

А.В. Моисеев, САО РАН

Методы исследования галактик.

Лекция III.

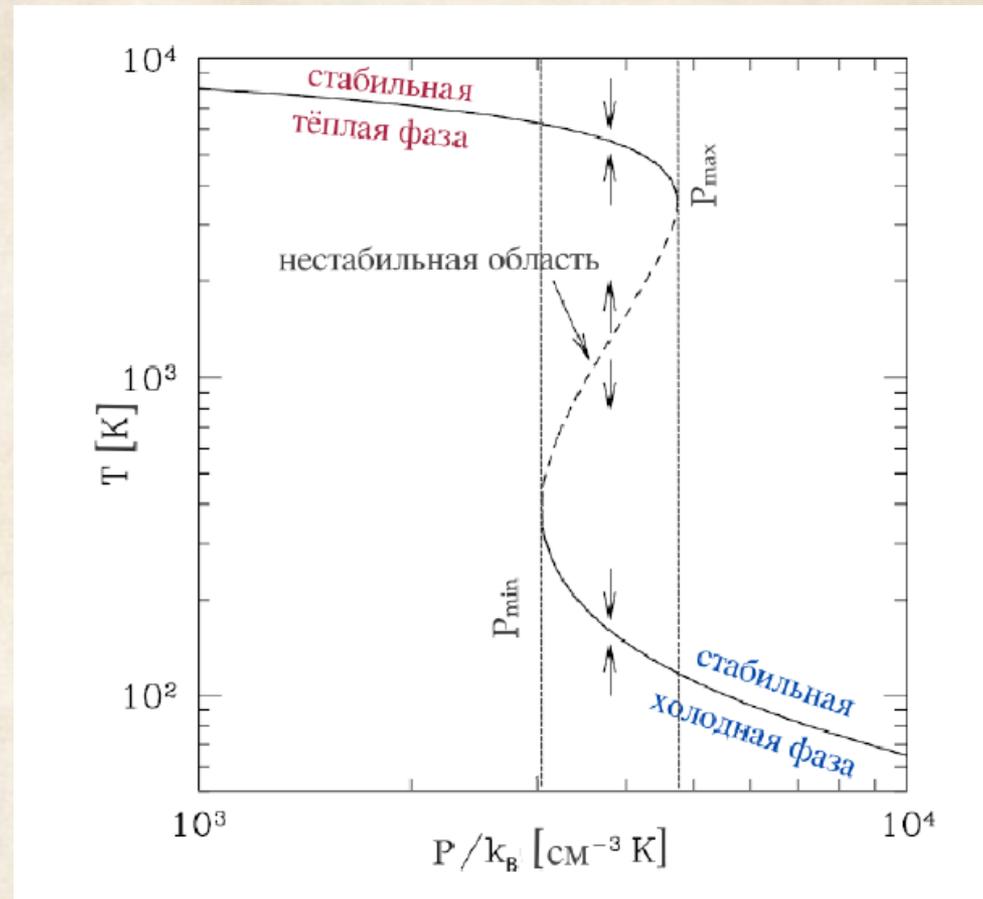
Газ в галактиках: атомарный водород, молекулярный и ионизованный. Измерение химсостава.

Презентации и видео: <https://www.sao.ru/hq/moisav>

Состояния газовой межзвездной среды (МЗС)

Фаза	T, K	n, cm ⁻³
Корональный газ	$\approx 5 \cdot 10^5$	~ 0.003
Зоны II низкой плотности	$\approx 10^4$	~ 0.3
Межоблачная среда	$\approx 10^4$	~ 0.1
Облака I	≈ 80	~ 10
Молекулярные облака	≈ 10	$\sim 10^3$
Глобулы	≈ 10	$\sim 10^4$
Яркие области II	$\approx 10^4$	~ 30
Гигантские молекулярные облака	~ 20	~ 300
Мазерные конденсации	≤ 100	$\sim 10^{10}$

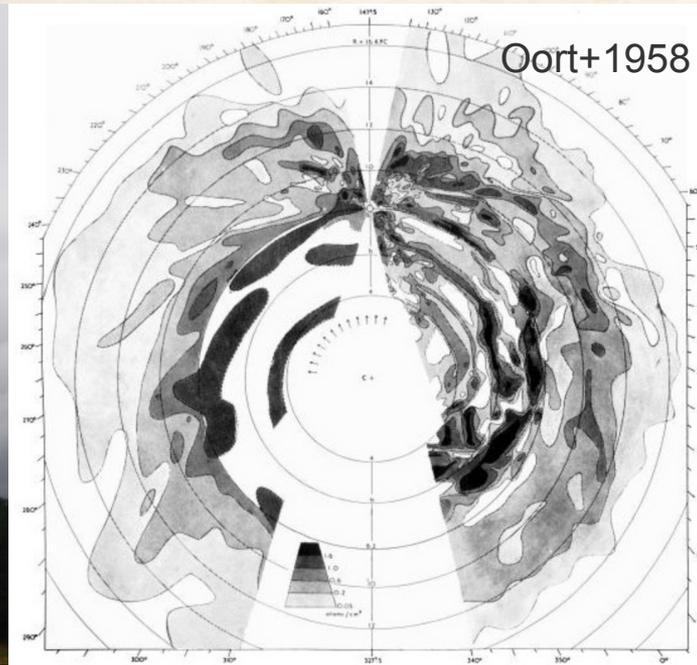
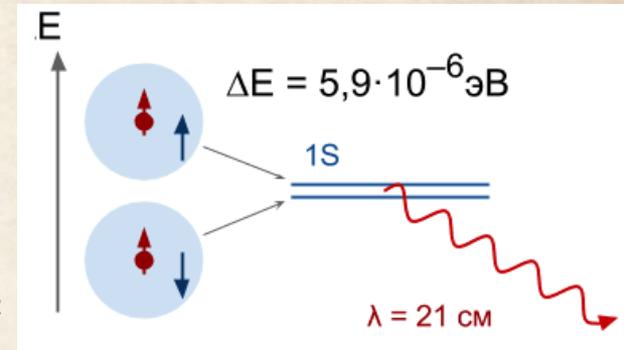
Фазовая диаграмма нейтрального газа



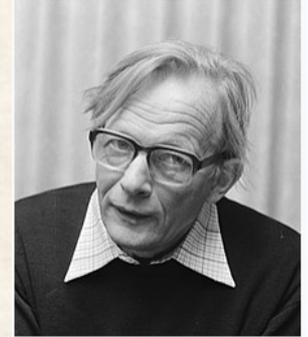
Draine (2011)

HI линия 21 см

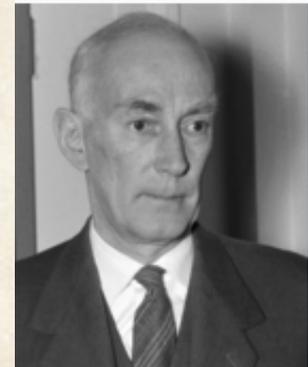
- Переход между подуровнями сверхтонкой структуры $1^2S_{1/2}$
- $\lambda=21.11$ см $\nu=1420.40$ МГц
- Вероятность перехода $A_{10}=2.9 \cdot 10^{-15}$ с⁻¹ (раз в 11 млн. лет)
- Предсказание: Ван де Хюлст (1944), И.С. Шкловский (1949)
- Обнаружение: 1951 г (Ewen & Purcell, Muller & Oort)



Hendrik C. van de Hulst



Jan Oort



Шкловский «Из истории развития радиоастрономии в СССР»

Масса HI: линейная зависимость от потока!

Возбуждение – в основном за счёт столкновений нейтральных атомов

Объёмный к-т излучения:

$$j_\nu = \frac{h\nu_{10}}{4\pi} n_1 A_{10} \phi(\nu), \quad n_1 = n_H/4,$$

В оптически тонкой среде:
("колонковая плотность")

$$I_\nu \approx \int j_\nu dl, \quad I_\nu \sim N_H = \int n_H dl$$

$$1 \text{ Ян} = 10^{-23} \text{ (эрг/с)/(см}^2 \cdot \text{Гц)}$$

В наблюдаемых величинах:

$$M_{HI} [M_\odot] = 236 D [\text{Mpc}]^2 \int F(\nu) [\text{mJy}] d\nu$$

На практике профиль линии чаще показывают в шкале скоростей $F(v)$:

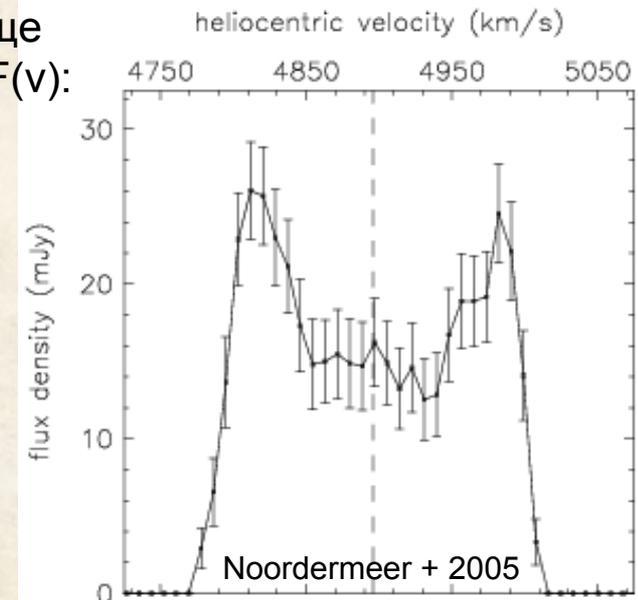
Характерные параметры HI в галактиках:

Облака: $T \sim 100 \text{ K}$, $n_H \sim 1 \text{ cm}^{-3}$

Межоблачный газ: $T \sim 5000 \text{ K}$, $n_H \sim 0.1 \text{ cm}^{-3}$

Учёт вклада тяжелых элементов (гелий и др.):

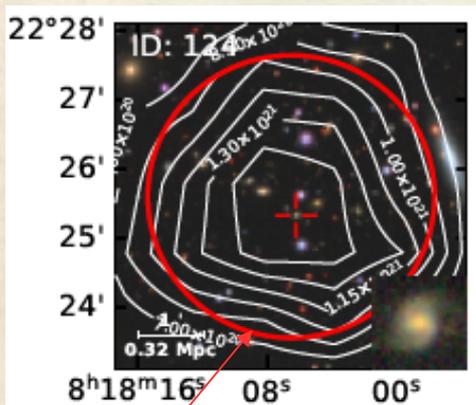
$$M(\text{gas}) = 1.44 M(\text{HI})$$



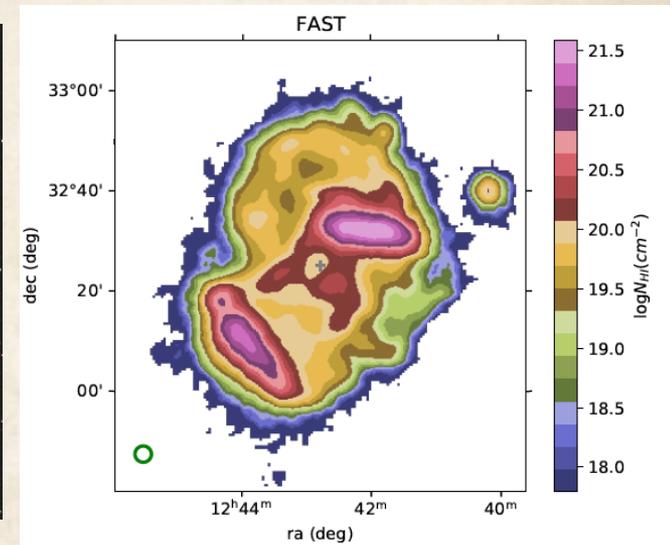
Проблема углового разрешения

$$\theta(\text{rad}) \approx 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad \theta(\text{HI}) \approx 1.22 * 206265'' \frac{21 \text{ cm}}{D} \approx \frac{528''(1+z)}{D/100\text{m}}$$

- Одиночный радиотелескоп позволяет картировать в HI только самые близкие галактики их группы
- “Путаница” для далеких галактик с малыми угловыми размерами + слабость потока. Пока самые далекие галактики в линии 21 см это $z=0.38$ (VLT), а в случае линзирования – $z=1.3$ (GMRT)



FAST beam
 $z=0.39$



Xi et al., submitted

Wang et al 2023: beam=3.2' / 7 kpc

Интерферометры: JVLТ, WSRT, GMRT, MeerKAT

На порядки более высокое угловое разрешение

Karl G. Jansky Very Large Array (JVLA)
28*25 м



Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT) 30* 40 м



Karoo Array Telescope in Meerkat National Park (MeerKAT, 64*13.5 м)



Но даже для близких галактик разрешение редко лучше 5", чаще – 20-60'

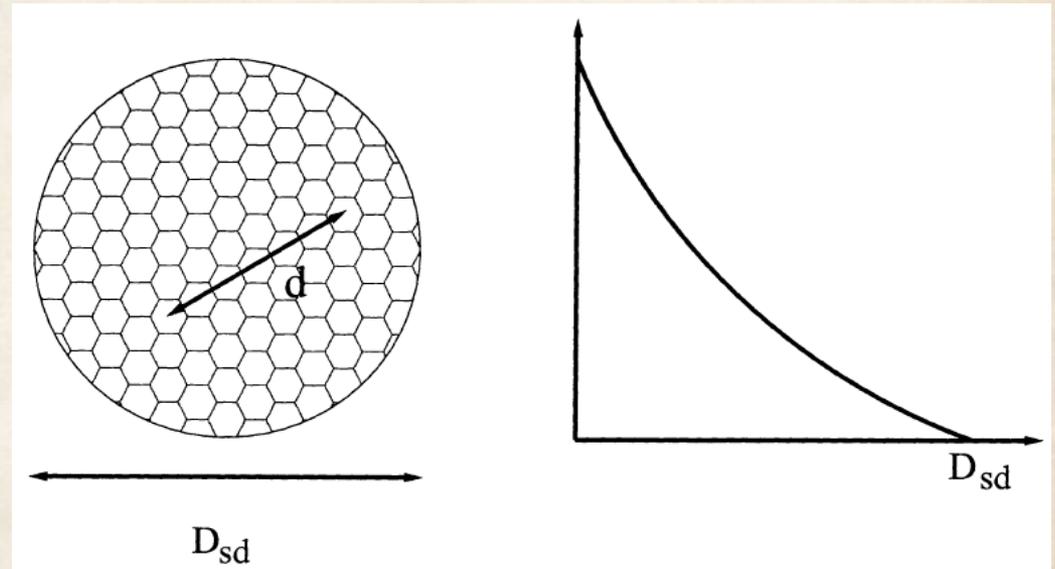
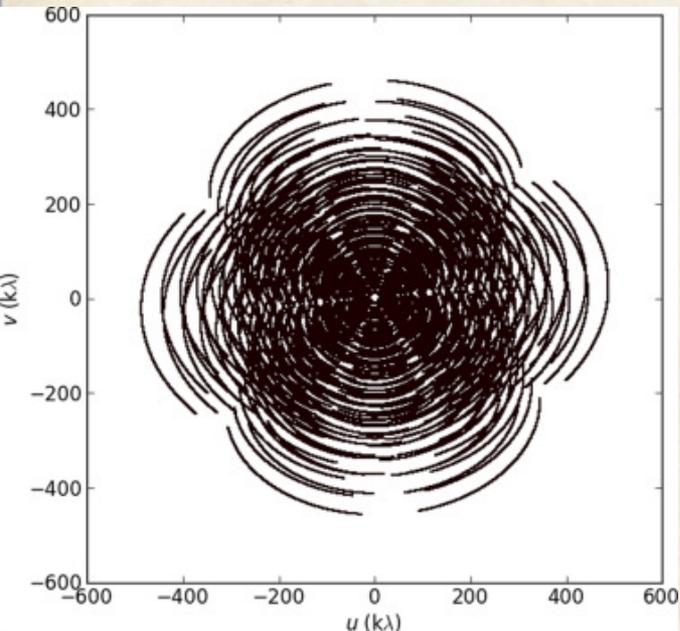
Т.е. сильно ниже, чем в оптике.

Проблемы интерферометров: диффузный газ

С незаполненной апертурой сложно детектировать диффузный газ (структуры с низкой пространственной частотой):

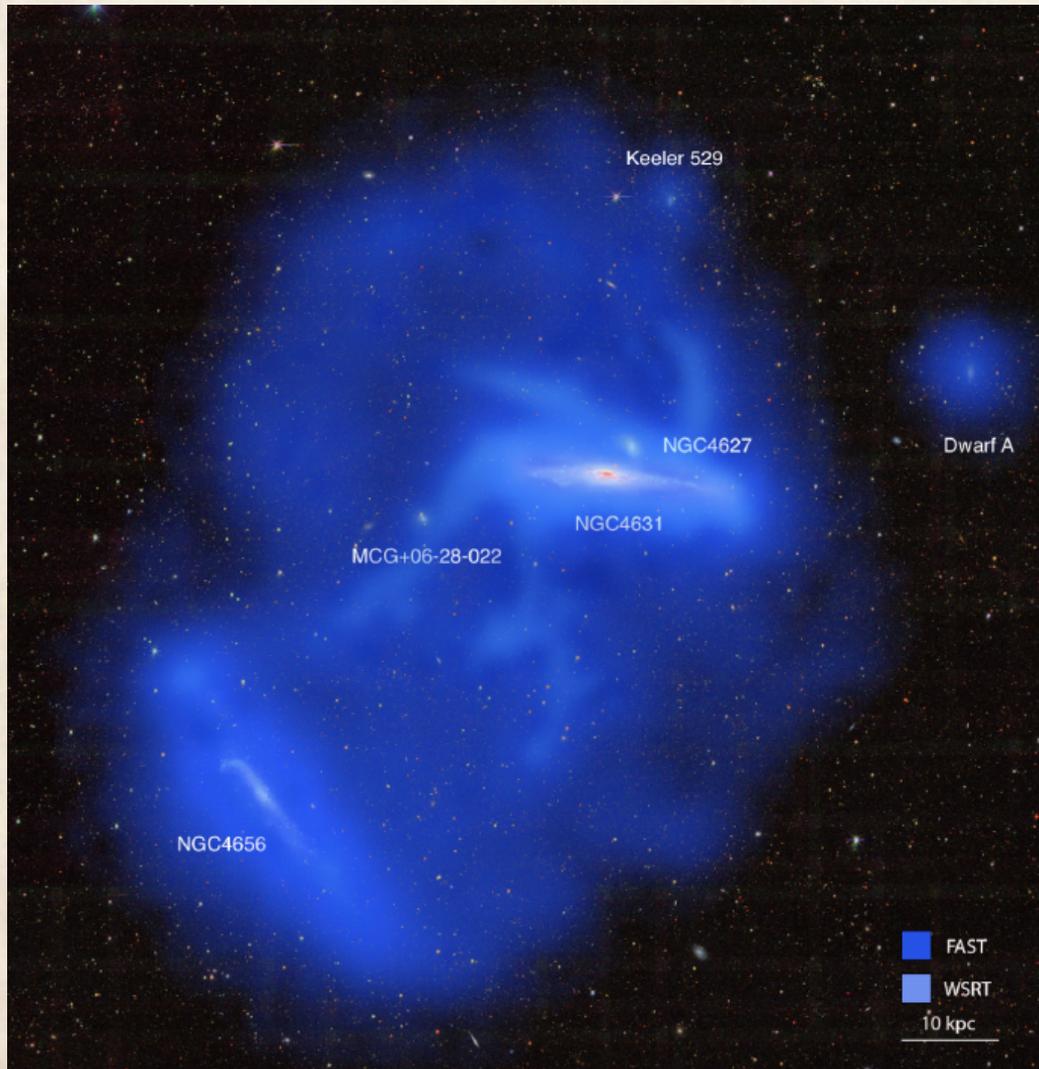
Плоскость пространственных частот (u, w) заполняется неравномерно, поэтому обратное преобразование Фурье, дающее распределение радиояркости, выполняется с ограничениями

В то время, как одиночная антенна может быть разбита на множество “мелких антенн”

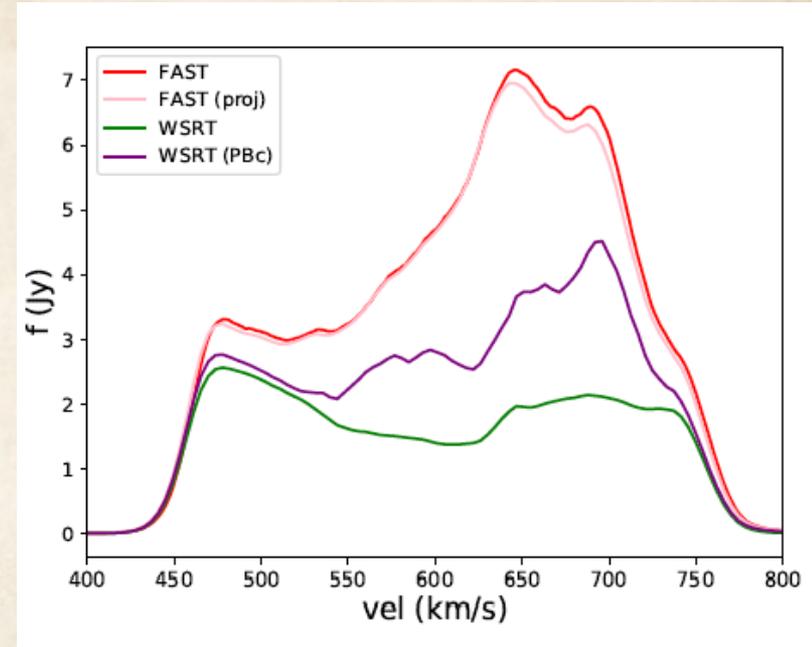


Stanimirovic 2002

Проблемы интерферометров: диффузный газ



Интегральный спектр с интерферометра WSRT и single-dish FAST



Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope

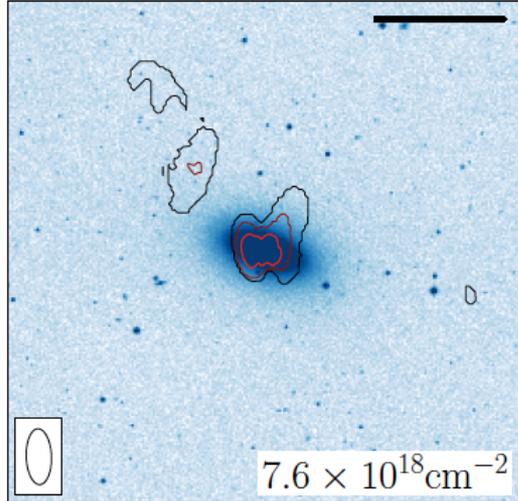


Wang et al 2023

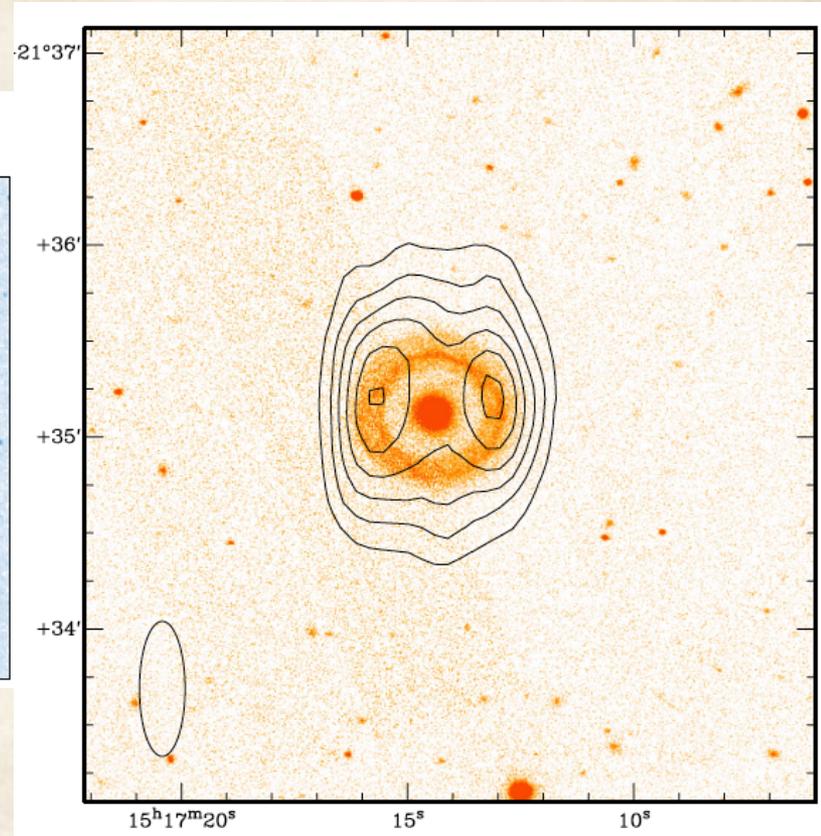
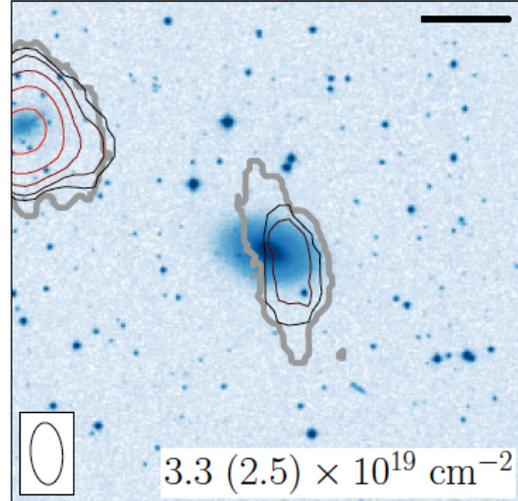
Проблемы интерферометров

Синтезированная диаграмма (beam) – часто вытянутая, зависит от проекции базы на картинную плоскость

NGC 3489 (*d*)

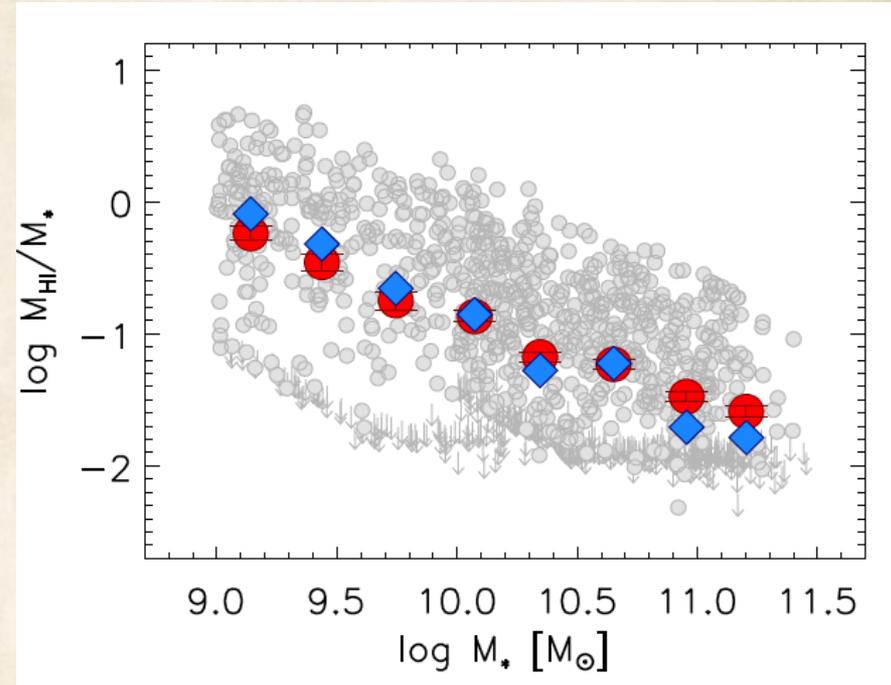
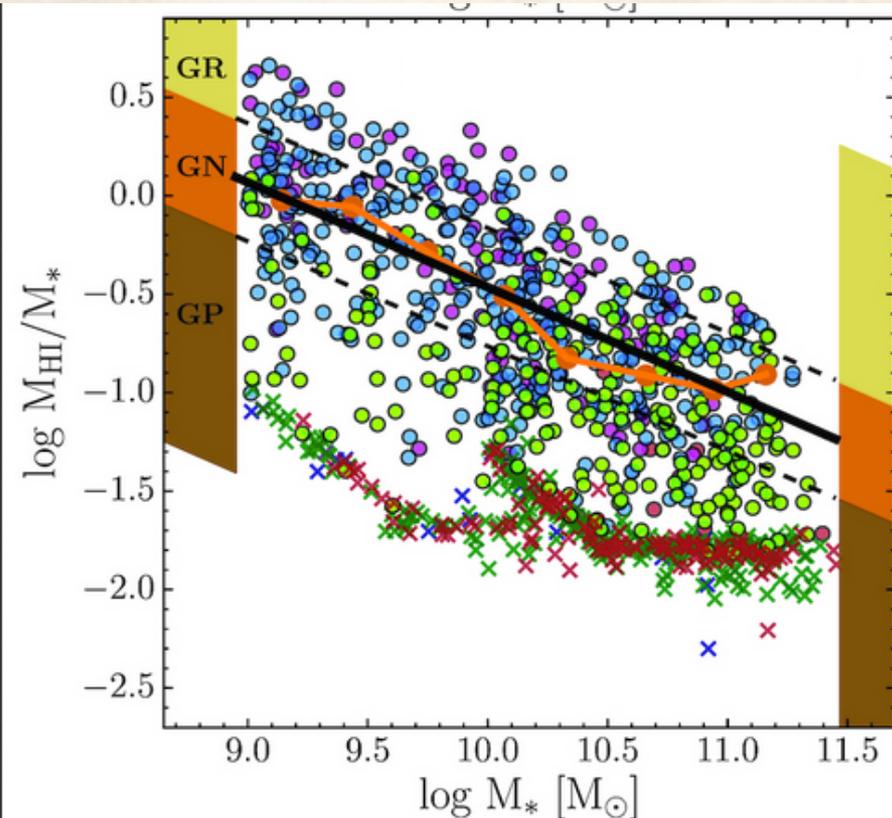


NGC 7280 (*u*)



WSRT maps:
Serra + 2011, Brosch + 2013

Содержание HI: зависимость от M^*

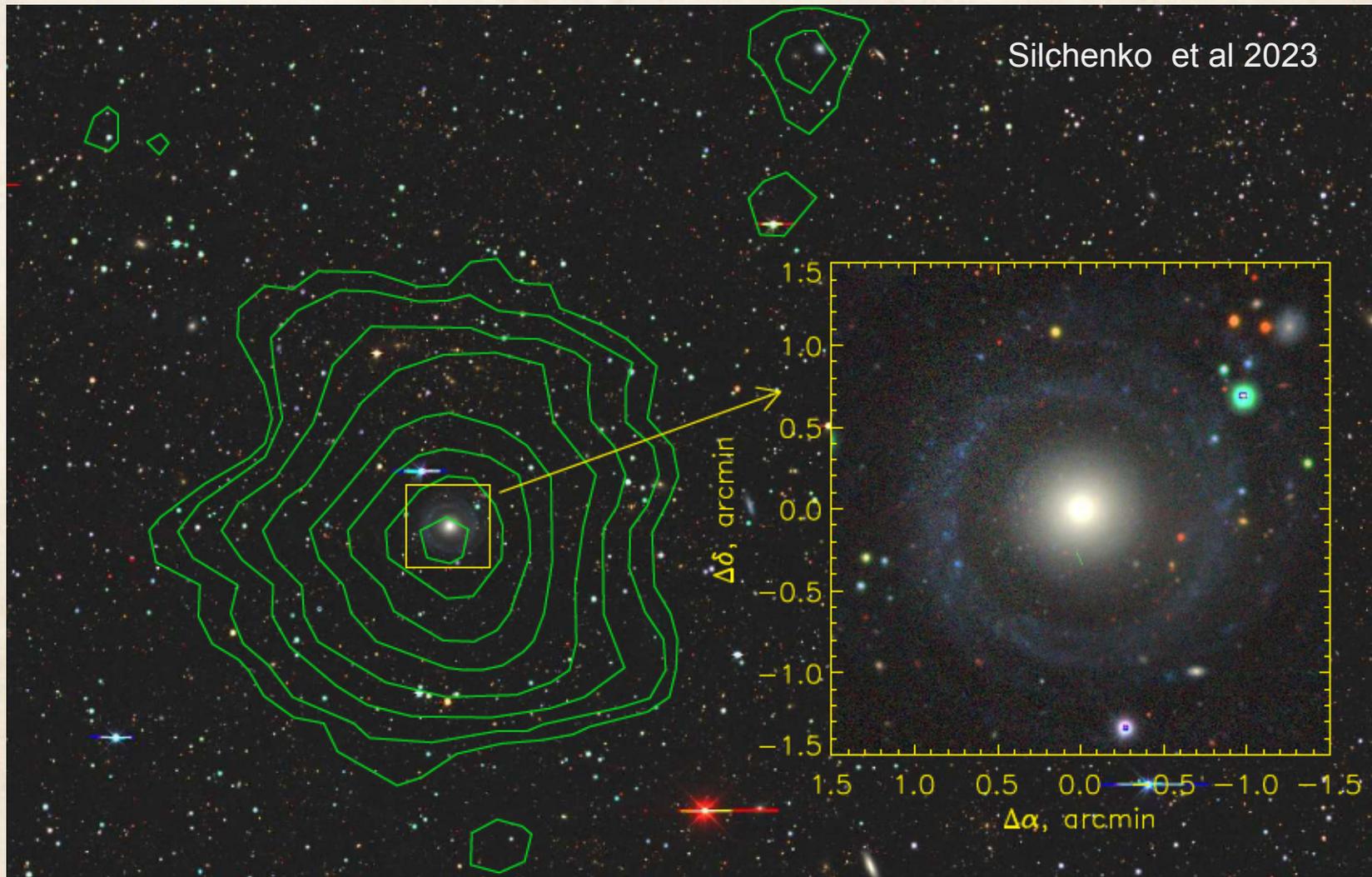


Доля HI выше в маломассивных галактиках (там же – выше sSFR, см. следующие лекции)
Но и разброс большой.



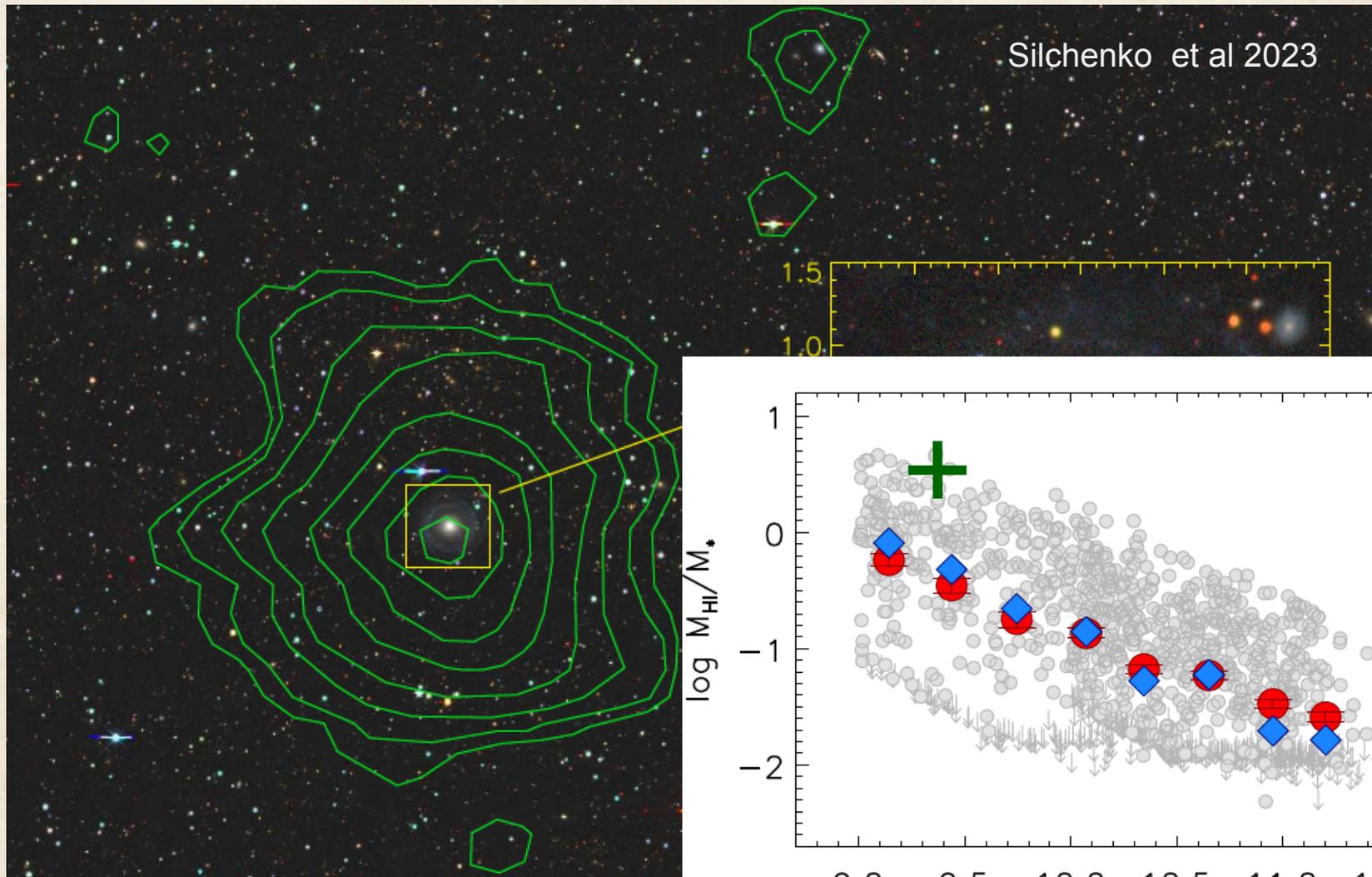
xGASS, 1179 galaxies
(Arecibo, Catinella + 2018; Janowiecki + 2020)

Внешние диски HI: UGC 4599 с $M^* < M(\text{HI})$, 100 kpc

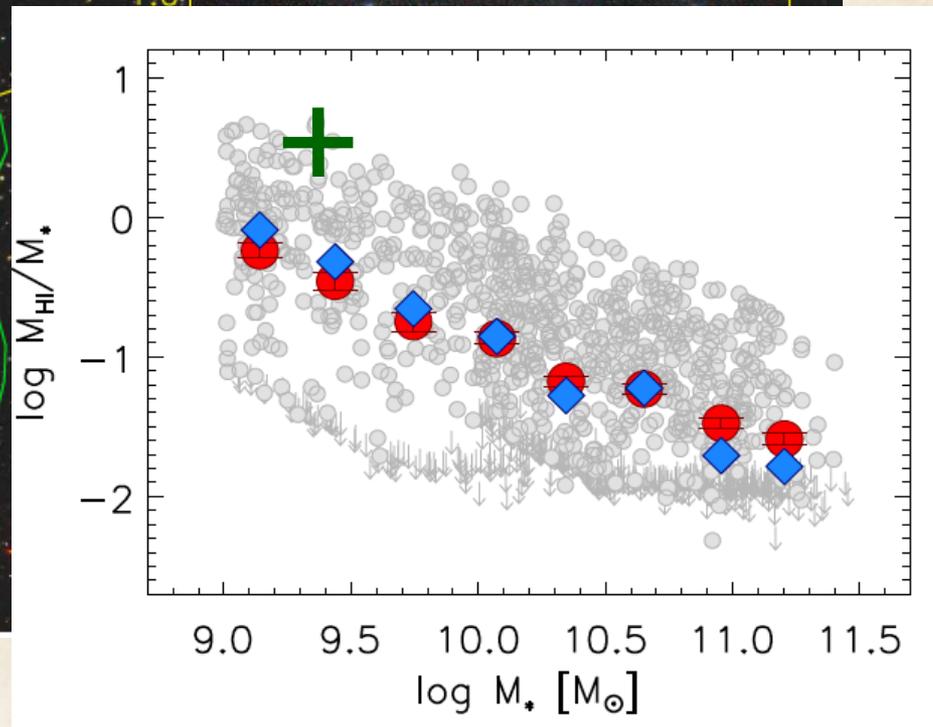


$M^* = 4 \cdot 10^9 M_\odot$
 $M(\text{HI}) = 4 \cdot 10^{10} M_\odot$

Внешние диски HI: UGC 4599 с $M^* < M(\text{HI})$, 100 kpc

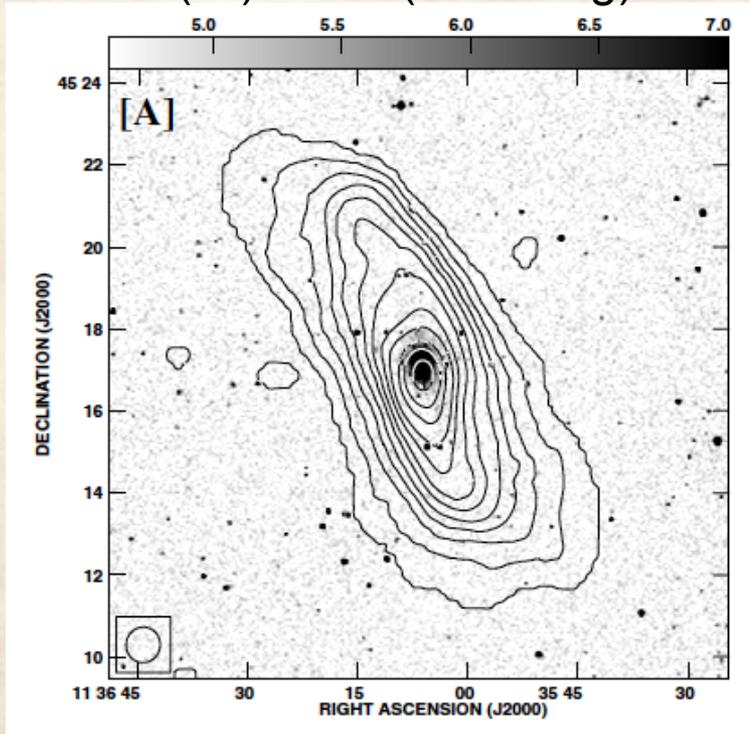


$M^* = 4 \cdot 10^9 M_\odot$
 $M(\text{HI}) = 4 \cdot 10^{10} M_\odot$

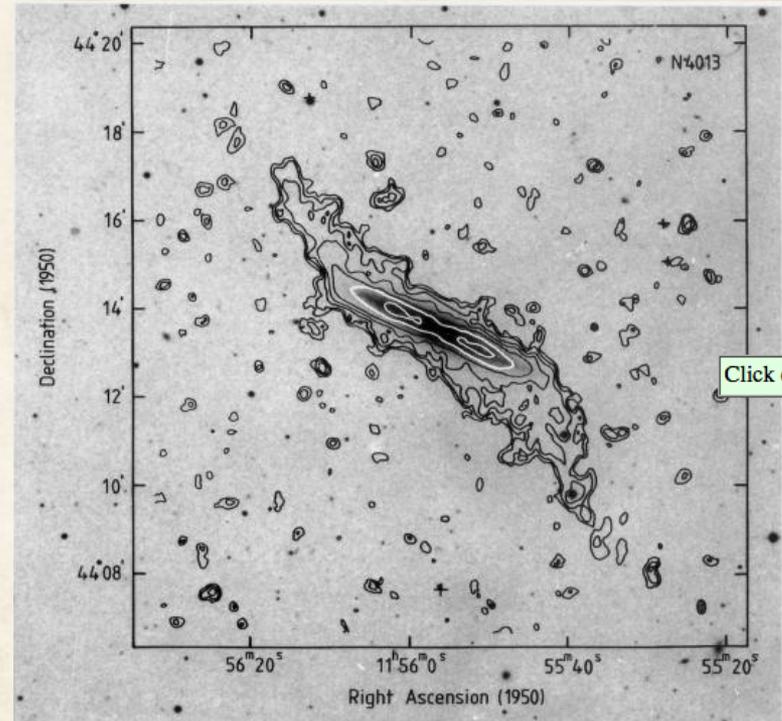


Внешние диски: гравитационно устойчивы, но изогнуты

NGC 3741 (Begun + 2005):
 $D(\text{HI})=8.3$ $D(26.5 \text{ mag})$



NGC 4013 (Bottema 1995)



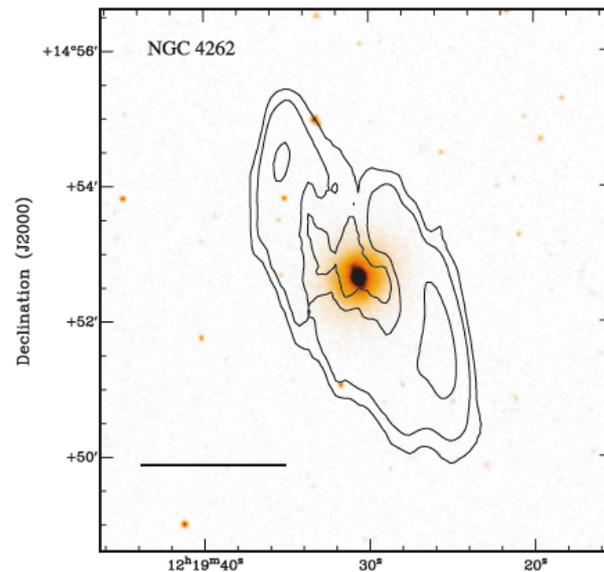
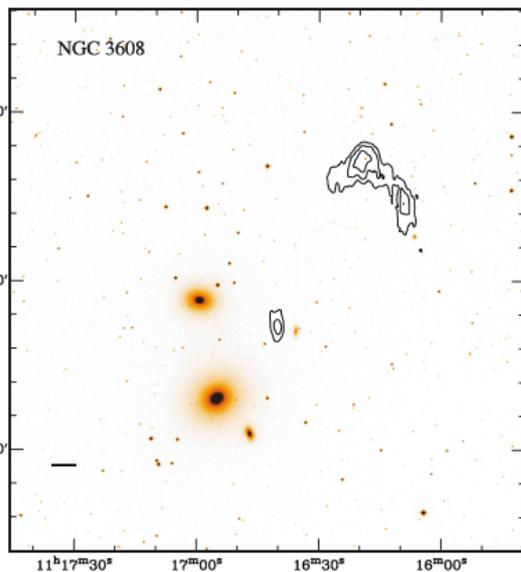
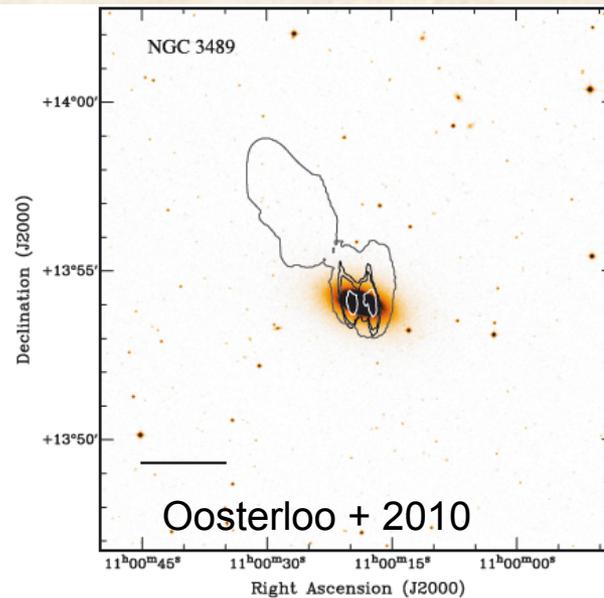
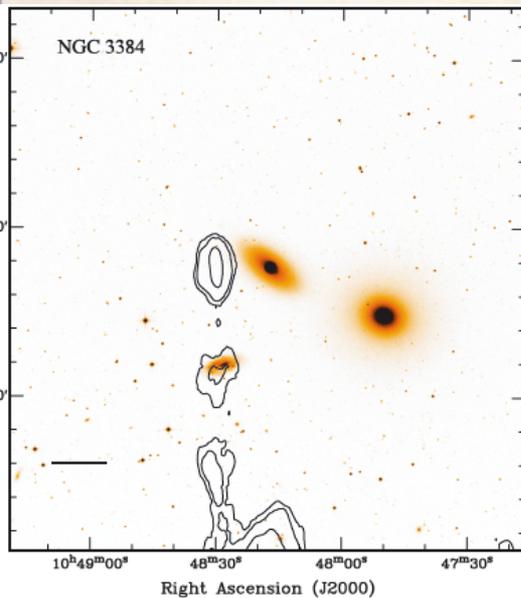
Изгибы (Warps):

Широко распространены (включая Млечный Путь)

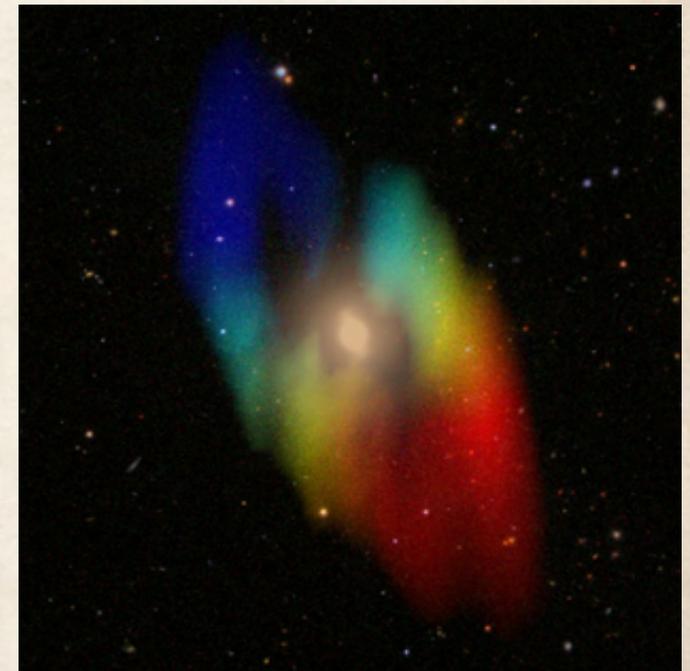
Важна гравитация гало (моды возмущений)

Могут индуцироваться внешним притоком газа (аккрецией)

Внешние облака - аккреция газа галактиками



- Наблюдается в галактиках разных типов, включая S0
- Проблема разделения аккреция/истечение
- Возможно формирование динамически устойчивых полярных структур



Khoperskov + 2014

Молекулярный газ: вращательные переходы CO

Энергия молекулы: $E = E_{el} + E_{vib} + E_{rot}$

Переходы между состояниями:

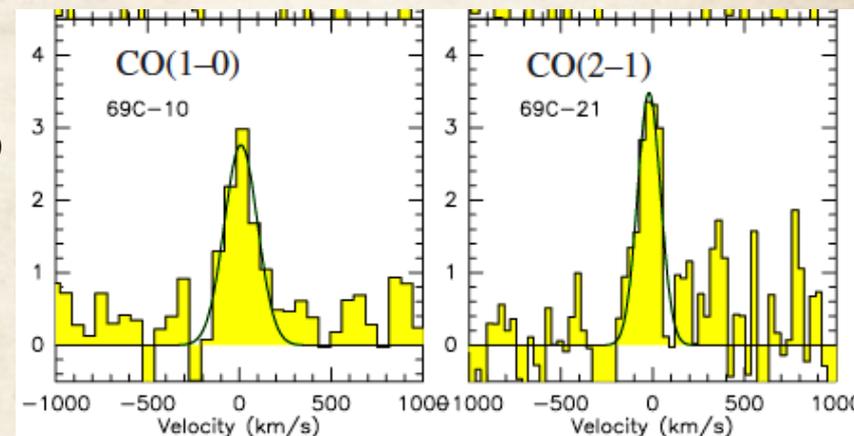
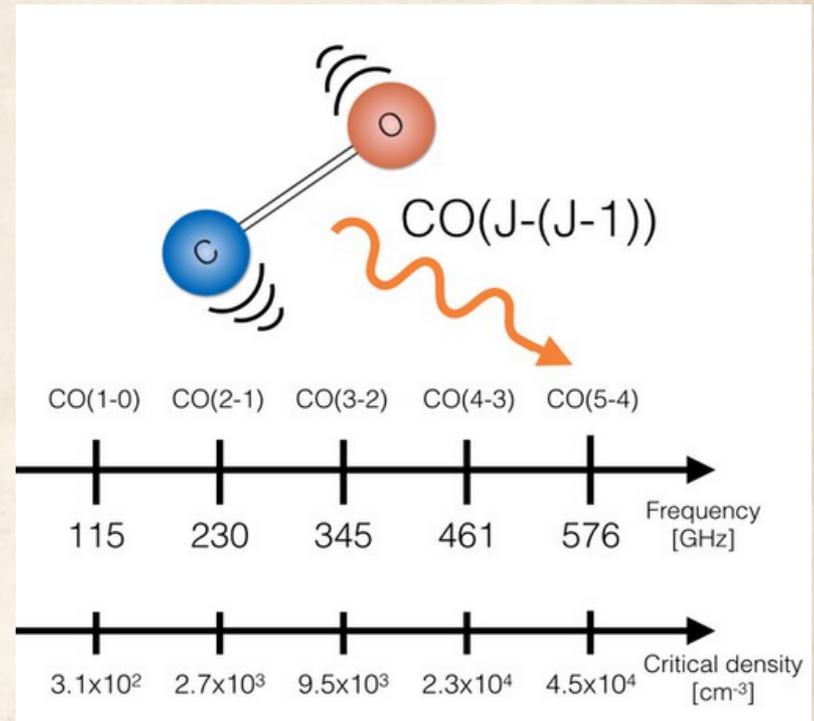
- Электронными E_{el} : оптика, УФ
- Вращательными: E_{vib} : ближний ИК
- Колебательными E_{rot} : дальний ИК, радио
- J – вращательное квантовое число

Столкновительное возбуждение уровней, заселенность зависит от плотности, линия наблюдается если $n > n_c$

CO($J=1-0$) – 2.6 мм / 115.3 ГГц / $n_c = 310 \text{ cm}^{-3}$

=>
на таком же телескопе угловое разрешение в CO будет в 80 раз лучше, чем в HI.
В реальности, для мм наблюдений обычно используют специализированные телескопы (требование к форме поверхности и т.д.)

Combes + 2013



Переход к массе H_2 , X-фактор

CO - вторая по обилию молекула после H_2 , но $n(H_2) \sim 10^4 (n_{CO})$
Наблюдаем излучение только 1/10000 от всех молекул в облаке.

Поток обычно выражают в W [К км/с], светимость L [К км/с пк²]:

$$L_{CO} = 23.5 I_{CO} \Omega_B \frac{D_L^2}{(1+z)^3} \text{ К км с}^{-1} \text{ пк}^2,$$

where I_{CO} is the intensity in К км с^{-1} , Ω_B the area of the main beam in square arcseconds, and D_L the luminosity distance in Мпс.

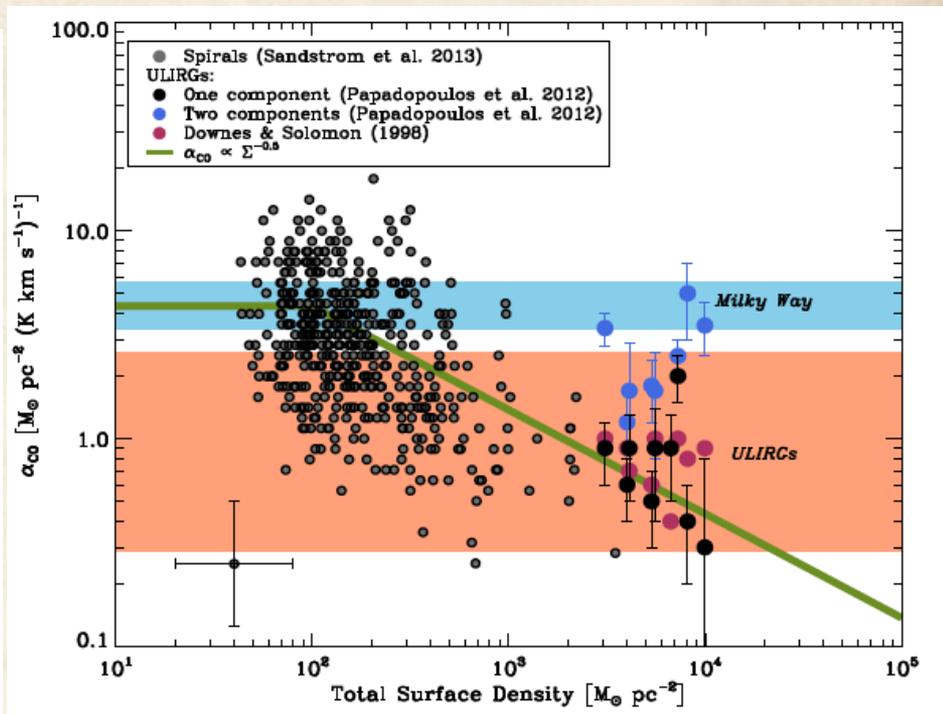
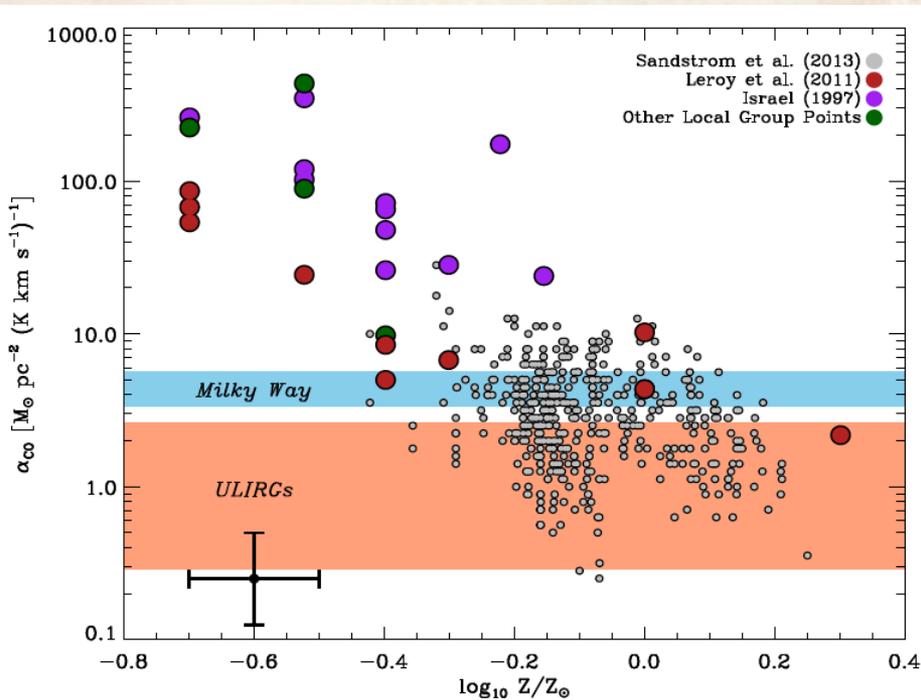
$$N(H_2) = X_{CO} W(^{12}C^{16}O J = 1 \rightarrow 0),$$

$$M_{mol} = \alpha_{CO} L_{CO}$$

“CO - to - H_2 conversion factor”, для Млечного Пути:

$$X_{CO} = 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}, \quad \alpha_{CO} = 4.3 M_{\odot}$$

X_{CO} зависит и от плотности и от металличности

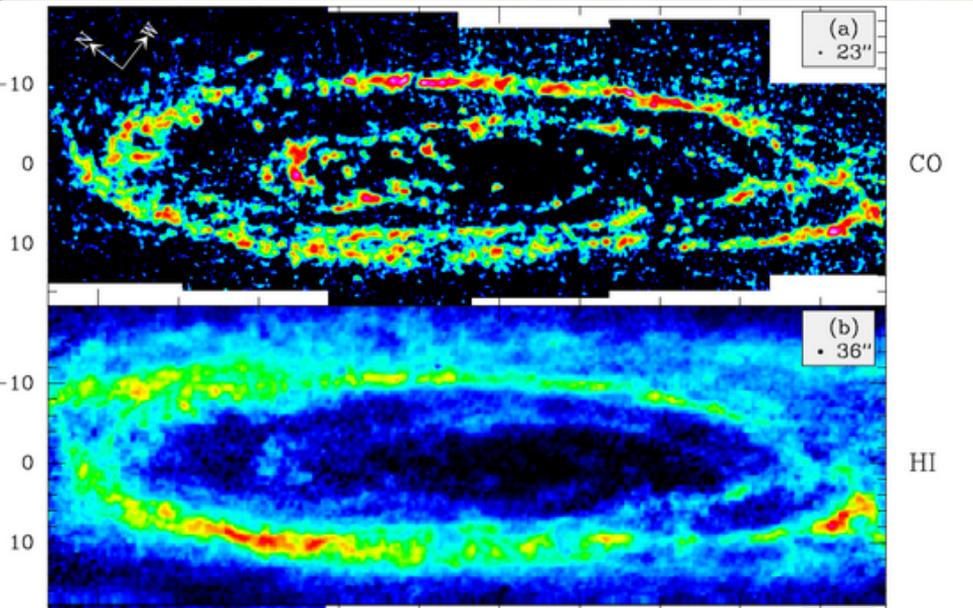


Bolatto + 2013

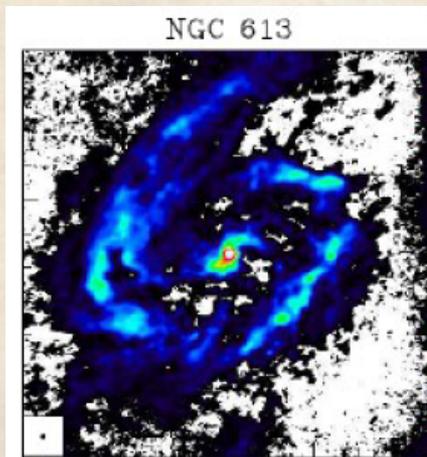
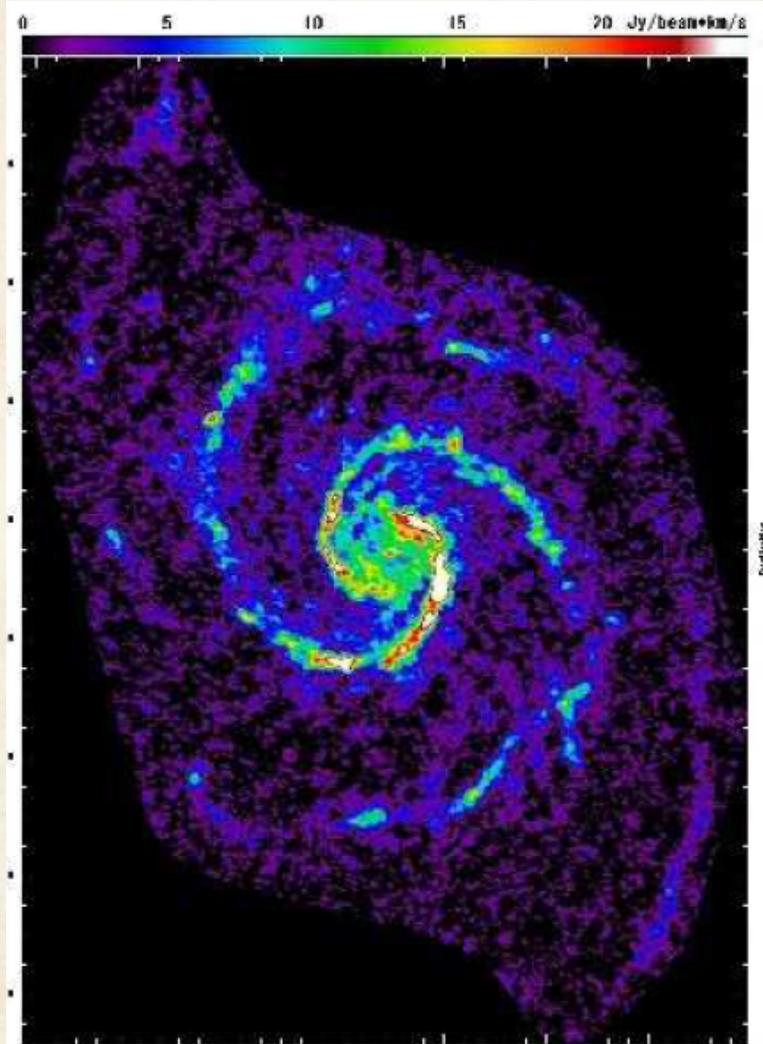
Методы оценки: вириальная масса облаков, через пылевое поглощение и т.д.

Плотный газ: спирали, кольца

M31 (IRAM, Nieten+2006)

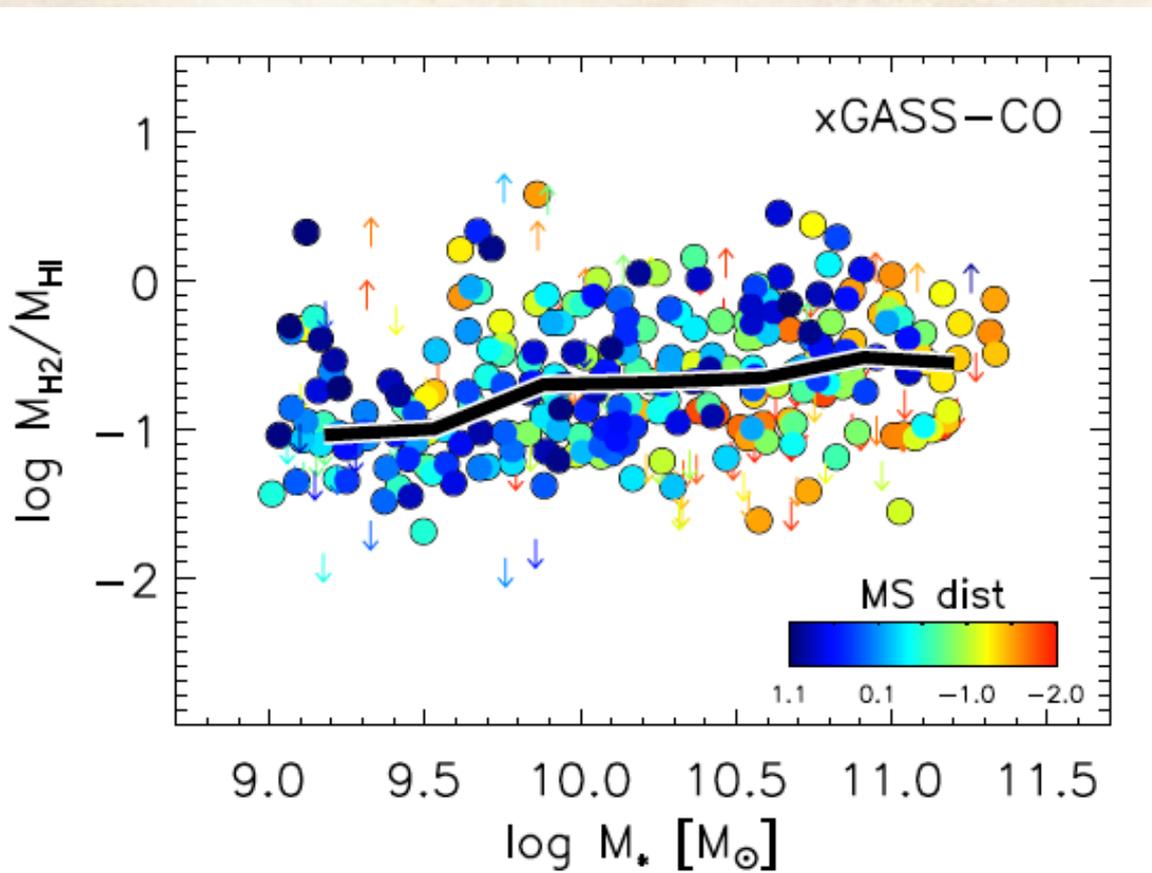


M51 (CARMA 6*10m +9*6m, Koda+2009)



(ALMA, Combes+2018)

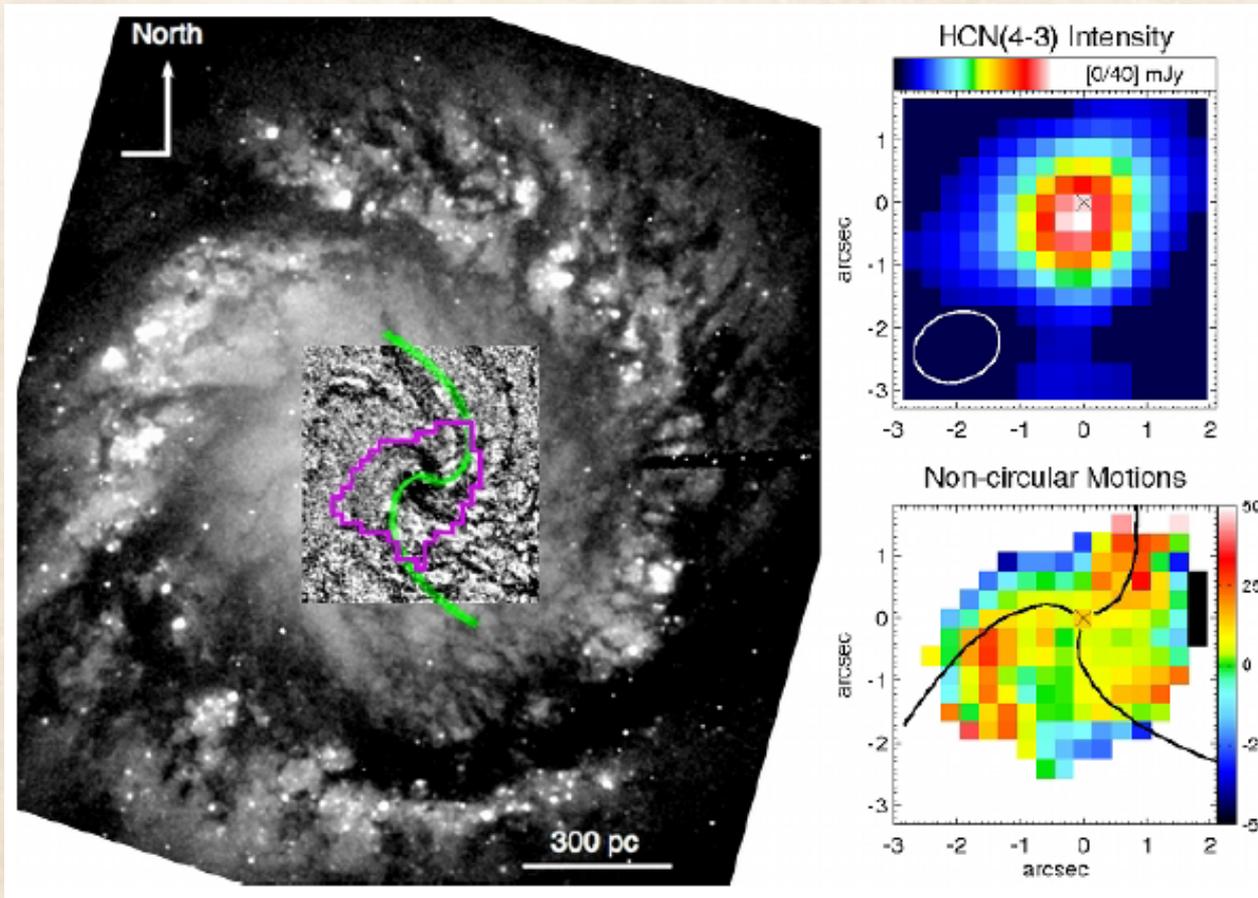
Относительное содержание $M(\text{H}_2)/M(\text{HI})$



- В среднем суммарная масса молекулярного газа на порядок ниже атомарного
- Но заметная разница в радиальном распределении

xGASS, 1179 galaxies
(Arecibo, Catinella + 2018)

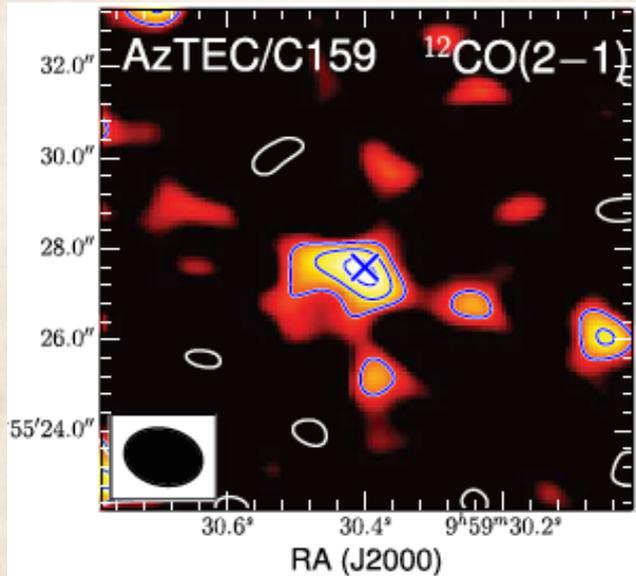
Другие переходы и молекулы: HCN, HCO...



Fathi +2013, ALMA
HCN- очень плотный газ

$n(\text{H}_2) \sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$

Большие z (AzTEC/C159, $z=4.6$)



+ [CII] 158 μm

Оценка X-фактора – близко к локальному!

$$M_{\text{H}_2}(\alpha_{\text{CO}}/4.3) = (1.5 \pm 0.3) \times 10^{11} M_{\odot}$$

$$M_{\text{H}_2}/M_{\star} = 3.3 \pm 0.7.$$

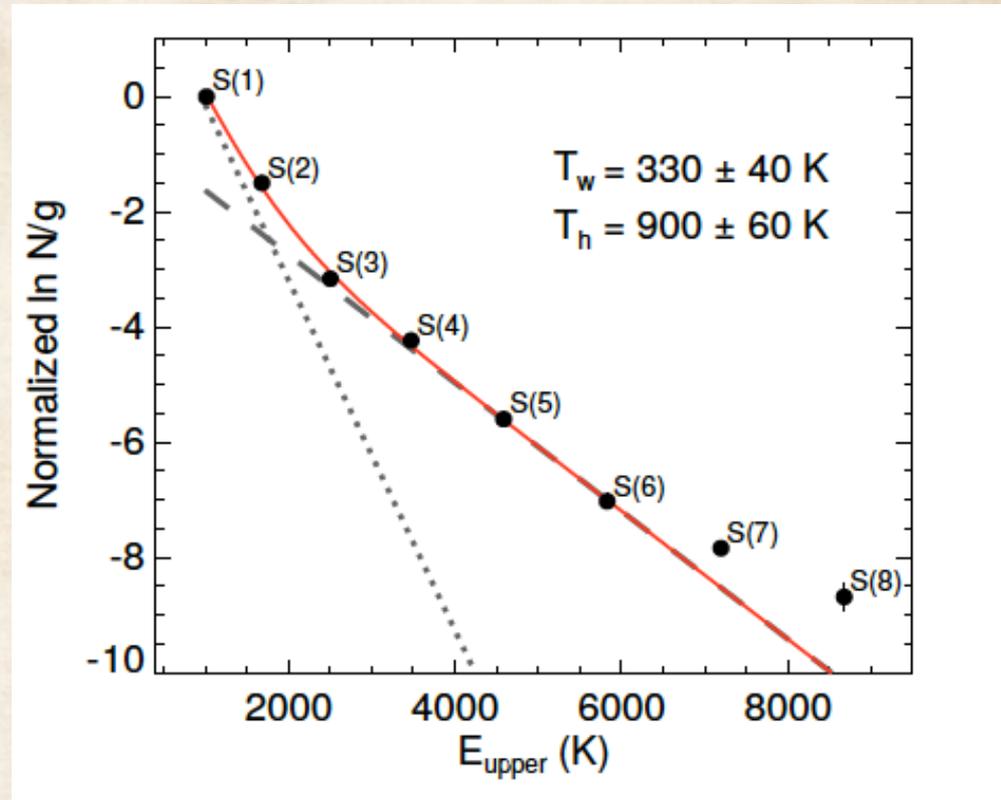
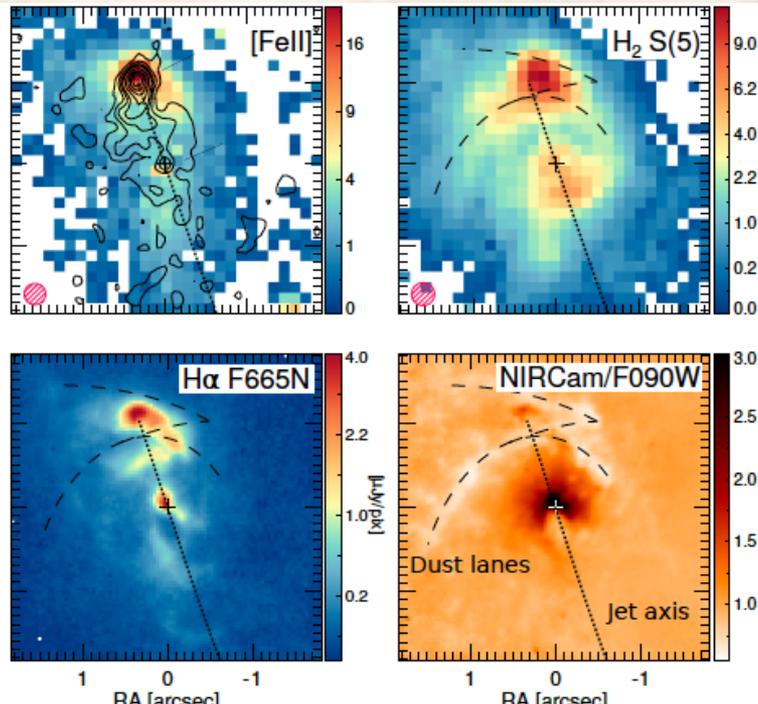


Jiménez-Andrade +2018

ALMA, 66*12 м, 150 м – 16 км

ИК диапазон: H_2 в эмиссии (S(8)-S(1)) 5-17 μm

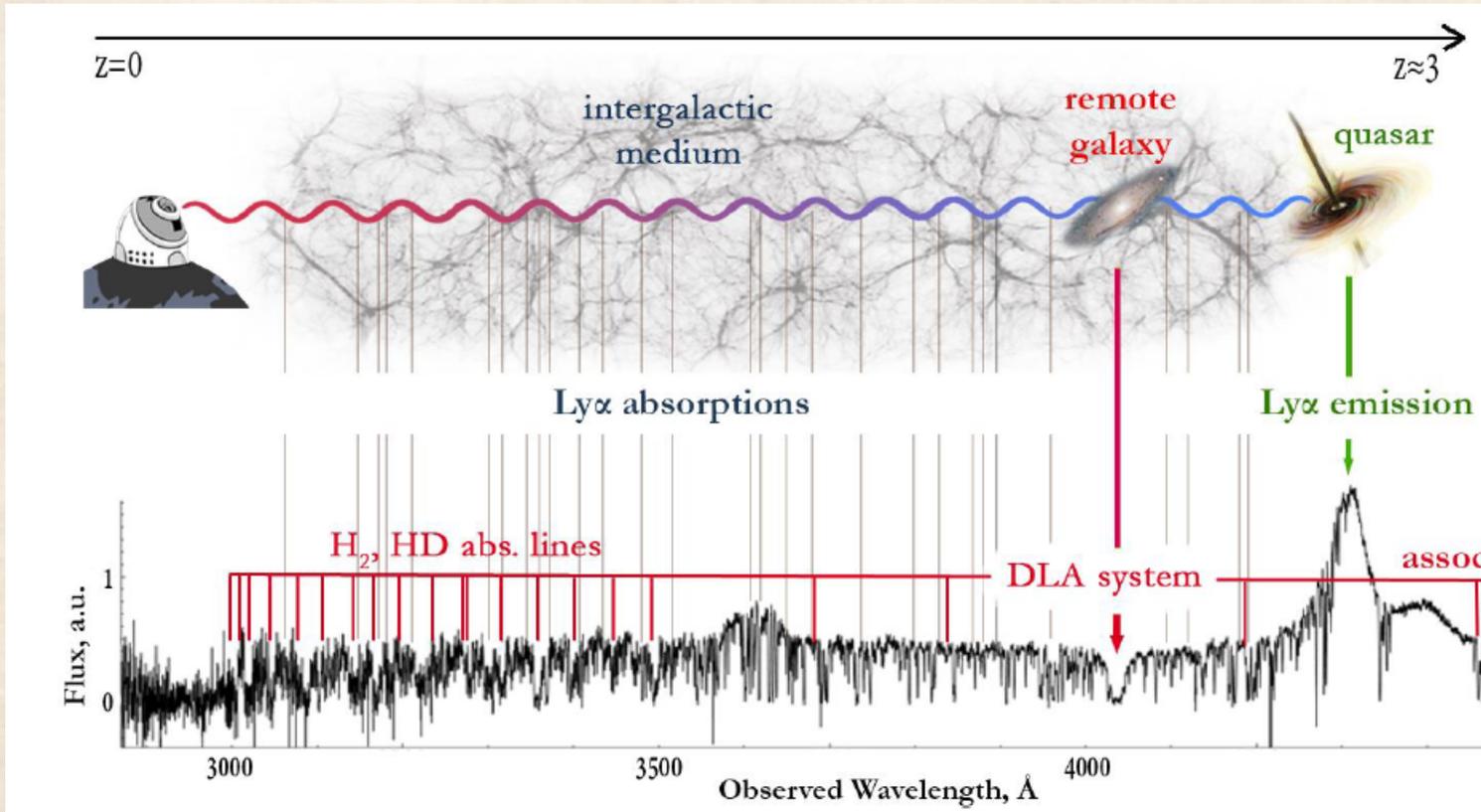
NGC 7319 (JWST, Pereira-Santaella +2023) Измерение температуры



Вращательные переходы молекулы

$$n_{H_2} = 10^2 \text{ to } 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

Молекулы "на просвет": HD, H₂

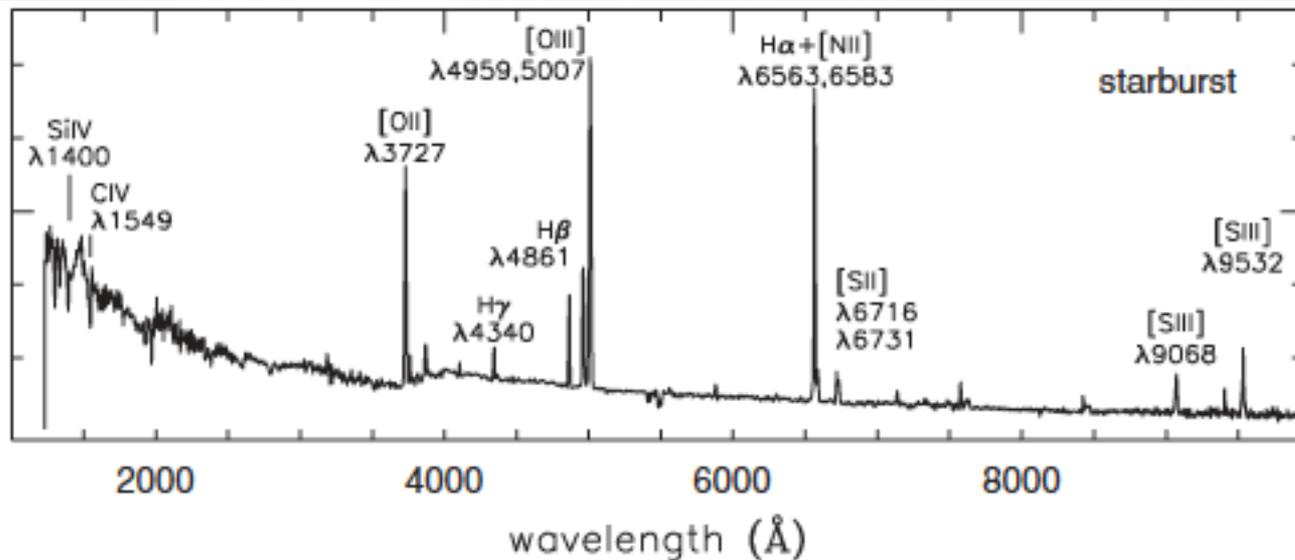


Balashev + 2019

Полосы Лаймана и Вернера :
УФ-спектрограф COS/HST ($z=0-2$)
Оптика ($z=2-3$)
Холодный межгалактический газ ($T\sim 70$ K)

$\lambda \lesssim 1150\text{\AA}$ (Лайман)
 $\lambda \lesssim 1020\text{\AA}$ (Вернер)

Ионизованный газ: диагностика

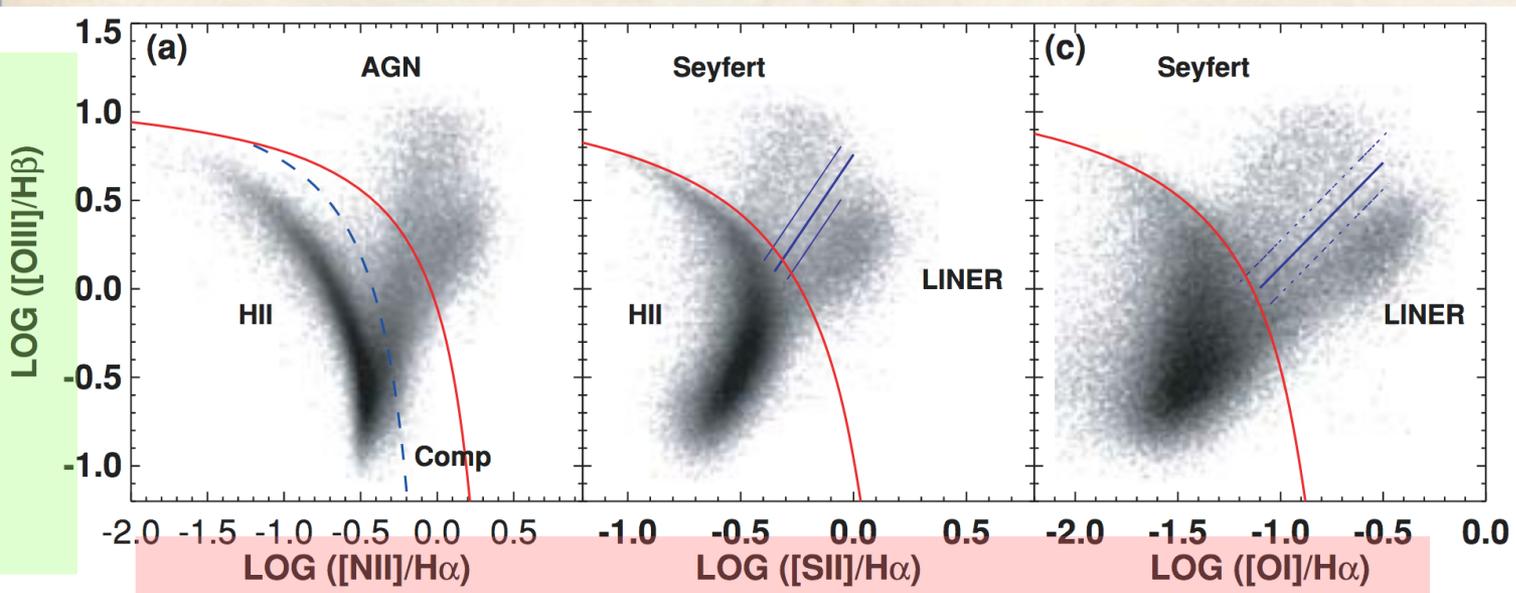
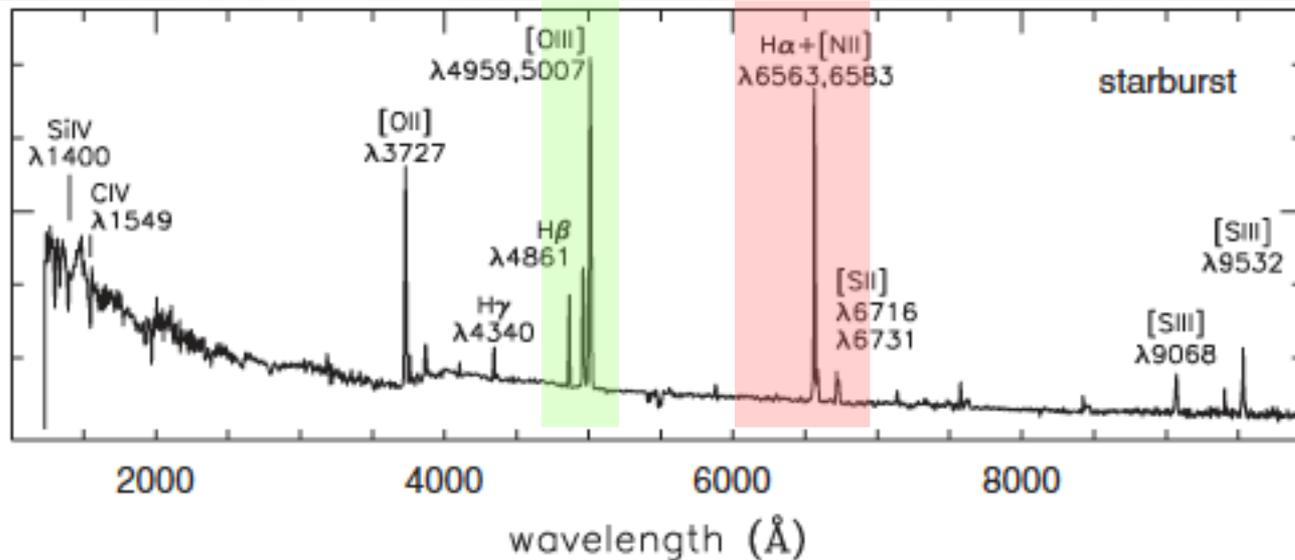


Рекомбинационные линии водорода: H α , H β

Запрещенные линии ионов: [O I], [O II], [O III], [S II], [N II]

Разрешенные линии ионов: C IV, Si IV,

Ионизованный газ: диагностика

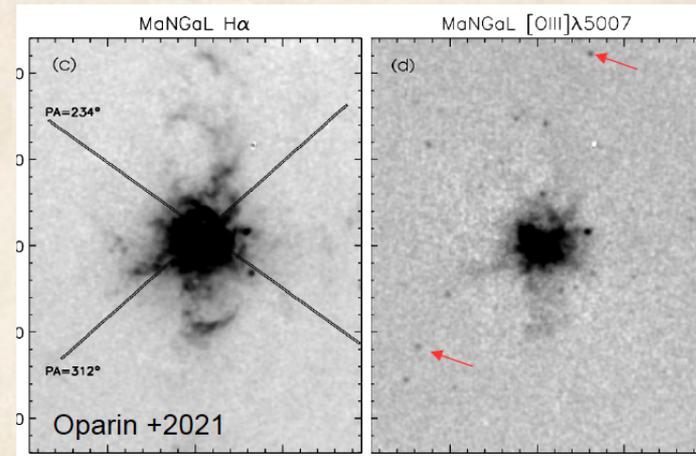


'BPT-diagrams' (Baldwin, Phillips & Terlevich, 1981)

Методы наблюдений (оптика, ИК, УФ)

- Изображения в линиях

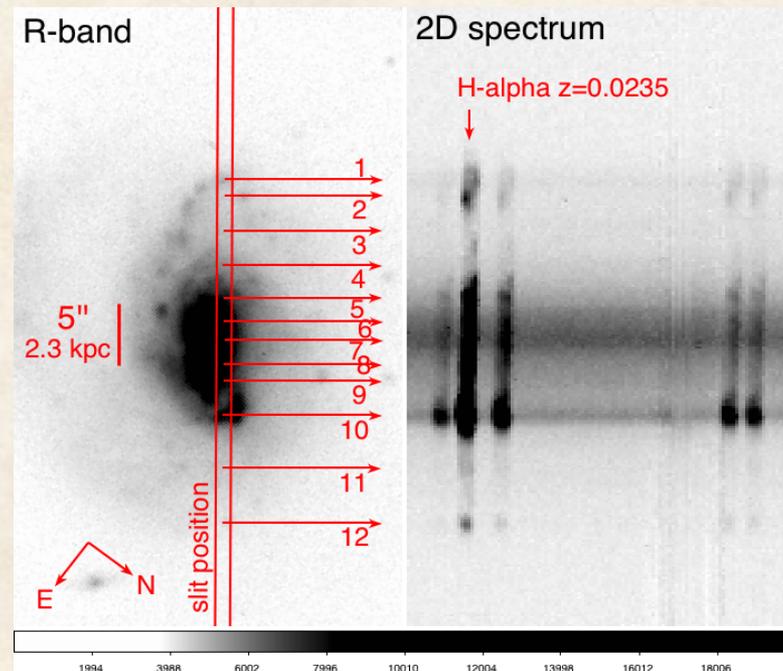
Лекция 1:



- Спектроскопия с длинной щелью и световолокном

- Панорамная (3D) спектроскопия

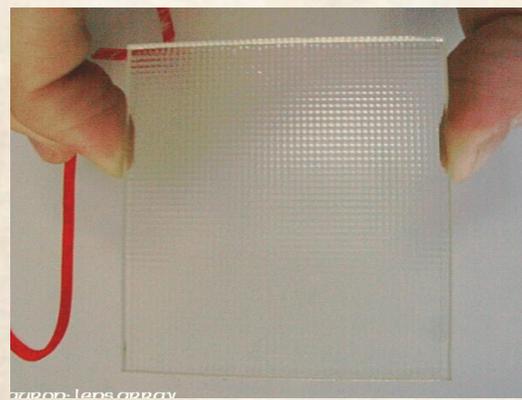
Моисеев А.В. курс лекций
«Методы панорамной спектроскопии»
(там же, где и текущий)



Integral field spectrographs (IFS)

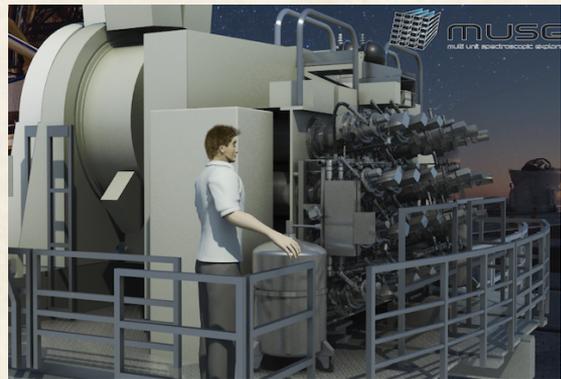
SAURON (4.2m WHT):

Lenslet array
FOV: 33x41"
(35 x 44 spaxels)
Sampling: 0.94"



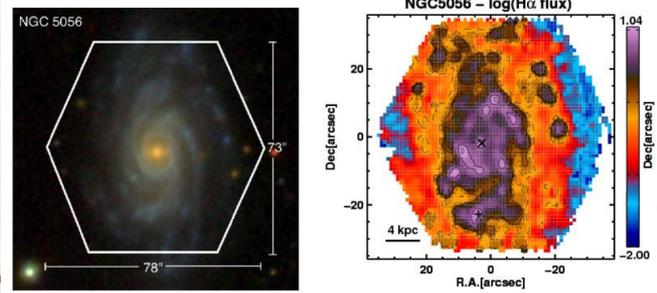
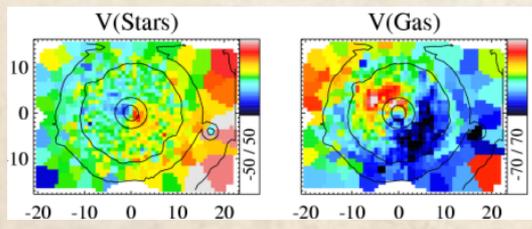
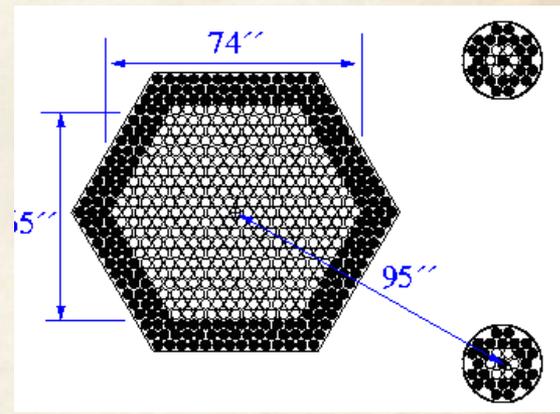
MUSE (8m VLT):

Set of slicers
FOV: 60"
(300 x 300 spaxels)
Sampling: 0.2"

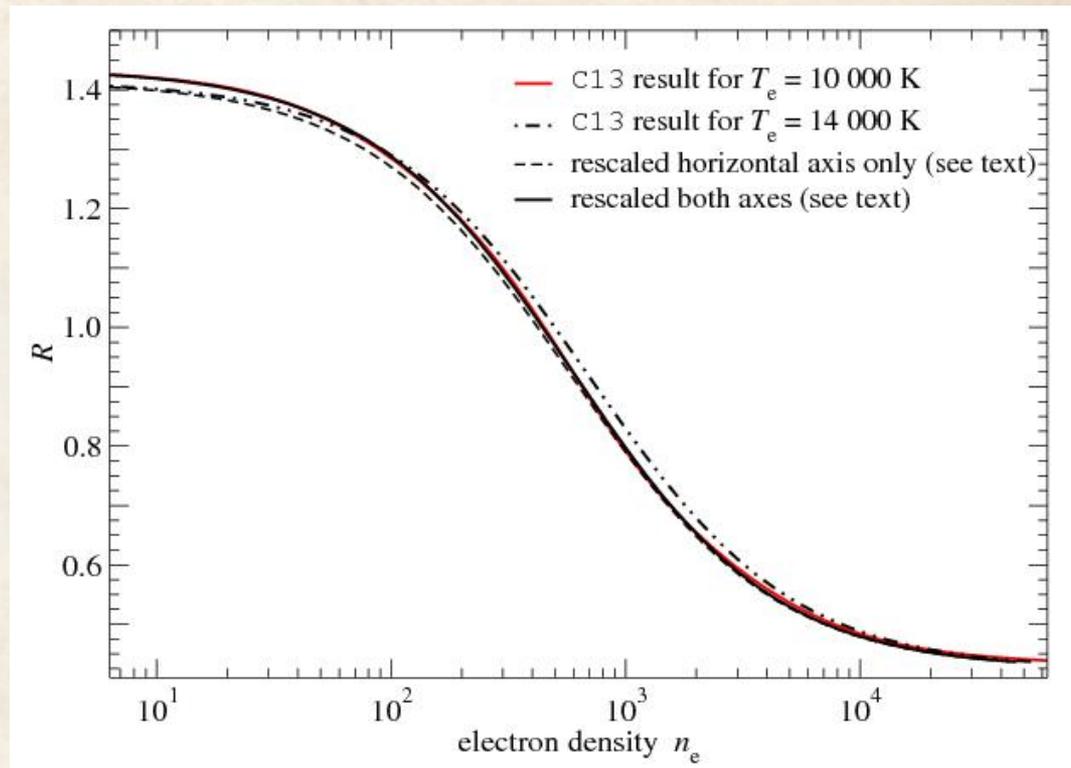
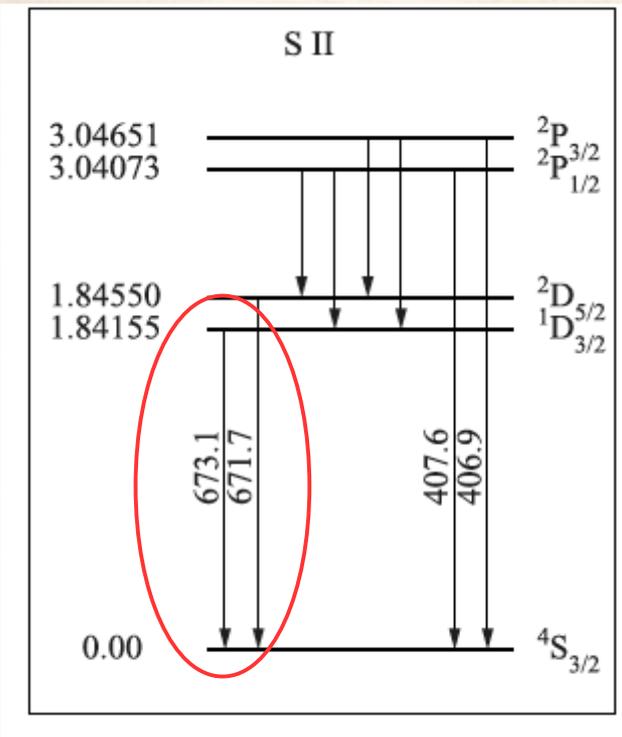


PPAK (3.6m CalarAlto):

fibers bundle (246 fibers)
FOV: 70"
(21 x 21 spaxels)
Sampling: 2.7"



Электронная плотность (концентрация) по [SII]



$$R = I(6716 \text{ \AA}) / I(6732 \text{ \AA})$$

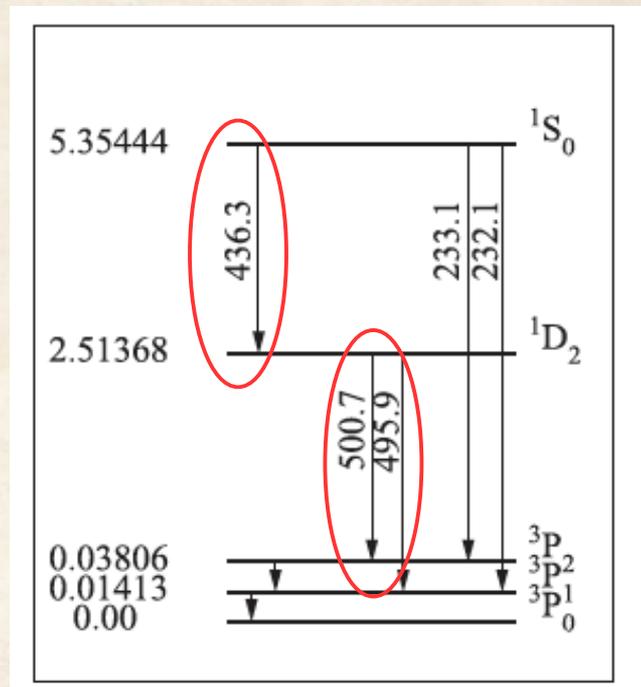
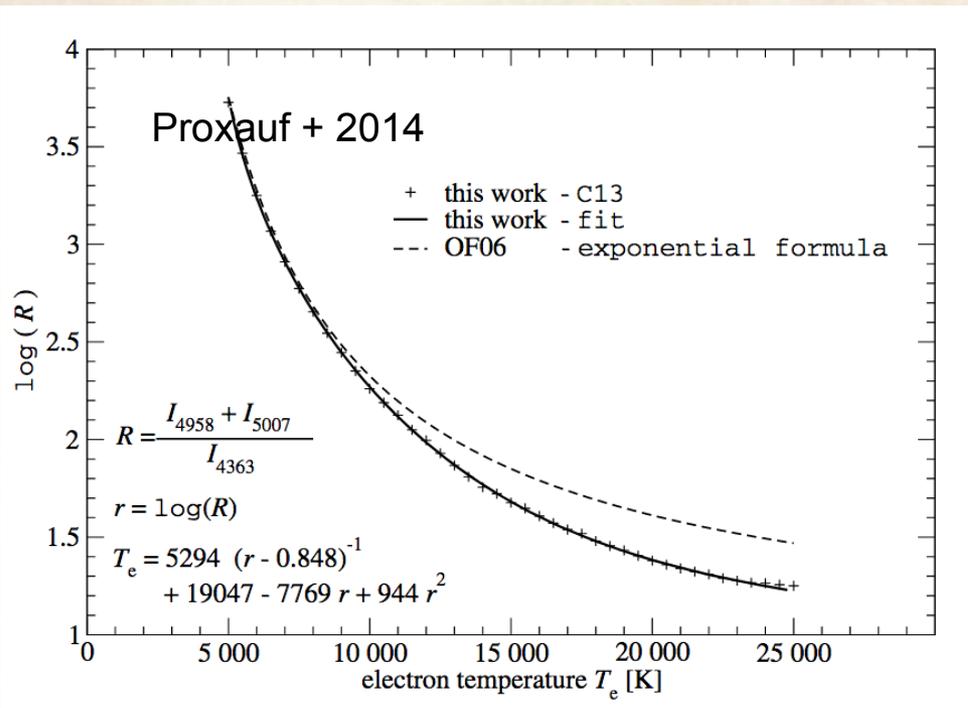
Proxauf + 2014

Слабая зависимость от T_e

Проблема: вырождение в очень актуальной области $< 100 \text{ cm}^{-3}$

Л.С. Пилюгин “Ионизованный газ в галактиках: физическое состояние и химический состав”, 2013

Электронная температура: Te(N), Te (O)...



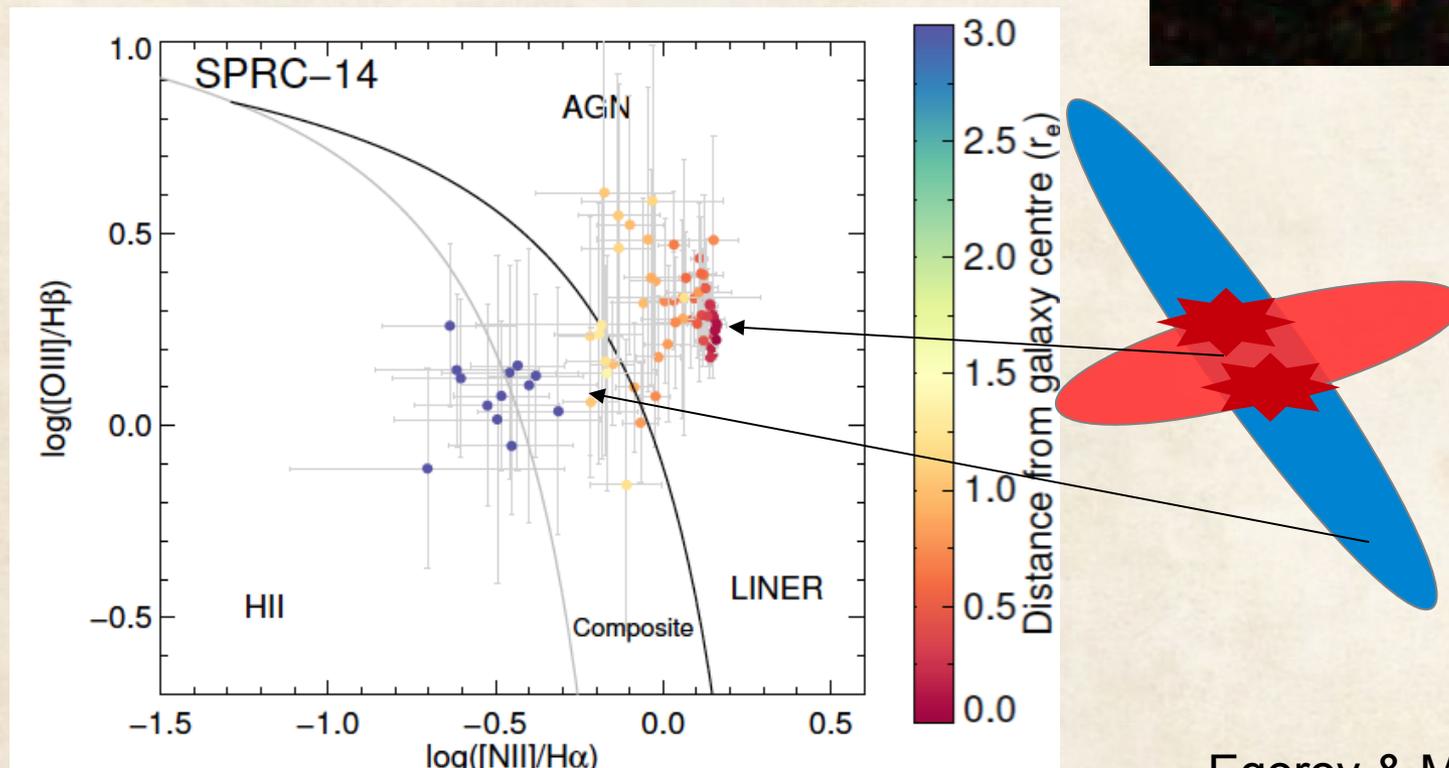
Сравнение линий интенсивностей с разных уровней, возбуждаемых электронным ударом.

На практике, линия [OIII] 4363 видна в объектах малой металличности, иначе приходится использовать менее обильные ионы: T(OII), T(NII), T(SII).

Условия возбуждения

Механизмы ионизации:

- молодые OB звезды
- ударные волны
- активное ядро



Egorov & Moiseev 2019

Металличность: $12 + \lg (X/H)$

“Прямой метод” - смогли измерить $T_e \Rightarrow$ оцениваем содержание каждого иона

$$12 + \lg(O^{++}/H^+) = \lg \frac{[O \text{ III}] \lambda_{436.3}}{H_{\beta}} + 7.137 + \frac{2.649}{t_3} - 0.517 \lg t_3 - 0.031 t_3, \quad (3.48)$$

$$12 + \lg(O^+/H^+) = \lg \frac{[O \text{ II}] \lambda_{372.7, 372.9}}{H_{\beta}} + 5.929 + \frac{1.617}{t_2} - 0.568 \lg t_2 - 0.008 t_2, \quad (3.49)$$

$$\frac{O}{H} = \frac{O^+}{H^+} + \frac{O^{++}}{H^+}$$

Аналогично, можно вычислить содержание азота

Проблемы:

- Нужно измерить слабые линии
- Оценить внутреннее поглощение
- Предположение об однородной симметричной туманности

Металличность: калибровка

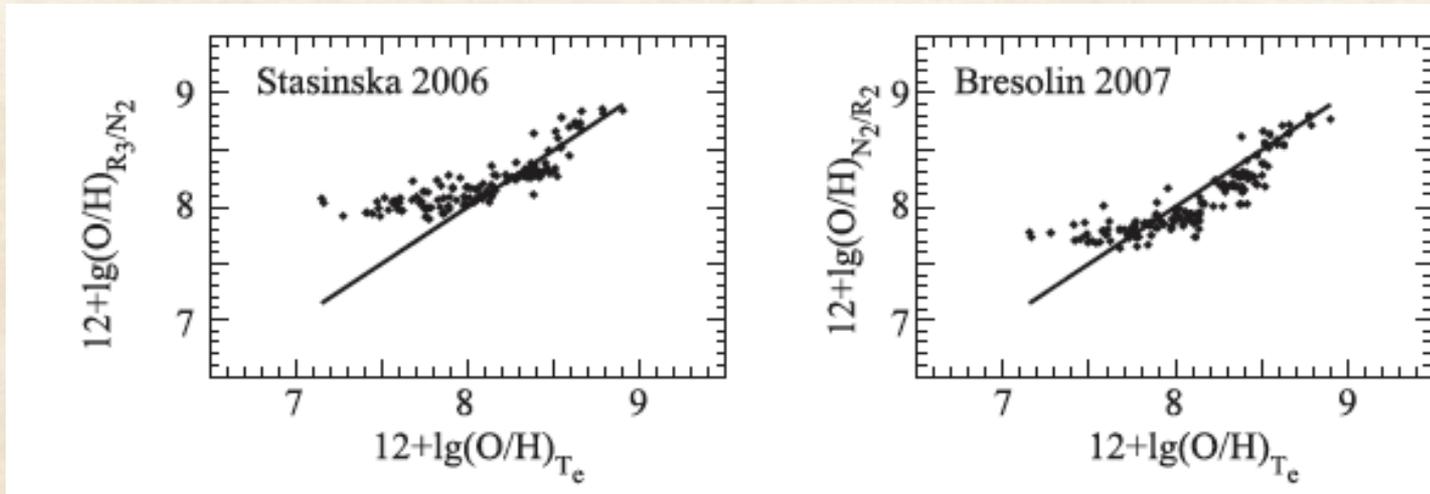
Очень часто используется “метод сильных линий”

В простейшем случае – это просто отношение $[\text{NII}]/\text{H}\alpha$

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{N_2} = 8.31 + 0.91 x, \quad (5.9)$$
$$x = N_2/\text{H}\alpha.$$

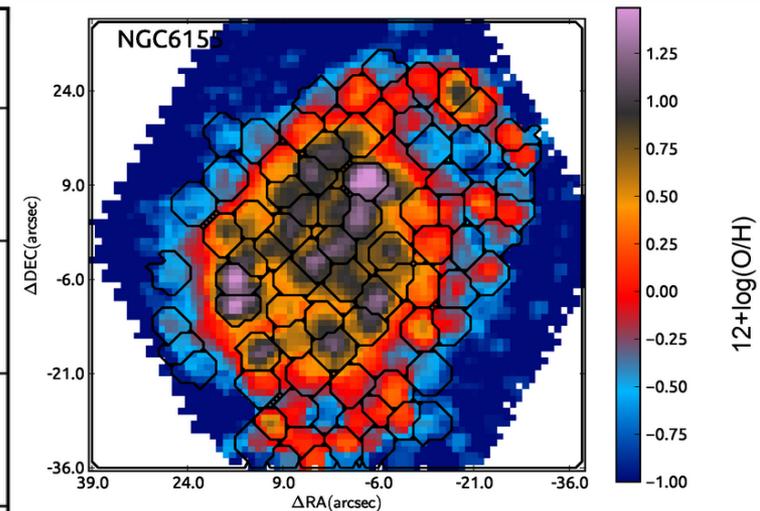
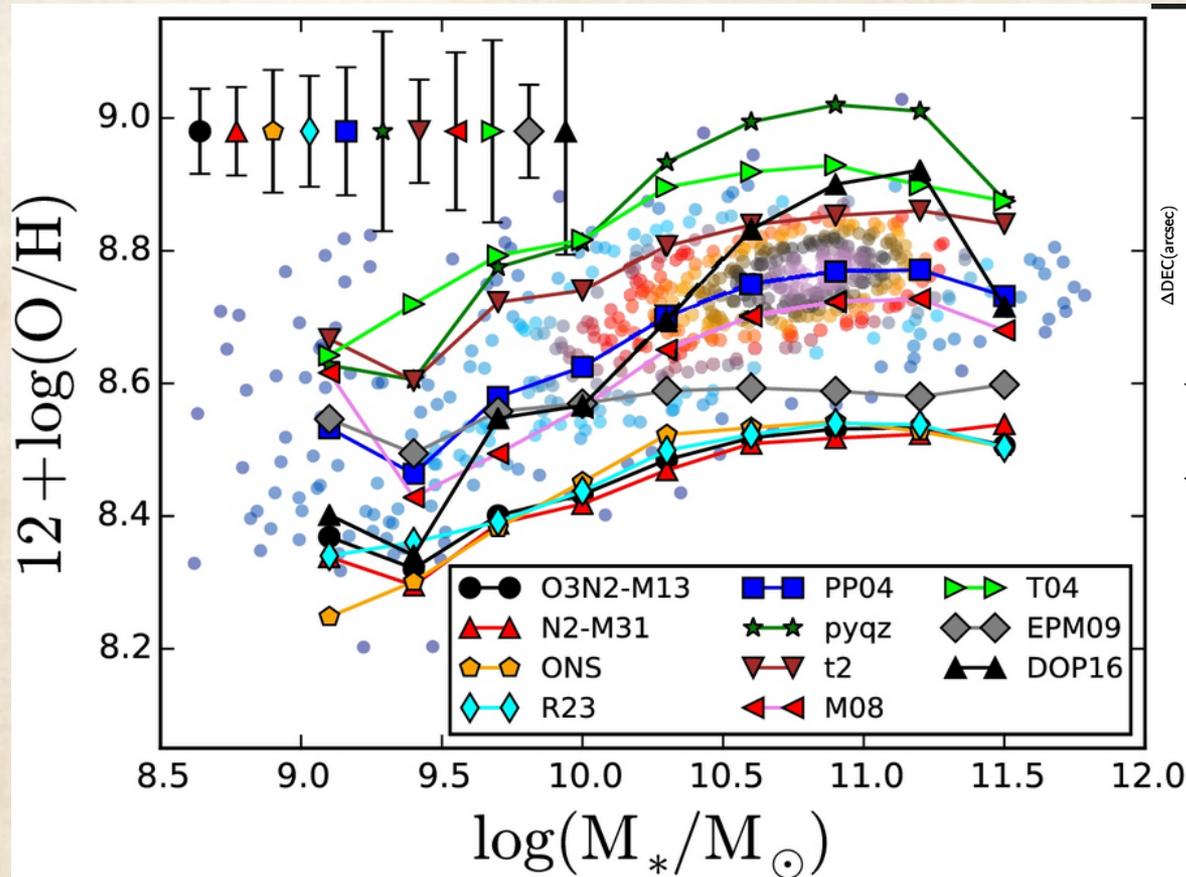
Не зависит от поглощения!

Но отличия разных калибровок друг от друга весьма велики



Масса-металличность для разных “калибраторов”

(CALIFA, Sánchez + 2017)



Масштабное соотношение существует, но конкретные величины – предмет жарких дебатов