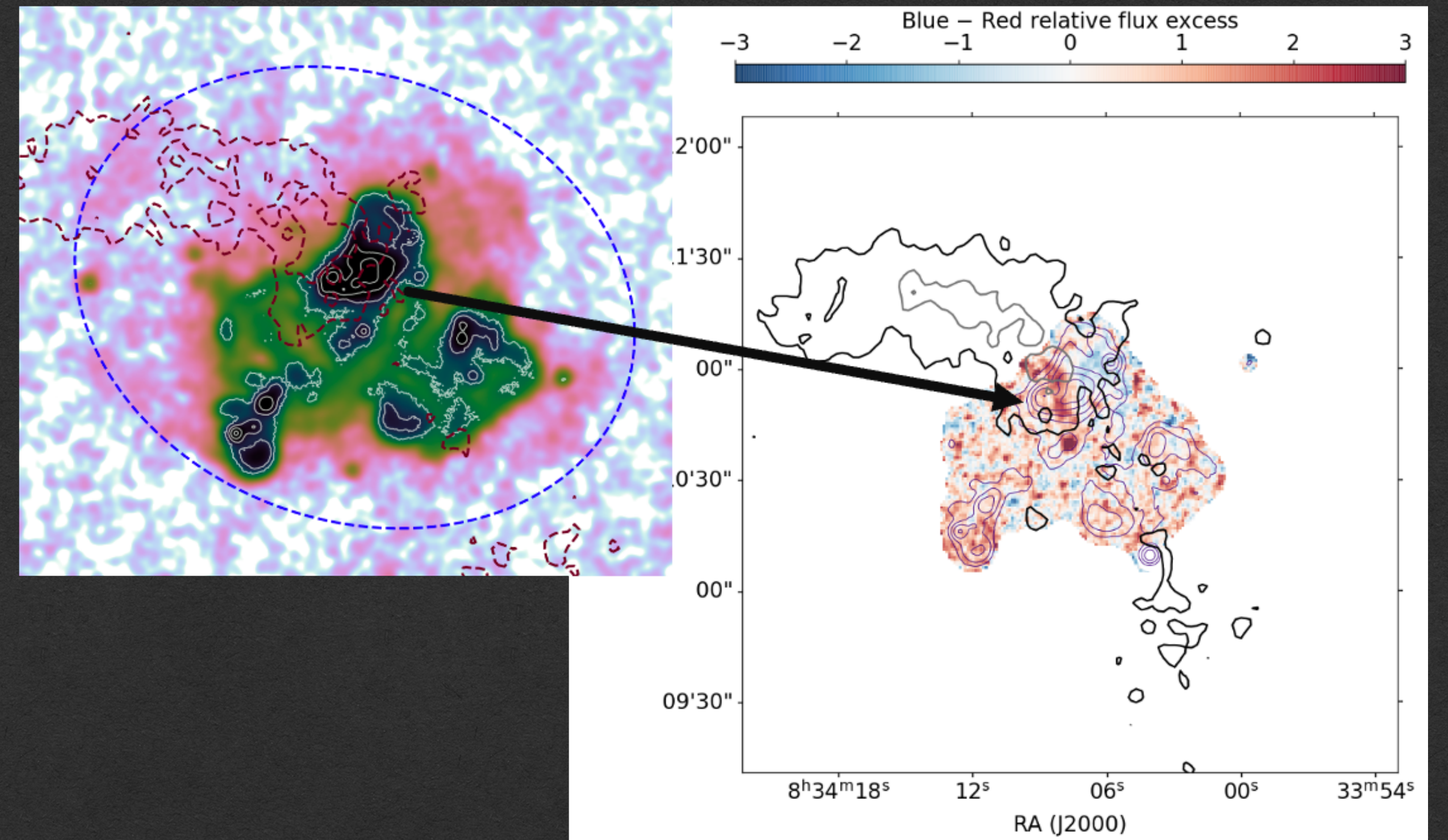
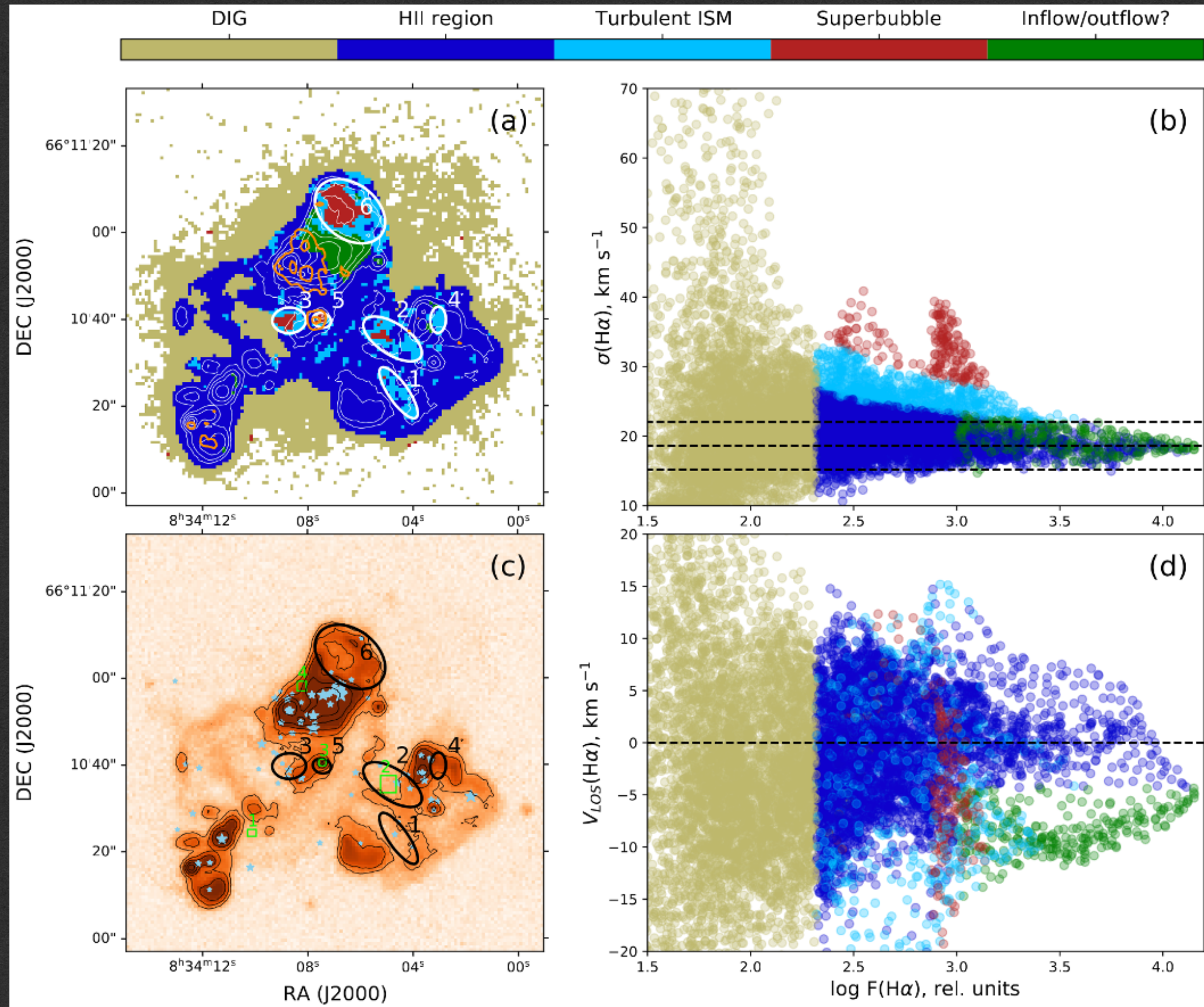
DDO53: аккреция газа «питает» текущее ЗО



Аккреция газа, видимая в кинематике H I и H α .

Оцененного темпа аккреции ($\sim 6 \times 10^{-3} M_{\text{sun}}/\text{yr}$) достаточно для поддержания локального ЗО

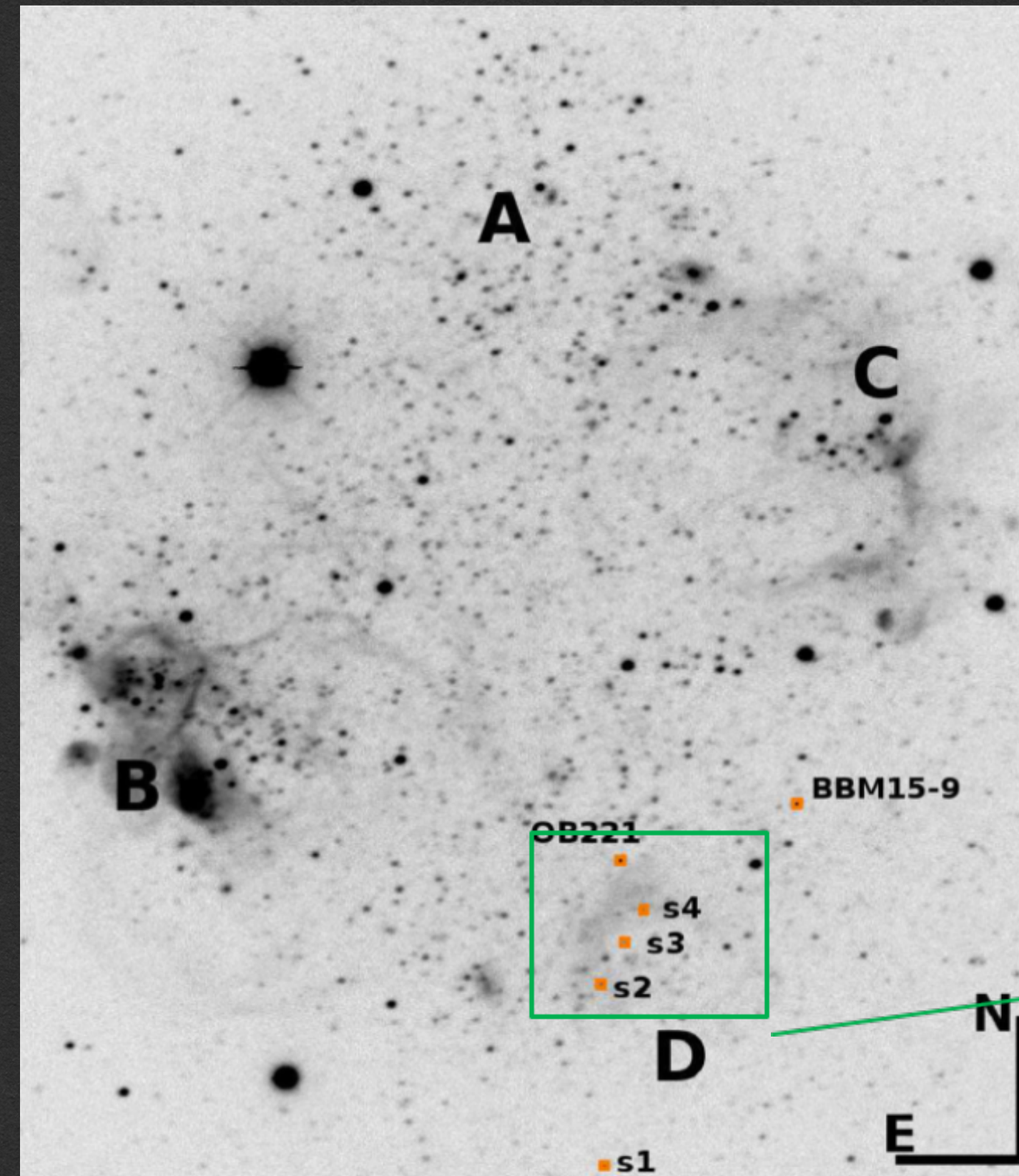
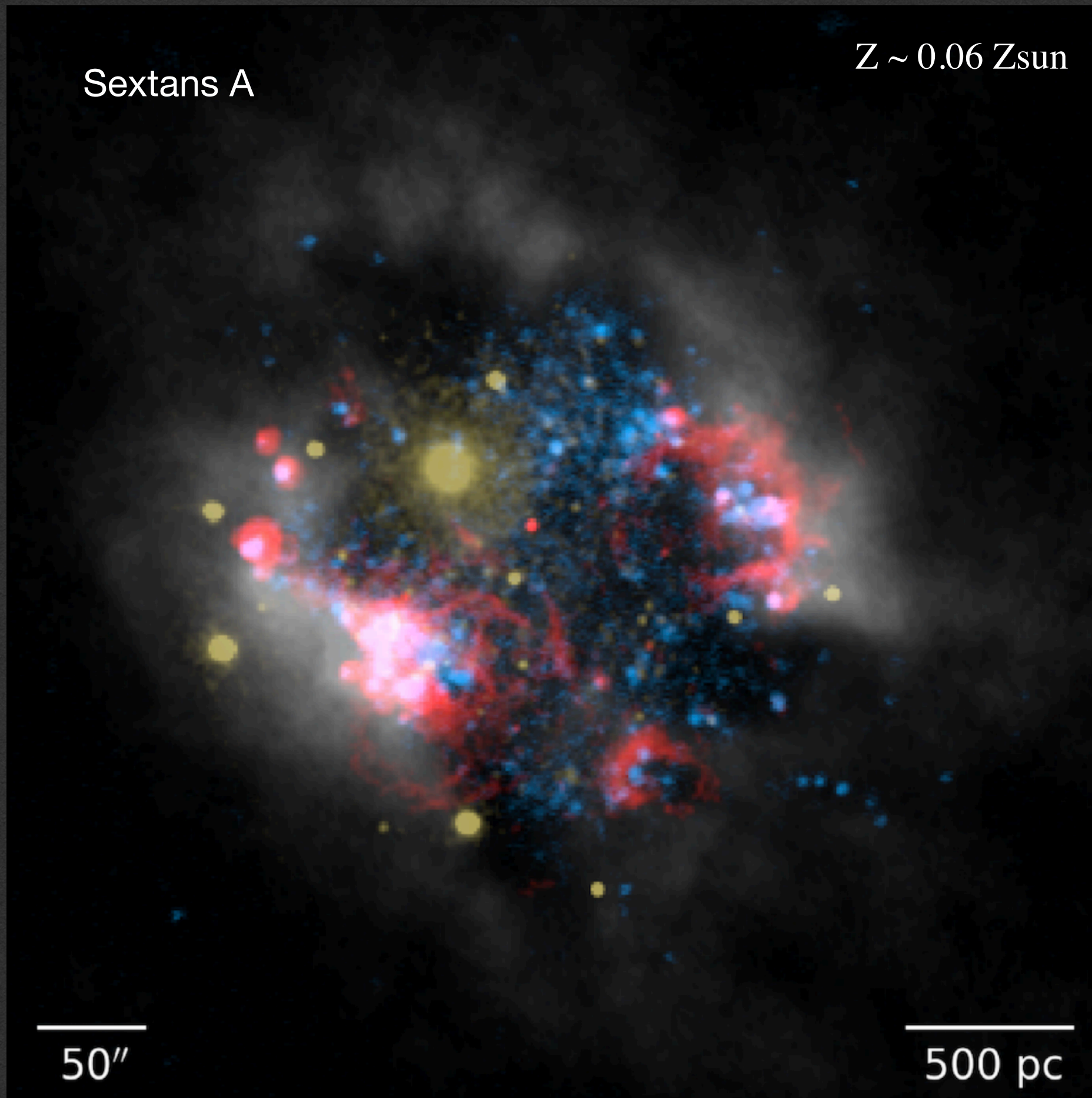
DDO53: аккреция газа «питает» текущее ЗО



Аккреция газа, видимая в кинематике H I и H α .

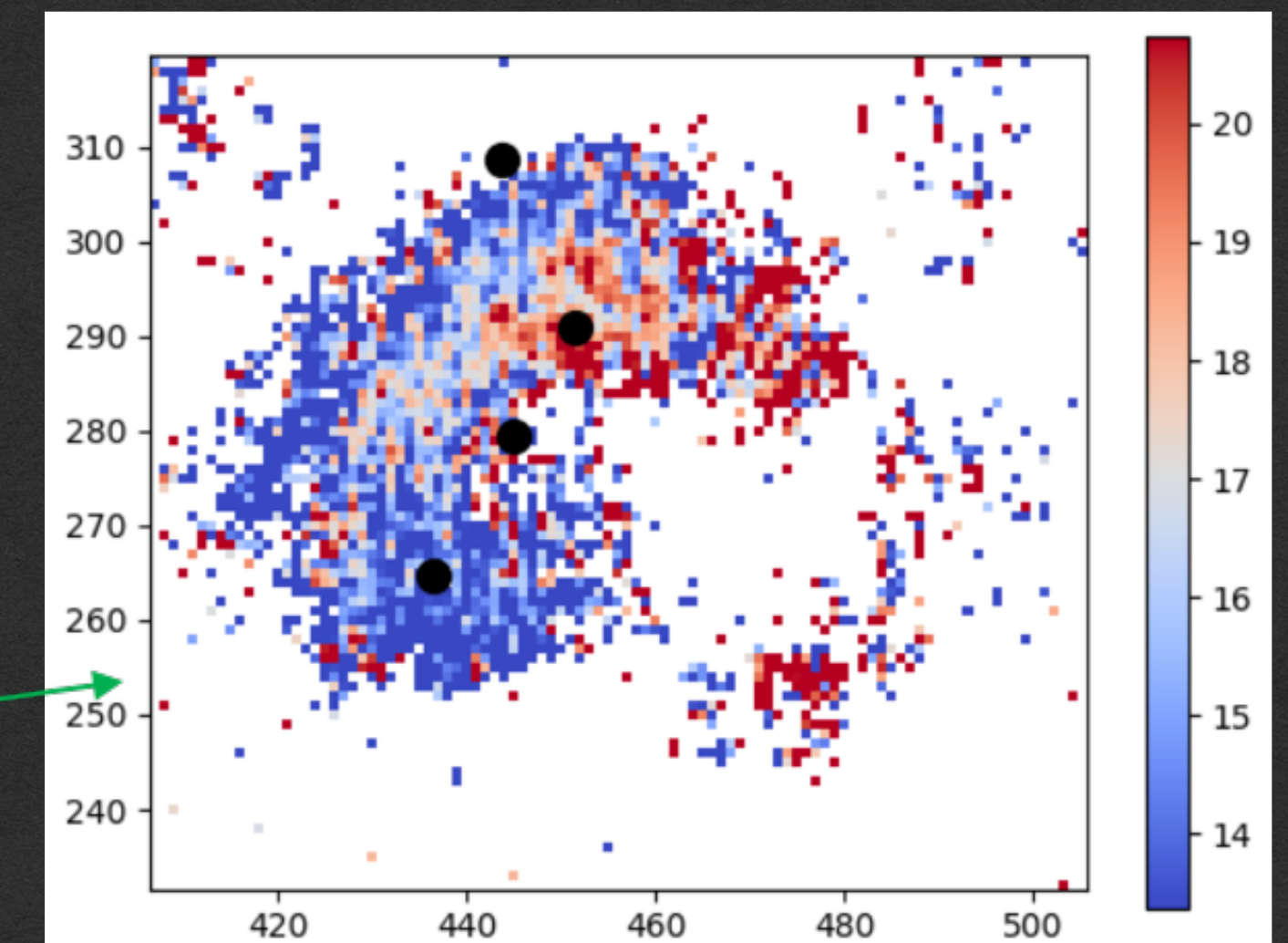
Оцененного темпа аккреции ($\sim 6 \times 10^{-3} M_{\text{sun}}/\text{yr}$) достаточно для поддержания локального ЗО

Sextans A: Звездный ветер в низкометаллическом окружении



Garcia+2019

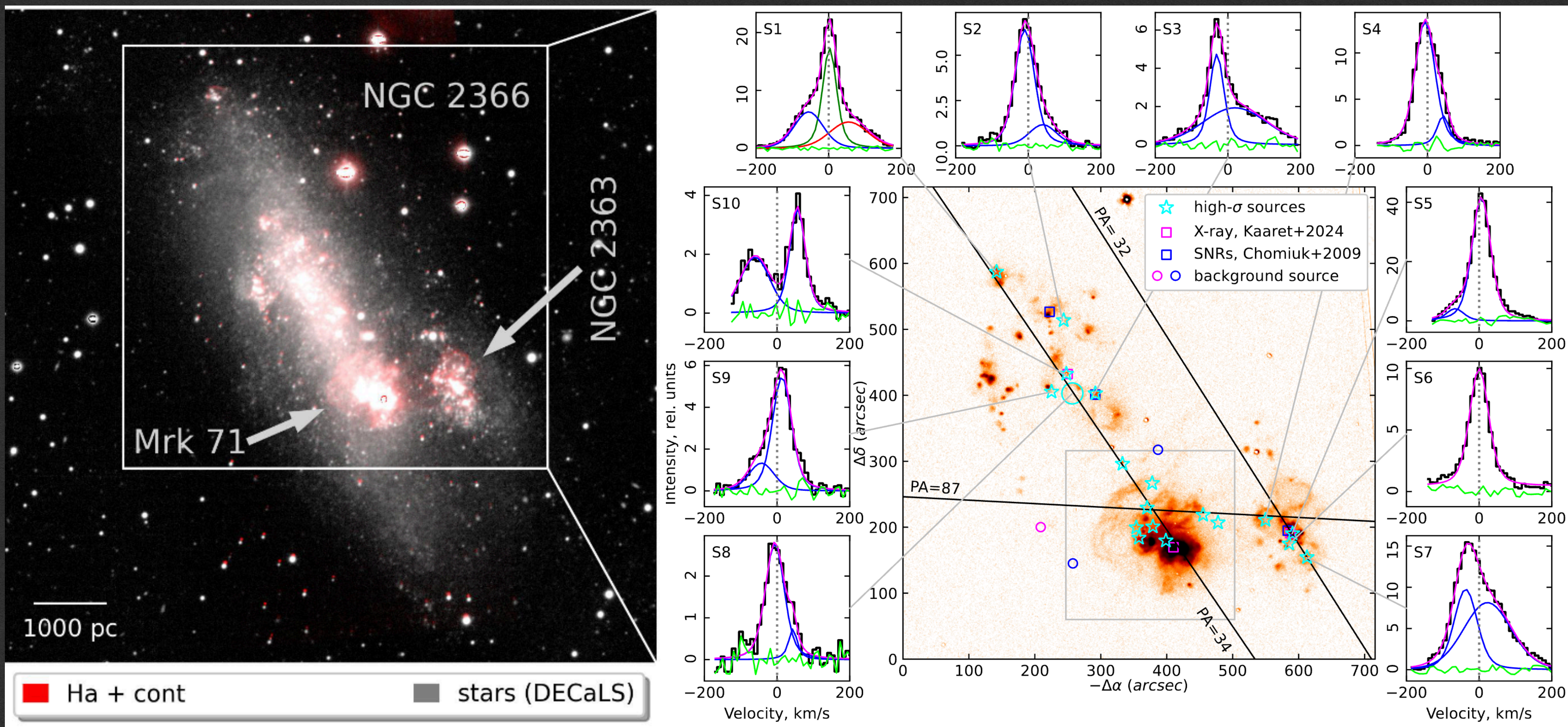
Intrinsic H α velocity dispersion



Gerasimov+2024

Анализ десятков сверхоболочек ионизованного газа в близких низкометаллических галактиках:
их энергия зависит от металличности, что вероятно отражает свойства звездного населения (*Egorov+2023*)

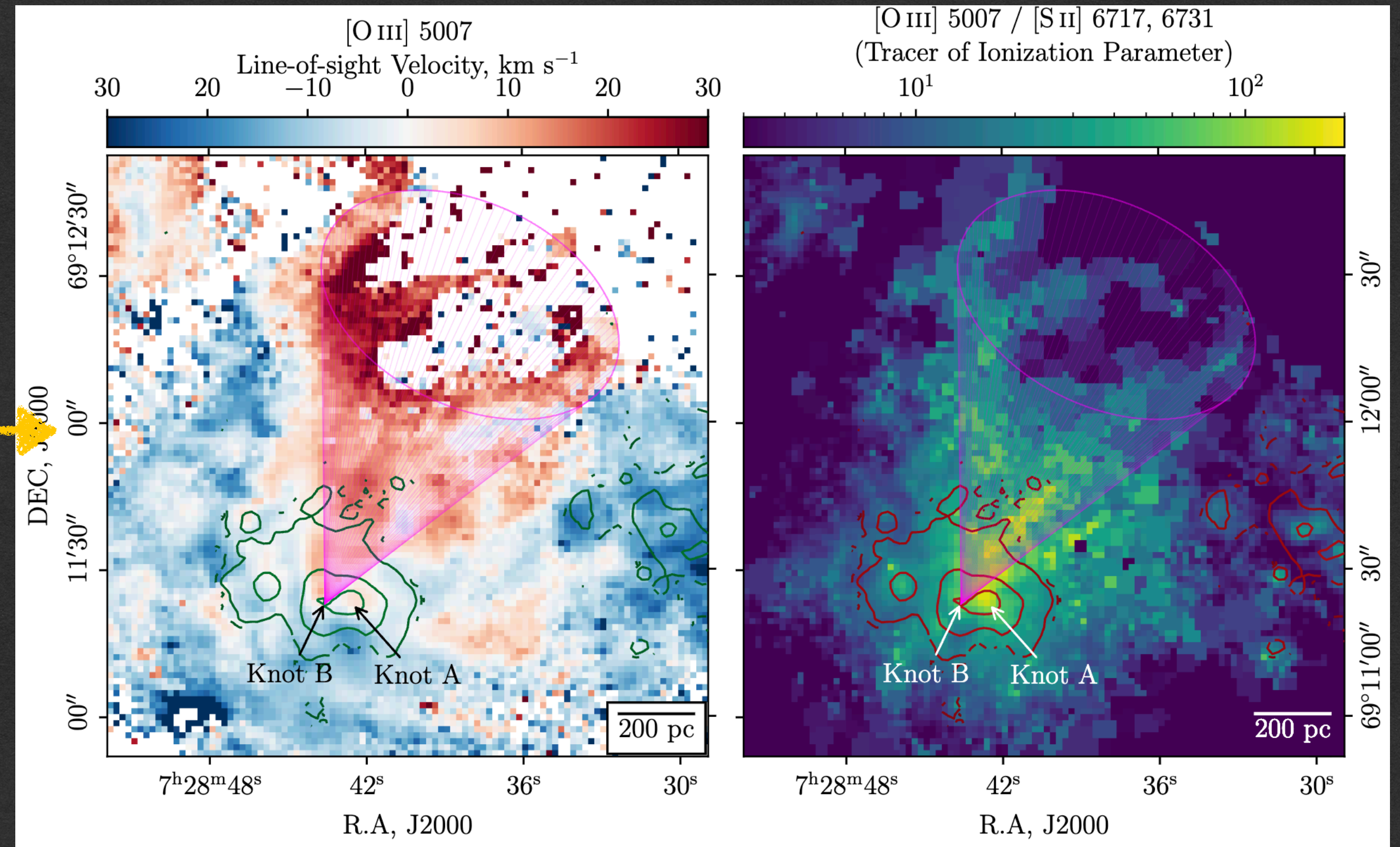
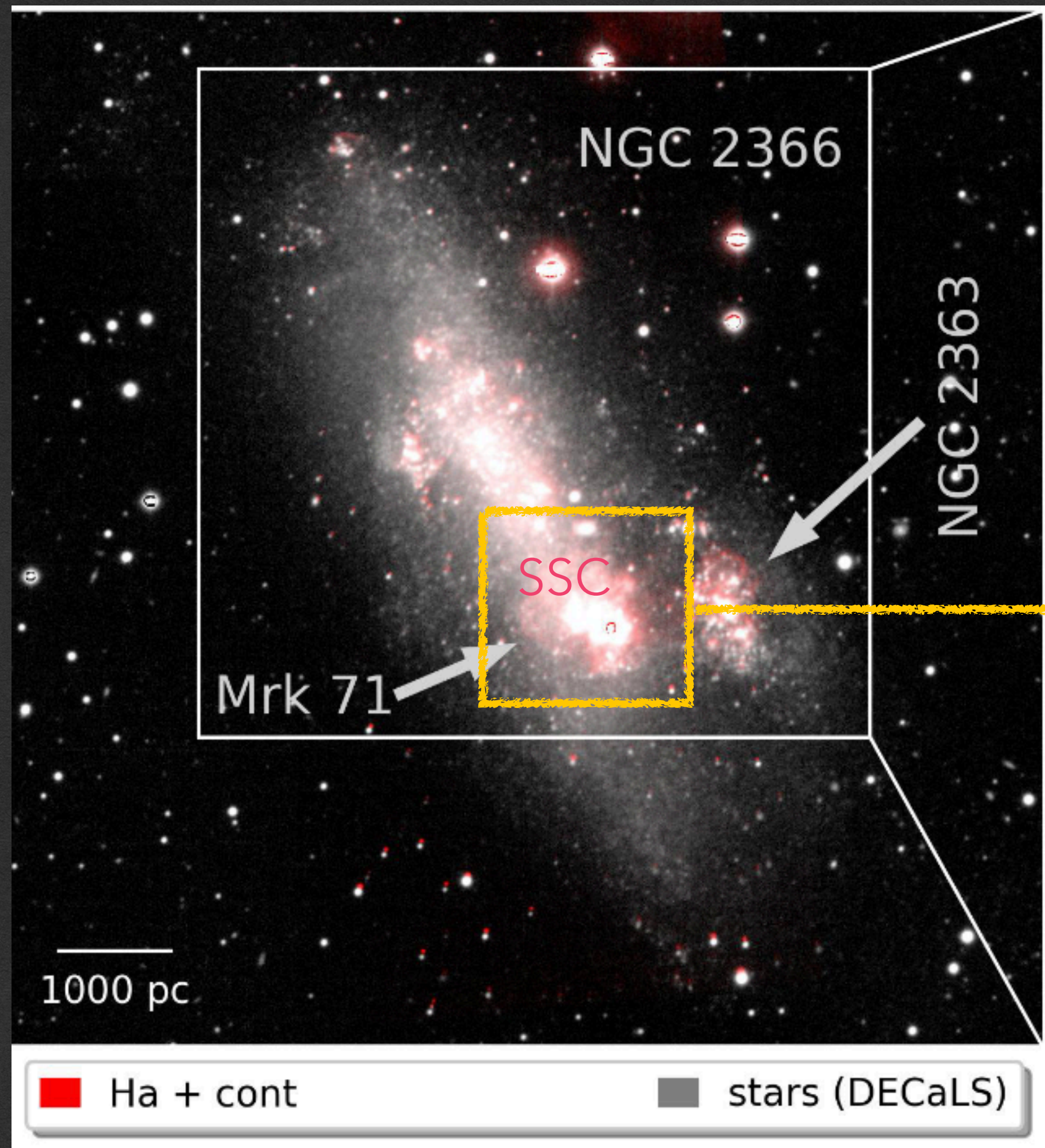
Новые кандидаты в WR и SNRs в низкометаллических галактиках



Yarovova et al. (2025)

(См также Egorov+2018; Yarovova+2023; Gerasimov+2024)

NGC2366: ~ 1.5 kpc outflow



Mass-loading factor ~ 5

Vasilyev et al. (in prep)

Наблюдения близких галактик с ИФП все еще актуальны?

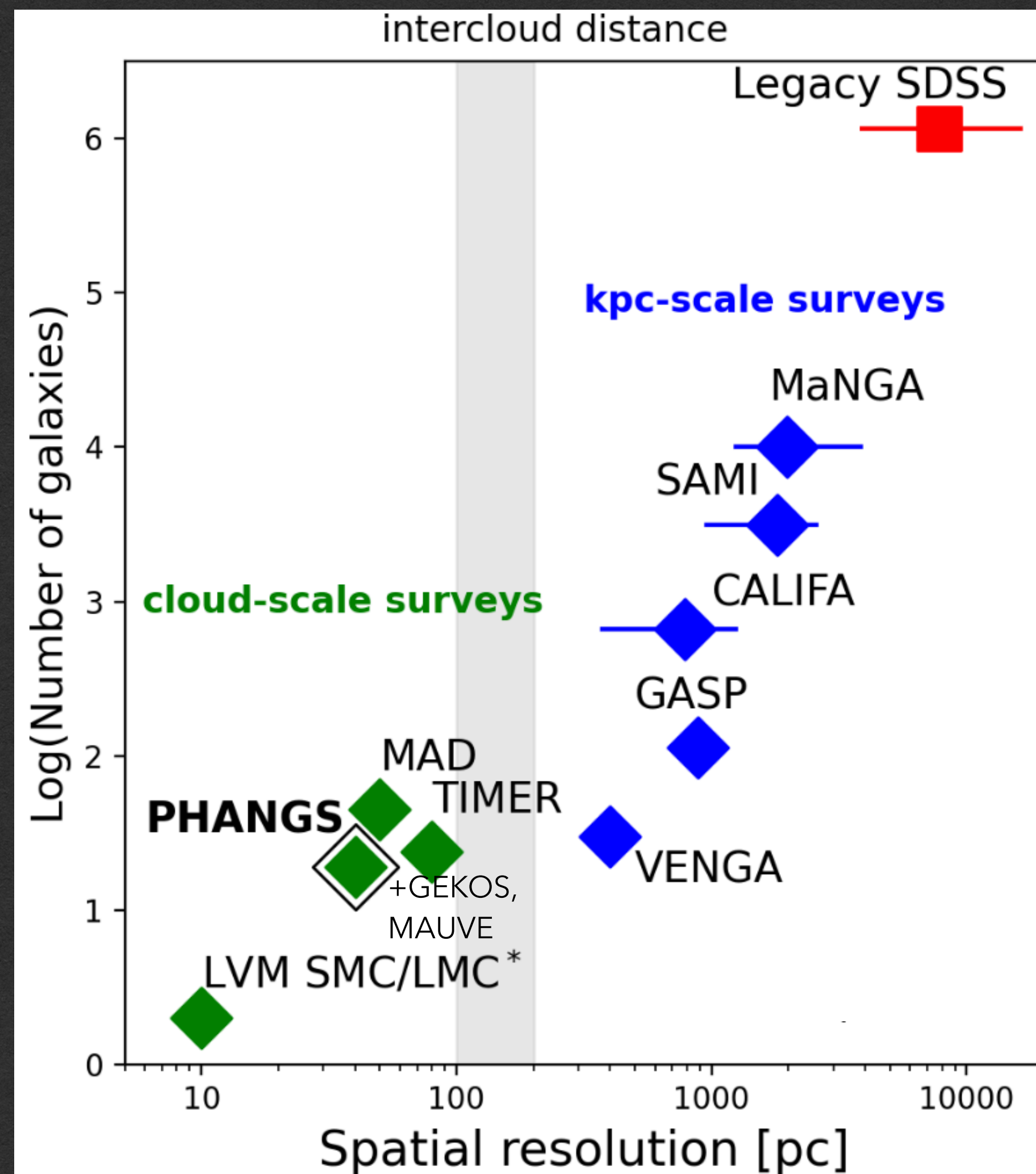
- Количество (и качество) «классических» IFU спектрографов непрерывно растет
- В отличие от ИФП, есть доступ к широкому оптическому диапазону
- Пространственное разрешение выросло от кпк (CALIFA, MaNGA) до ~10-50 пк (SDSS-V/LVM, PHANGS, SIGNALS, ...)
- Появляются IFU с высоким спектральным разрешением $R \sim 10\,000 - 15\,000$

Наблюдения близких галактик с ИФП все еще актуальны?

Спойлер: пока да!

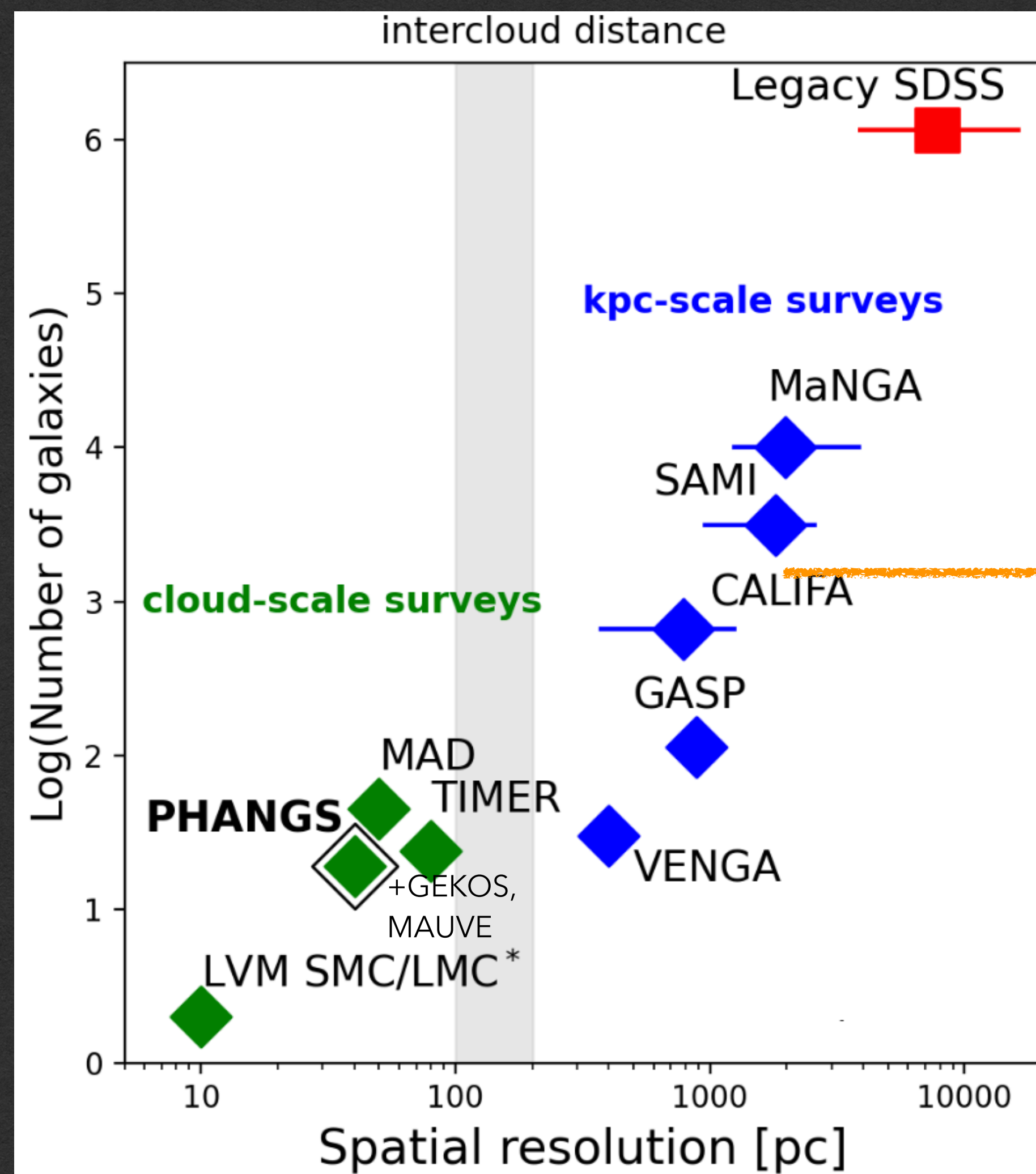
- Количество (и качество) «классических» IFU спектрографов непрерывно растет
- В отличие от ИФП, есть доступ к широкому оптическому диапазону
- Пространственное разрешение выросло от кпк (CALIFA, MaNGA) до ~ 10 - 50 пк (SDSS-V/LVM, PHANGS, SIGNALS, ...)
- Появляются IFU с высоким спектральным разрешением $R \sim 10\,000 - 15\,000$

Пространственное разрешение оптических IFU обзоров

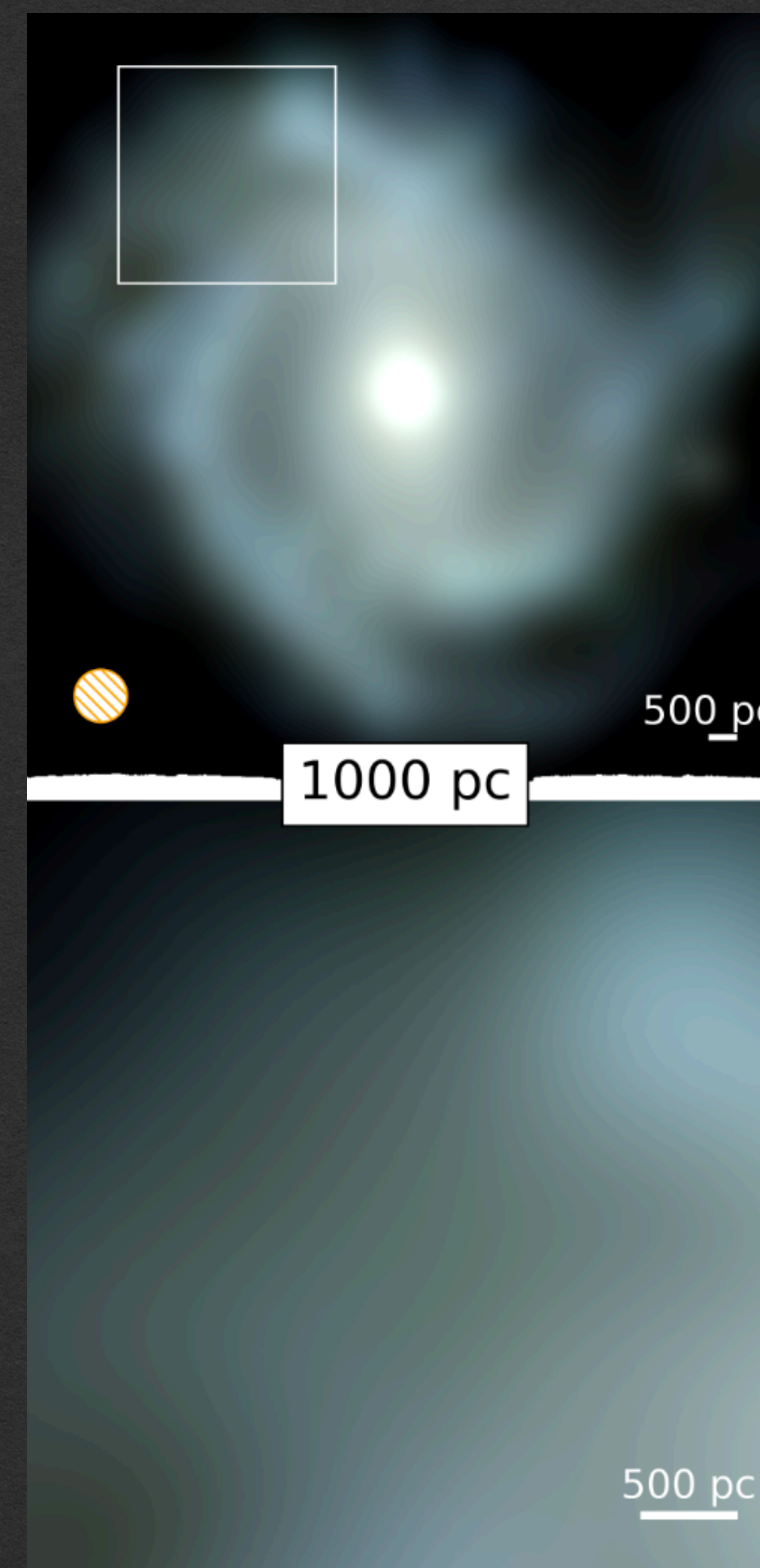


Emsellem et al. (2022)

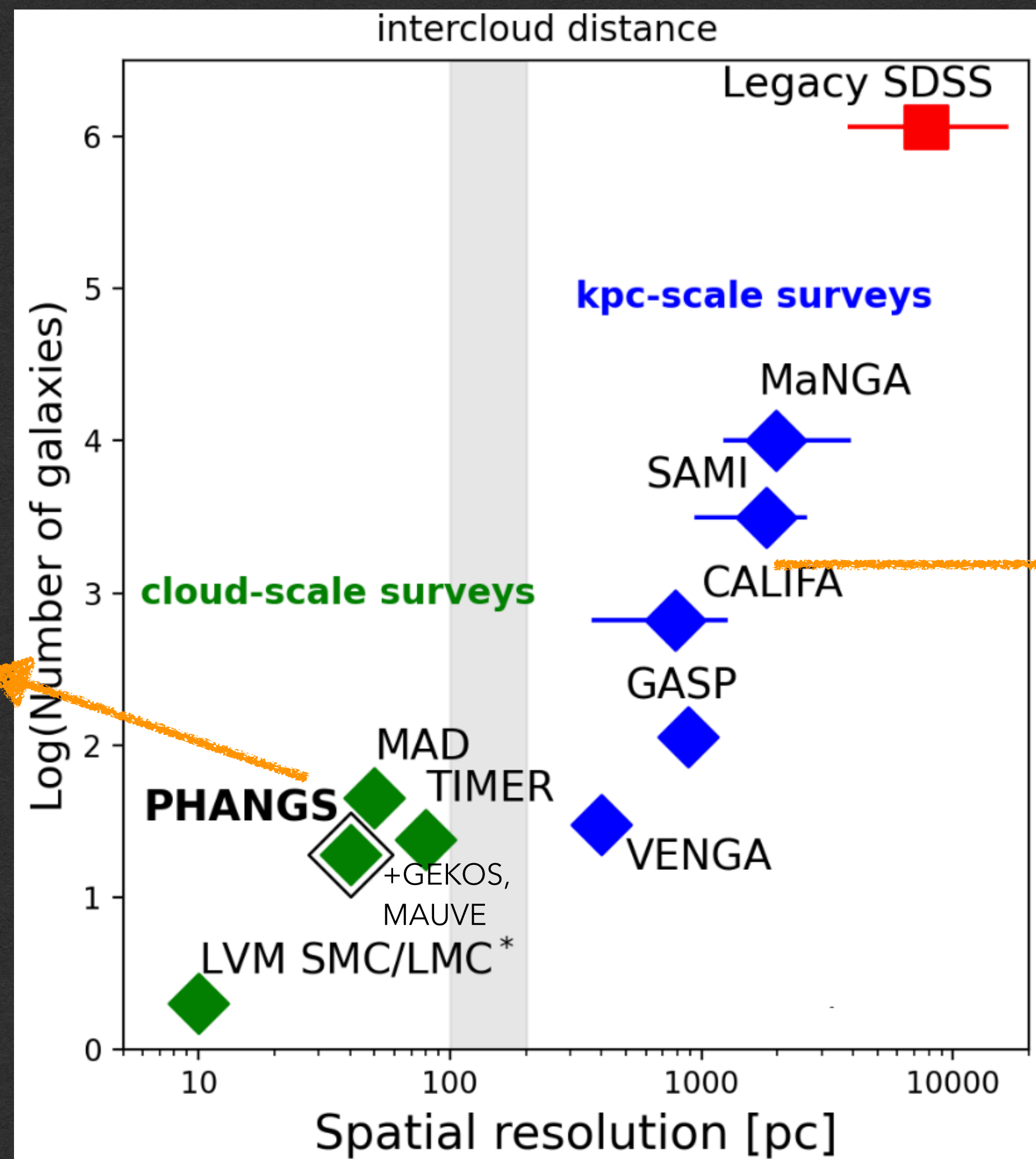
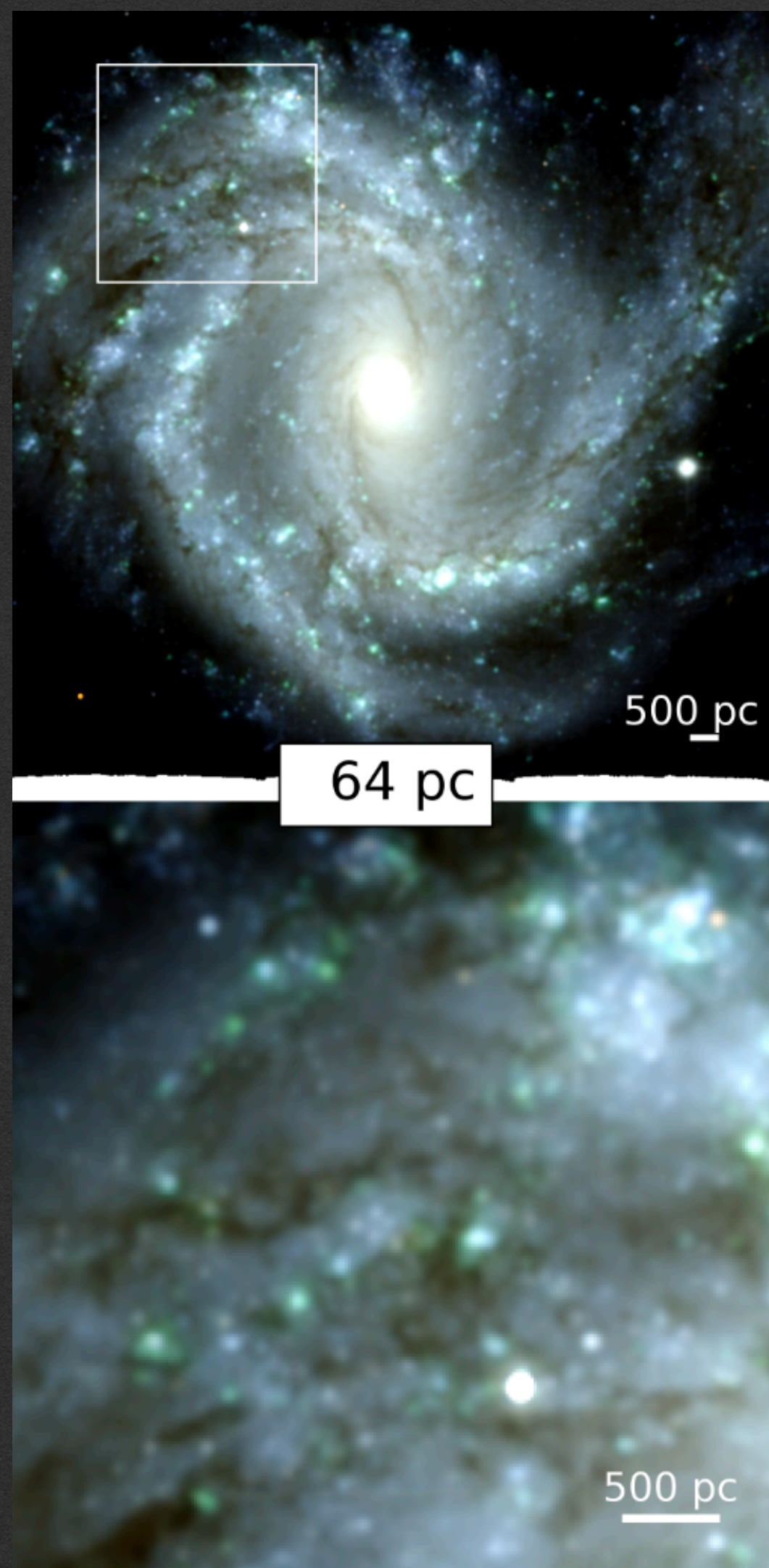
Пространственное разрешение оптических IFU обзоров



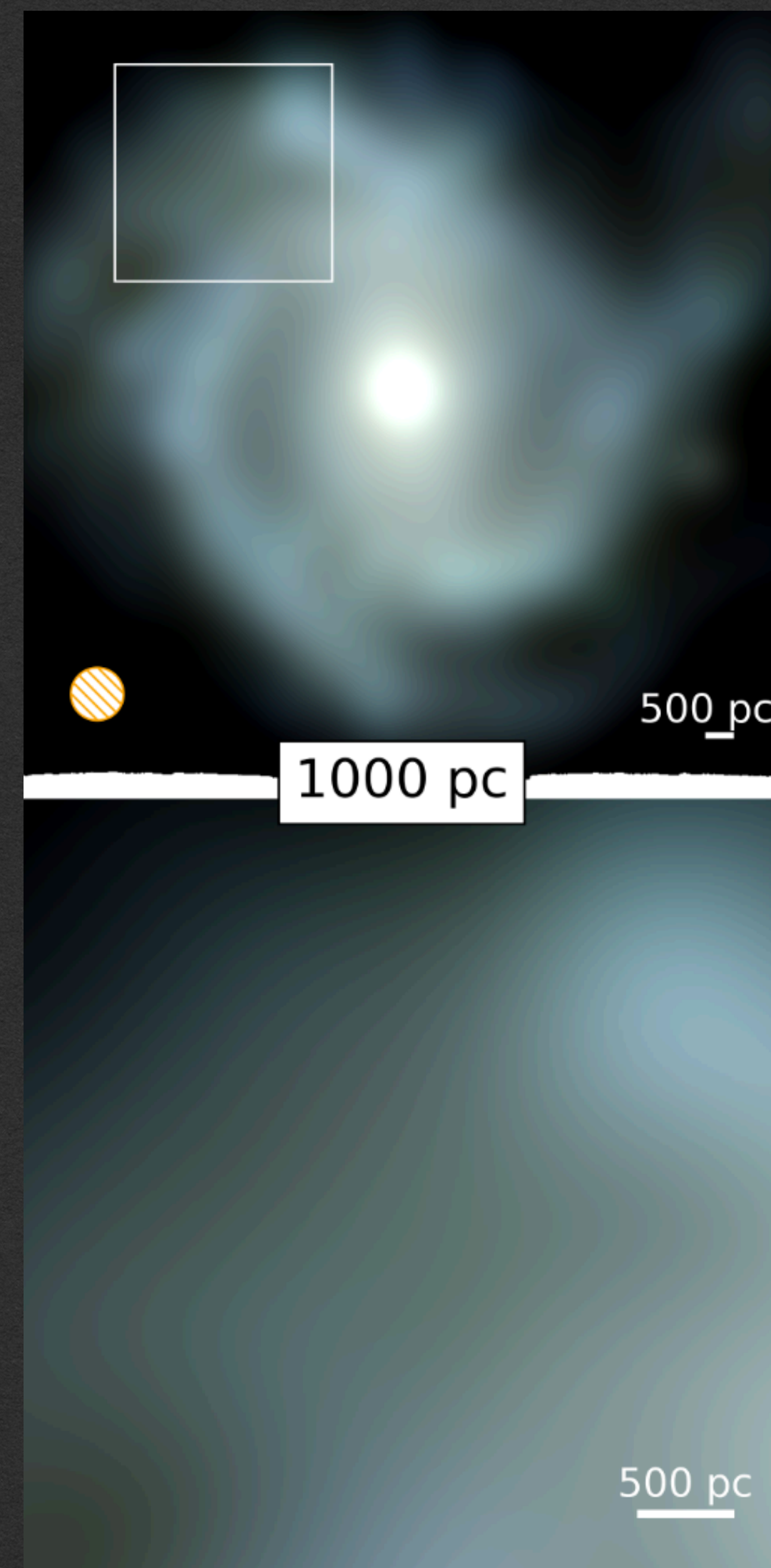
Emsellem et al. (2022)



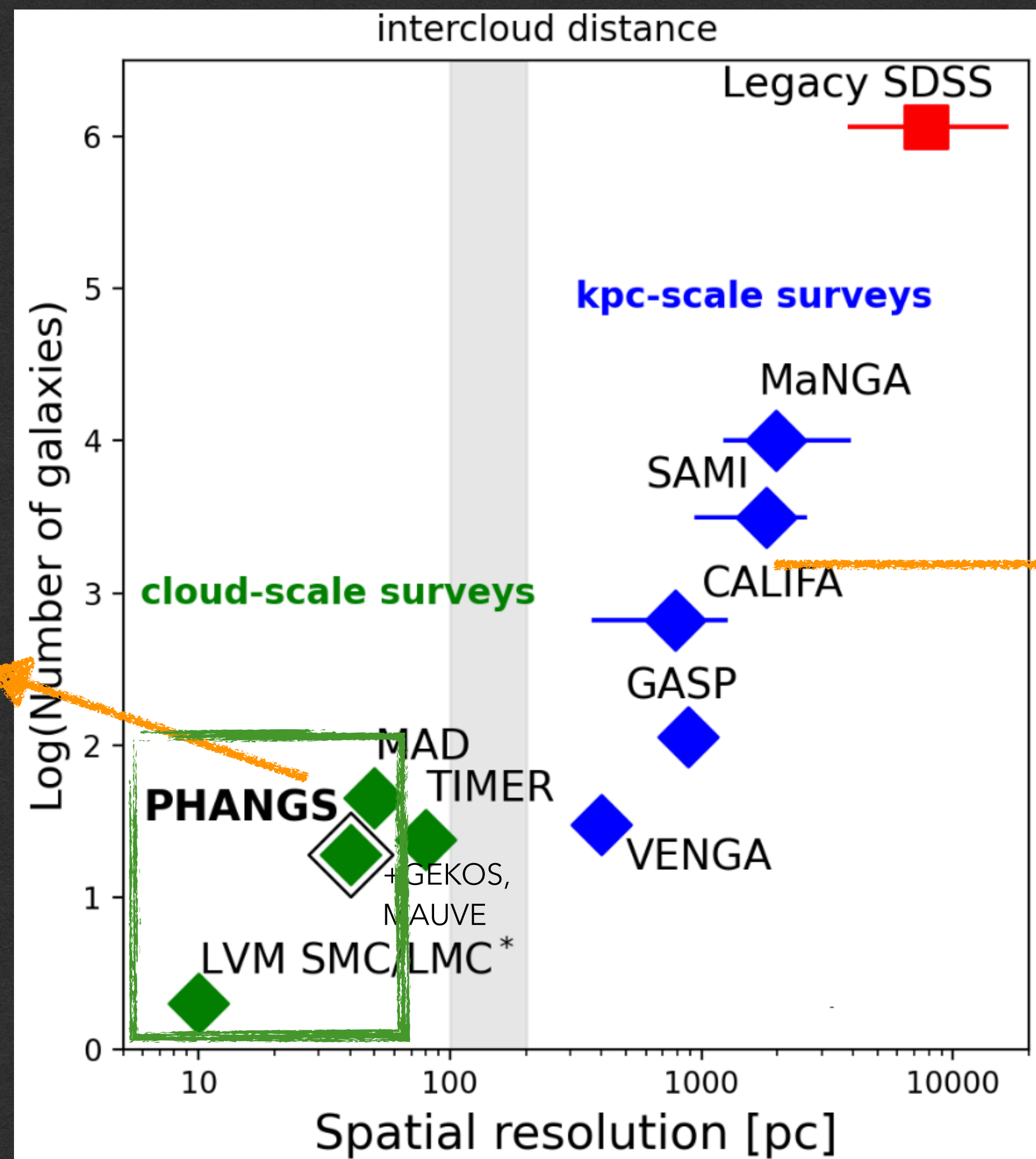
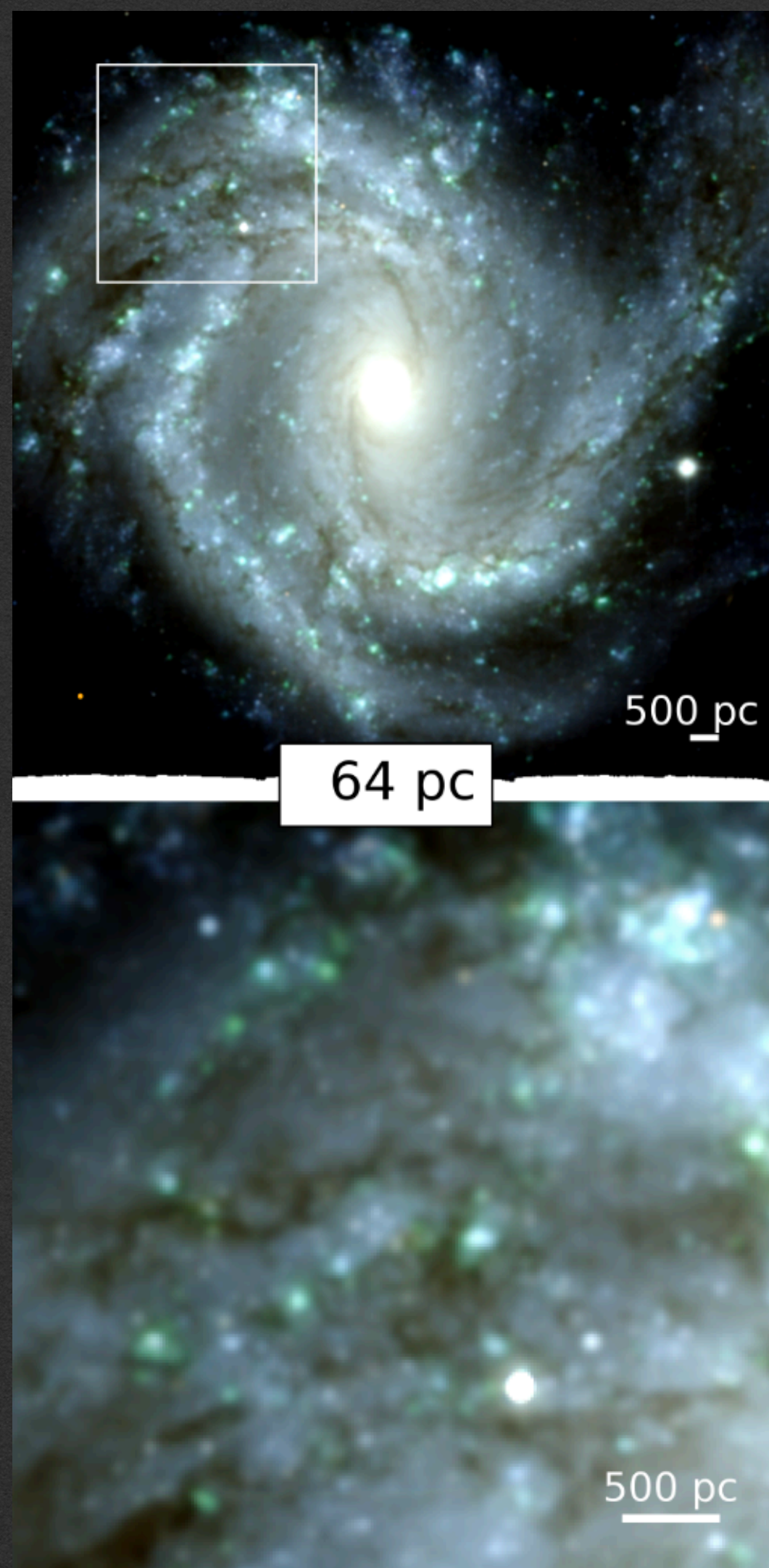
Пространственное разрешение оптических IFU обзоров



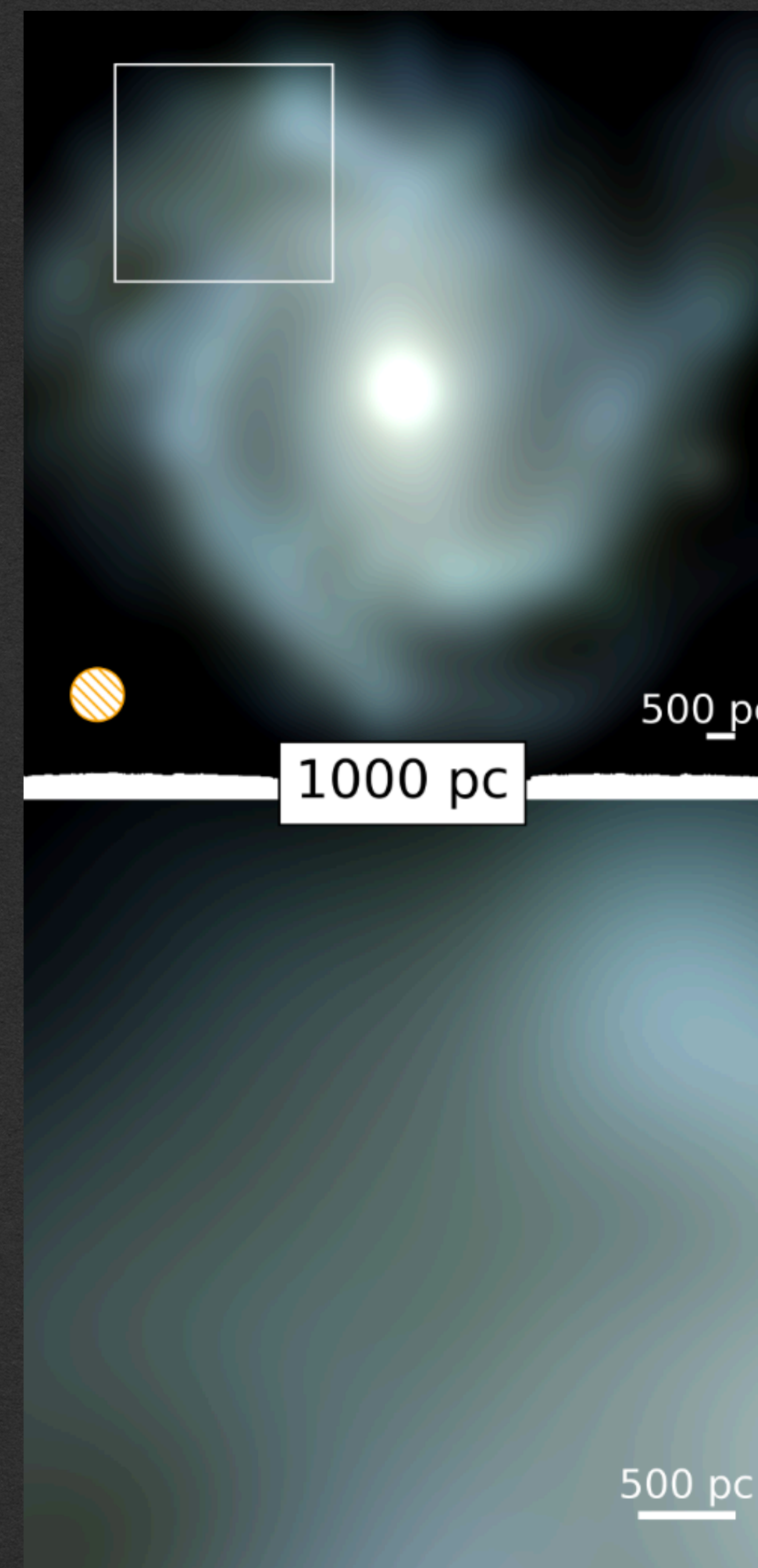
Emsellem et al. (2022)



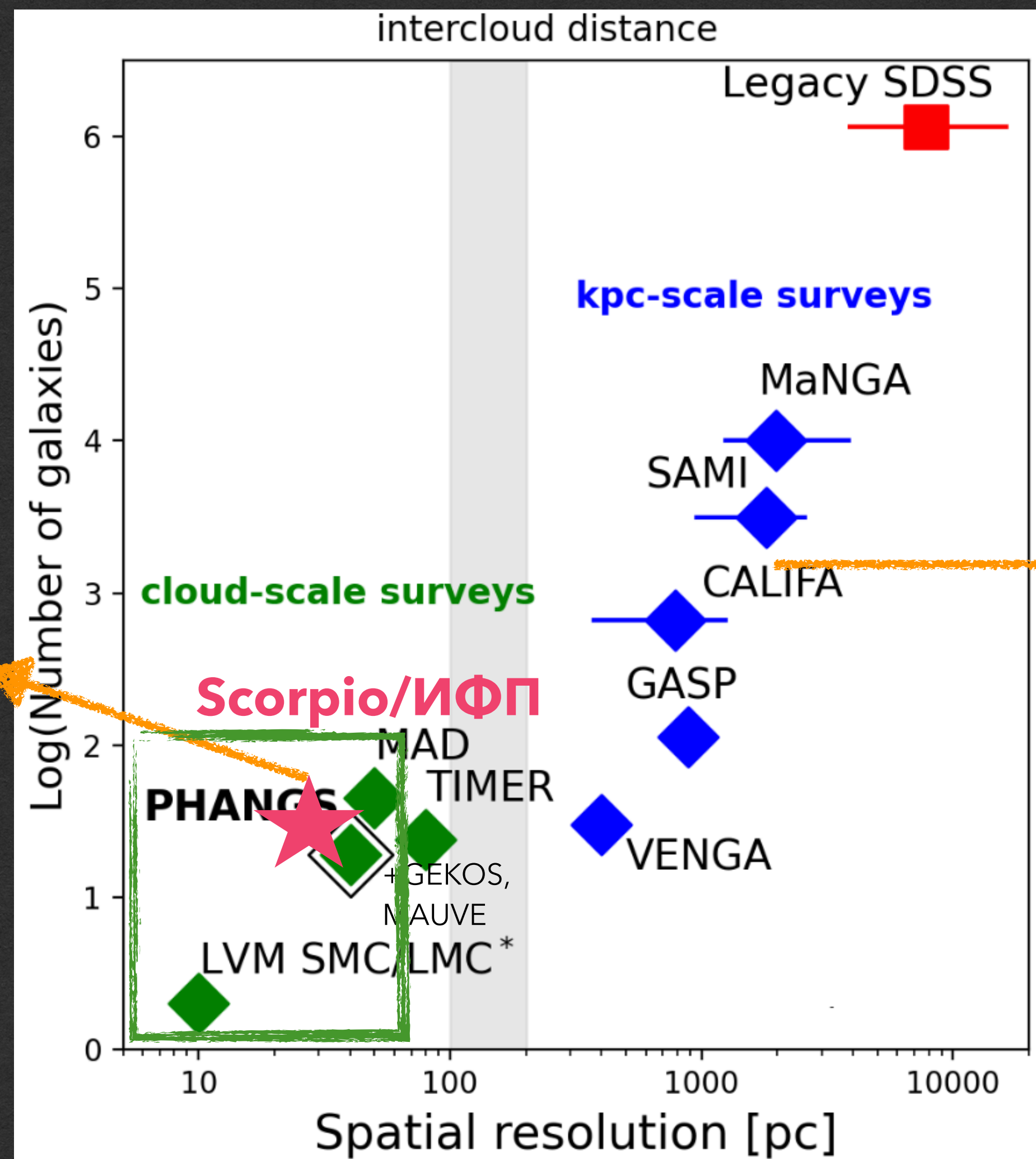
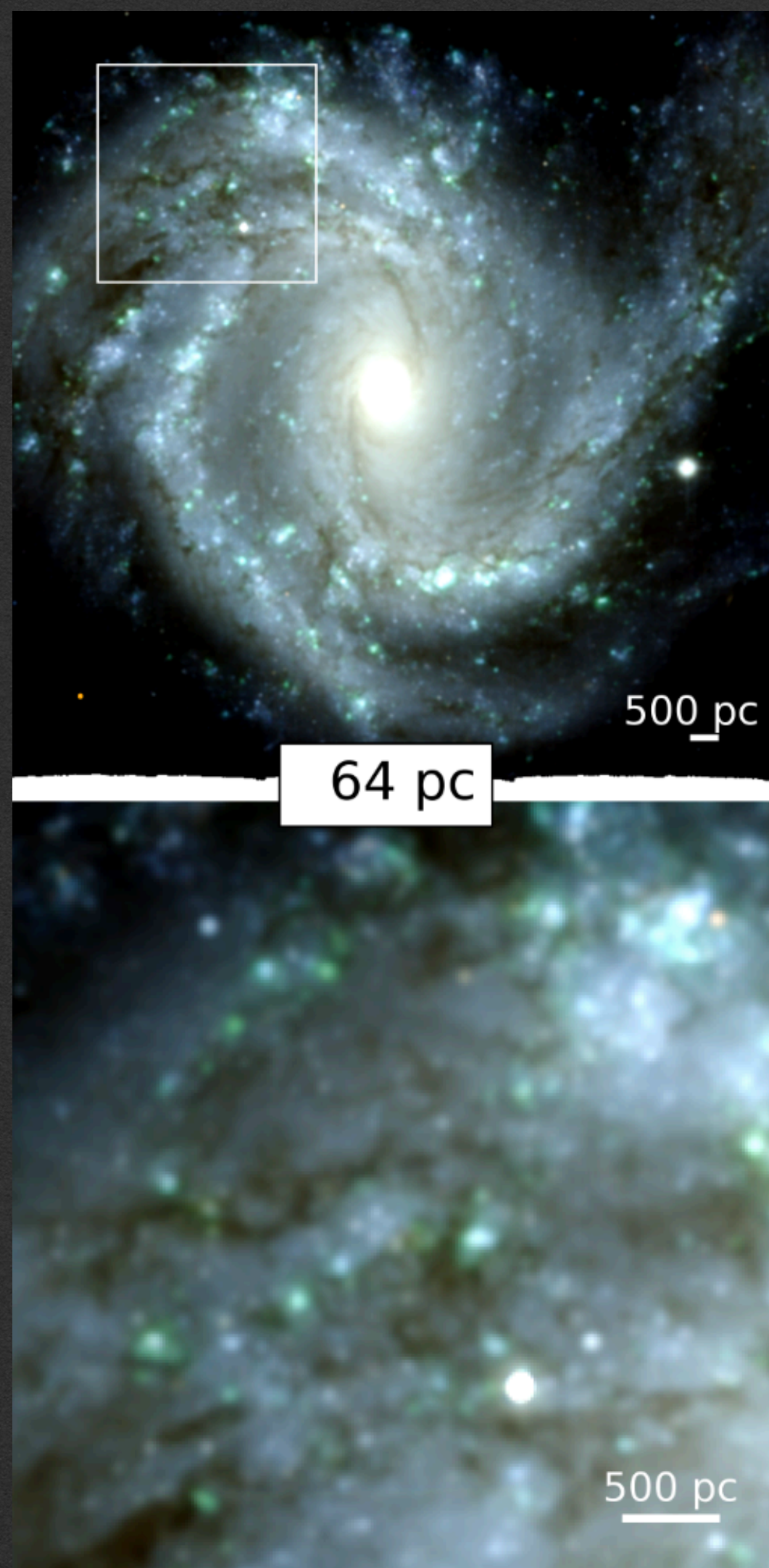
Пространственное разрешение оптических IFU обзоров



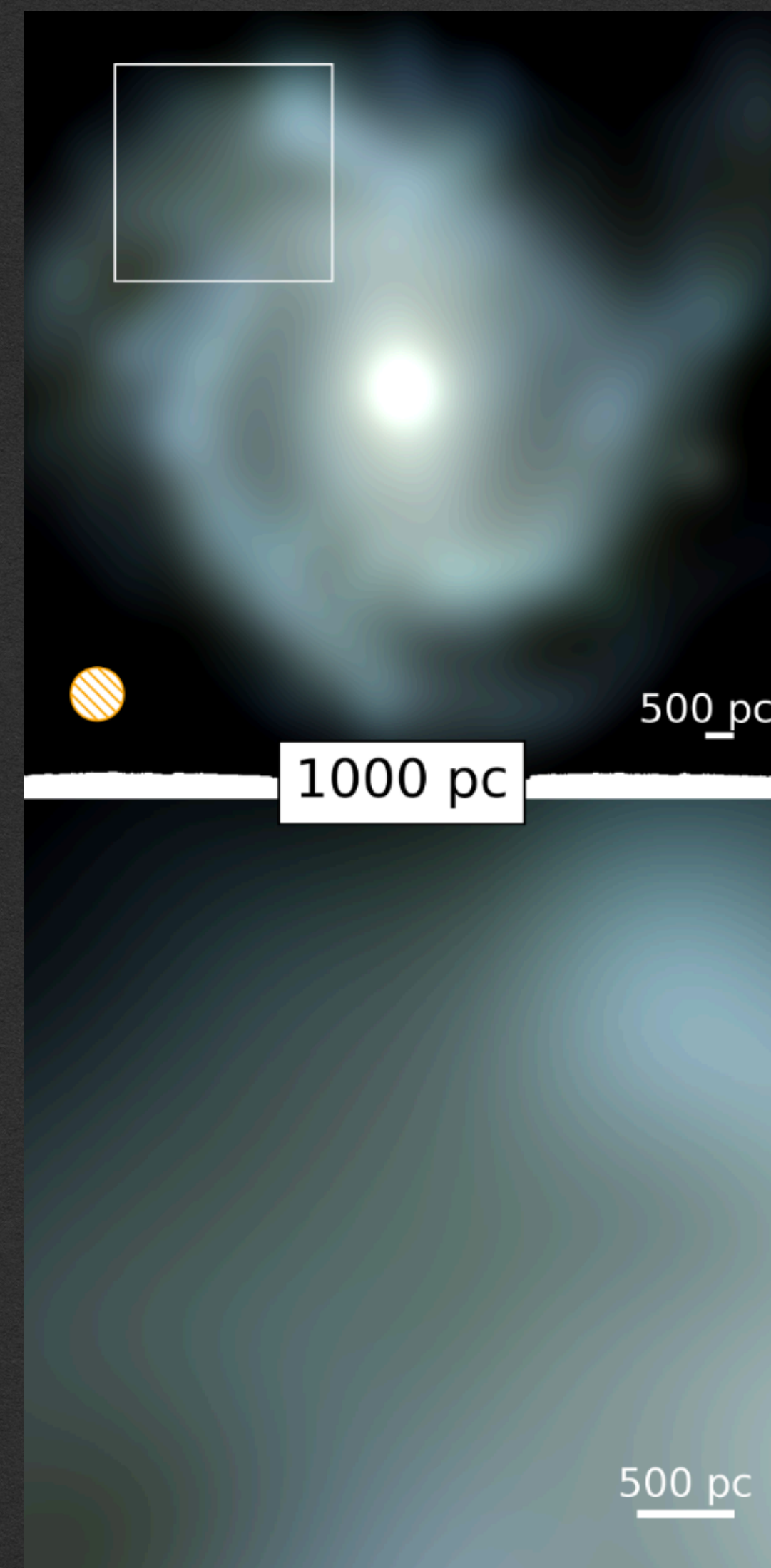
Emsellem et al. (2022)



Пространственное разрешение оптических IFU обзоров



Emsellem et al. (2022)



MUSE observations of NGC253 (PHANGS)



Congiu et al. (2025)

Credit: ESO/PHANGS/E.Congiu

NGC 253: $D \sim 3.5$ Mpc; spatial resolution ~ 17 pc

101 MUSE pointings; 20×5 arcmin² mosaic

Second largest extragalactic mosaic observed by MUSE so far

PHANGS: MUSE mosaics for ~ 40 nearby galaxies, including several extended samples

(Emsellem+2022, Congiu+2025, Williams+2025, Egorov+2025 + in prep)

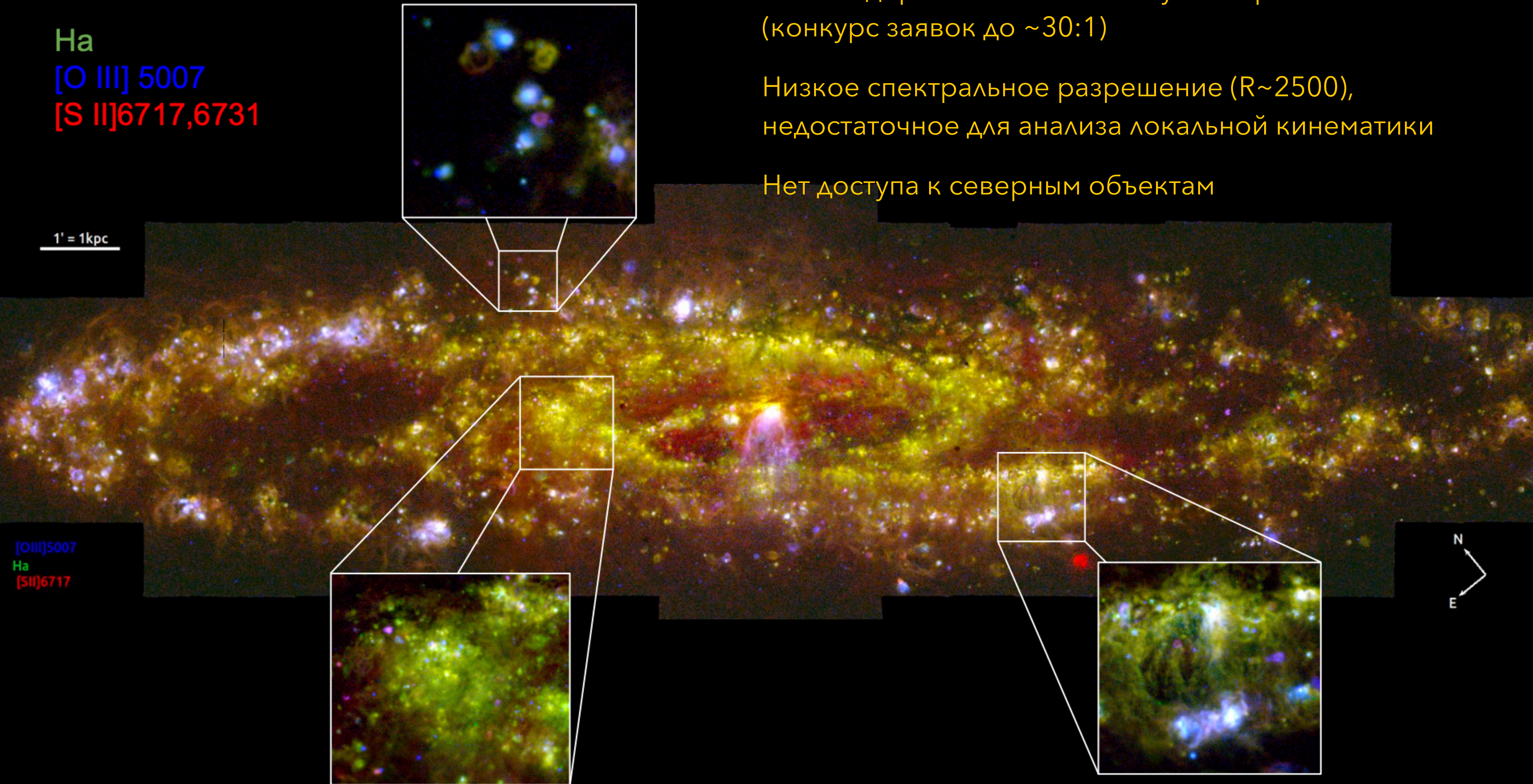
Ha
[O III] 5007
[S II] 6717, 6731

1' = 1kpc

Очень «дорого» + сложно получить время
(конкурс заявок до ~30:1)

Низкое спектральное разрешение ($R \sim 2500$),
недостаточное для анализа локальной кинематики

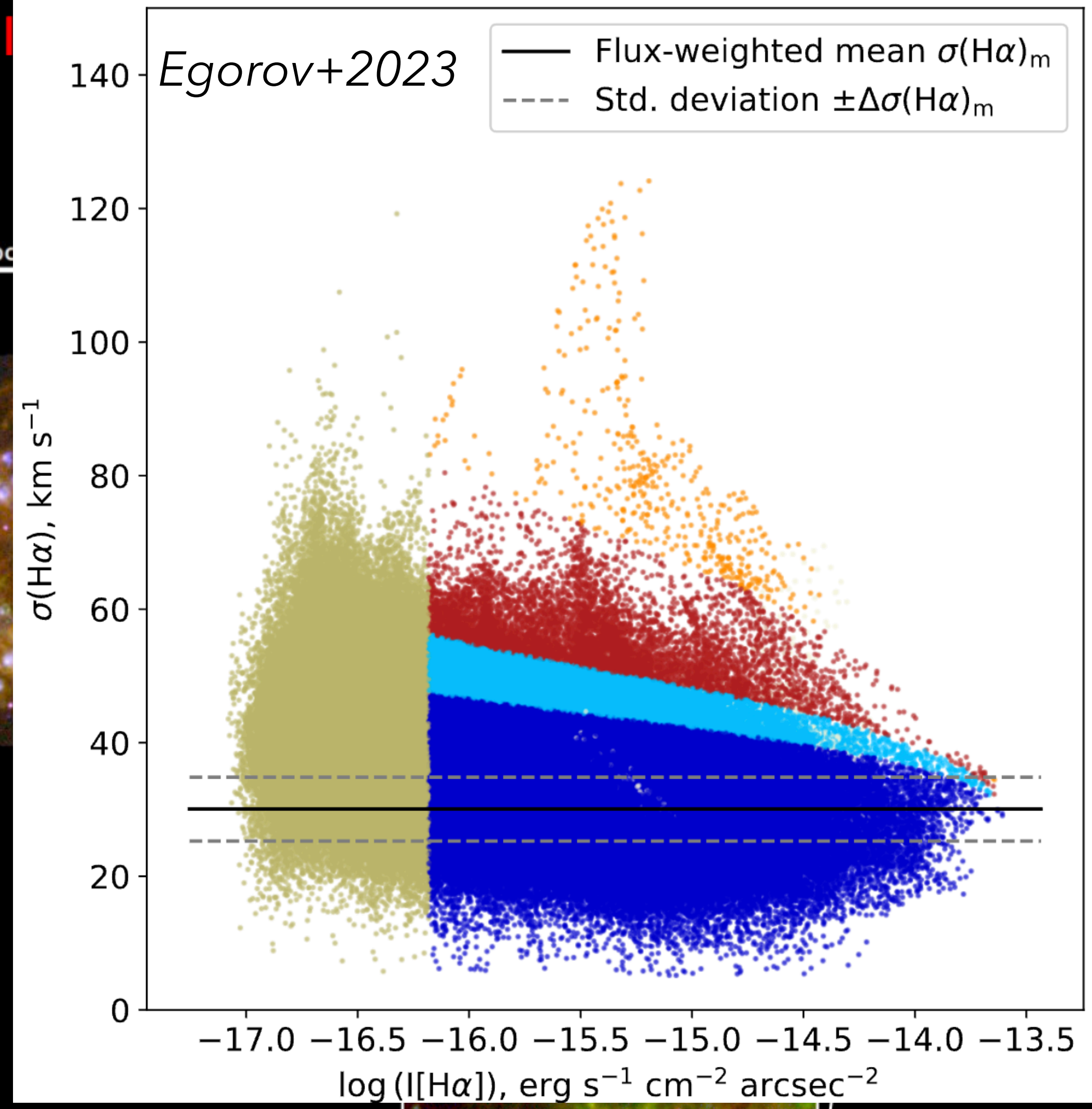
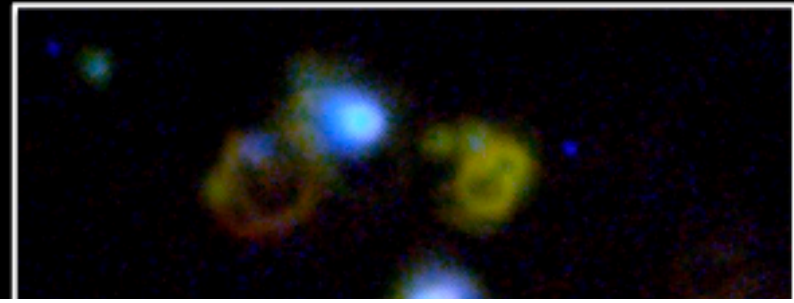
Нет доступа к северным объектам



[O III] 5007
Ha
[S II] 6717



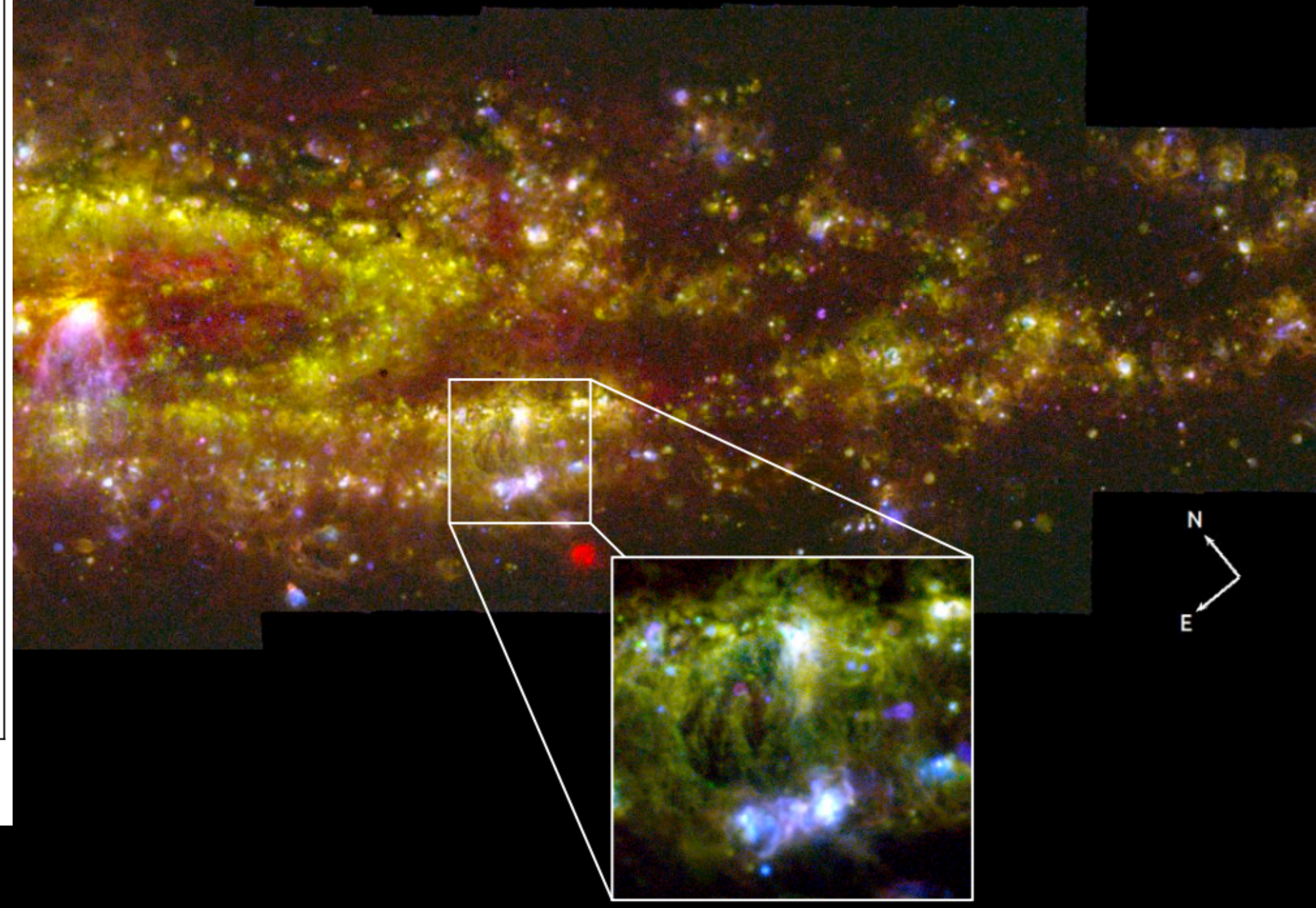
Ha
[O III] 5007
[S II]



Очень «дорого» + сложно получить время
(конкурс заявок до ~30:1)

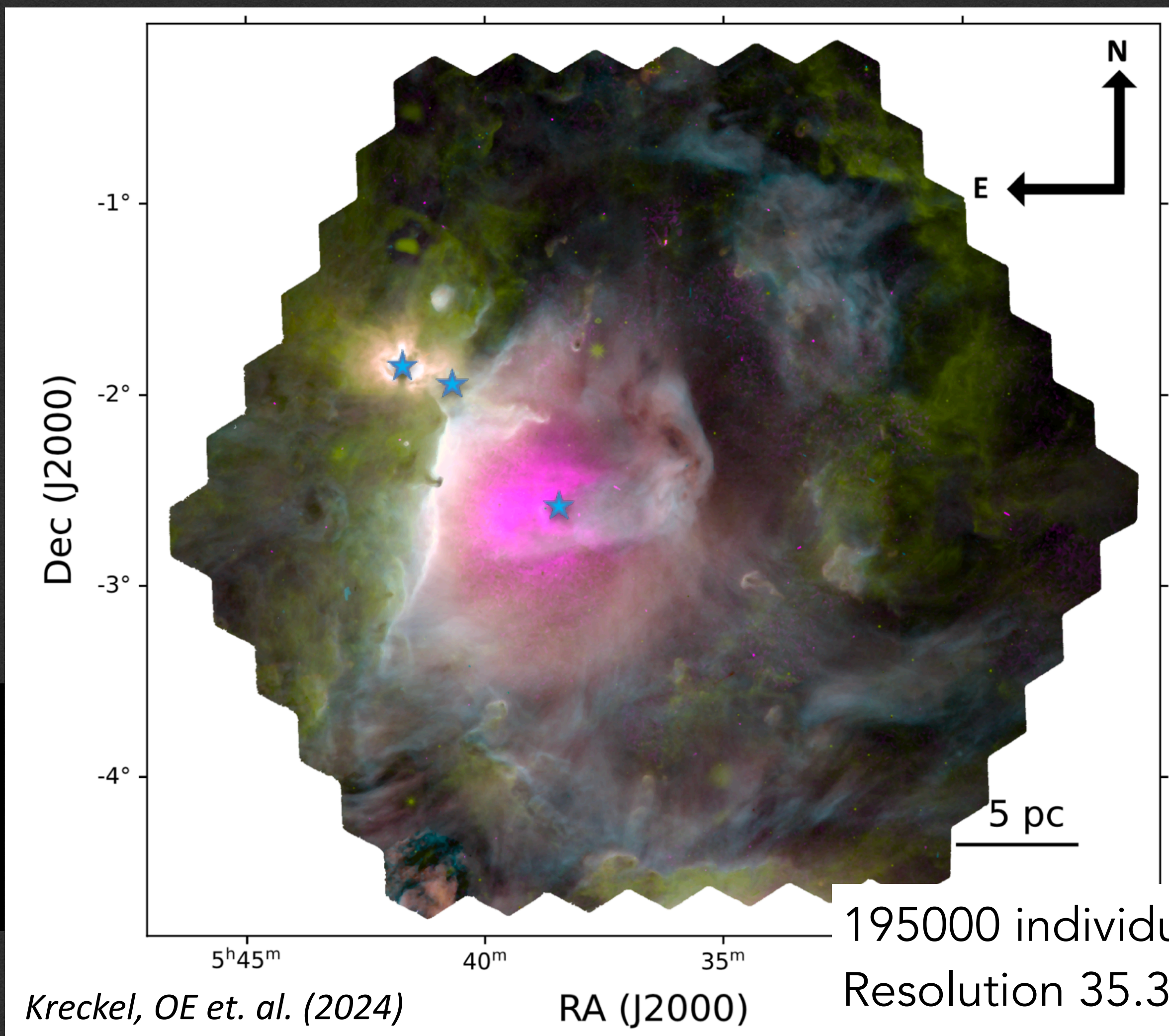
Низкое спектральное разрешение ($R \sim 2500$),
недостаточное для анализа локальной кинематики

Нет доступа к северным объектам

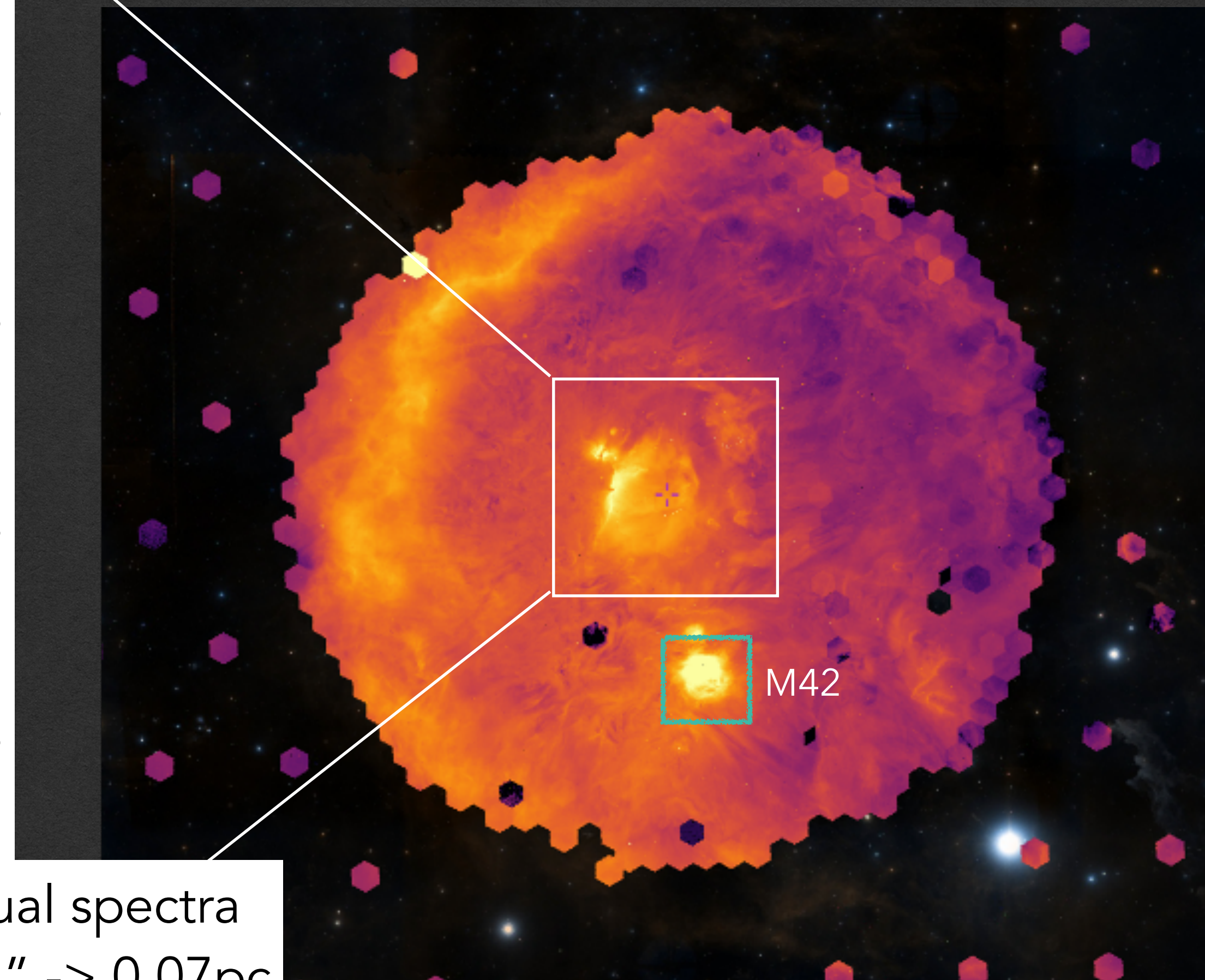


SDSS-V Local Volume Mapper

[SII]
Halpha
[OIII]
12micron

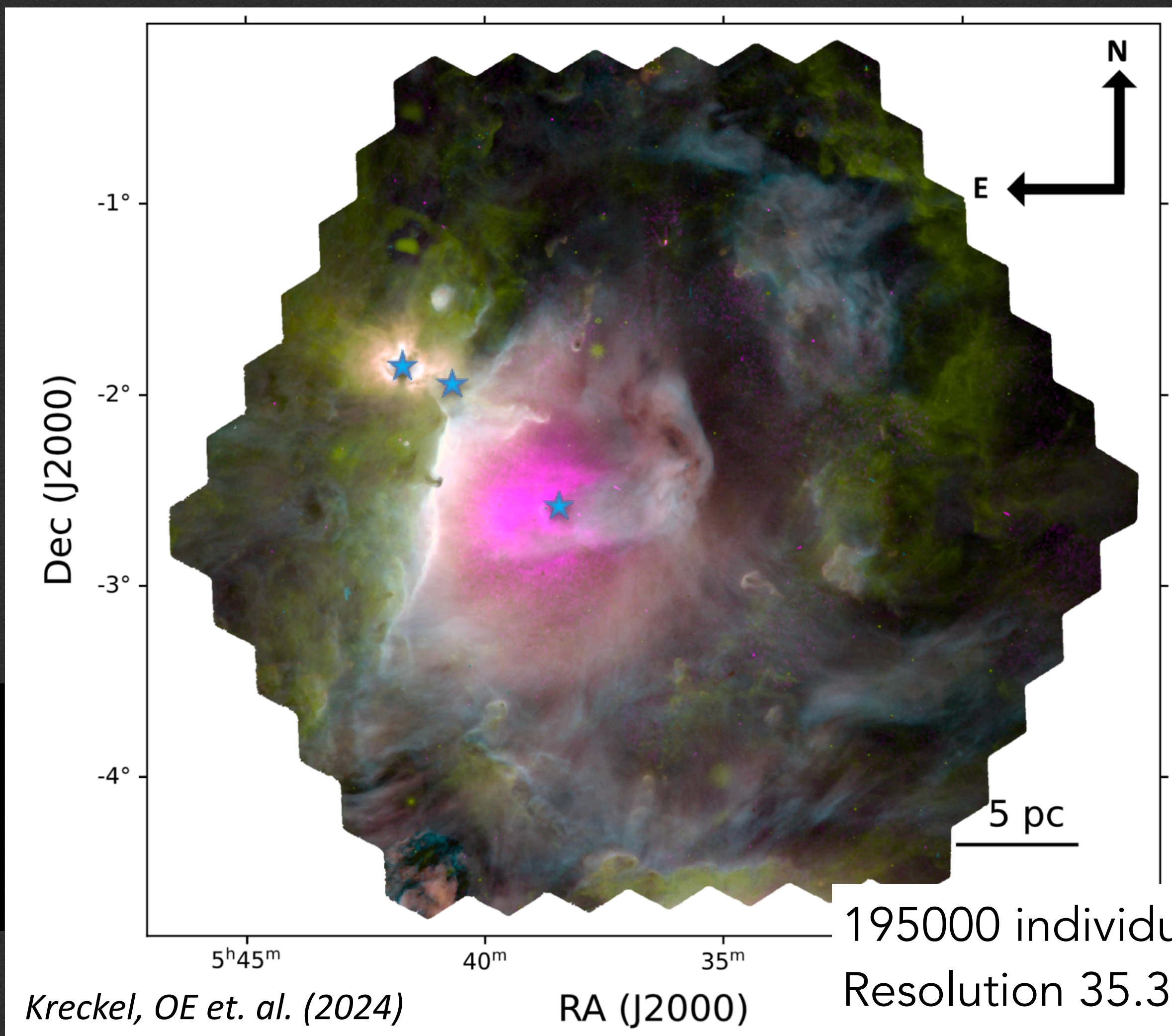


195000 individual spectra
Resolution 35.3" -> 0.07pc

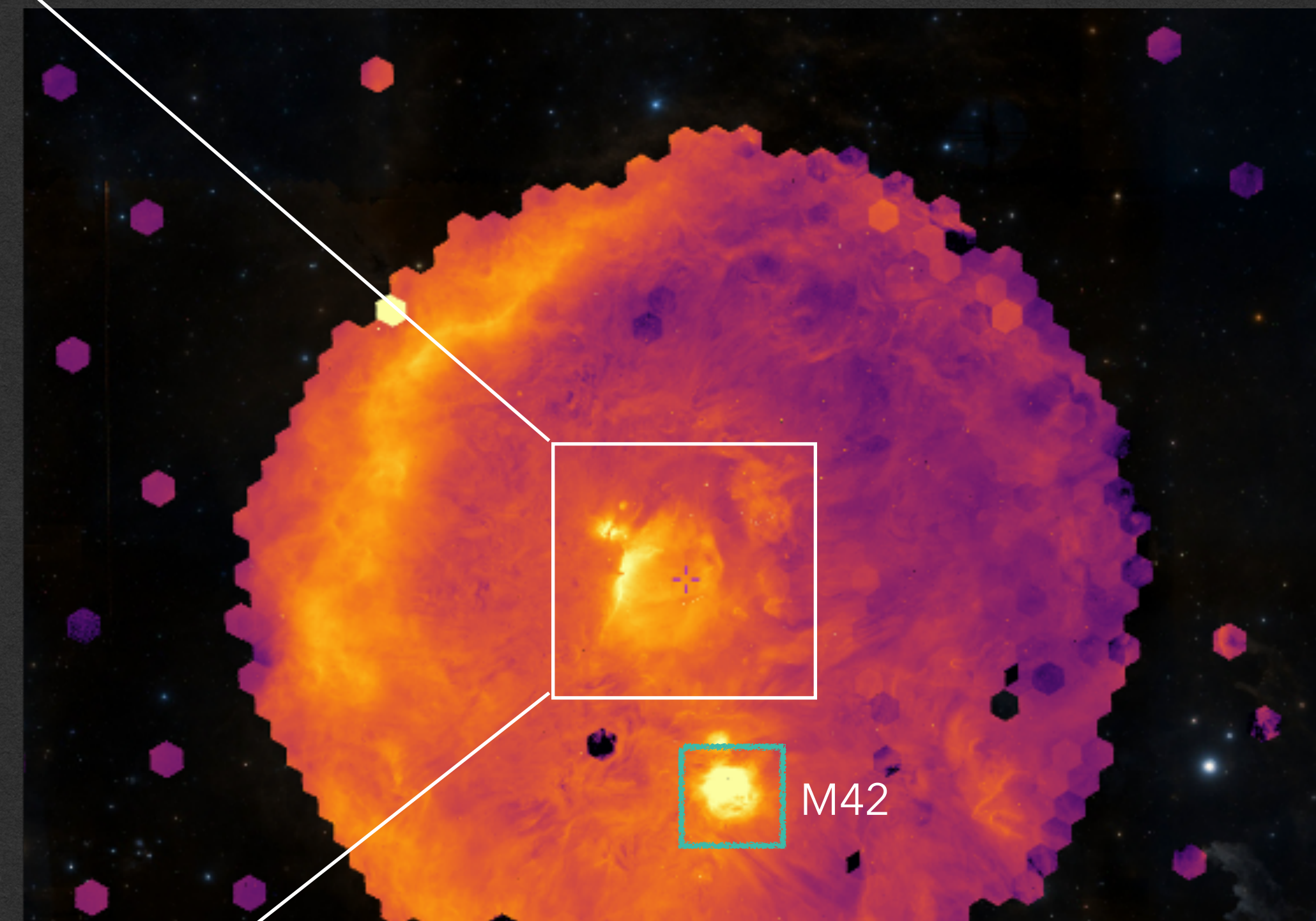


Spectrographs: 3600-9800A @ R~4000; IFUs: 1800 x 35" fibers; ~30' FOV;
Survey and technical details: Drory+(2024)

SDSS-V Local Volume Mapper



[SII]
Halpha
[OIII]
12micron

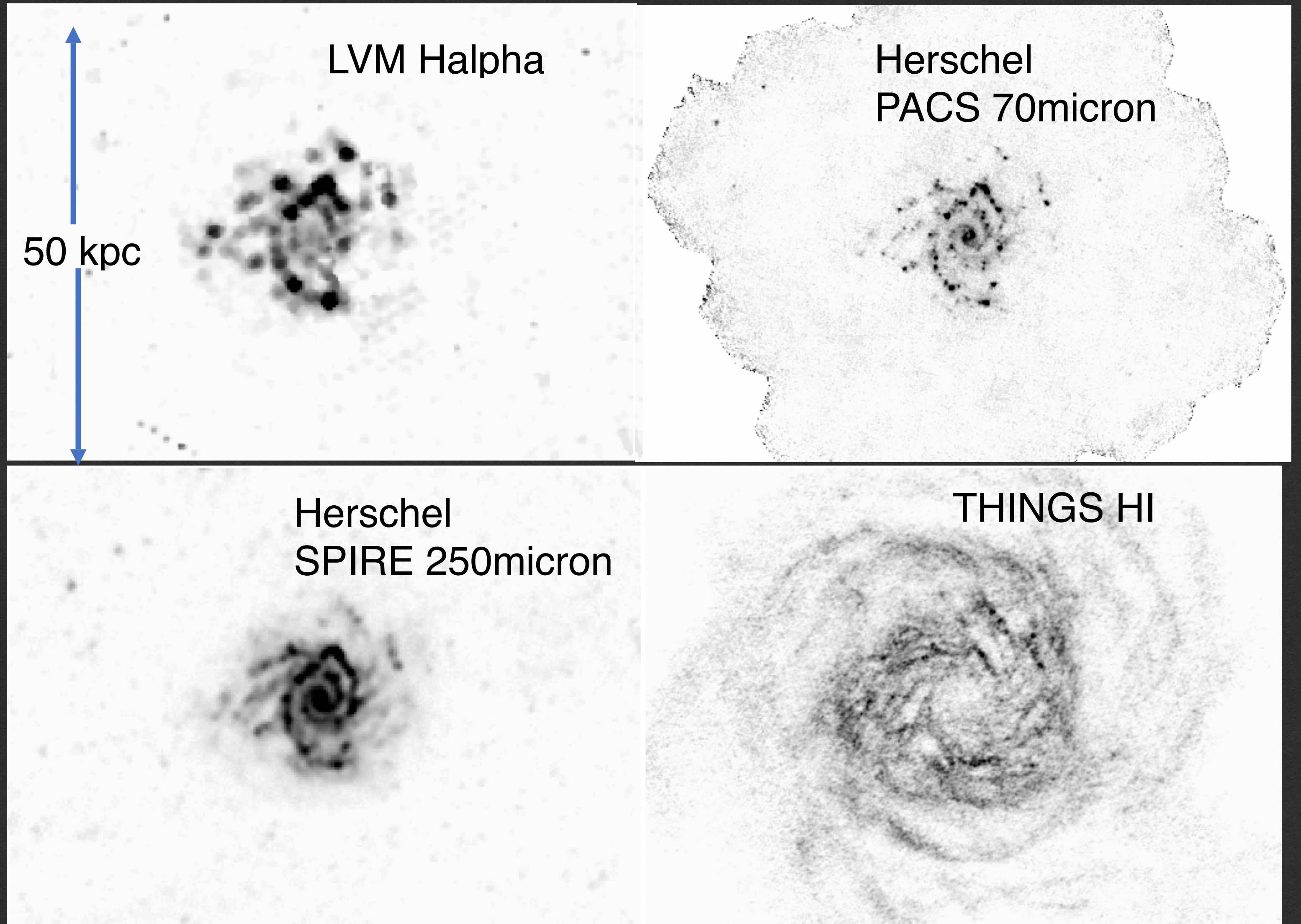


- Только 2 галактики (MCs)+ MW
- Спектральное разрешение недостаточно для надежного измерения турбулентности обычных HII областей
- Нет доступа к северным объектам

Spectrographs: 3600-9800A @ $R \sim 4000$; IFUs: 1800 x 35'' fibers; $\sim 30'$ FWHM
 Survey and technical details: Drory+(2024)

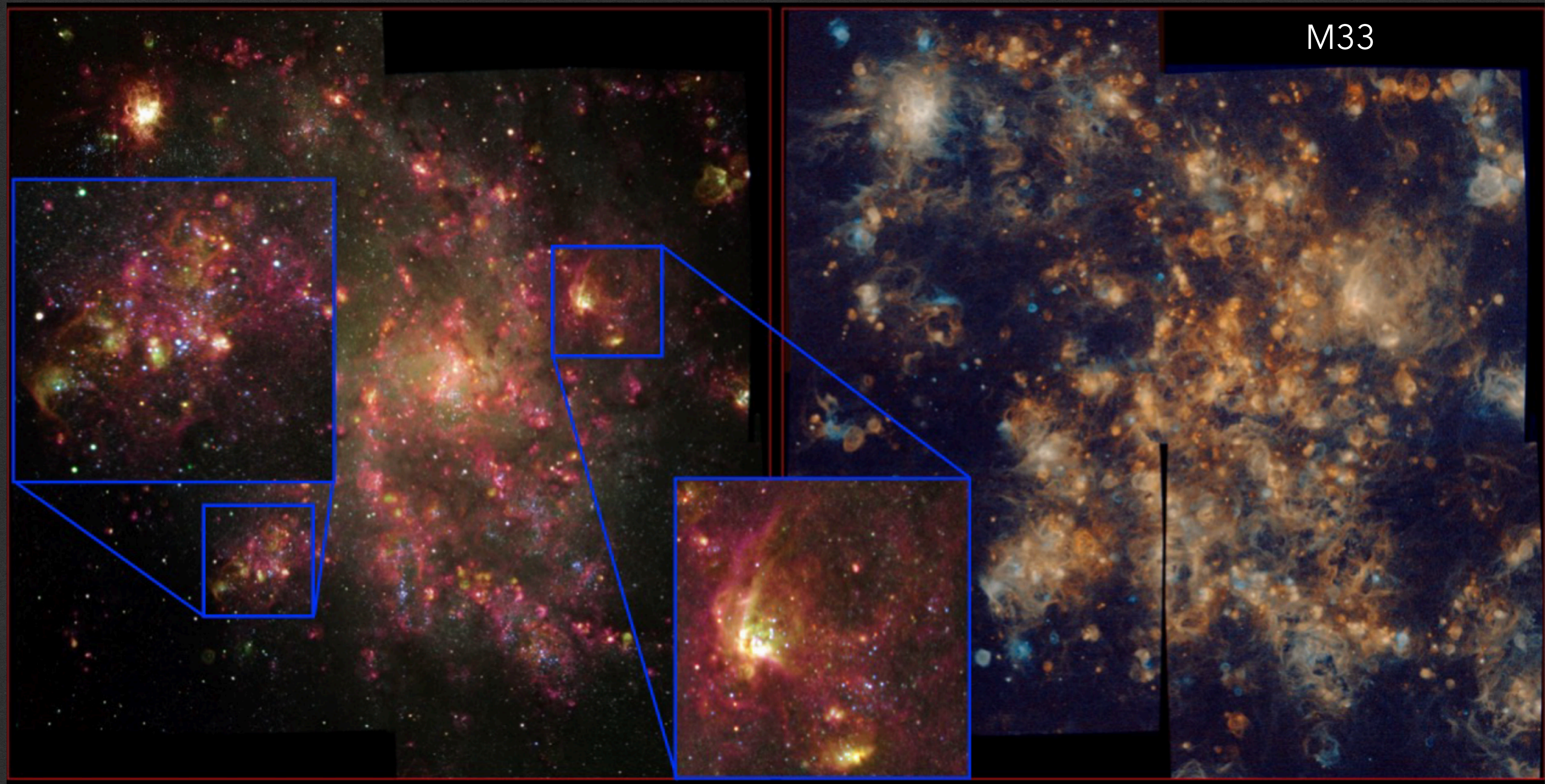
Local Volume Galaxies @ MaNGA-like resolution

Пространственное разрешение (~kpc) недостаточно для анализа локальных процессов



Spectrographs: 3600-9800A @ $R \sim 4000$; IFUs: 1800 x 35" fibers; $\sim 30'$ FOV;
Survey and technical details: Drory+(2024)

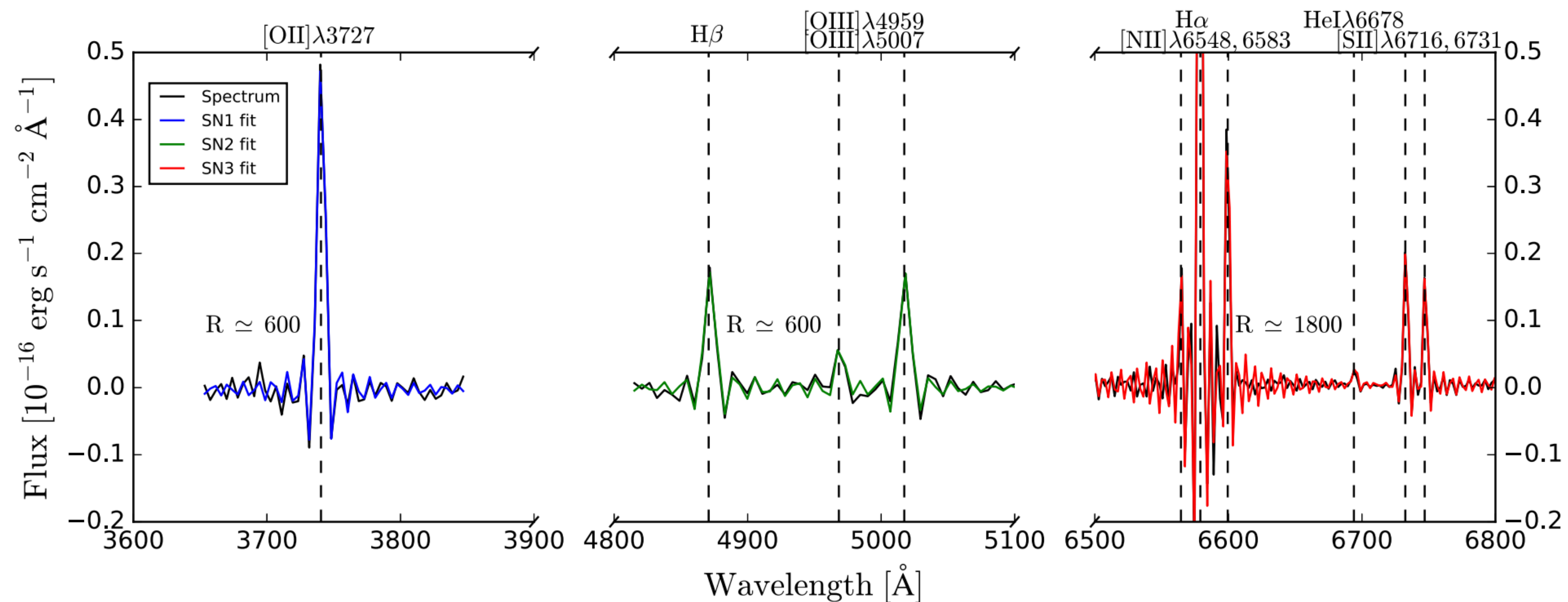
SIGNALS: Фурье-спектропия на CFHT



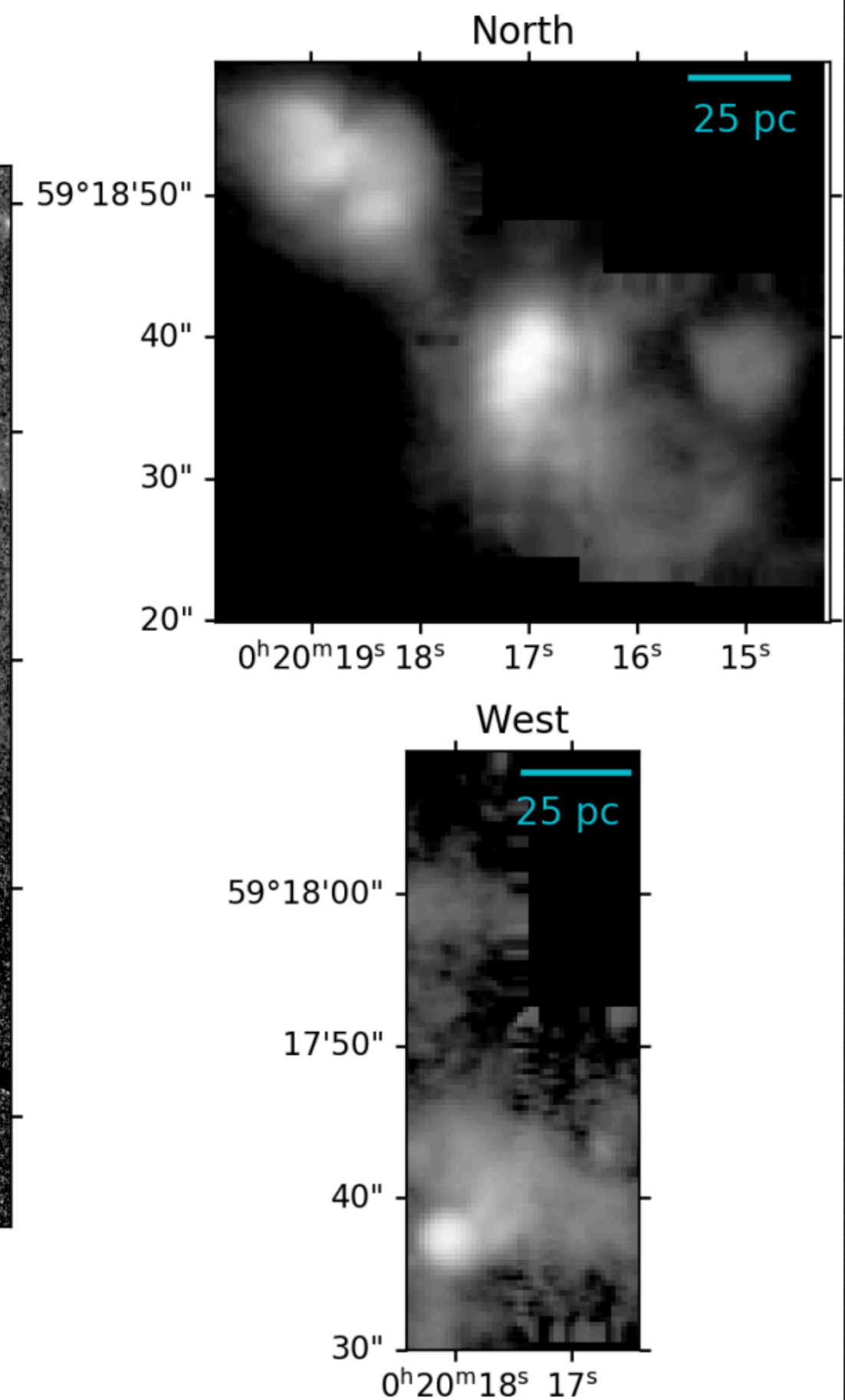
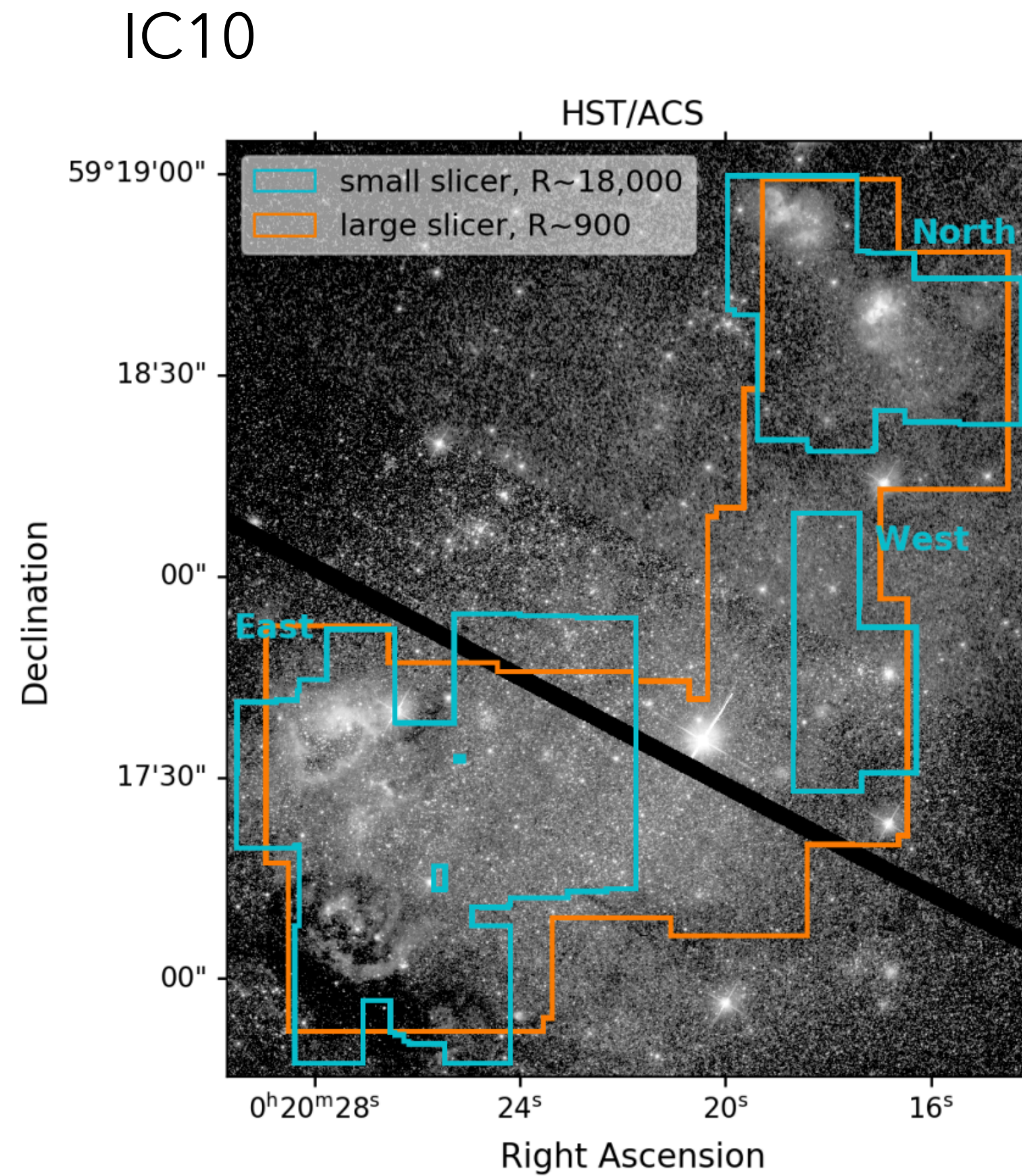
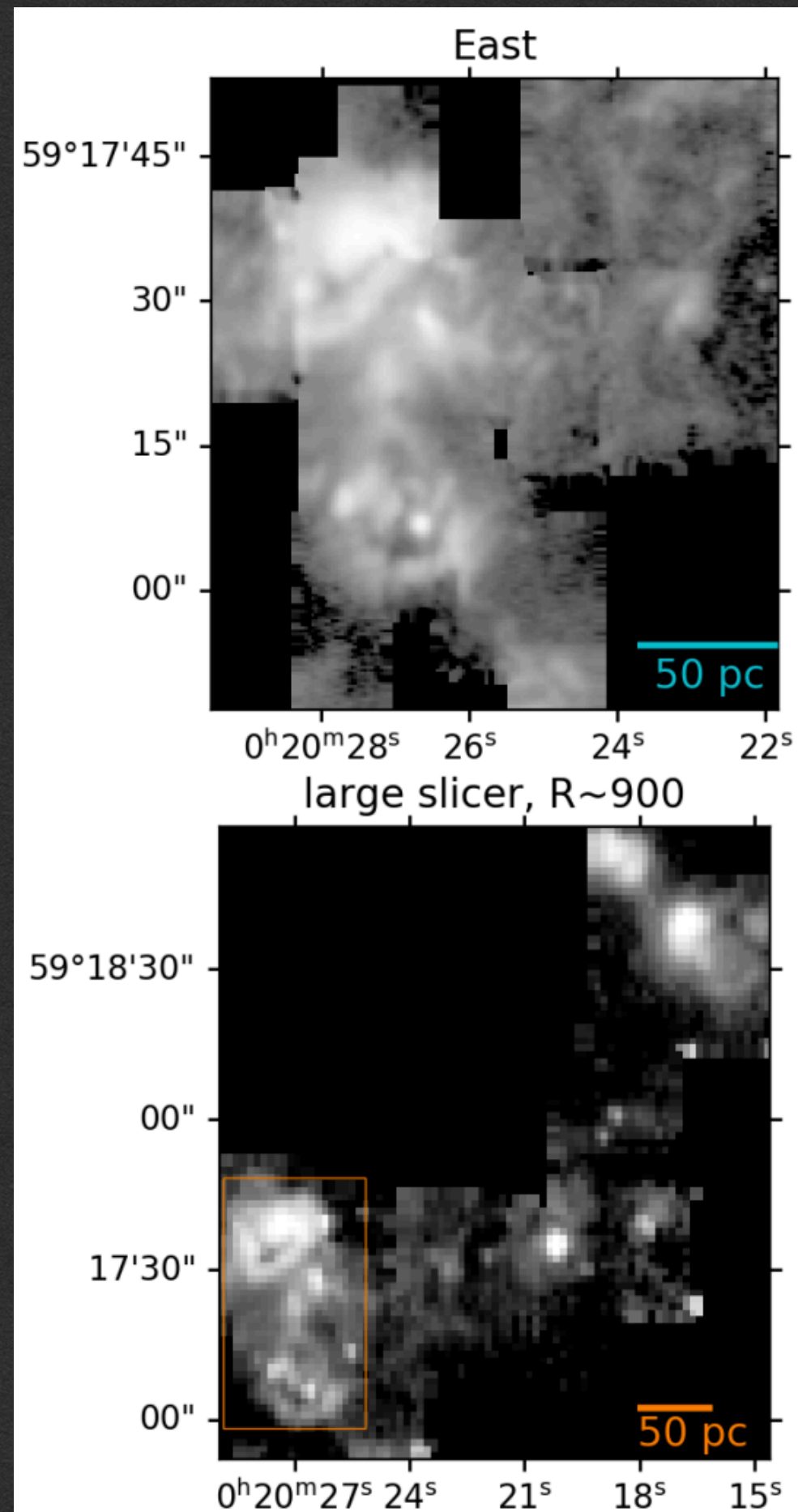
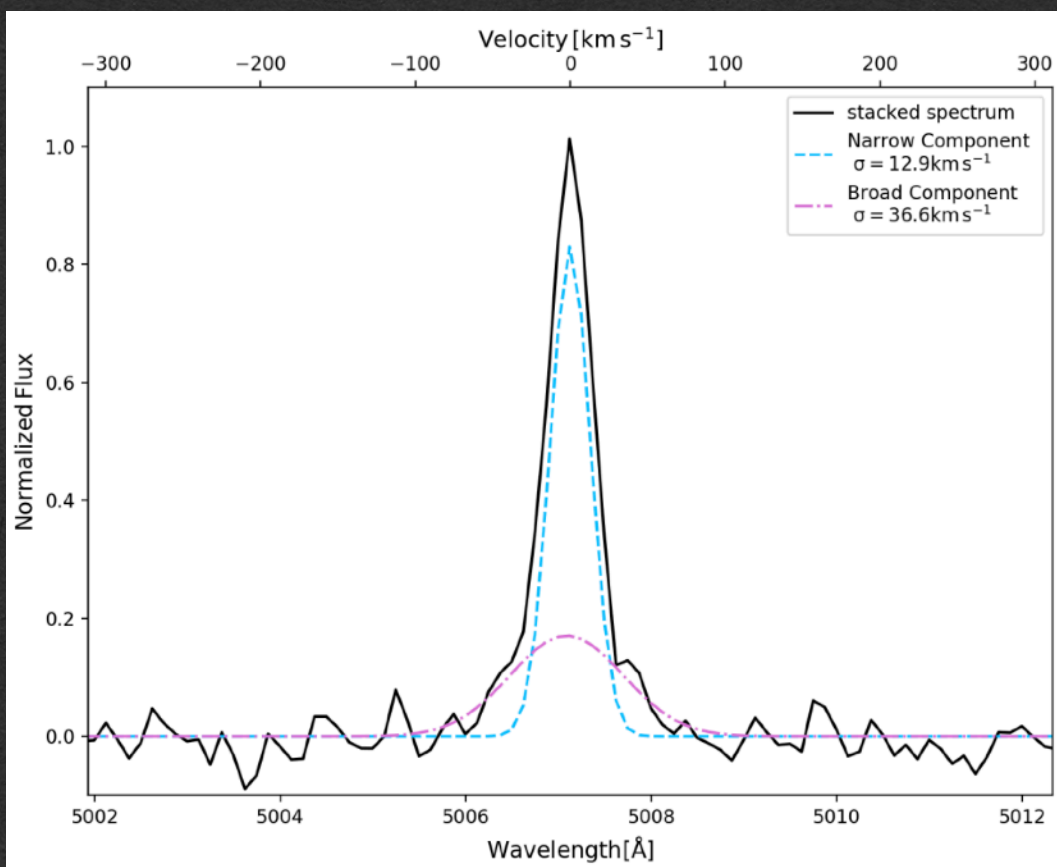
SIGNALS: Фурье-спектроскопия на CFHT

M33

Сложный инструментальный контур - проблематично извлечь информацию о локальной кинематике

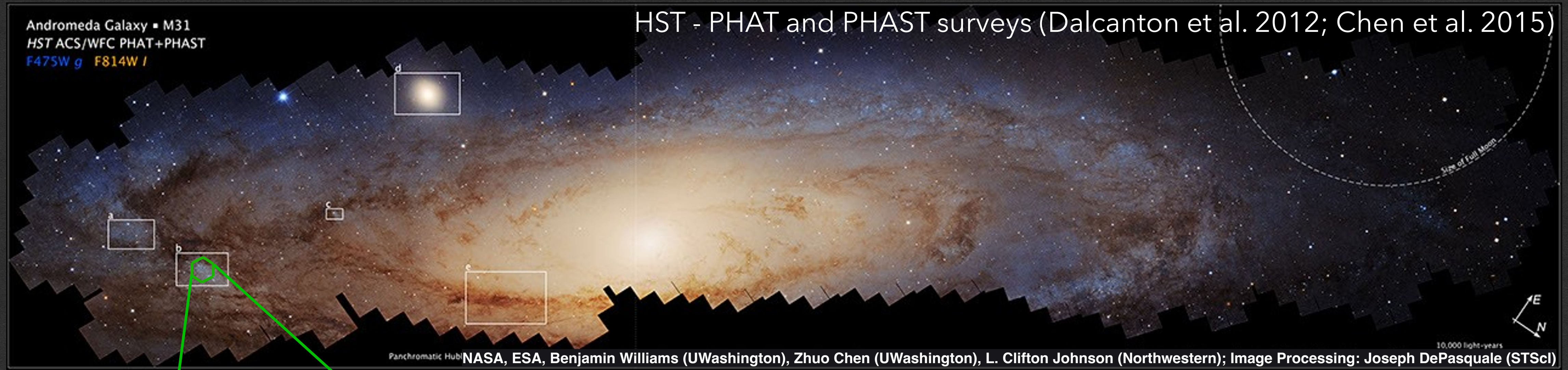


KCWI/KCRM @ 10m Keck

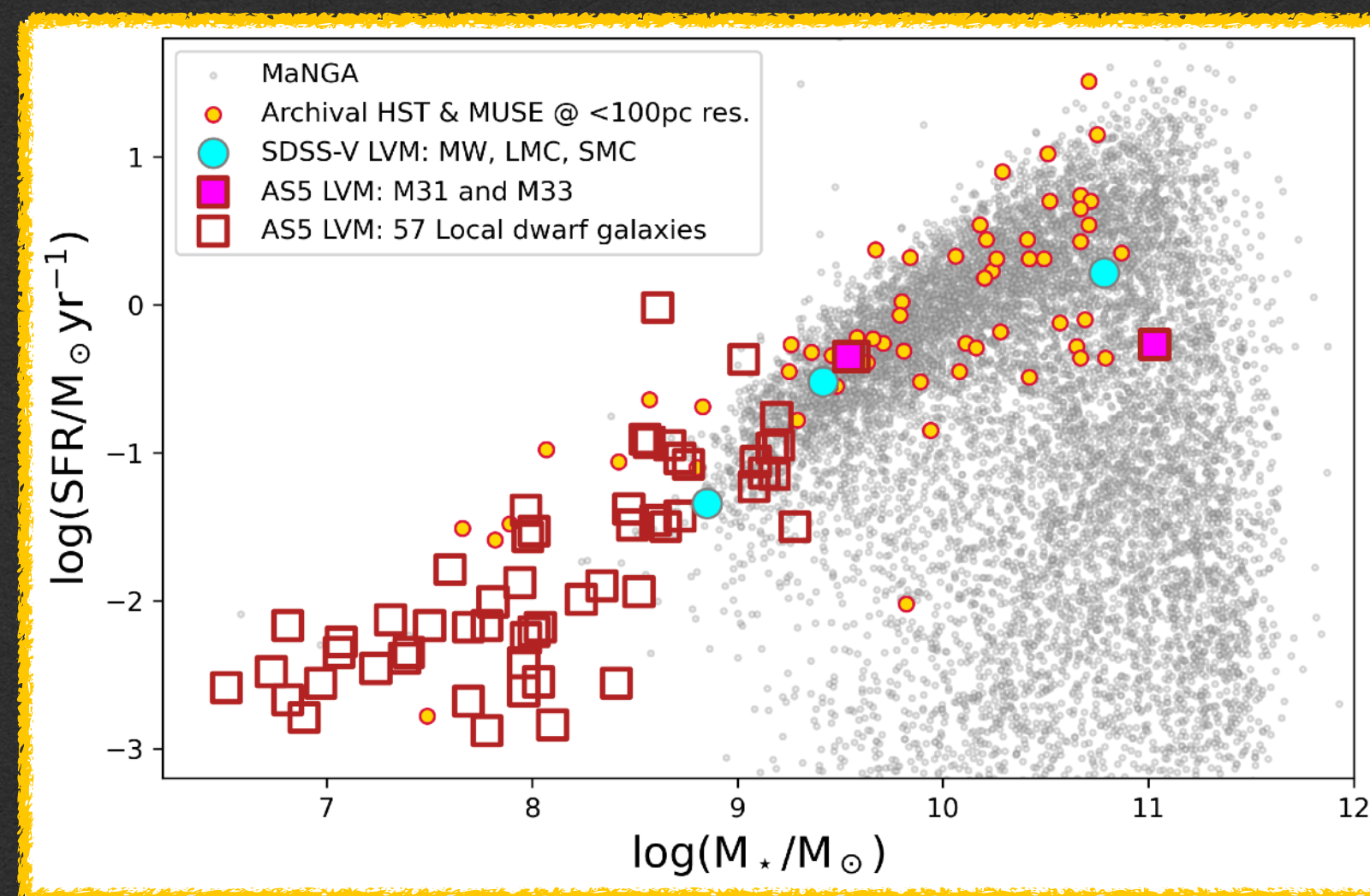
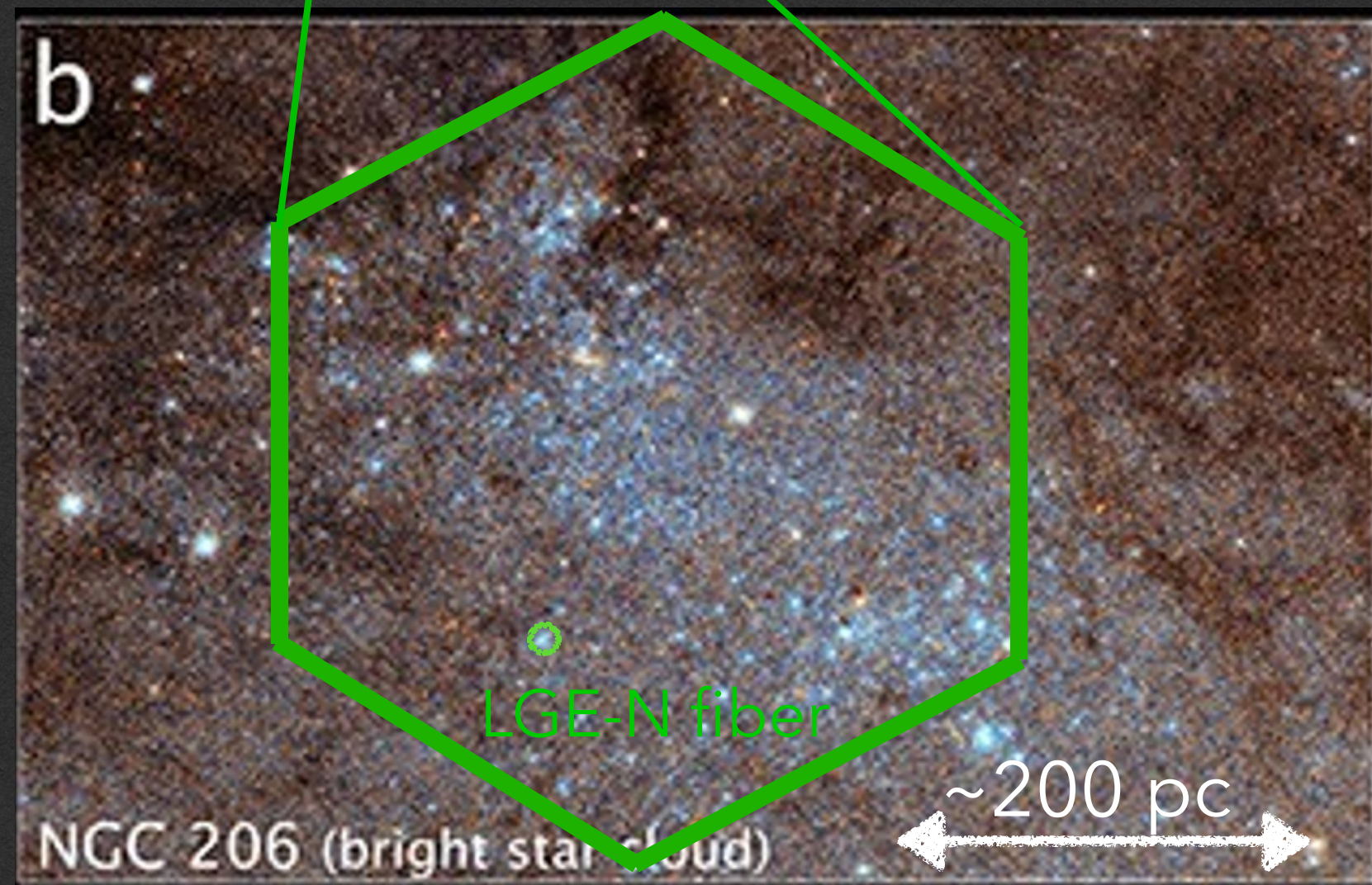


Подходит для кинематики газа в режиме высокого разрешения (только H α -[OIII] => сопоставимо с ИФП на SCORPIO)
 Маленькое поле зрения + сложности с обработкой данных и построением мозаики.

Future of the LVM: AS5 (future SDSS-VI) Local Group Explorer (~2027-2032) (= LGE-South + LGE-North)



LGE-N FOV (~2x2")



LGE-N: a new instrument at existing ~2m class telescope to cover M31, M33, most of local dwarfs (+zoom-in observations of MW) providing the same data quality as LVM for MCs

Current team:
PIs: Guillermo Blanc & Niv Drory
Survey scientists:
 Oleg Egorov, Eduardo Méndez-Delgado, Evelyn Johnston
Instrument lead: Tom Herbst
 > 75 scientists from 11 counties

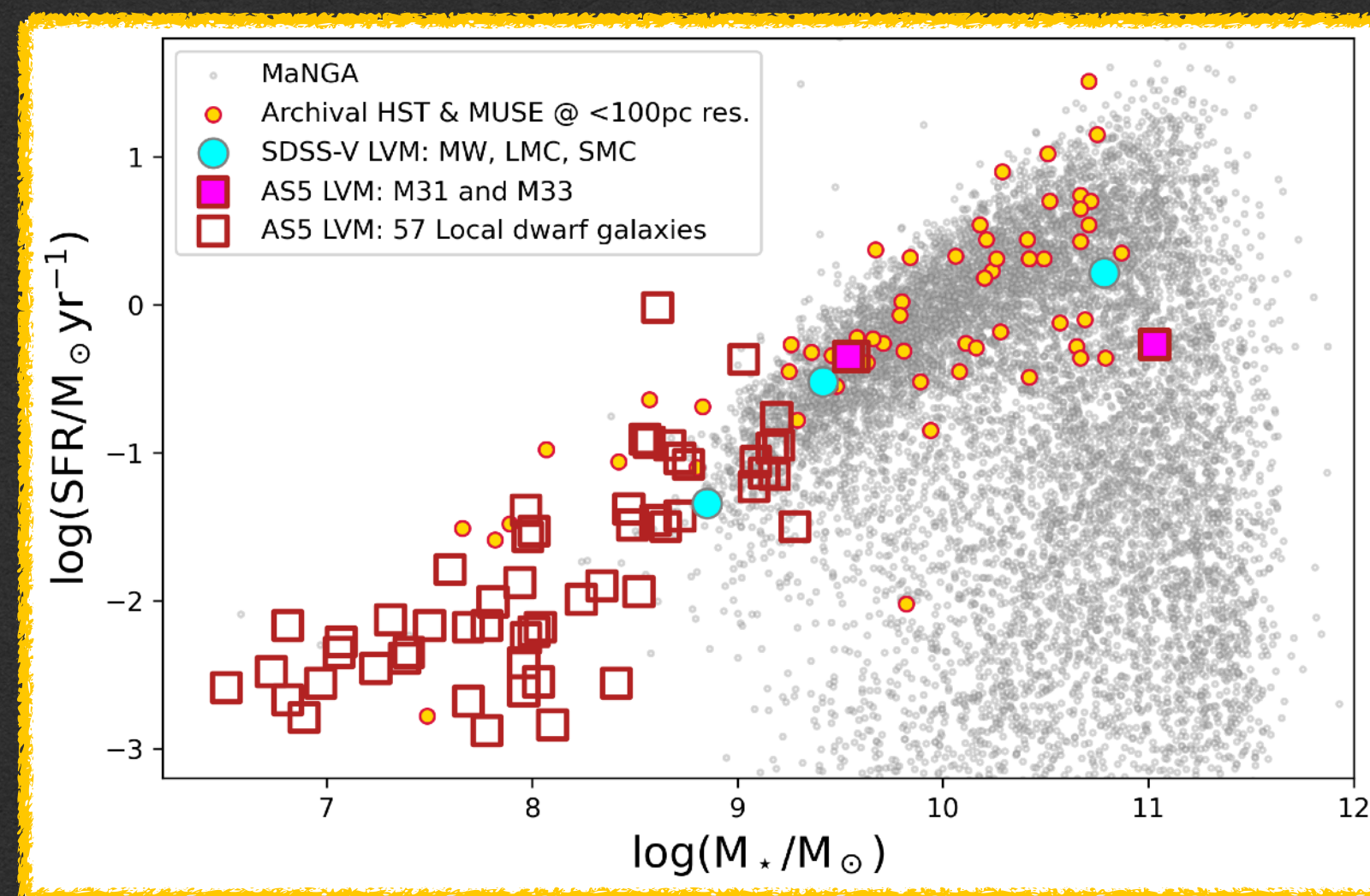
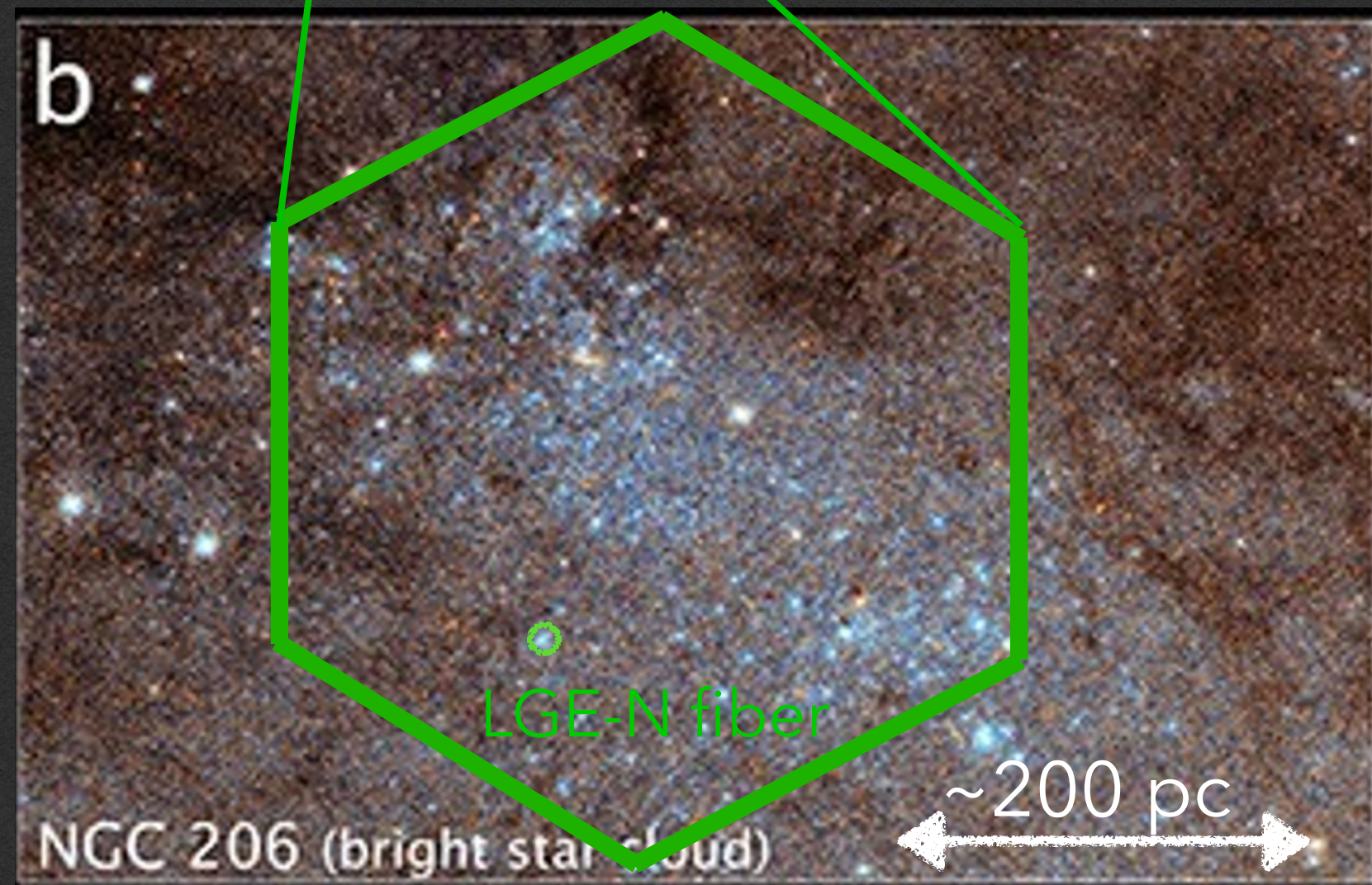
Future of the LVM: AS5 (future SDSS-VI) Local Group Explorer (~2027-2032)

(= LGE-South + LGE-North)

+ AMASE (similar to LVM and LGE, but $R \sim 15000$)



LGE-N FOV (~2x2")



LGE-N: a new instrument at existing ~2m class telescope to cover M31, M33, most of local dwarfs (+zoom-in observations of MW) providing the same data quality as LVM for MCs

Current team:

PIs: Guillermo Blanc & Niv Drory

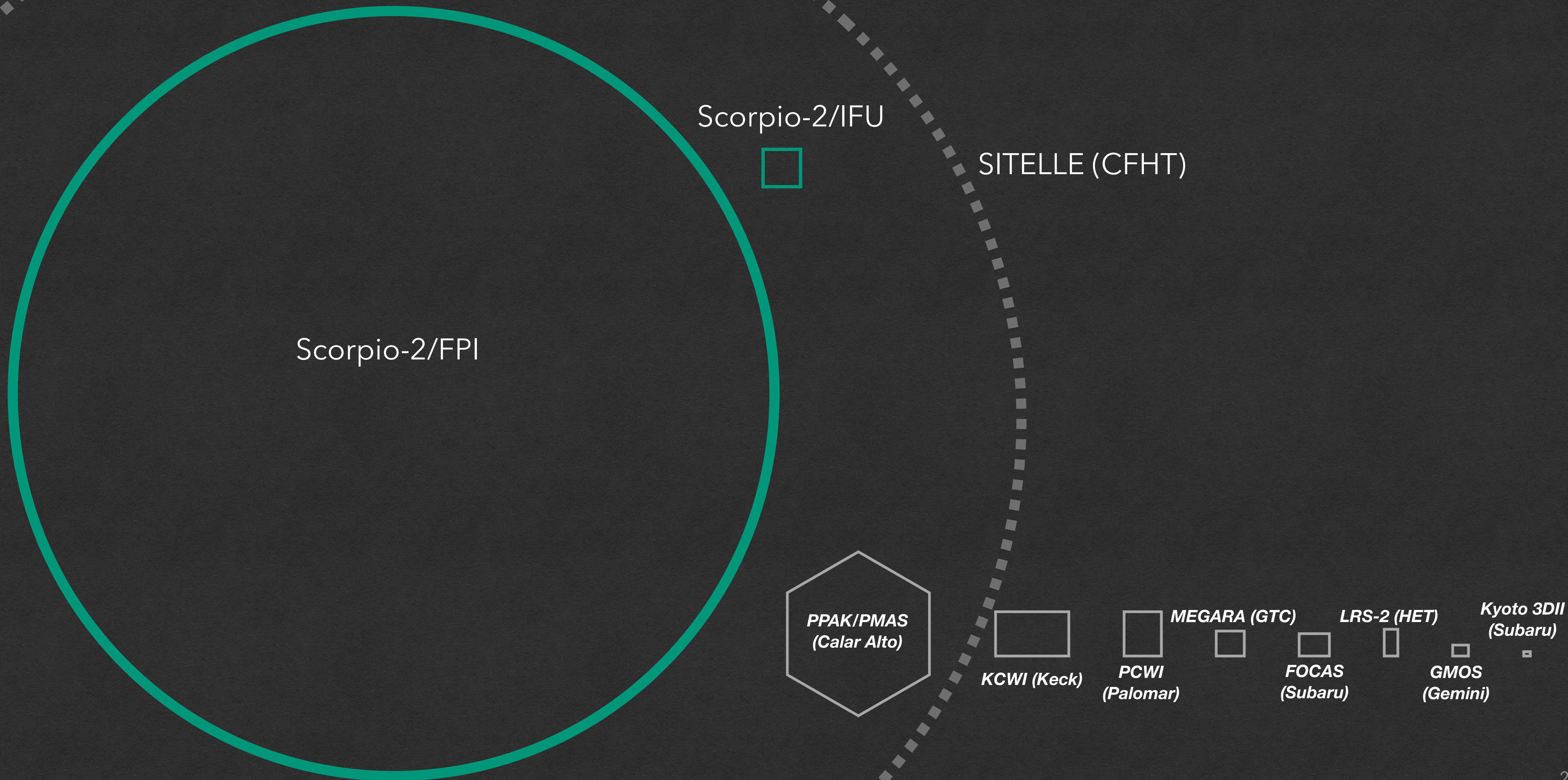
Survey scientists:

Oleg Egorov, Eduardo Méndez-Delgado, Evelyn Johnston

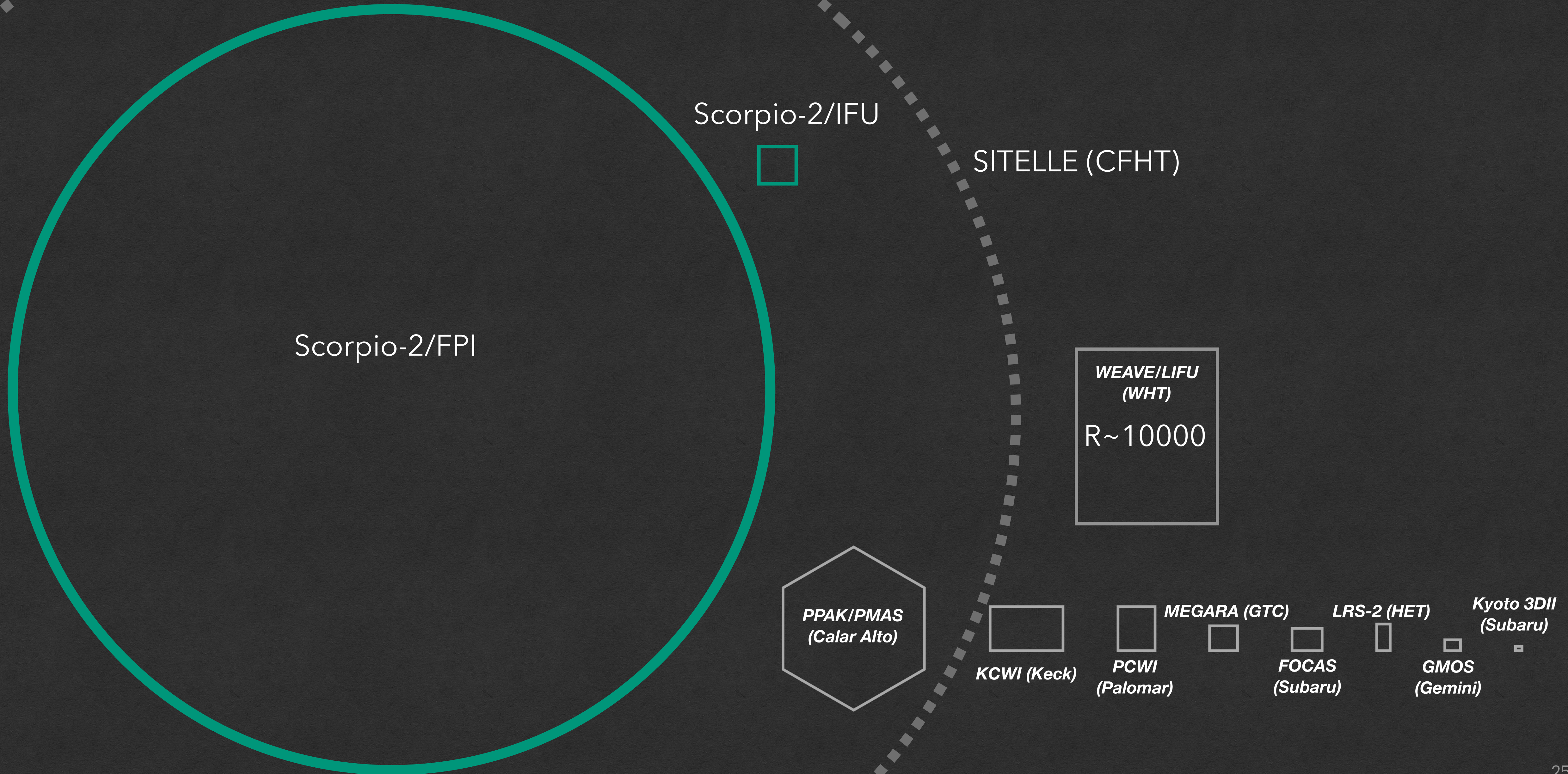
Instrument lead: Tom Herbst

> 75 scientists from 11 countries

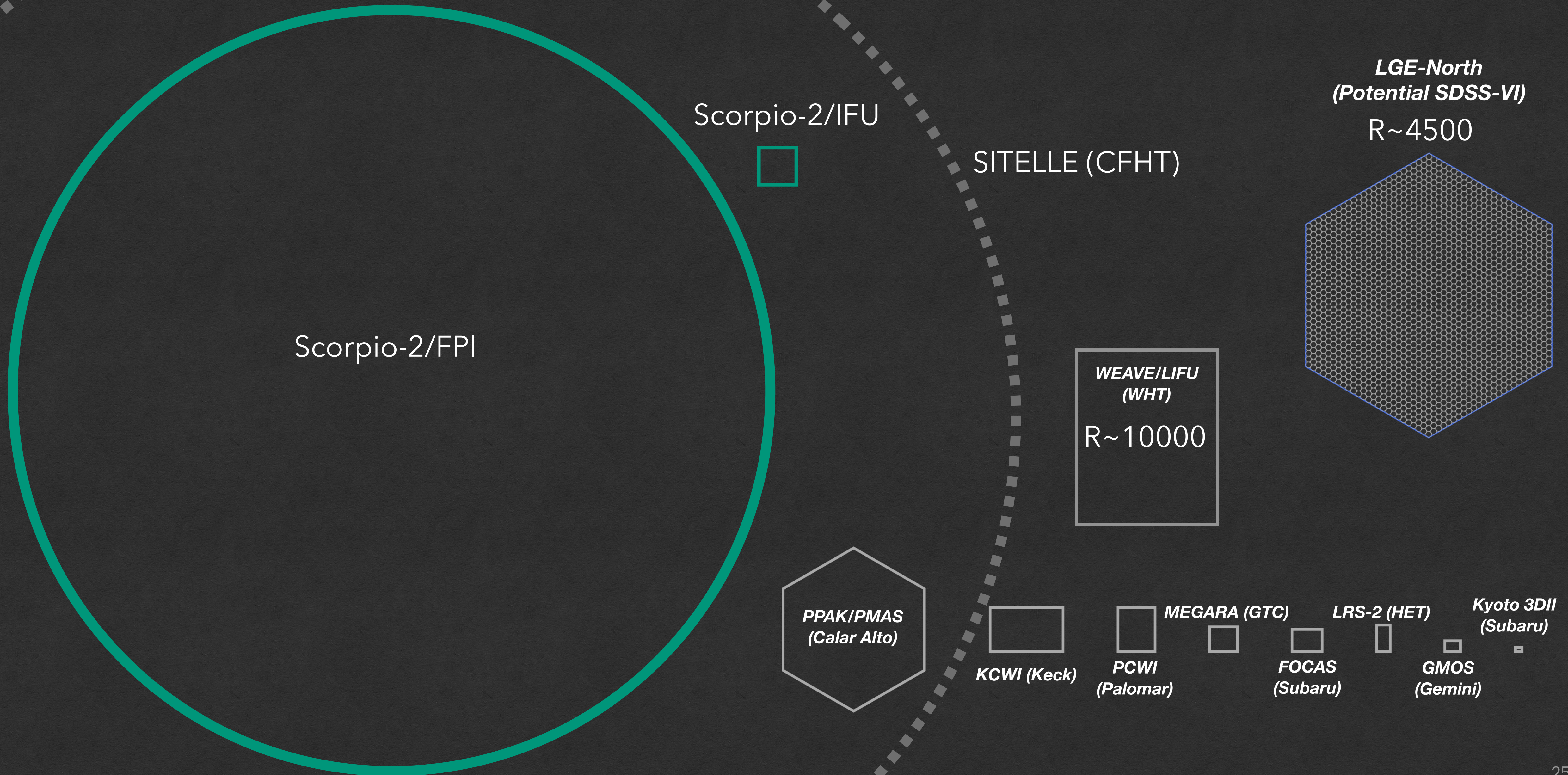
SCORPIO FOV среди других северных панорамных спектрографов



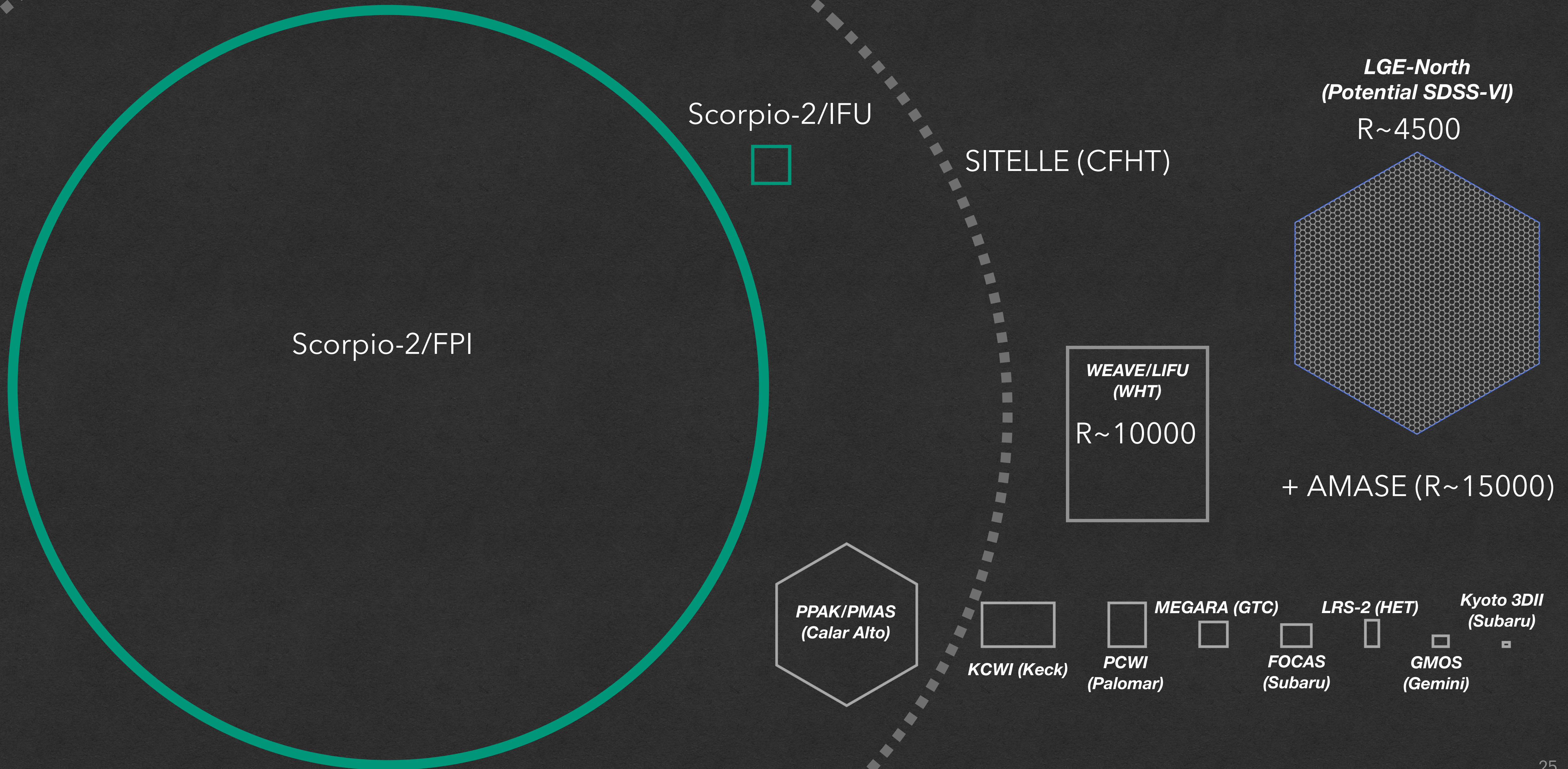
SCORPIO FOV среди других северных панорамных спектрографов



SCORPIO FOV среди других северных панорамных спектрографов

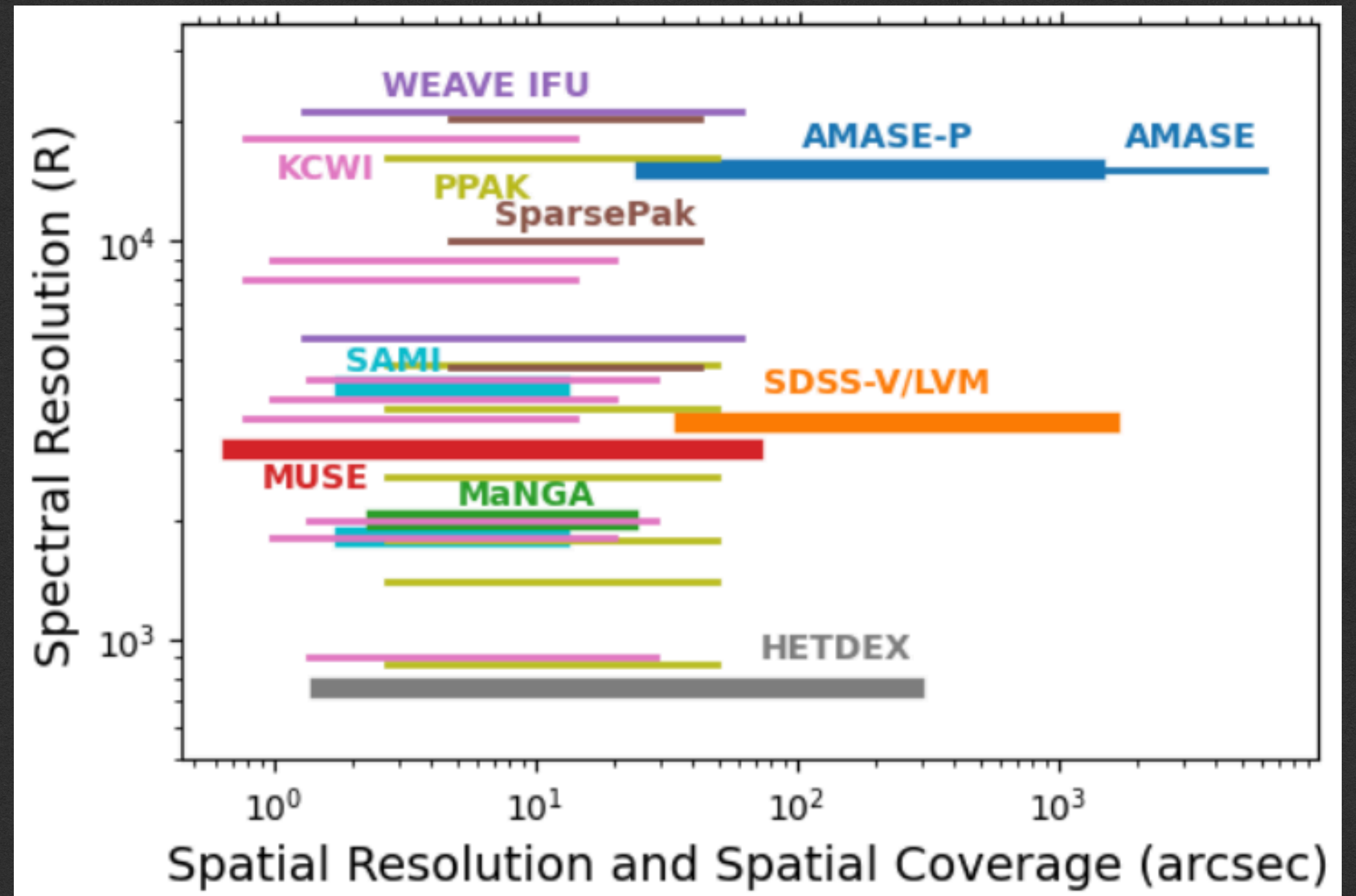


SCORPIO FOV среди других северных панорамных спектрографов



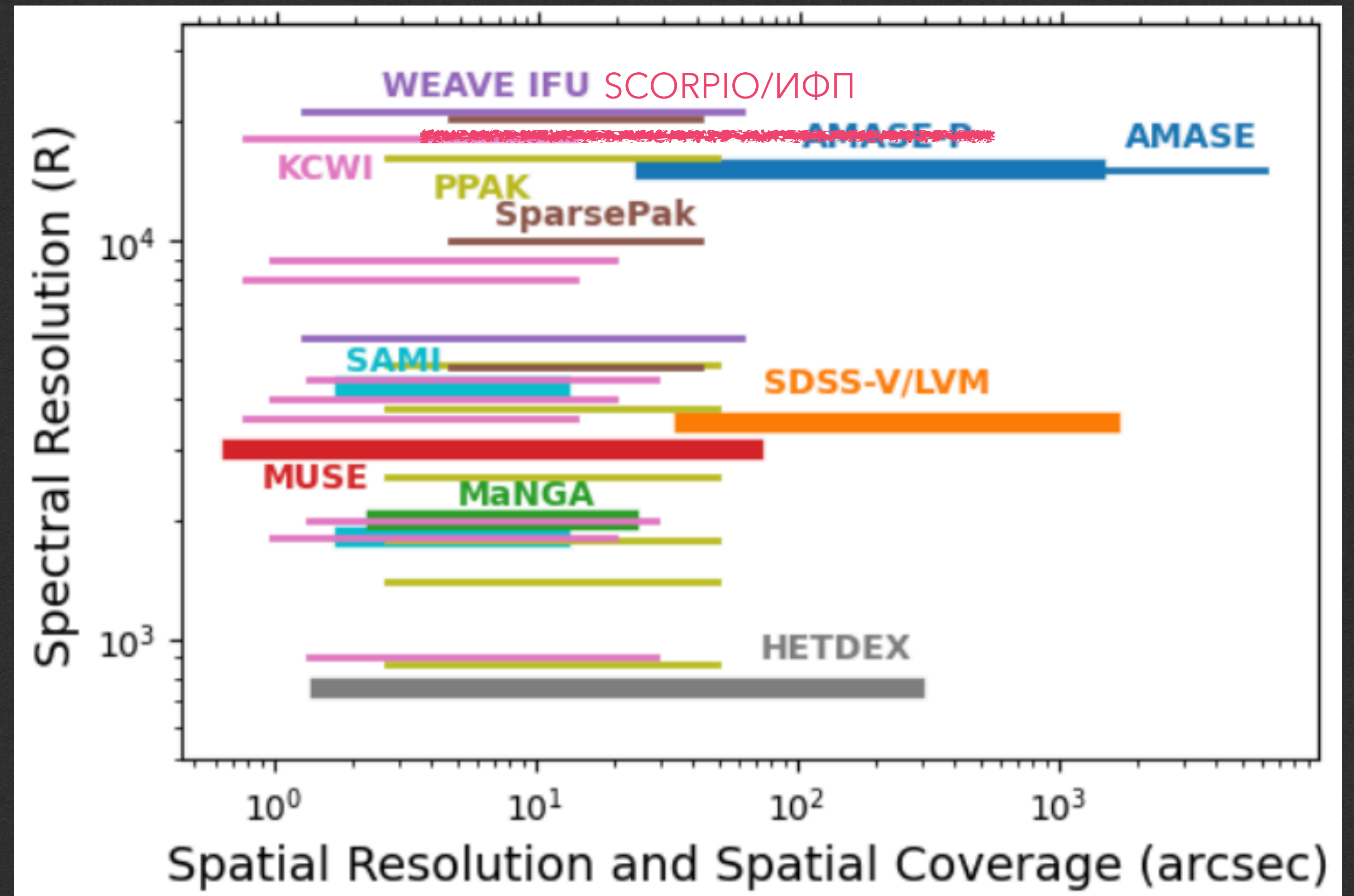
Спектральное разрешение SCORPIO FOV среди других панорамных спектрографов

ИФП высокого разрешения делает Scorpio по-прежнему одним из лучших существующих инструментов для измерения кинематики ионизированного газа

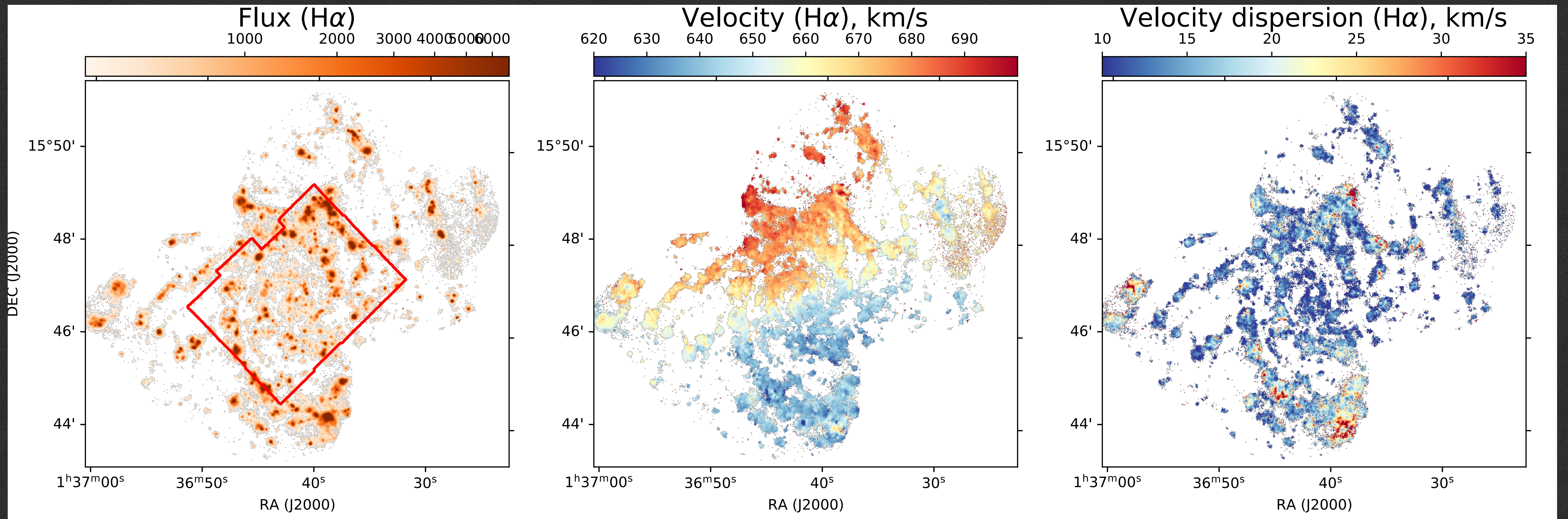


Спектральное разрешение SCORPIO FOV среди других панорамных спектрографов

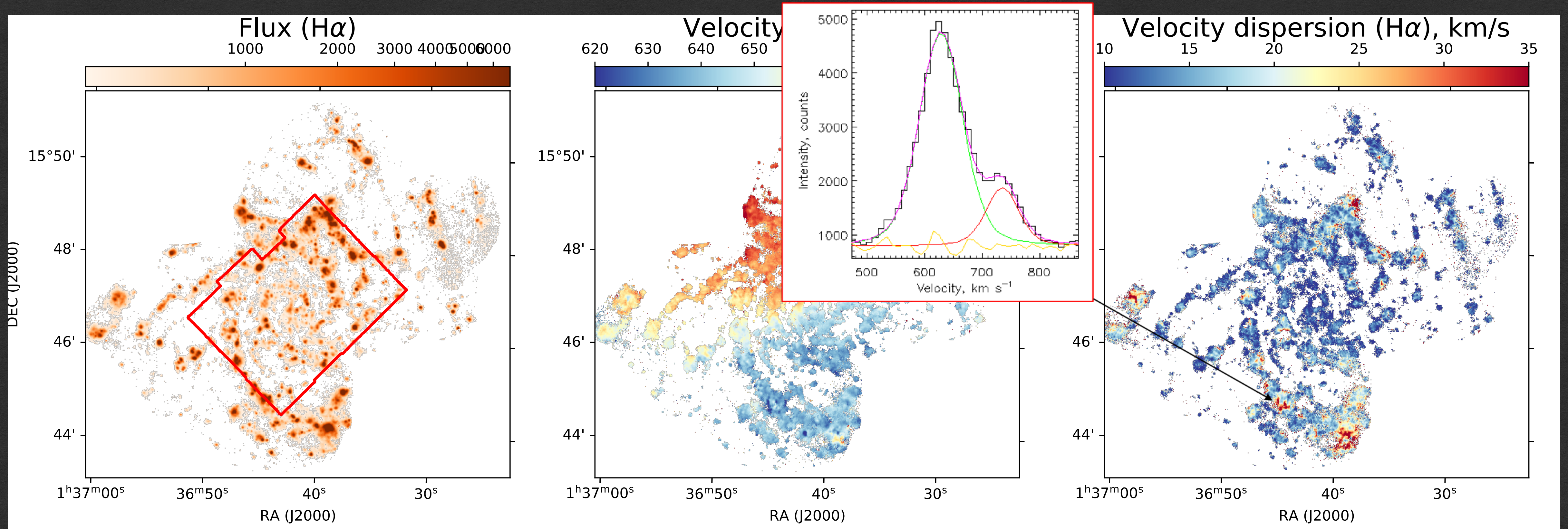
ИФП высокого разрешения делает Scorio по-прежнему одним из лучших существующих инструментов для измерения кинематики ионизированного газа



SCORPIO/FPI: сравнение с MUSE (кинематика и морфология газа)

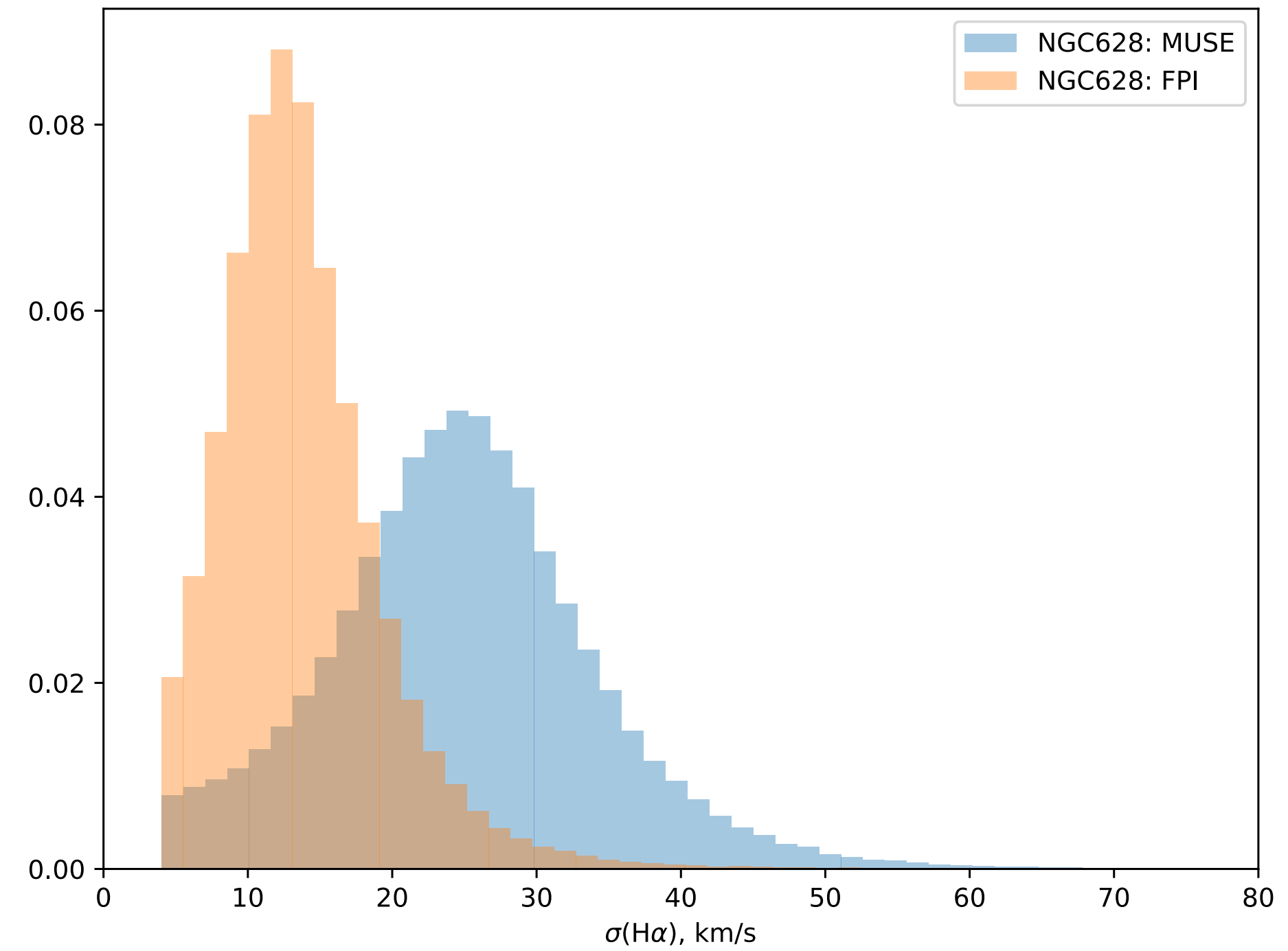
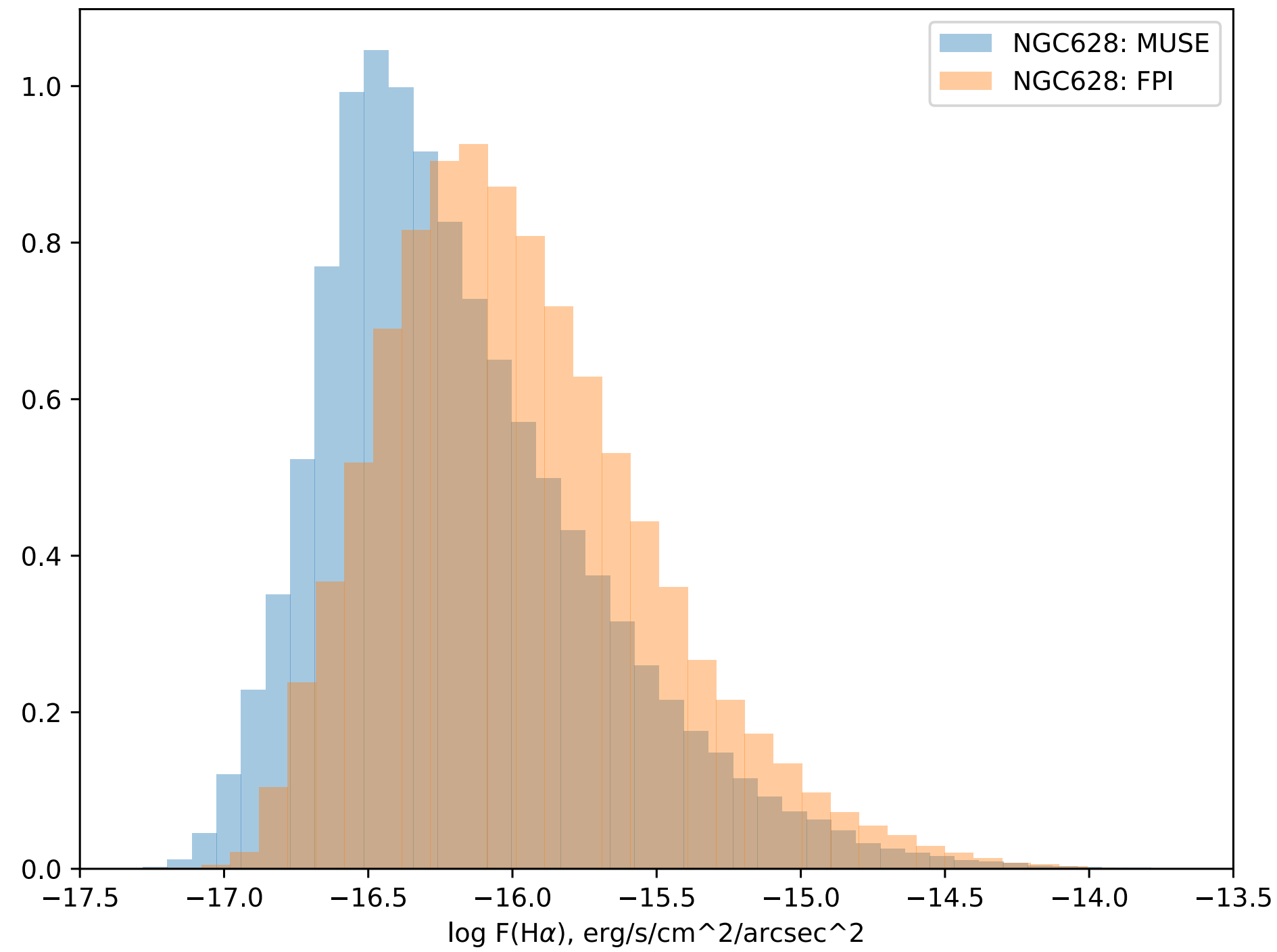


SCORPIO/FPI: сравнение с MUSE (кинематика и морфология газа)



SCORPIO/FPI: сравнение с MUSE (кинематика и морфология газа)

Систематическое завышение дисперсии скоростей по данным MUSE из-за низкого спектрального разрешения



MUSE: 12 полей, 1h каждое

ИФП: 2 поля, 6h каждое

SCORPIO/FPI: проблемы и предложения

Программные:

Требуют улучшения алгоритмы:

- Удаление бликов
- Вычитание линий неба

Более активное привлечение студентов к улучшению обработки данных

- Необходим хорошо документированный пакет обработки (желательно в python)

Аппаратные:

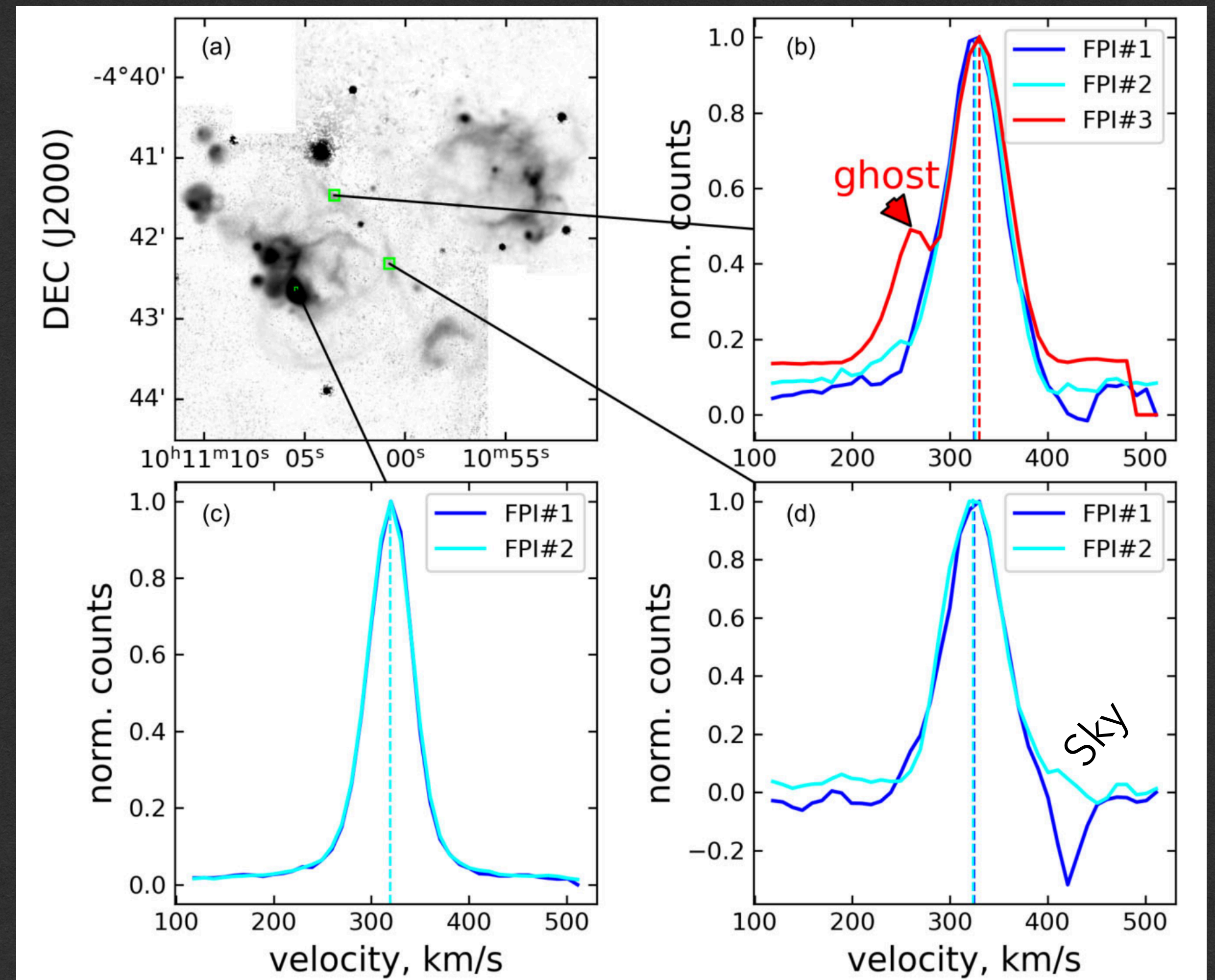
Блики по полю - есть ли возможность их минимизировать чтобы более эффективно использовать FOV

Организационные:

- Режим ИФП - не такой стандартный, как LS или IMA. Напоминания наблюдателям о необходимых калибровках (и как их снимать) позволили бы минимизировать потерю данных

Научные:

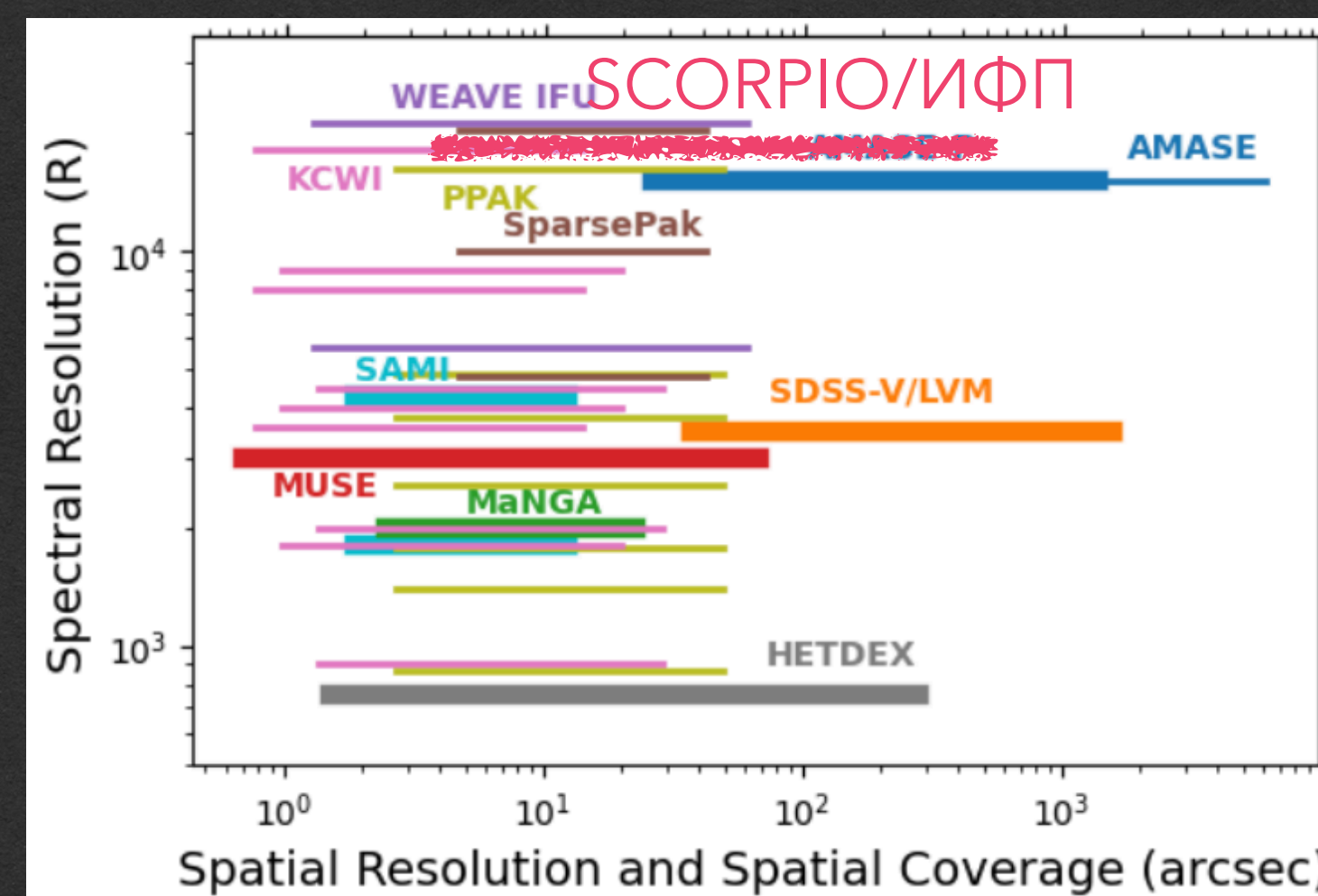
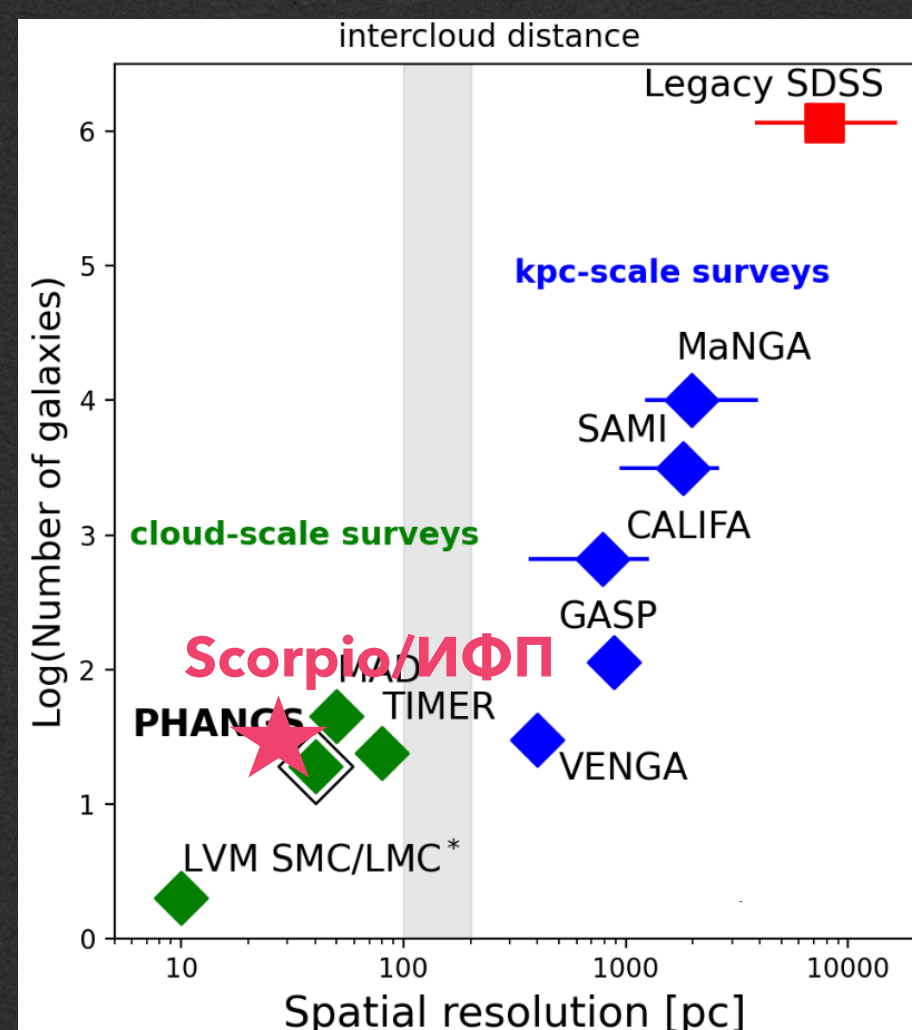
Обзор кинематики ионизованного газа в близких галактик с высоким разрешением - все еще очень востребован



Gerasimov+2022

Заключение

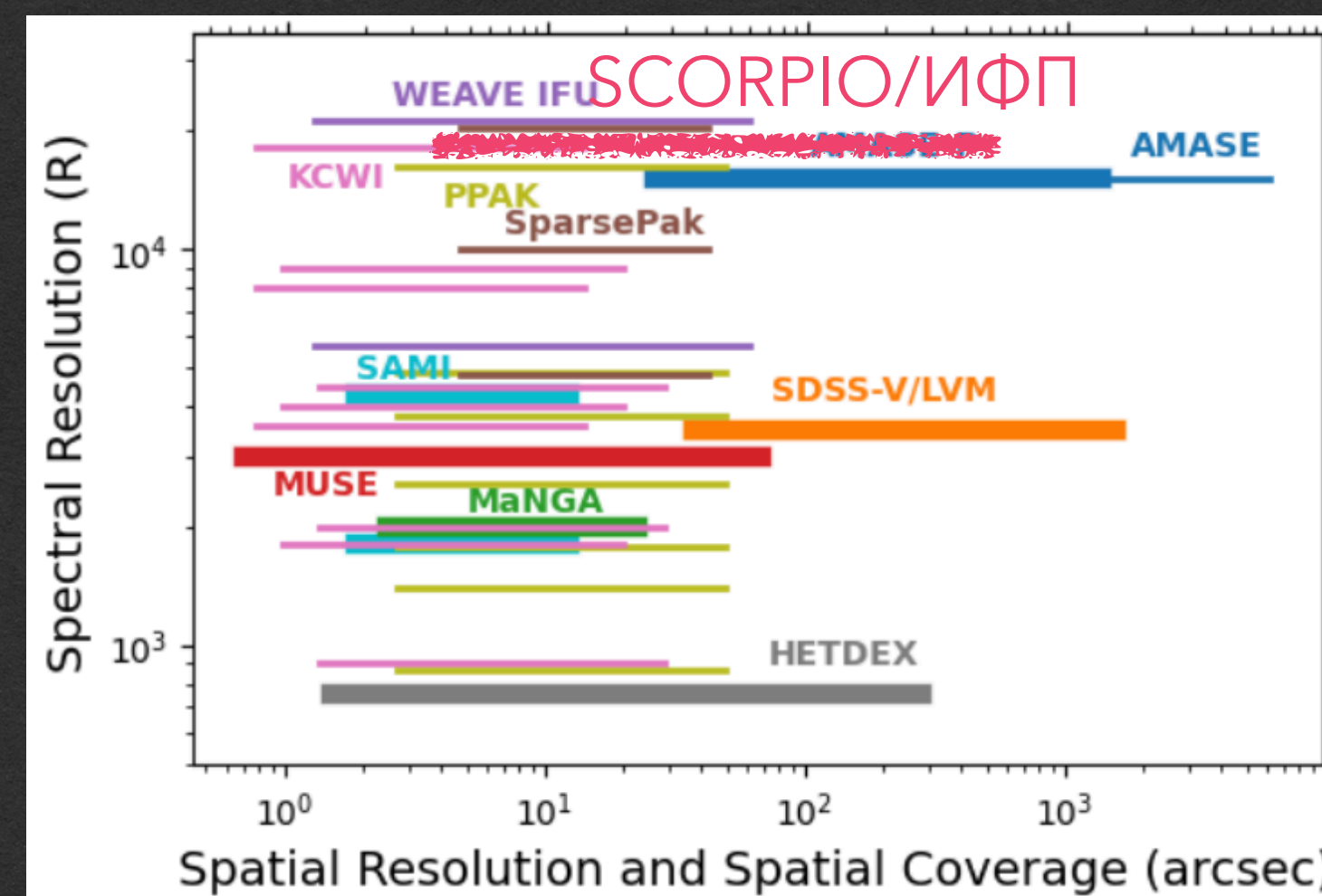
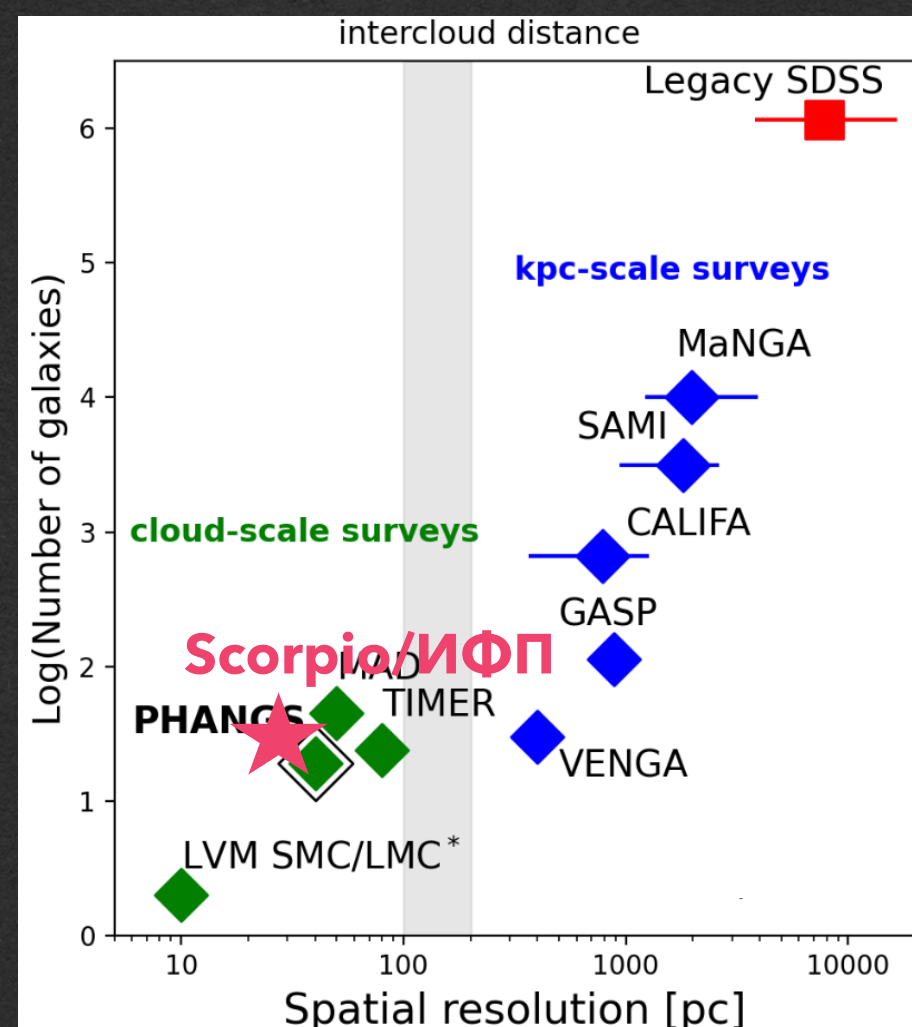
- SCORPIO - на сегодняшний момент, единственный рабочий инструмент в России, предлагающий возможность оптической панорамной спектроскопии
- Результаты: энергетический баланс между массивными звездами и МЗС в низкометаллическом окружении; идентификация множества остатков СН, звезд LBV, WR; аккреция газа, outflows etc.
- Благодаря большому полю зрения + высокому спектральному и пространственному разрешению + высокой чувствительности - режим ИФП в SCORPIO-2 все еще уникален для исследования морфологии и локальной кинематики ионизированного газа.
- Большой потенциал для создания востребованного обзора МЗС близких северных галактик, для которых нет или недостаточно данных IFU. Однако, эта ниша может заполниться в течение следующих ~5 лет



Огромное спасибо разработчикам и наблюдателям за ваш труд!

Заключение

- SCORPIO - на сегодняшний момент, единственный рабочий инструмент в России, предлагающий возможность оптической панорамной спектроскопии
- Результаты: энергетический баланс между массивными звездами и МЗС в низкометаллическом окружении; идентификация множества остатков СН, звезд LBV, WR; аккреция газа, outflows etc.
- Благодаря большому полю зрения + высокому спектральному и пространственному разрешению + высокой чувствительности - режим ИФП в SCORPIO-2 все еще уникален для исследования морфологии и локальной кинематики ионизированного газа.
- Большой потенциал для создания востребованного обзора МЗС близких северных галактик, для которых нет или недостаточно данных IFU. Однако, эта ниша может заполниться в течение следующих ~5 лет



Огромное спасибо разработчикам и наблюдателям за ваш труд!

Поздравление от Chat-GPT

