

Explorando el gas difuso con MUSE



F. Fabián Rosales–Ortega
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Explorando el gas difuso con MUSE



Instituto Nacional
de Astrofísica,
Óptica y Electrónica



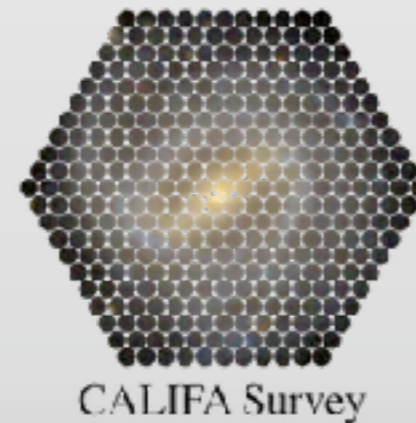
instituto de astronomía
unam



- ◆ Miguel A. Nieto* (INAOE)
- ◆ Lluís Galbany (U. Pittsburgh)
- ◆ Sebastián F. Sánchez (IA-UNAM)
- ◆ Ángeles Díaz (U. Autónoma Madrid)
- ◆ Monica Relaño (IoA, Cambridge)
- ◆ J. Sebastián Castellanos* (Max Planck, Göttingen)
- ◆ The **AMUSING** team (PI Joseph Anderson, ESO)

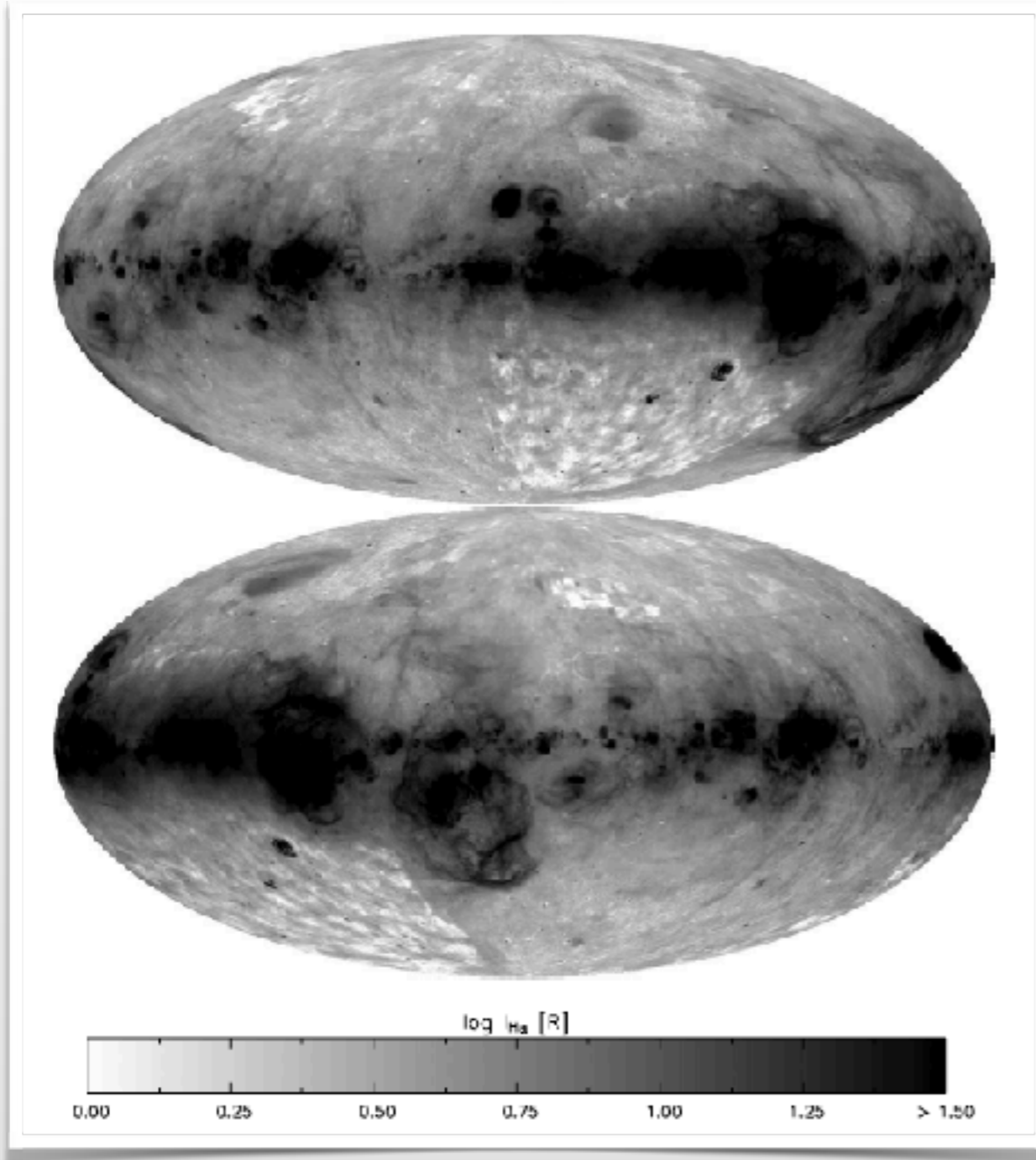


UNIVERSITY OF
CAMBRIDGE



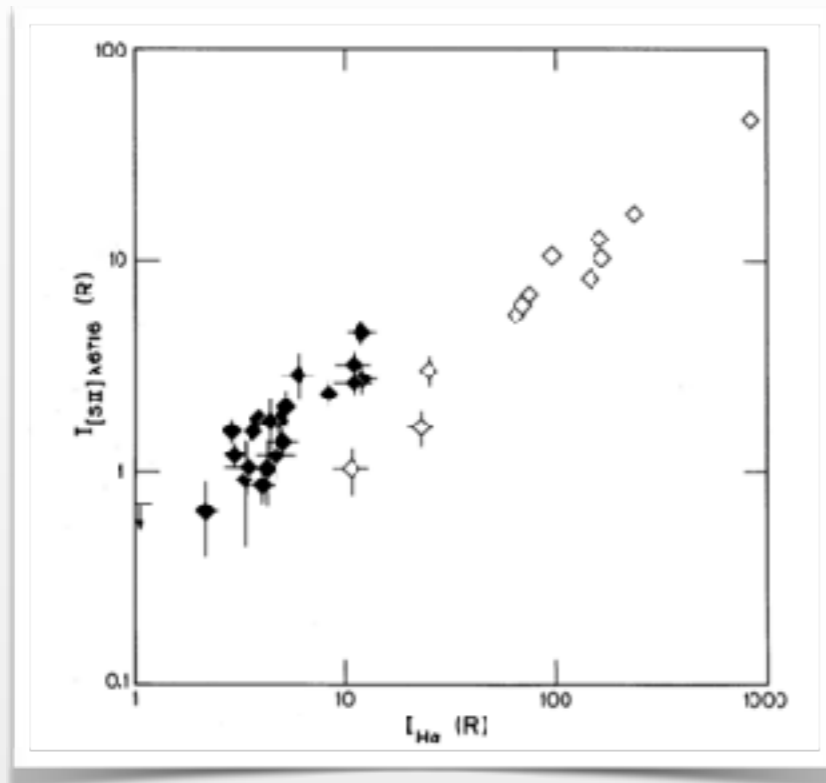
Gas ionizado difuso

- ◆ **Hoyle and Ellis (1963)** proponen la existencia de una envoltura tibia y de baja densidad (10^4 K, 10^{-3} cm $^{-3}$) de H ionizado alrededor de la Vía Láctea.
- ◆ Proceso: **absorción libre-libre** fondo sincrotrón Galáctico (1.5 y 10 MHz).
- ◆ Dispersión de señales de radio de **pulsares** confirman su existencia (Hewish et al. 1968; Guélin, 1974).



Mapa *all-sky* del WIM en H α (Finkbeiner, 2003)

Gas ionizado difuso en la Vía Láctea



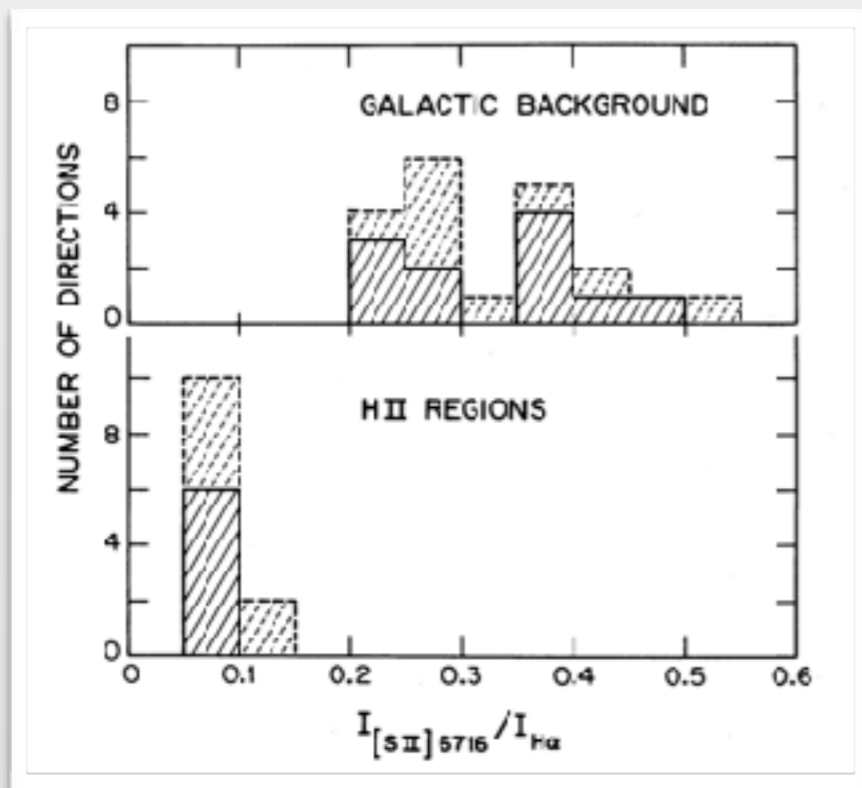
- ♦ La detección de **líneas de emisión débiles** en el óptico del medio difuso establecen la presencia de **H ionizado** como una componente principal del medio **Galáctico**.

(Reynolds 1971, Reynolds et al. 1973)

- ♦ Espectro característico:

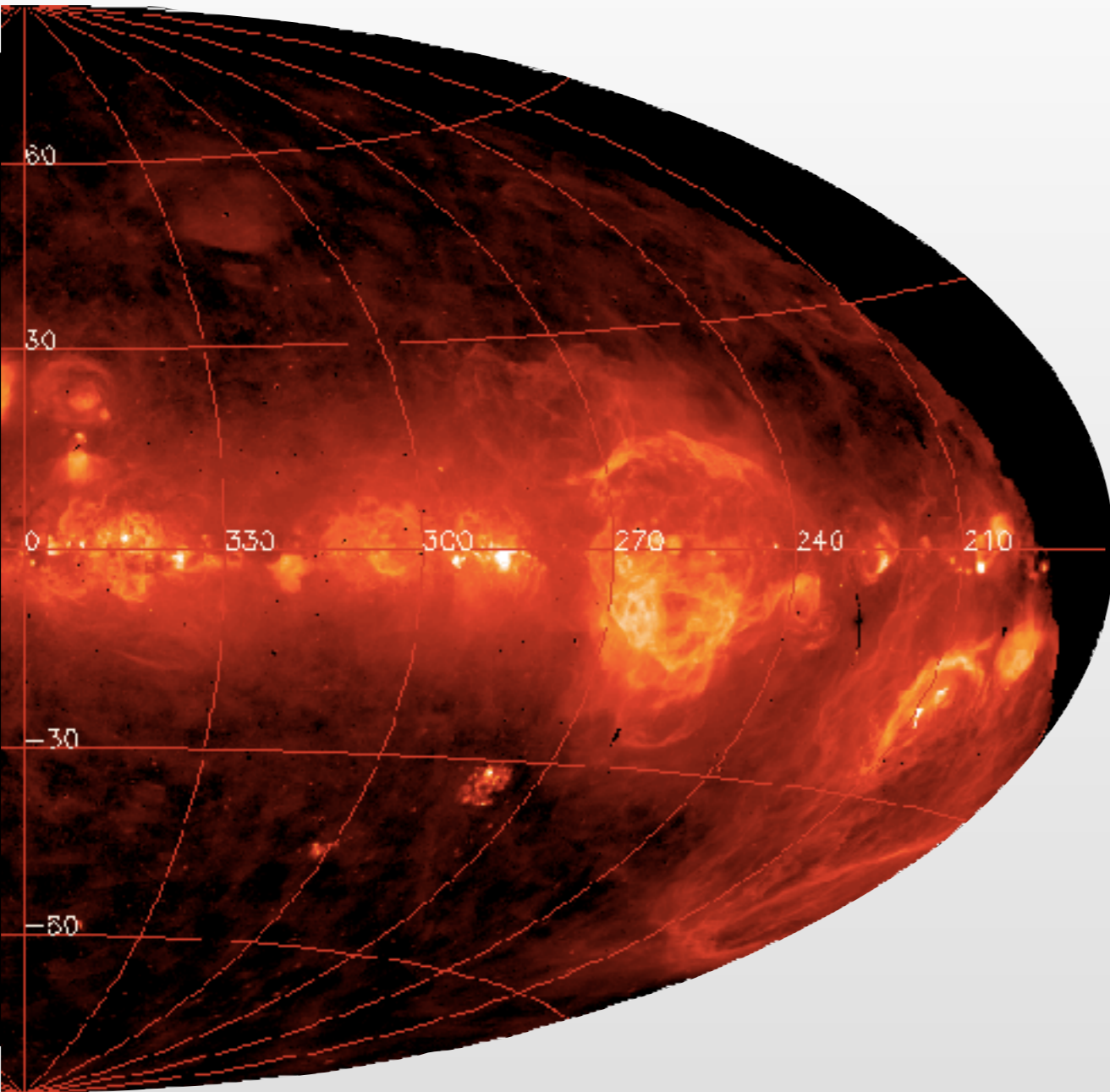
H α , [S II] $\lambda 6716$, [N II] $\lambda 6584$.

- ♦ Cocientes de línea muy diferentes a **regiones HII** tradicionales.



Reynolds (1985)

Gas ionizado difuso en la Vía Láctea



(Reynolds et al 1971, Monnet 1971)

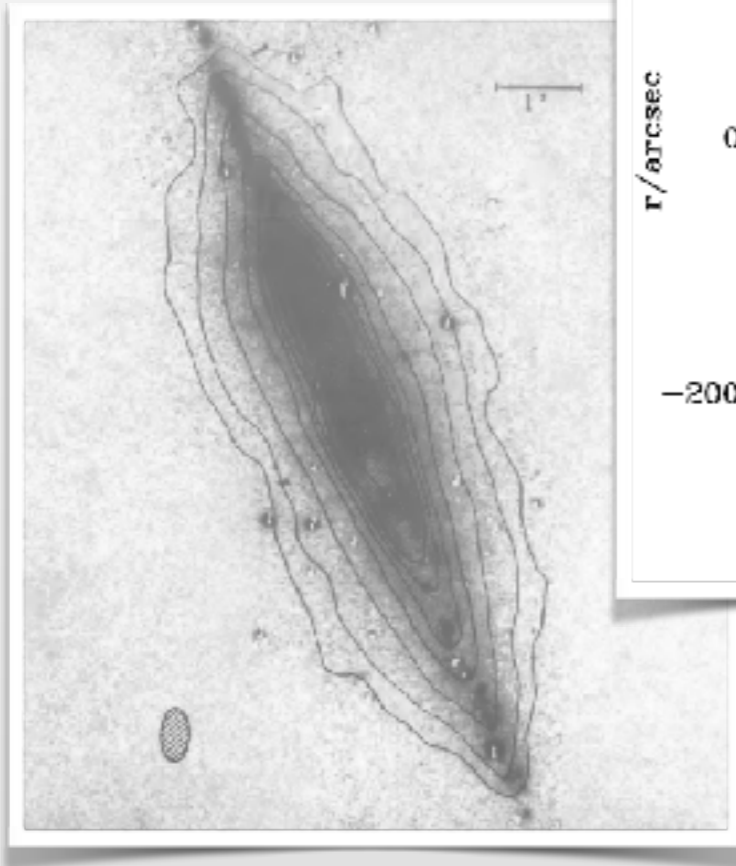
Propiedades

- ◆ **Reynolds layer:** se extiende sobre el plano de la Galaxia entre **1-1.8 kpc** (Reynolds 1993).
- ◆ Ocupa más del **20%** de volumen del ISM.
- ◆ Constituye el **90% en masa** del hidrógeno ionizado.
- ◆ Contribuye al menos **1/3** del total de la columna HI en la vecindad solar.
- ◆ Temperatura: **6-10 10^4 K**.
- ◆ Densidad: **0.03-0.08 cm^{-3}** .

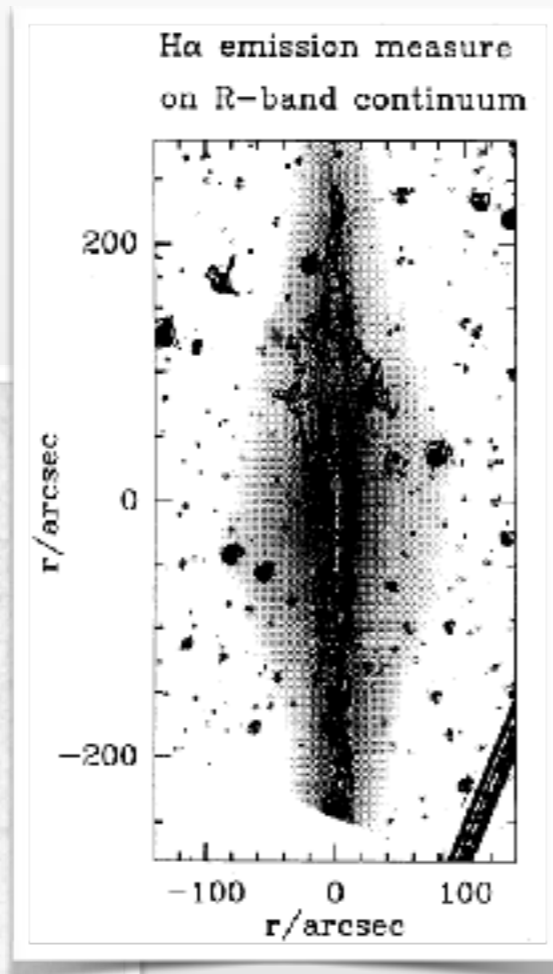
Gas ionizado difuso en otras galaxias

Dettmar (1990)

NGC891



Rand et al. (1990)



Dos décadas después:

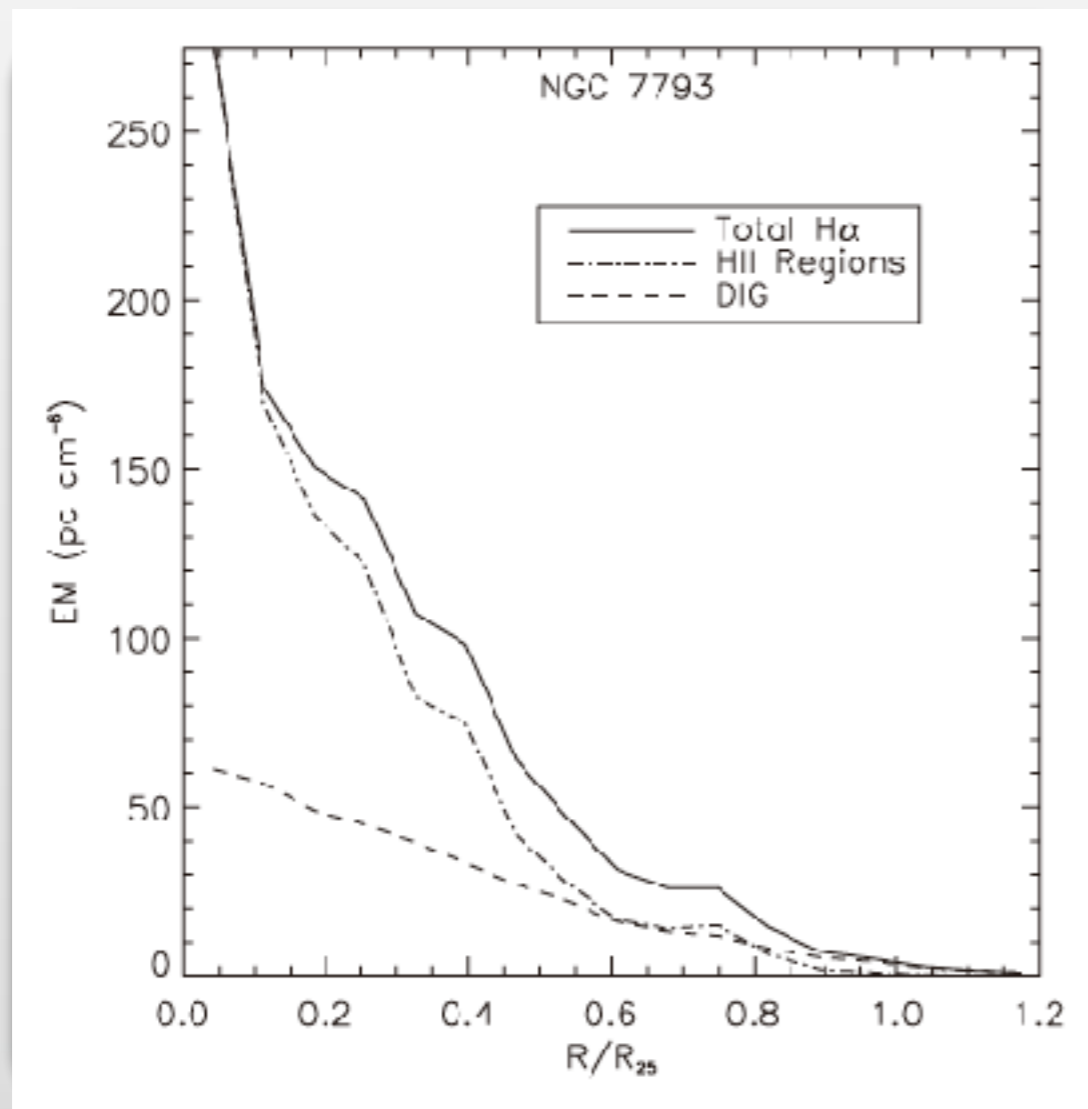
(CCD, deep H α imaging)

- ◆ Primera detección extragaláctica en el halo de NGC891 (Rand et al. 1990, Dettmar et al. 1990).
- ◆ Aumento de **[S II]/H α** , **[N II]/H α** , **[O III]/H α** con la distancia al plano (Rand 1997, 1998).

Diffuse ionized gas (DIG) vs.
Warm Ionized Medium (WIM)

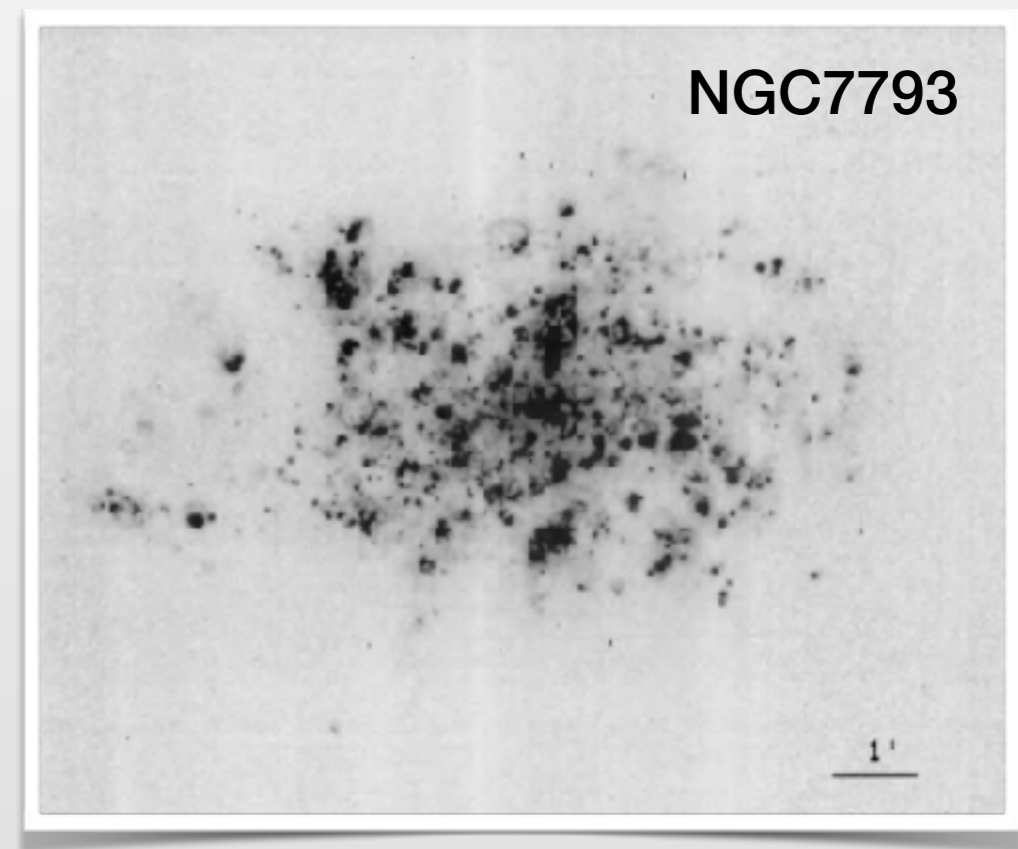
DIG extragaláctico

Walterbos & Braun (1994): primer estudio del DIG en secciones de M31.



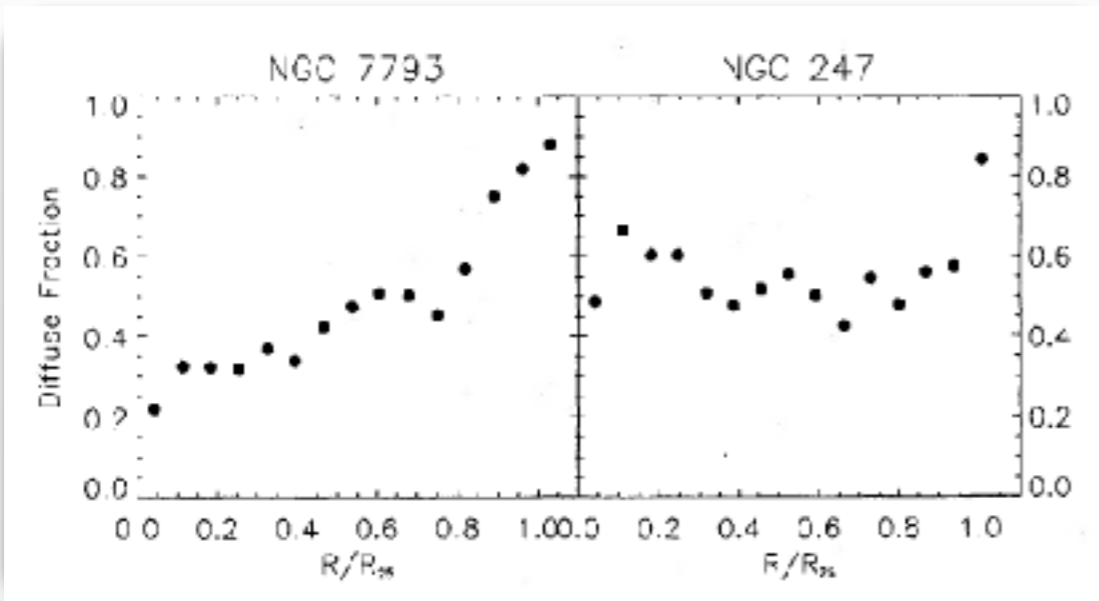
galaxias *face-on*

Ferguson et al. (1996): primer estudio sistemático del DIG en dos galaxias (*face-on*), NGC 247 & NGC 7793.



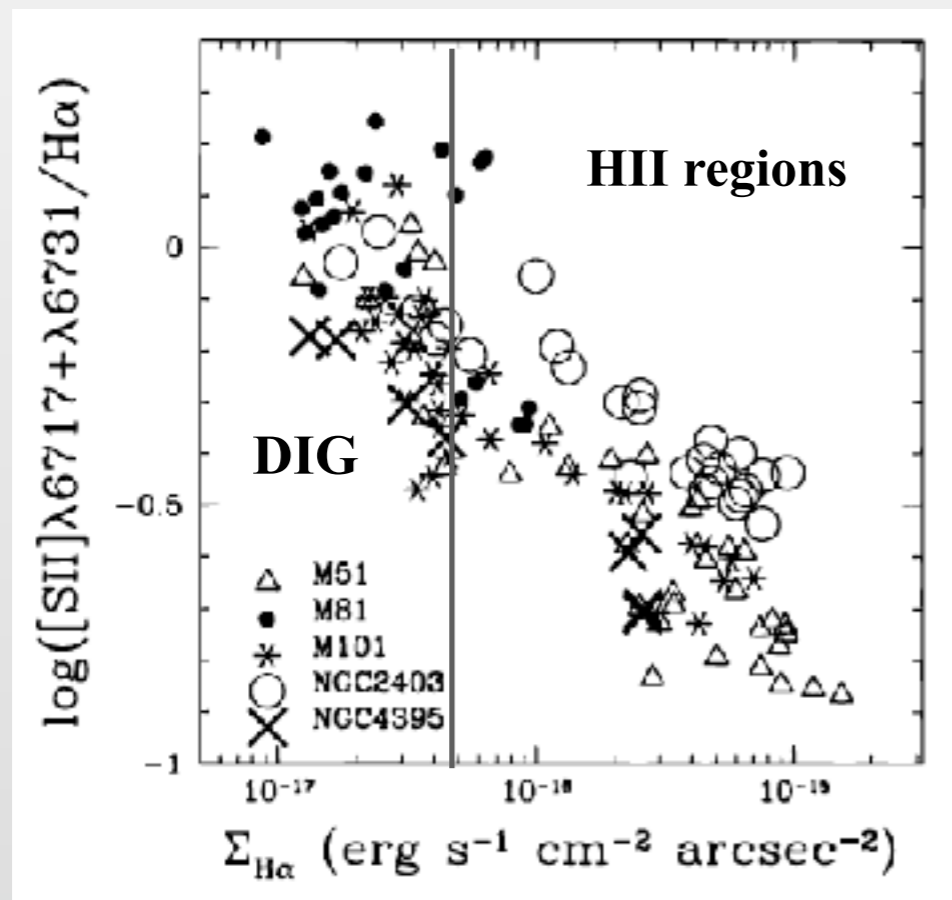
Ferguson et al. (1996)

Ferguson et al. (1996)



Características del DIG

- ◆ $L(\text{H}\alpha)$: **30%-50%** de la emisión total.
- ◆ $I(\text{H}\alpha) < 10^{-17}$ cgs
EM $\sim 50 \text{ pc cm}^{-6}$, $T=10^4 \text{ K}$
(Osterbrock & Ferland 2006)
- ◆ Baja ionización:
 $[\text{S II}]/\text{H}\alpha > 0.5$, $[\text{N II}]/\text{H}\alpha > 0.4$
- ◆ Área proyectada del disco ocupada por DIG: **$80 \pm 10\%$** (Oey et al. 2007)
- ◆ En algunos casos el DIG se observa en forma de estructuras discretas (cáscaras y filamentos).



Wang et al. (1997)

¿Qué ioniza el DIG?

Mecanismo de ionización propuestos:

- ◆ **Escape de fotones Ly α (< 912 Å) de regiones HII**
(e.g. Ferguson et al. 1996, Zurita et al. 2002)
- ◆ **Choques: energía cinética por SNe, WR**
(e.g. Dopita & Sutherland 1995, Monreal-Ibero et al. 2010)
- ◆ **Estrellas calientes evolucionadas (HOLMES)**
(e.g. Flores-Fajardo et al. 2011, Zhang et al. 2017)

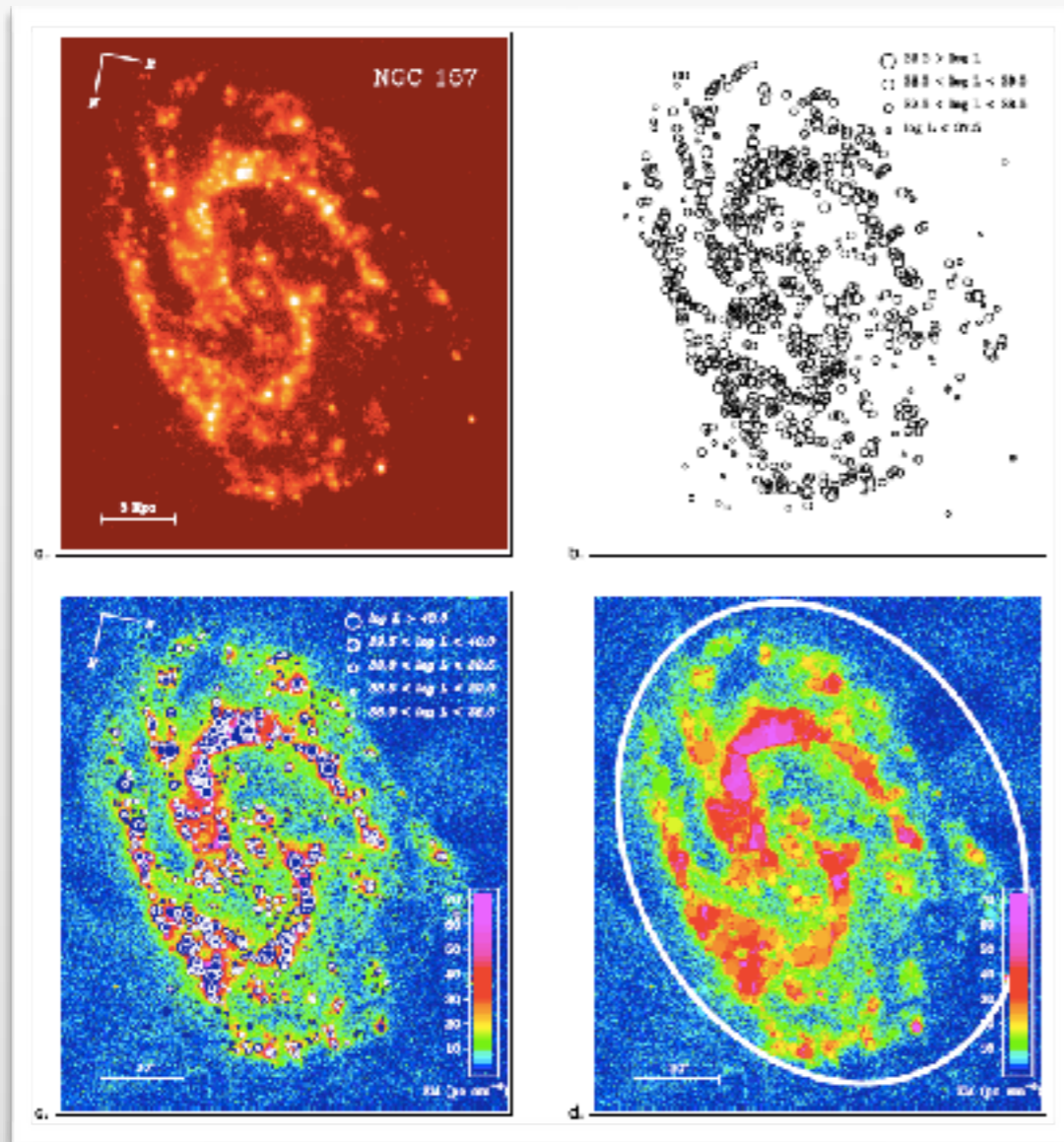
Otros:

- ◆ Dispersión de luz UV por polvo (2%).
- ◆ Decaimiento de neutrinos masivos (e.g. Sciama 1990).
- ◆ Turbulencia (e.g. Slavin et al. 1993).
- ◆ *Microflares* Galácticos (e.g. Raymond 1992).

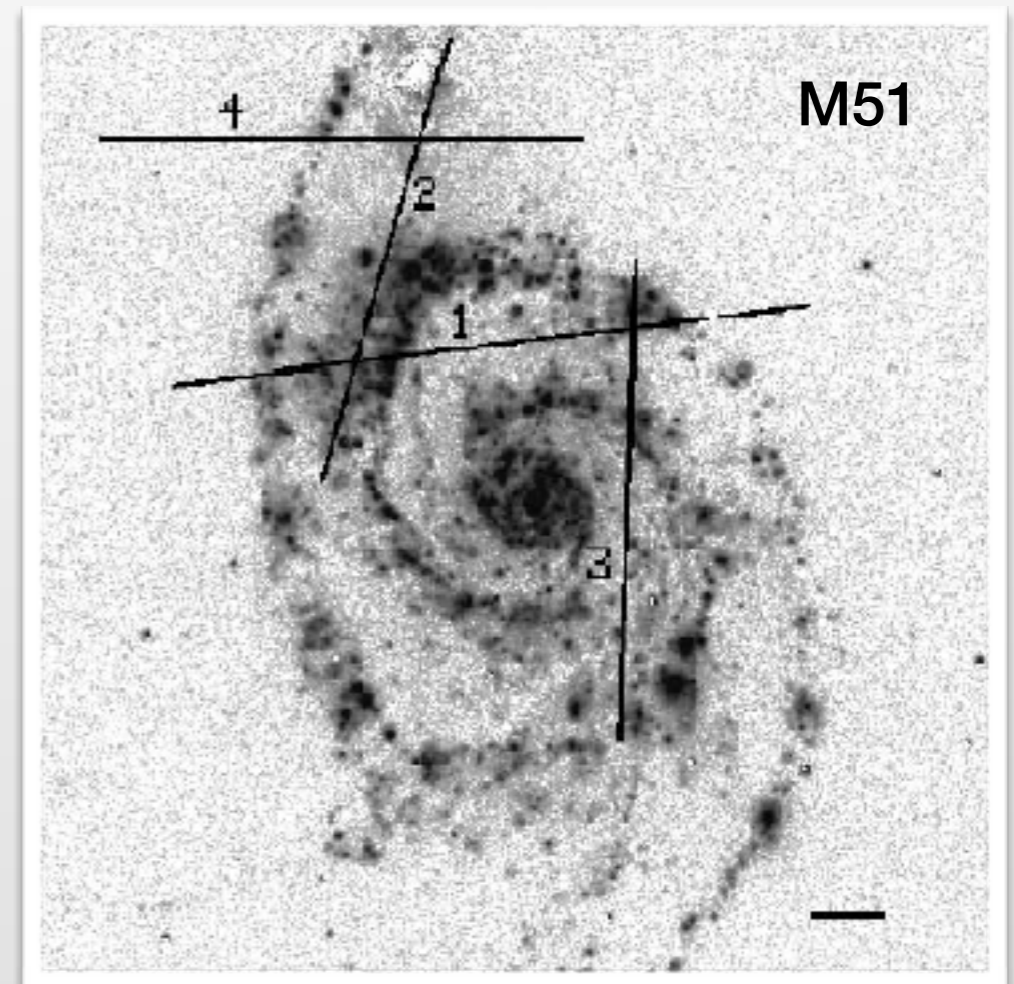
Detección del DIG en galaxias cercanas

Imágenes de banda estrecha en H α

Espectroscopía de rendija larga



Zurita et al. (2000)



Hoopes & Walterbos (2003)

Estudios del DIG en galaxias cercanas

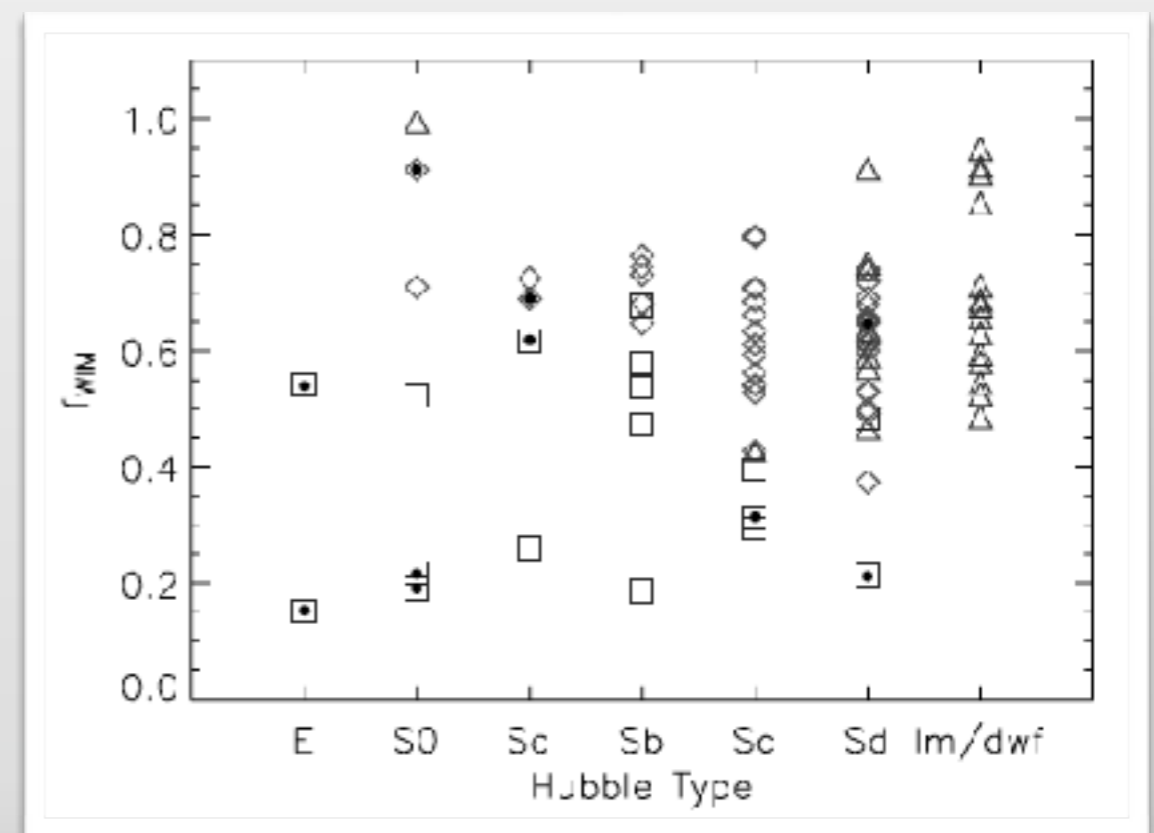
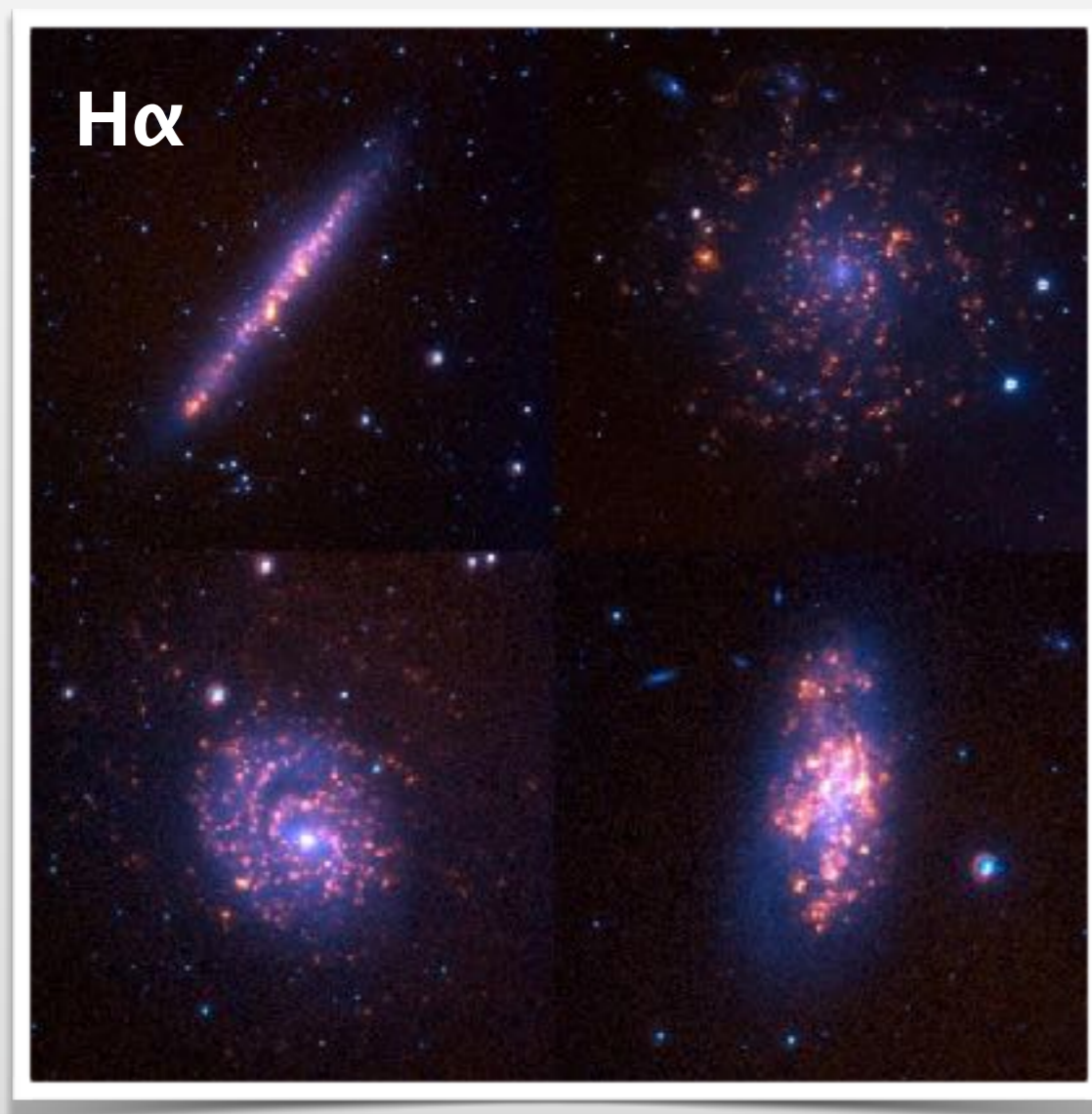
SINGG: Survey for Ionization in Neutral Gas Galaxies

Oey et al. (2007)

◆ 109 galaxias

◆ $f_{\text{DIG}} \sim 0.6$

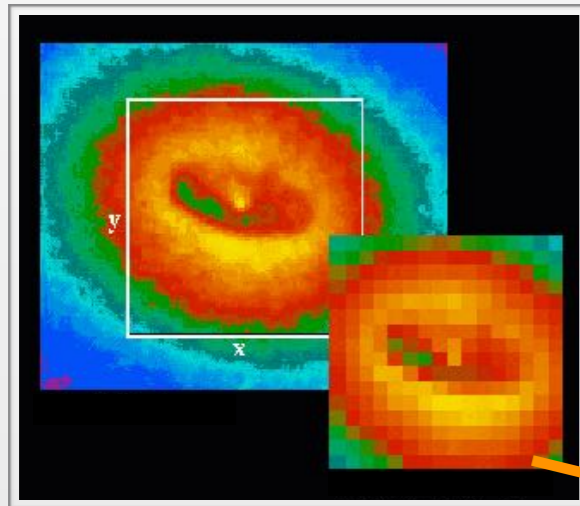
◆ Sin correlación evidente con tipo morfológico o SFR



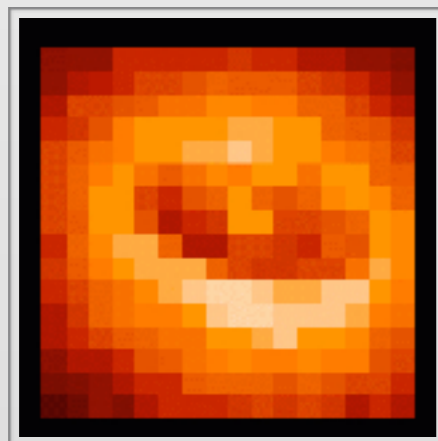
Espectroscopia bidimensional (2D)

Técnica que produce un cubo de datos de intensidad de flujo como función de x , y , λ

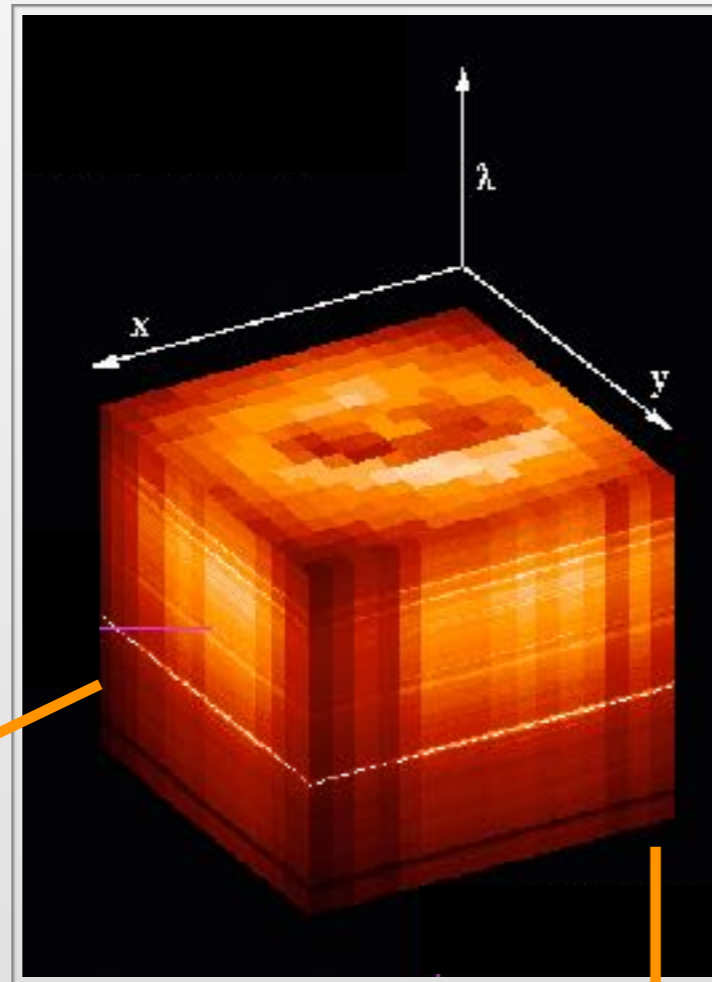
- ◆ Multi-object spectroscopy (MOS)
- ◆ Fabry-Pérot (tunable-filters)
- ◆ Integral field units (IFU)



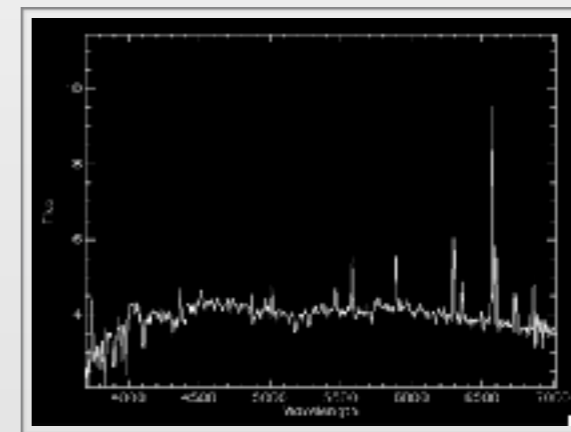
Campo de visión (FoV)
+ objeto en el cielo



Cada corte: imagen
monocromática



Cubo de datos
espectroscopico



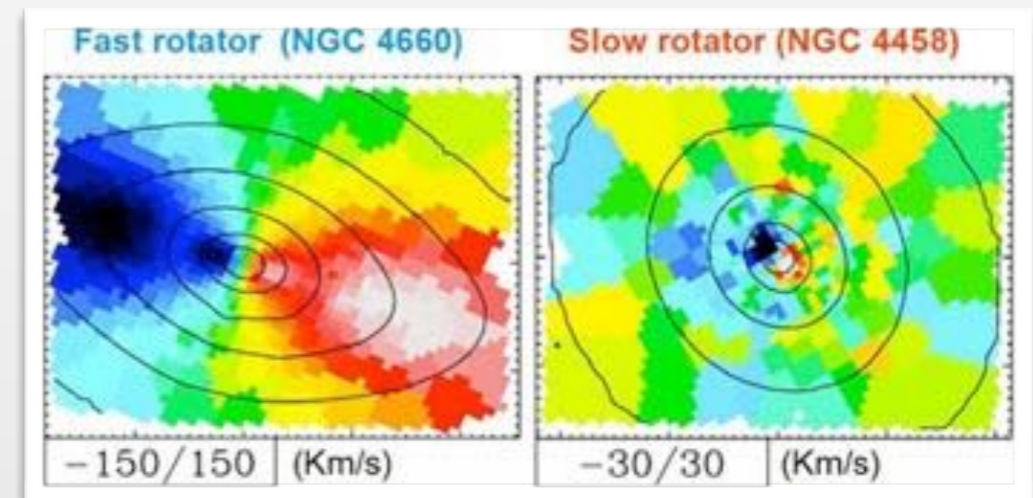
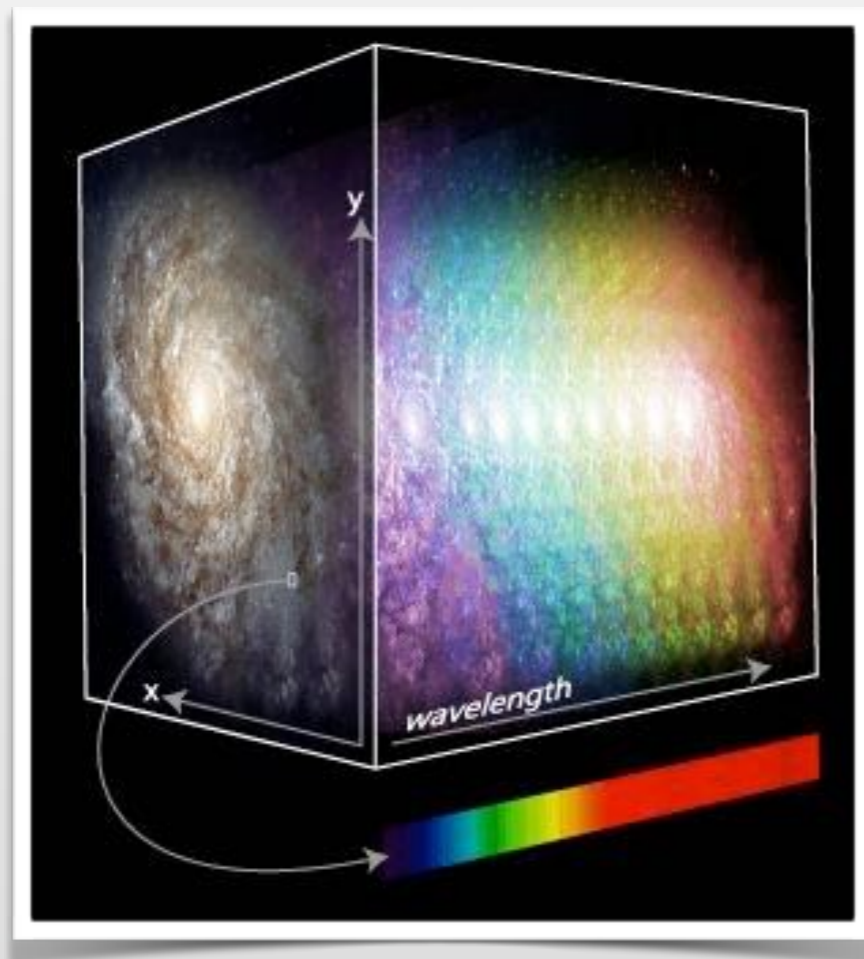
Cada columna:
un espectro

Spaxel

Espectroscopia de campo integral

Integral Field Spectroscopy (IFS)

Tipo de **espectroscopia 2D** en el cual la información **espacial** y **espectral** es obtenida **simultáneamente**

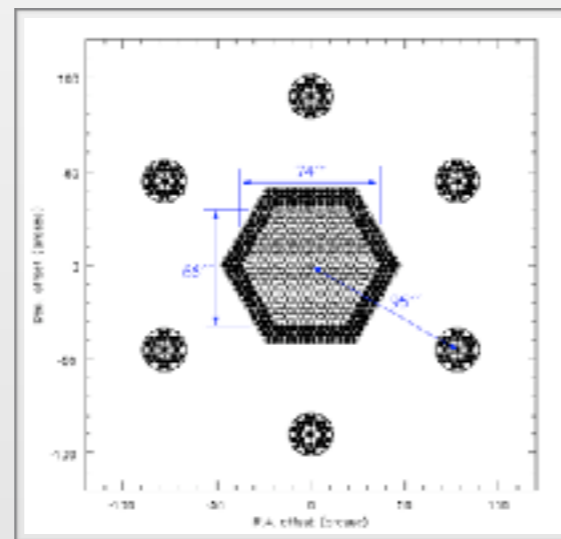
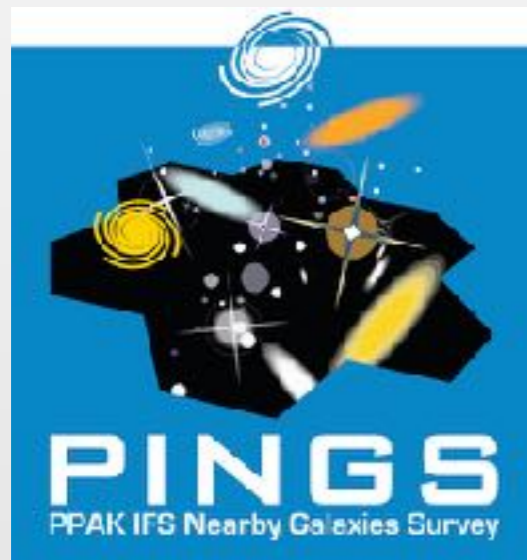


- ♦ **SAURON** (2001) - **Atlas3D** (2011)
72 200 elípticas
- ♦ **DiskMass** (2010)
30 galaxias, cinemática

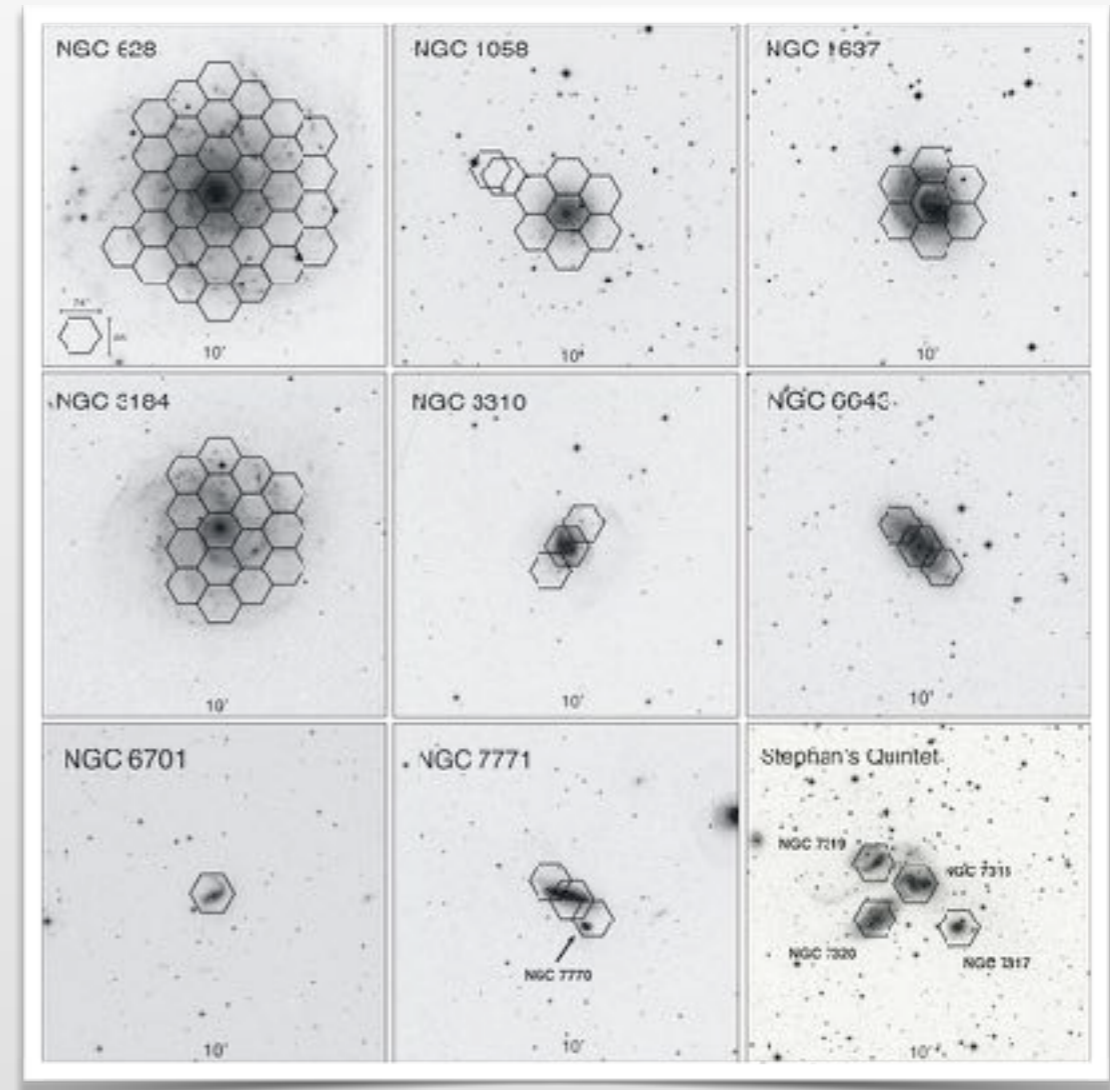
Mapeos de galaxias con IFS

PPAK IFS Nearby Galaxies Survey

Primer mapeo IFS de galaxias espirales cercanas



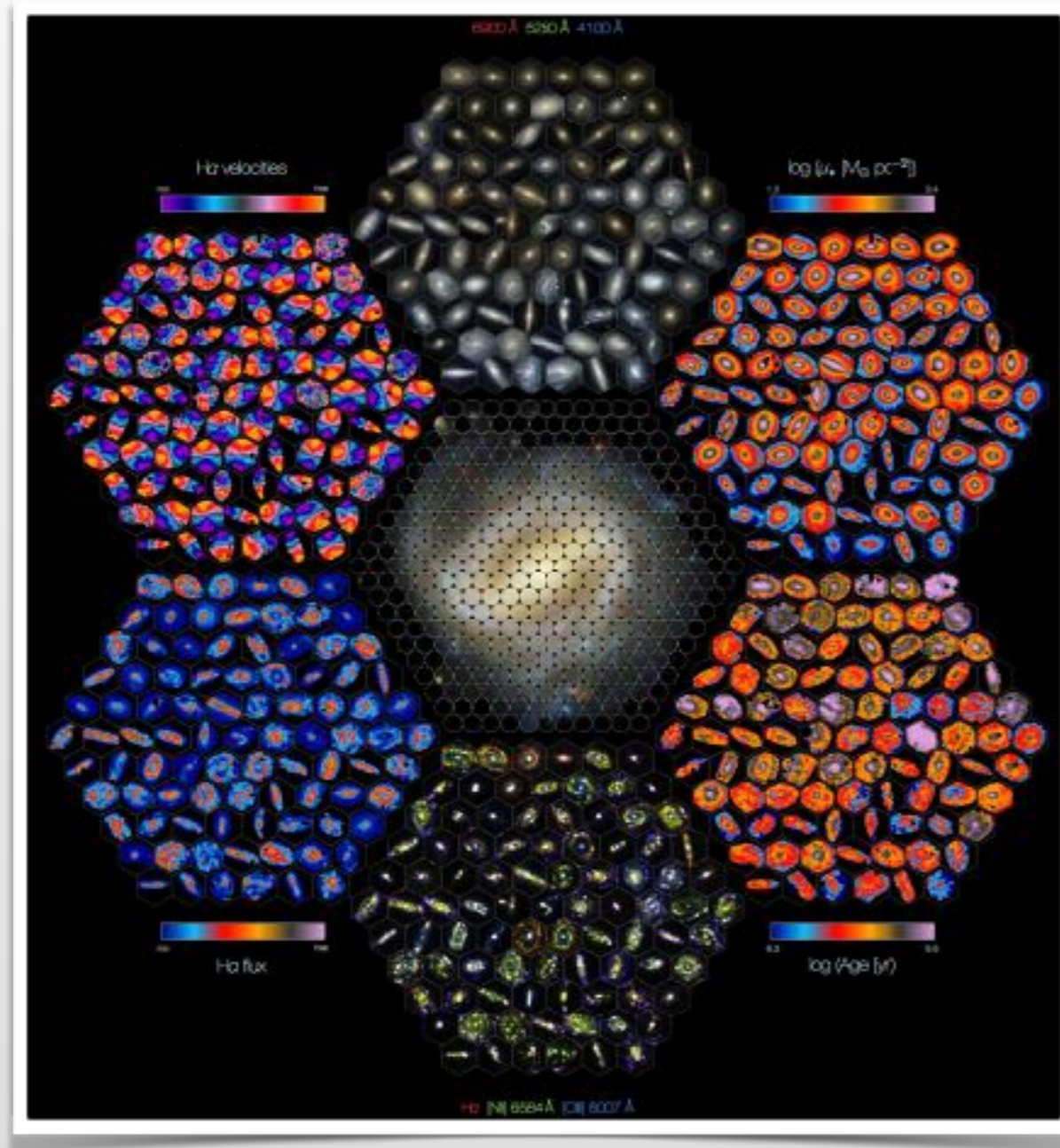
Área observada ~ 80 arcmin²



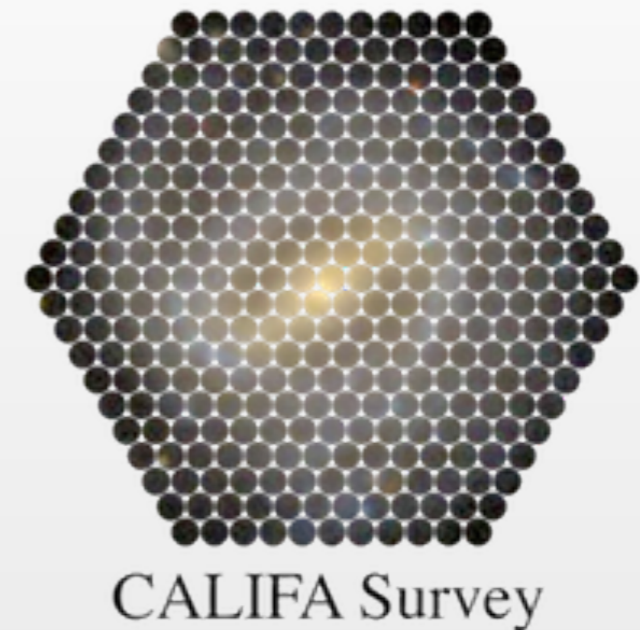
Rosales-Ortega PhD, Rosales-Ortega et al. (2010)

Mapeos de galaxias con IFS

Calar Alto Legacy Integral Field spectroscopy Area Survey



García-Benito et al. (2015)



Sánchez et al. (2012)

- ◆ Primer mapeo IFS de galaxias del Universo Local.
- ◆ Muestra estadística y representativa: **+600 galaxias.**
- ◆ **FoV ~ 1 arcmin**

Mapeos de galaxias con IFS

SAMI

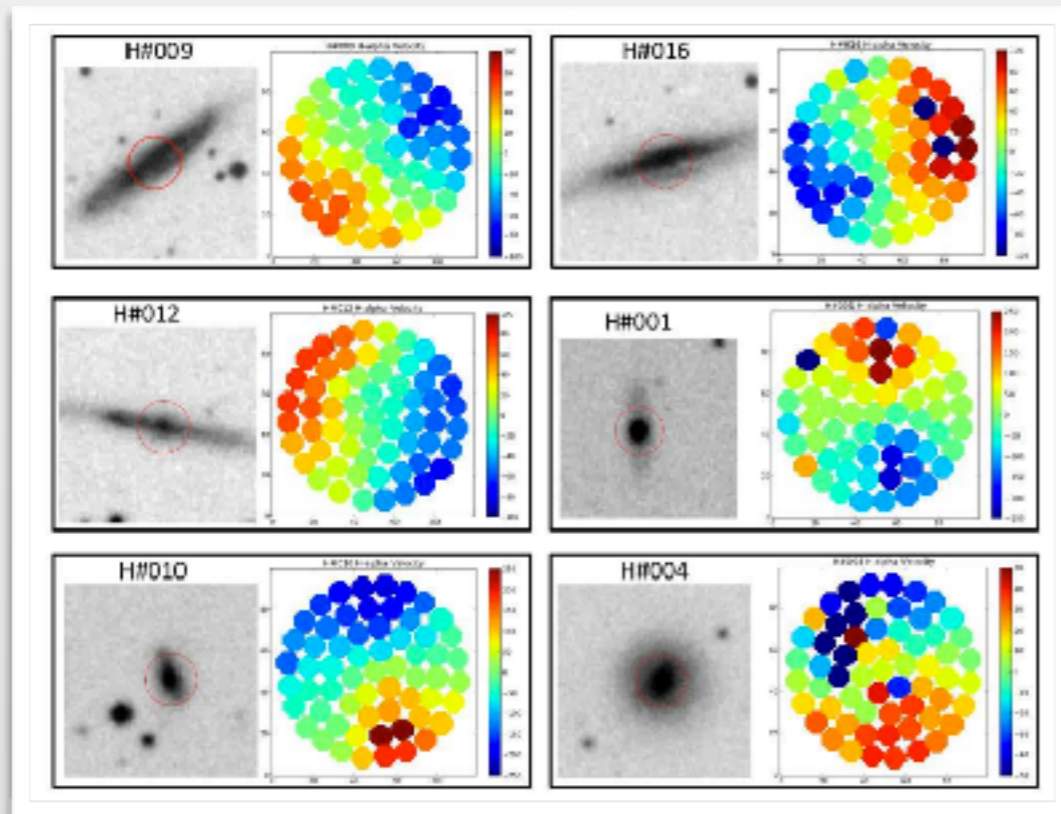
The Sydney-AAO Multi-object
Integral field spectrograph

- ◆ +3k galaxias
- ◆ **14 arcsec FoV**
- ◆ 4m Anglo-Australian Telescope

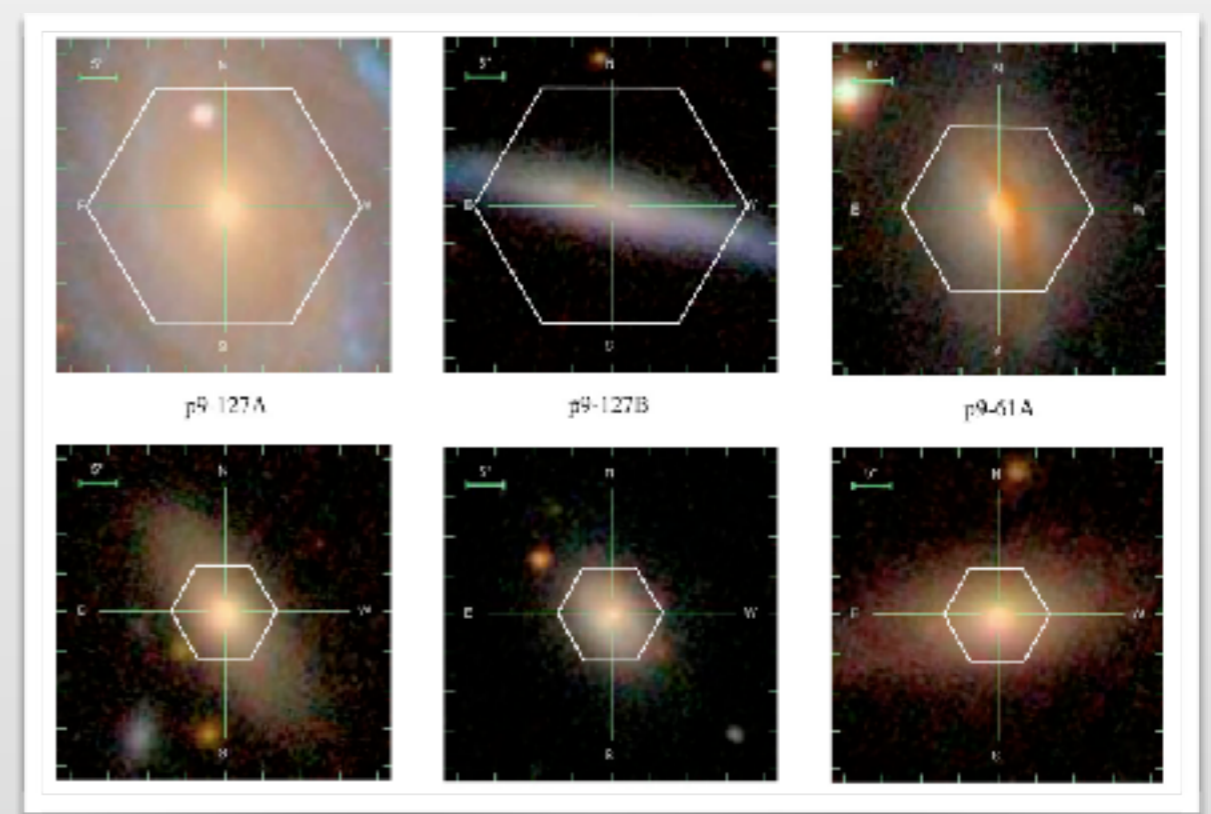
MaNGA

Mapping Nearby Galaxies at APO

- ◆ +10k galaxias
- ◆ **12-32 arcsec FoV**
- ◆ 2.5m SDSS IV



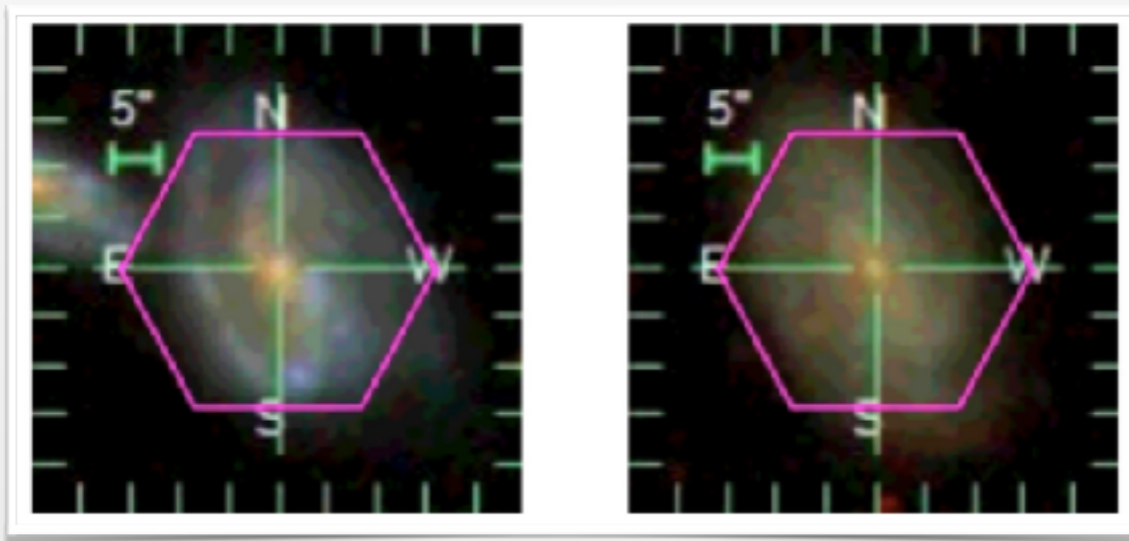
Croom et al. (2012)



Bundy et al. (2015)

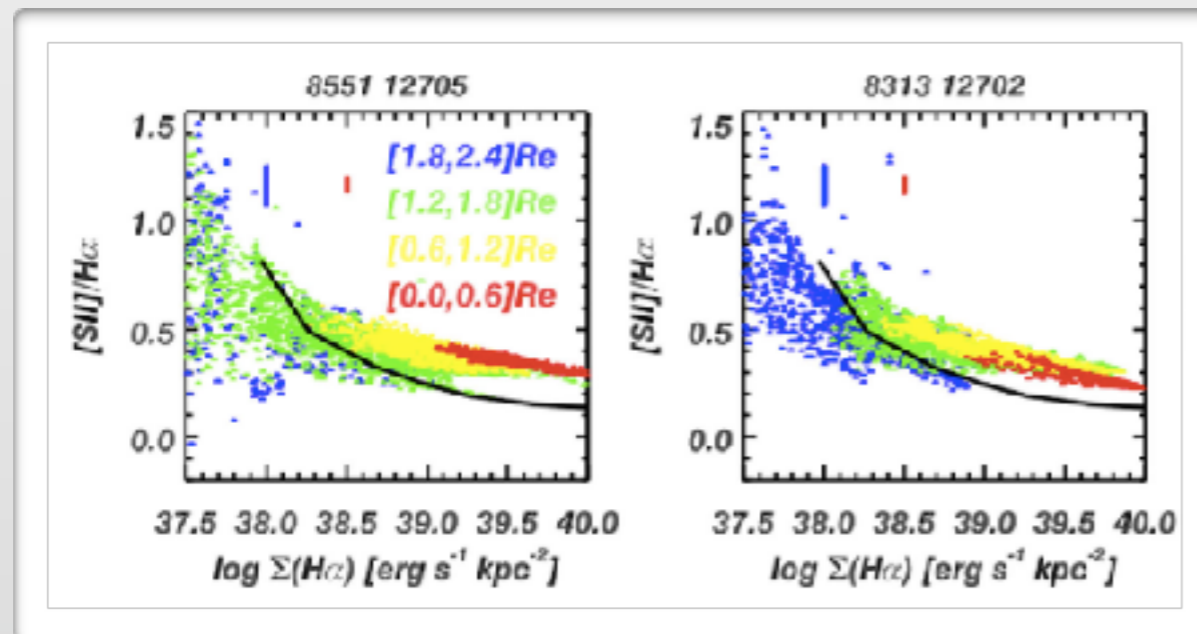
Estudio del DIG con IFS: MaNGA

Zhang et al. (2017)



Resultados

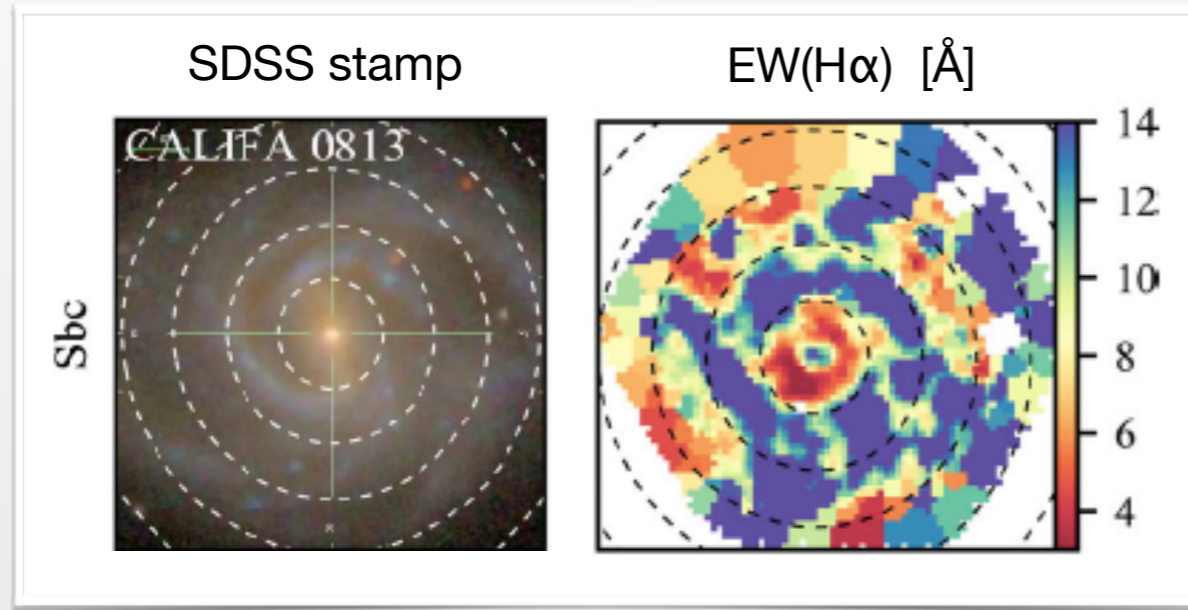
- ◆ **365 galaxias** (face-on).
- ◆ Impacto del DIG en cocientes de líneas.
- ◆ Spaxels: regiones de **kpc** (HII + DIG).
- ◆ $\Sigma(\text{H}\alpha)$ como proxy para separar DIG.
- ◆ Corte en **EW(H α)** no es recomendable.



Mecanismo de ionización:
estrellas calientes evolucionadas
(HOLMES)

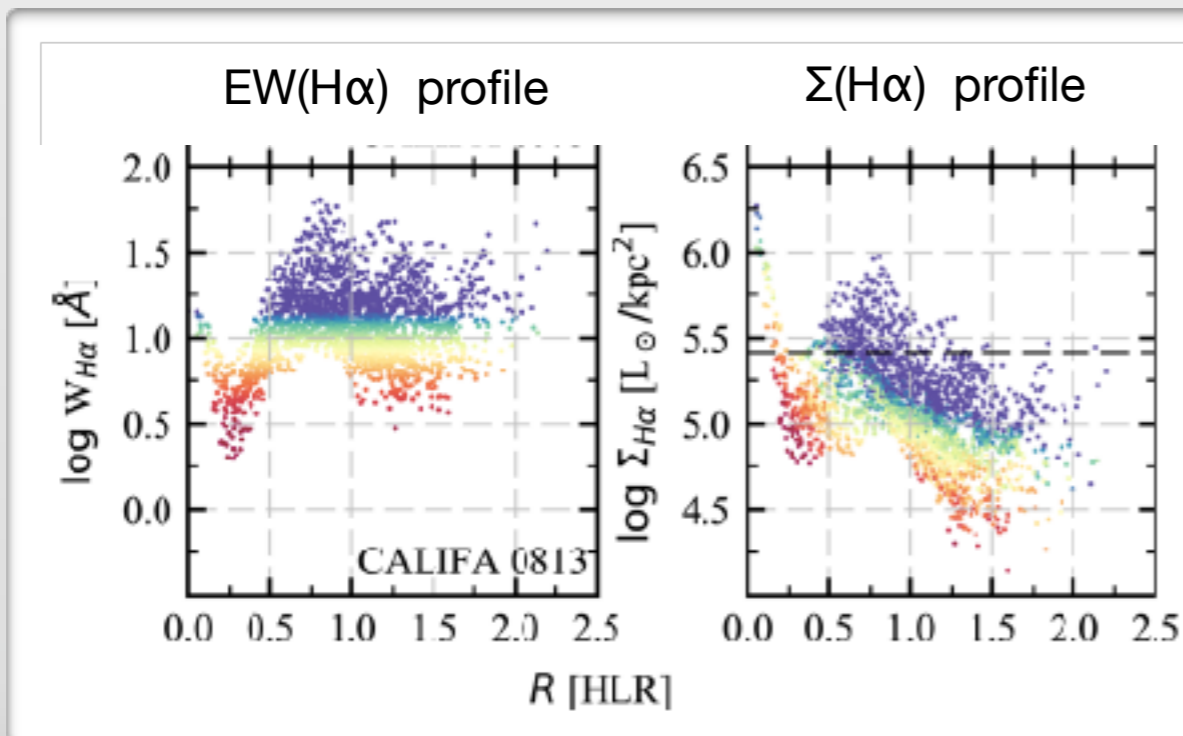
Estudio del DIG con IFS: CALIFA

Lacerda et al. (2018)



Resultados

- ◆ **391 galaxias** (face-on + edge-on).
- ◆ Separación del DIG por **EW(H α)**:
 - **hDIG**: regiones dominadas por HOLMES, $EW(H\alpha) < 3 \text{ \AA}$.
 - **mDIG**: $3 < EW(H\alpha) < 14 \text{ \AA}$ (SF)
- ◆ Separar DIG con **$\Sigma(H\alpha)$** es “*conceptualmente incorrecto*”.



Mecanismo de ionización:

HOLMES + SF

(diferentes regímenes)

DIG: retos y problemas

H α imaging + *long-slit*

- ◆ Objetos individuales (SINGG H α).
- ◆ **Alta** resolución espacial.
- ◆ DIG: $\Sigma(\text{H}\alpha)$
- ◆ Mecanismo DIG:
 - **Escape de fotones Lyc.**

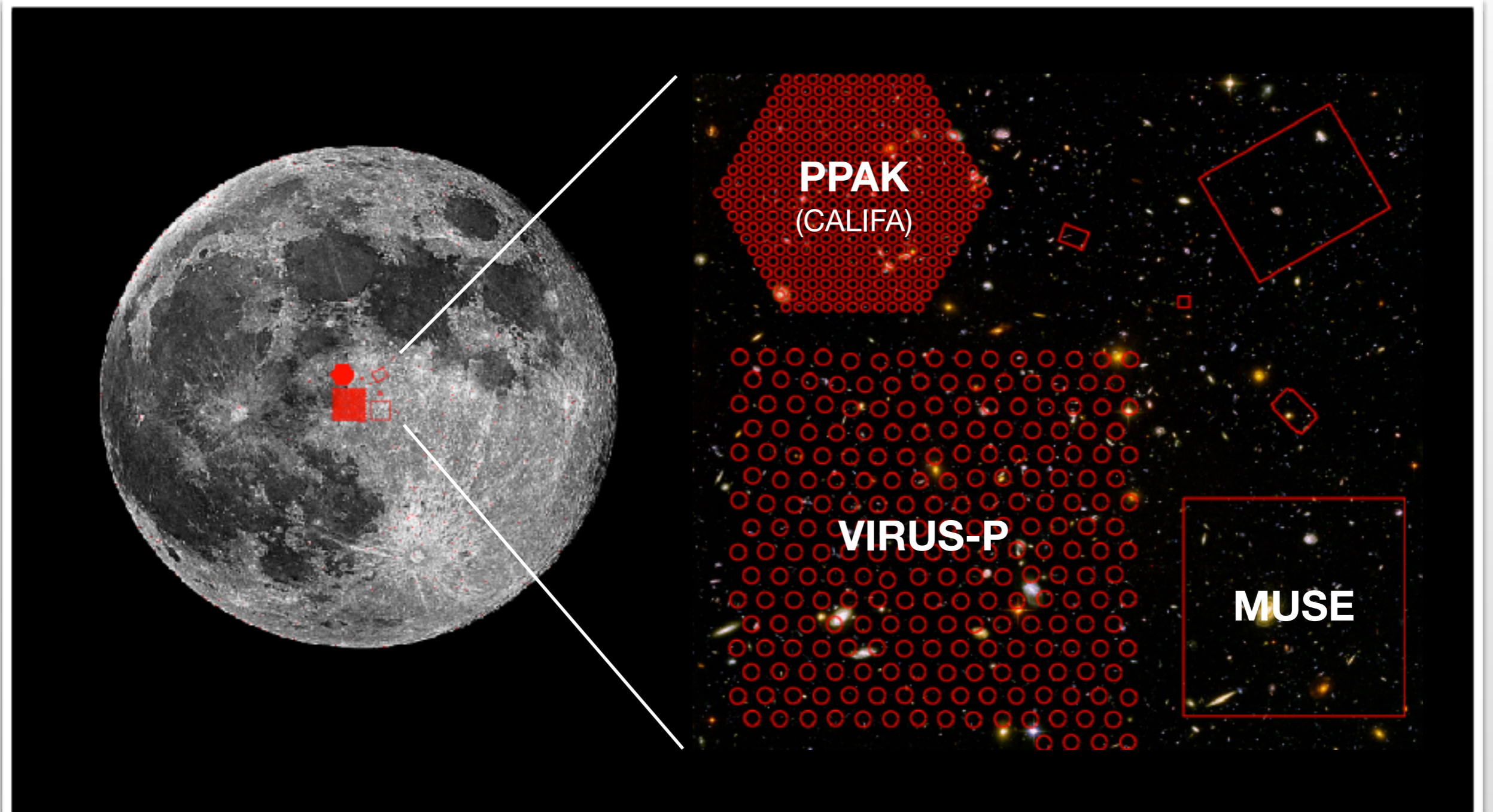
Estudios IFS

- ◆ Muestras +300 galaxias.
- ◆ **Baja** resolución espacial.
- ◆ DIG: $\Sigma(\text{H}\alpha)$ vs. EW(H α).
- ◆ Mecanismo:
 - **Estrellas evolucionadas.**

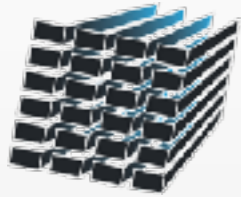


- ◆ Metodología de separación.
- ◆ Mecanismo(s) de ionización: *energy-budget*.
- ◆ Relación del DIG con otras propiedades físicas: $\log(U)$, f_e , etc.
- ◆ Implicaciones para estudios de abundancias, SFR, z , etc.

Información espectroscópica vs. FoV



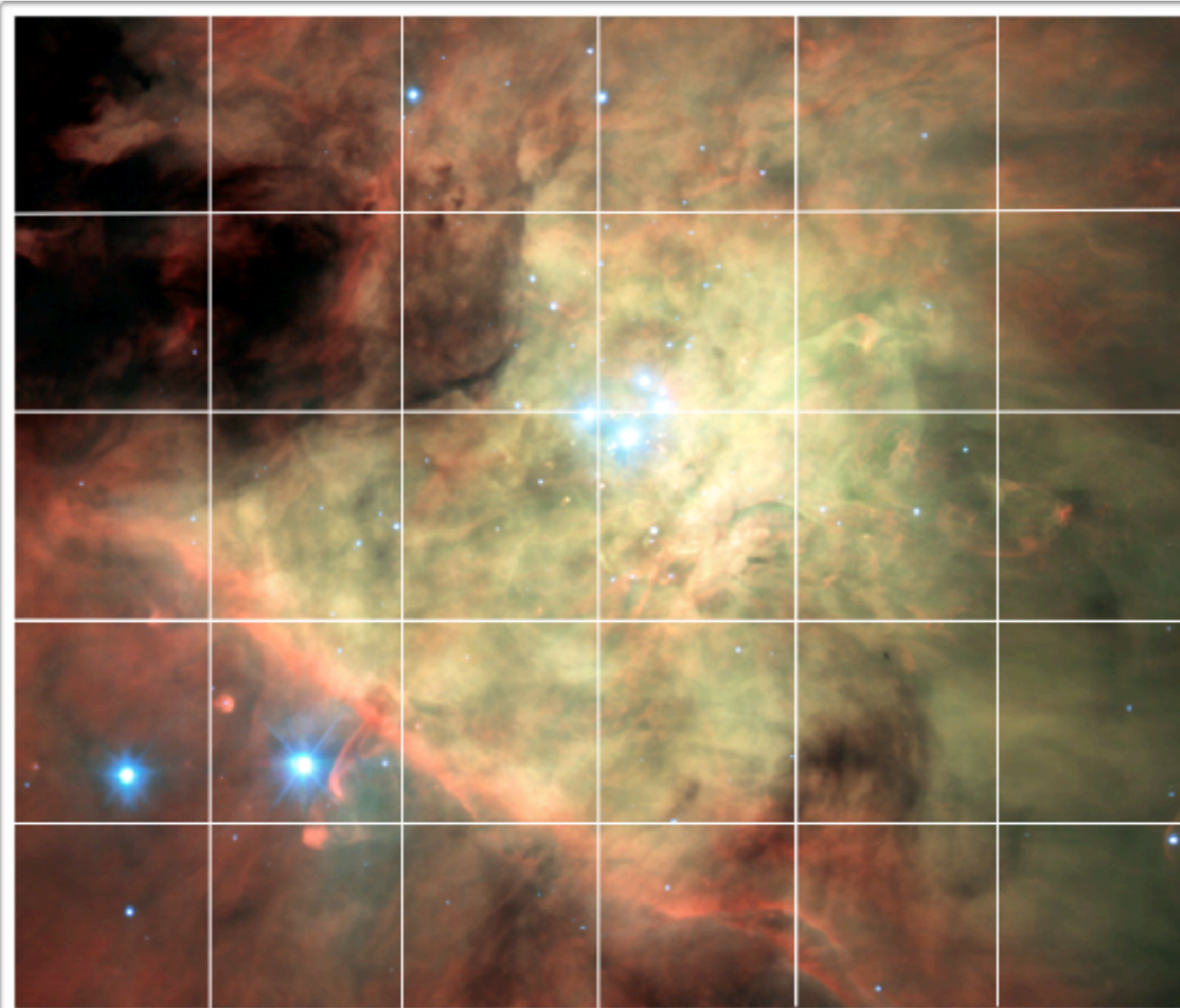
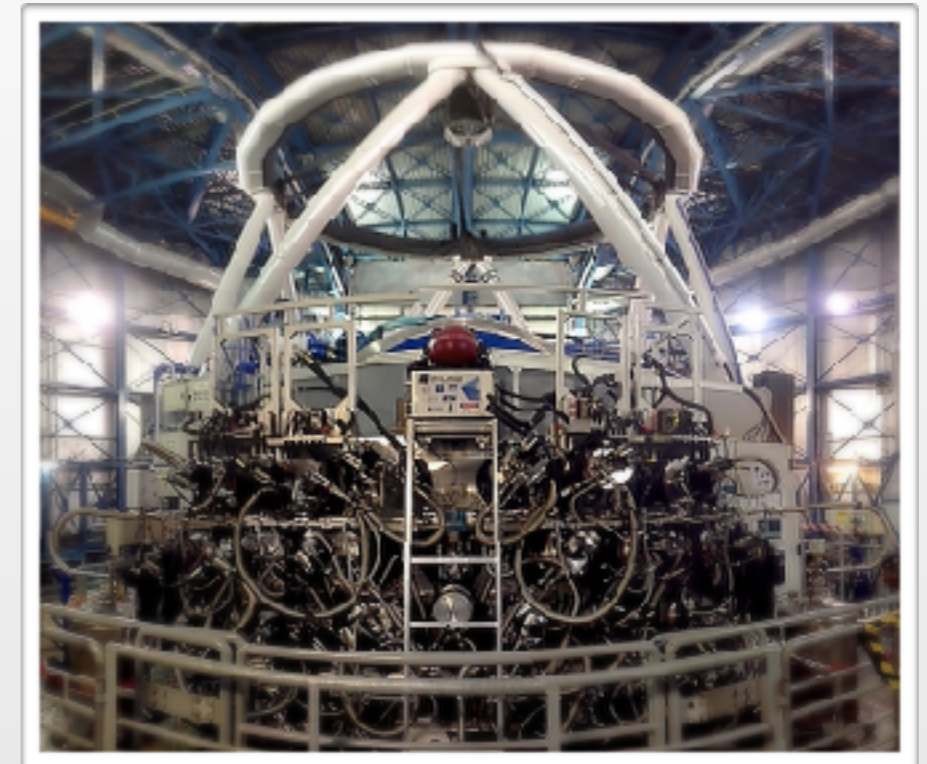
Multi Unit Spectroscopic Explorer



MUSE
multi unit spectroscopic explorer

Very Large Telescope
(VLT) Paranal, Chile

Bacon et al. (2004)

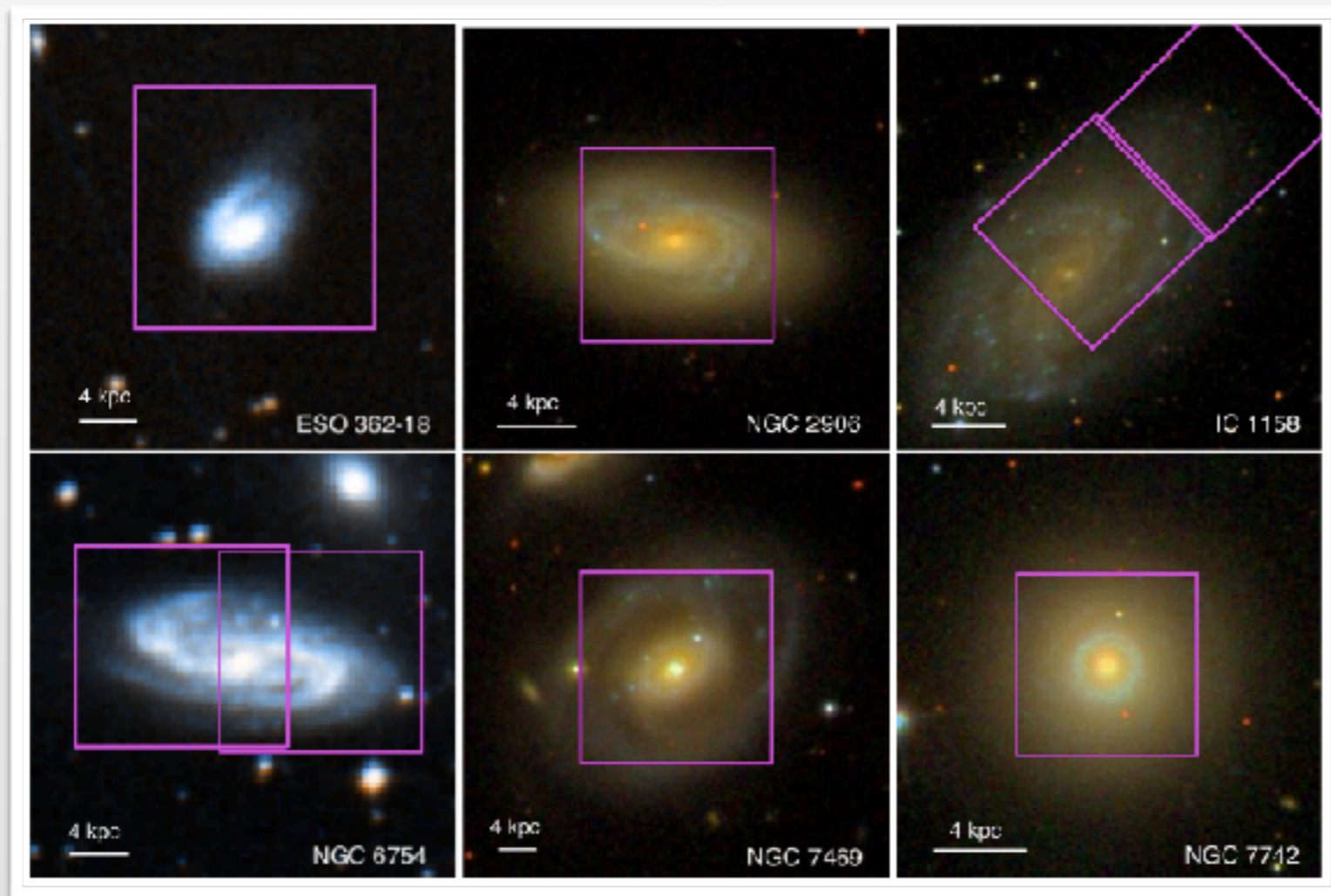


- ★ FoV: **1 arcmin²**
- ★ Sampling: **0.2 arcsec²**
- ★ λ : 4650-9300 Å
- ★ R ~ 3,000

Nebulosa de Orión

Colaboración AMUSING

All-weather MUSE Supernova Integral field Nearby Galaxies survey



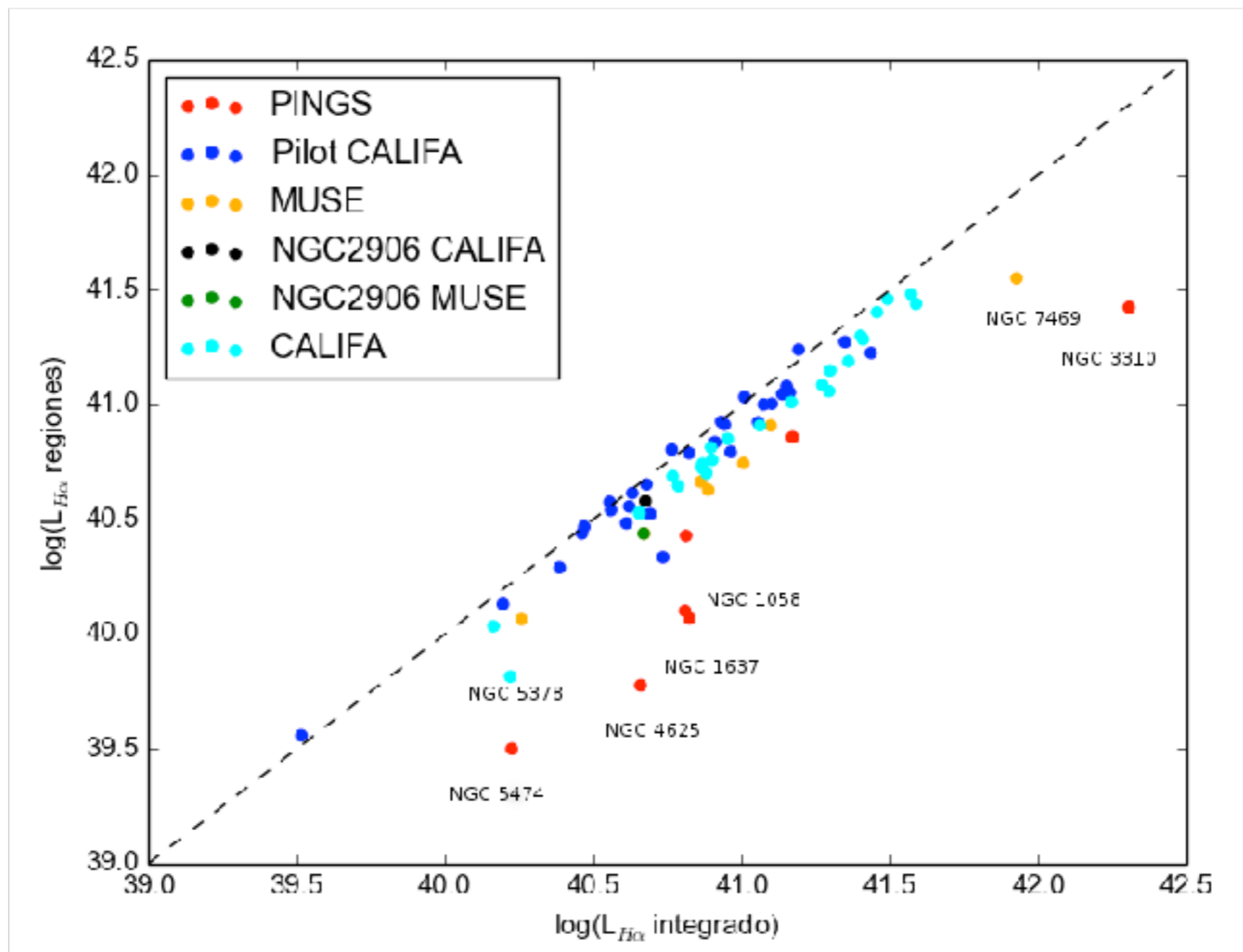
PI Joseph Anderson (ESO)

- ◆ Tiempo no-óptimo en Paranal para observar **SN hosts**.
- ◆ Propiedades de **progenitores** de SNs.
- ◆ **+400 galaxias**

Galbany et al. (2016)

By-product: **cobertura 2D IFS de galaxias cercanas a 0.2 arcsec!**

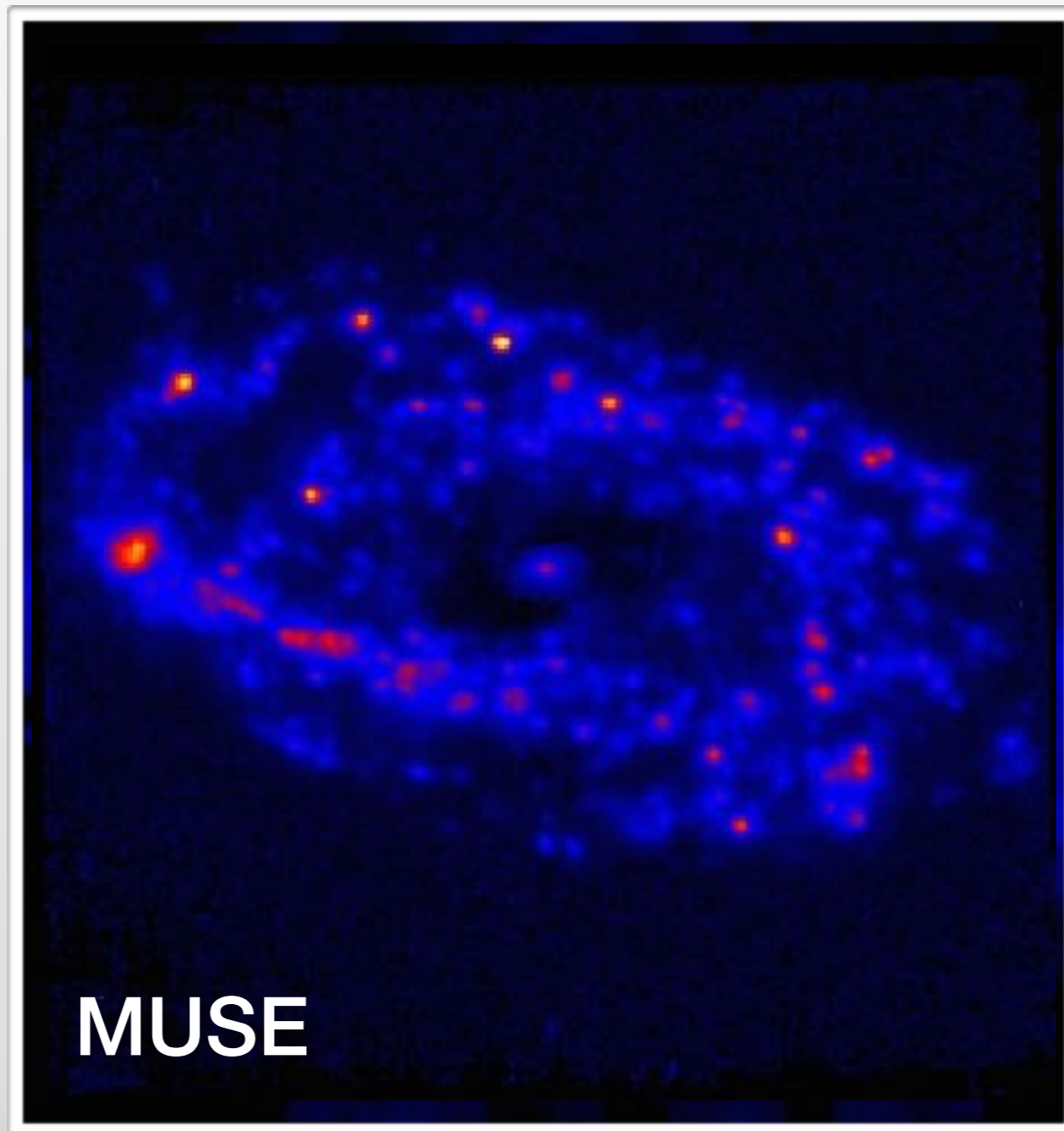
Efectos de resolución espacial en IFS



Efectos de resolución espacial en IFS

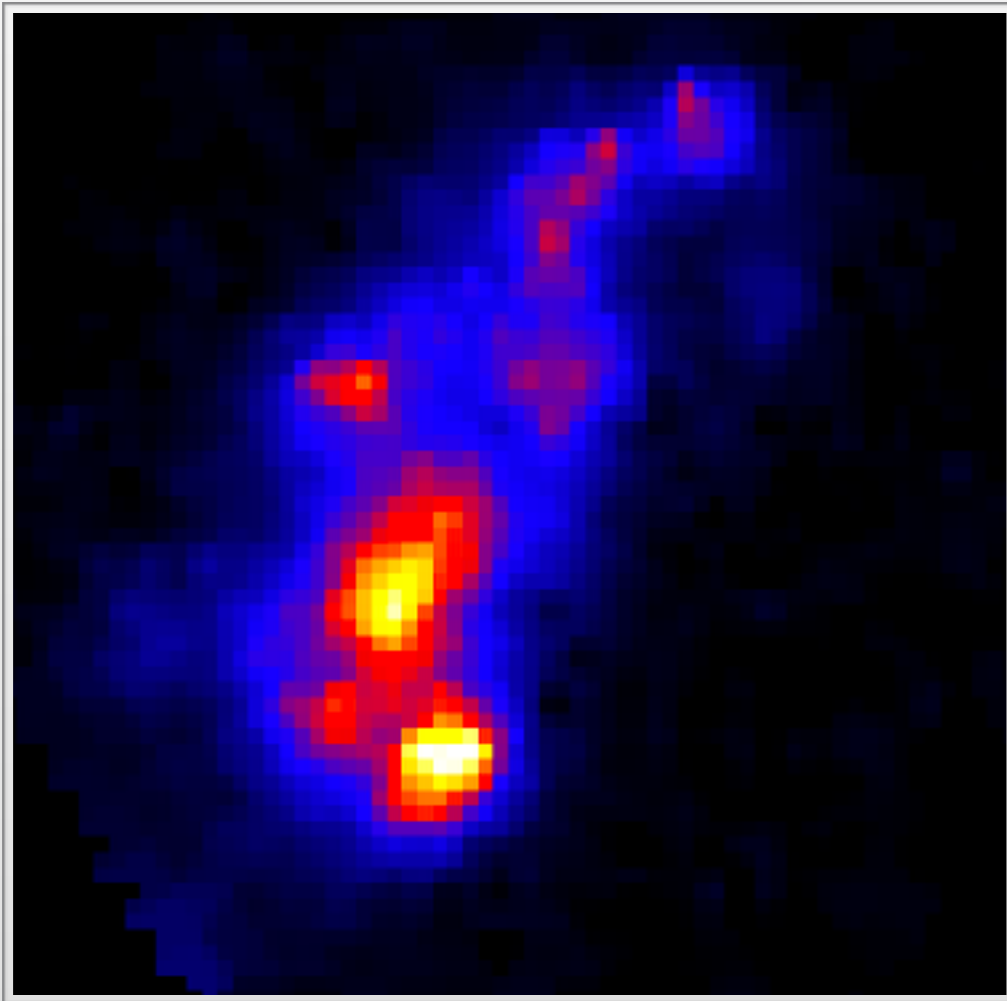
NGC 2906

Emisión $H\alpha$

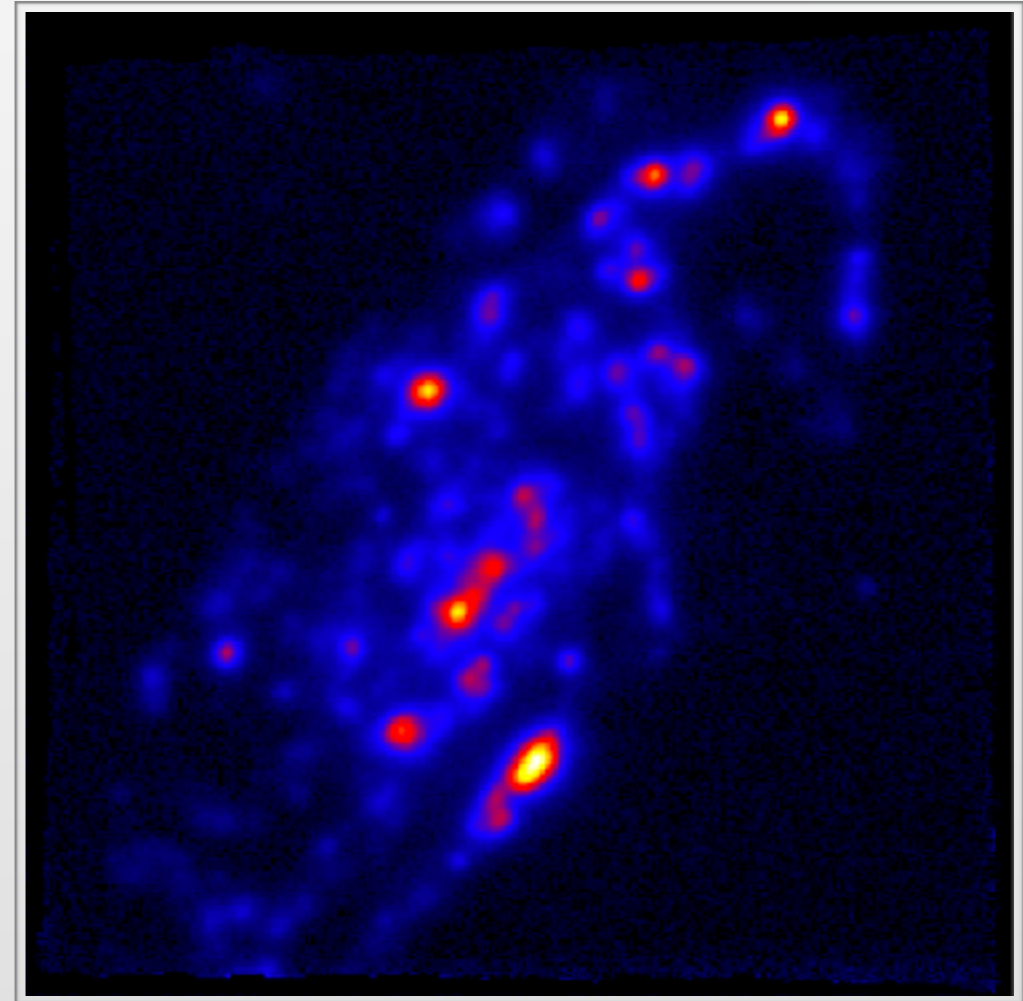


Efectos de resolución espacial en IFS

UGC 2690



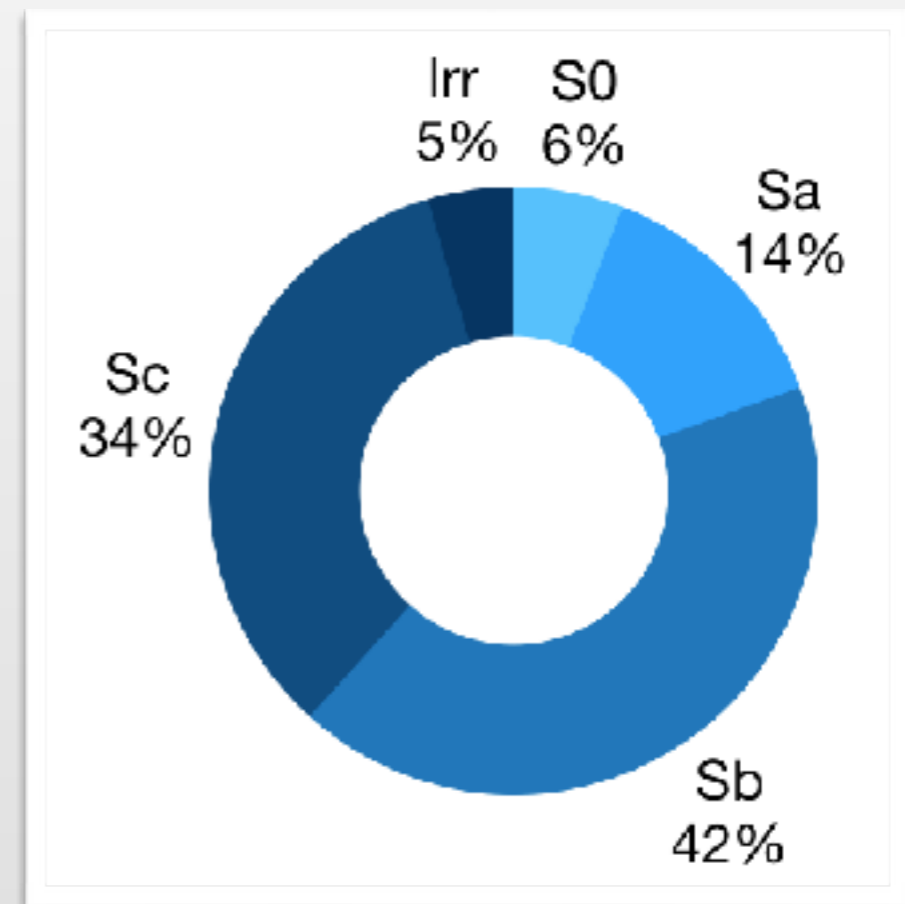
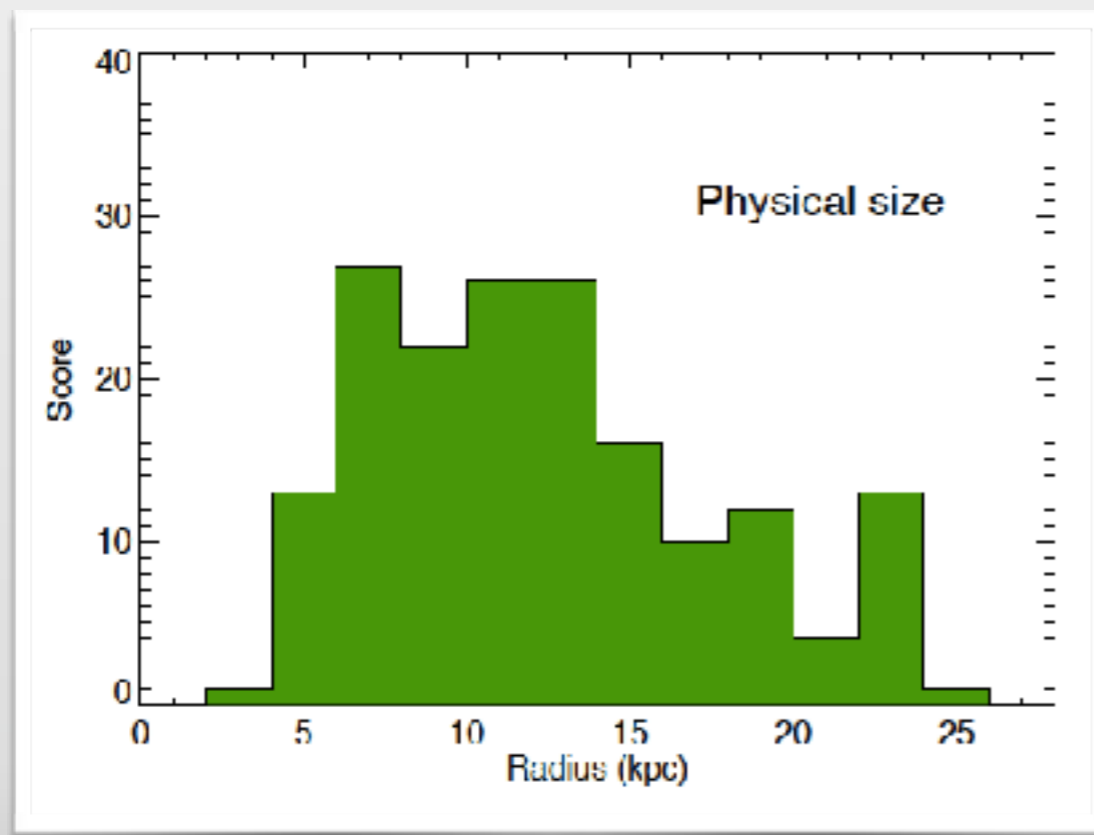
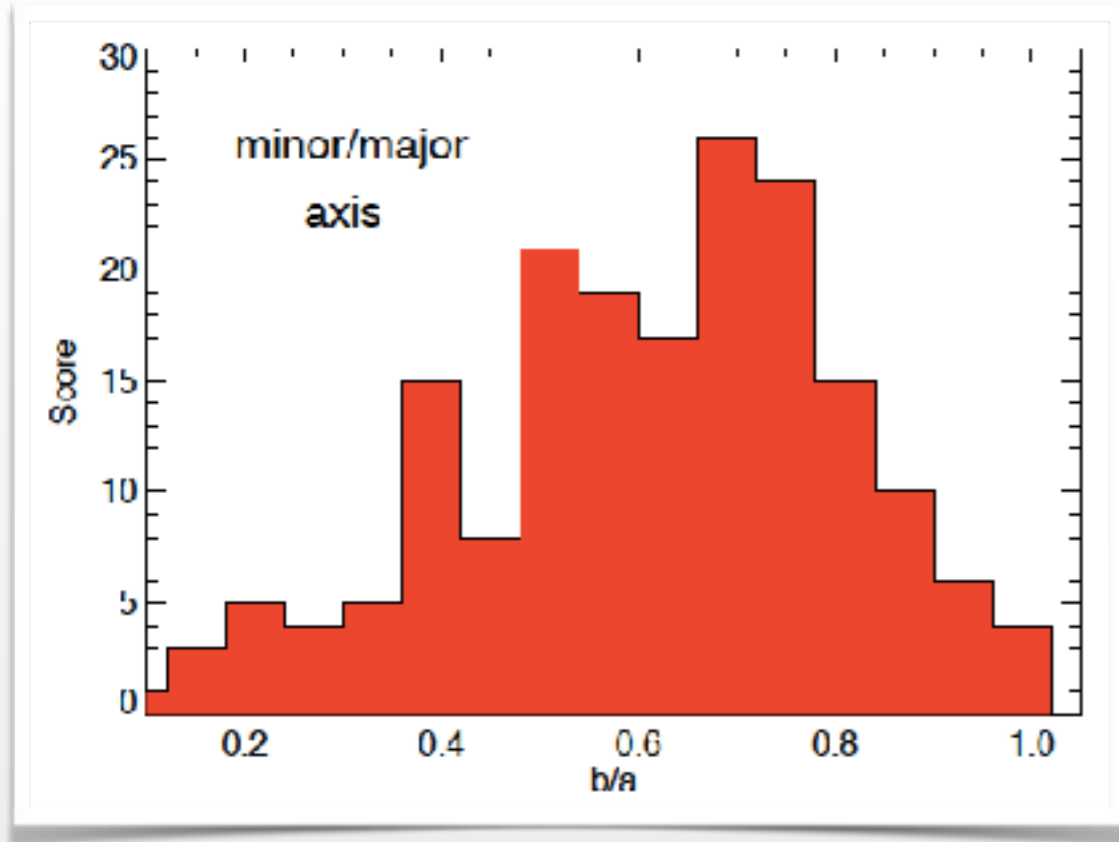
CALIFA



MUSE

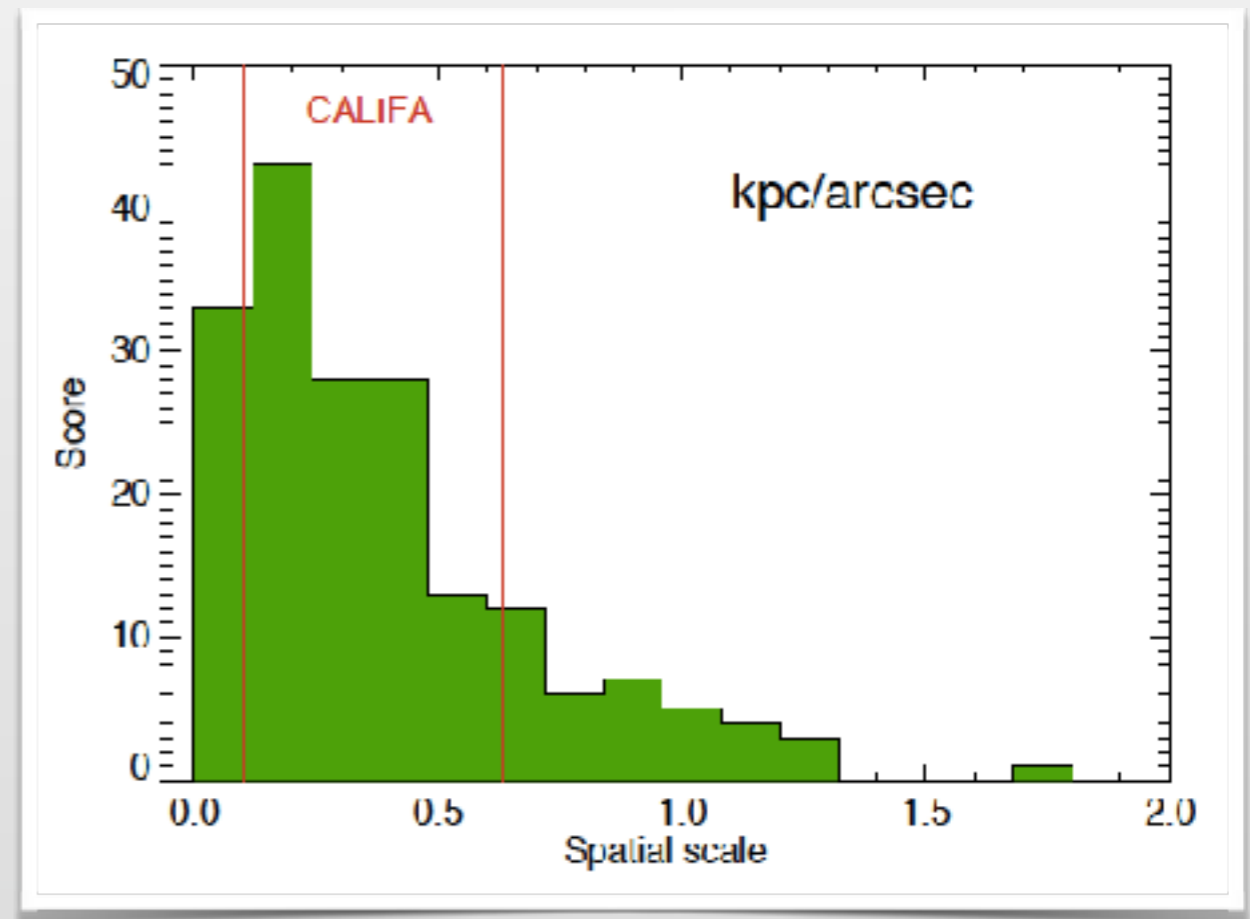
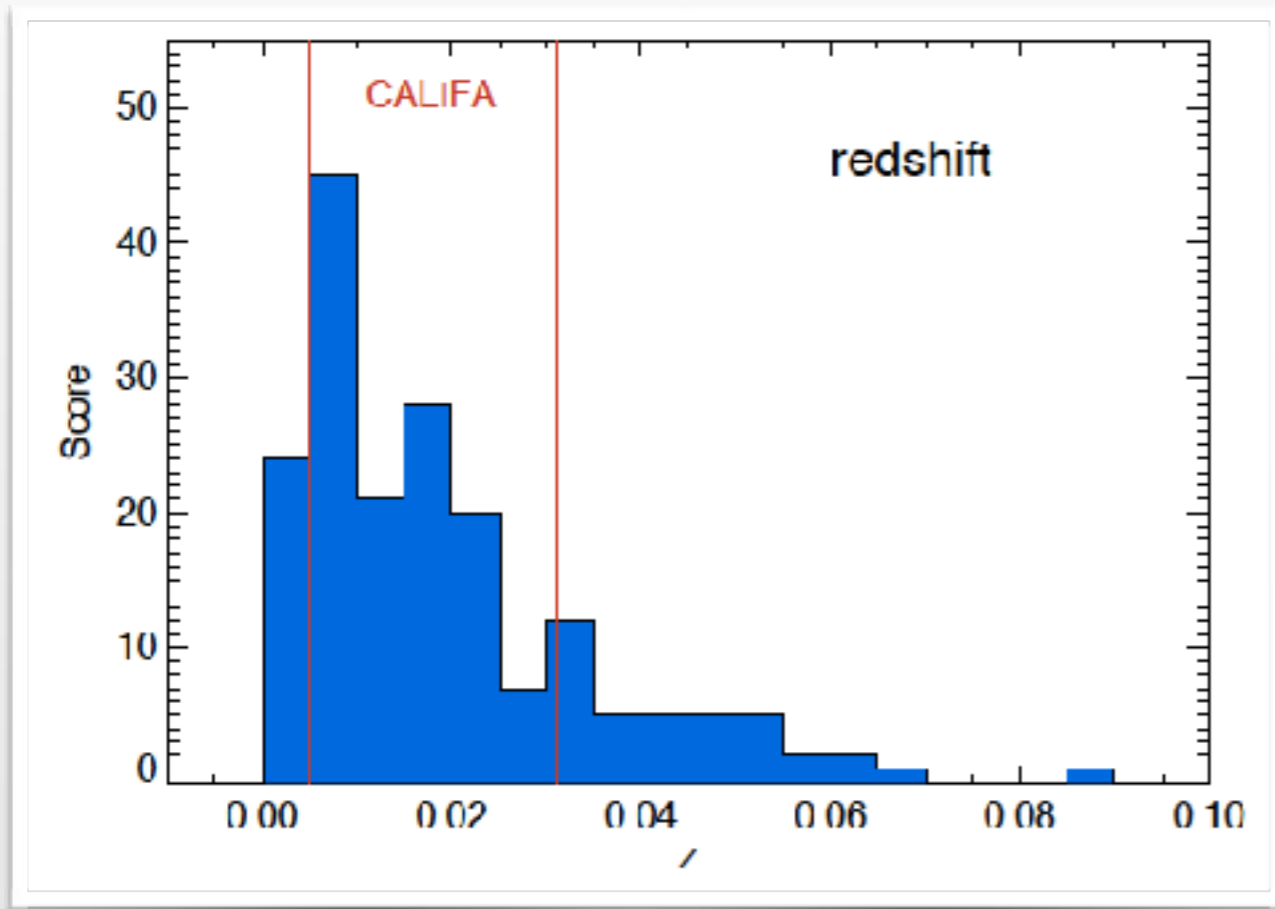
Caracterización de AMUSING

submuestra DIG:
183 galaxias



20 Seyfert-AGN

Caracterización de AMUSING



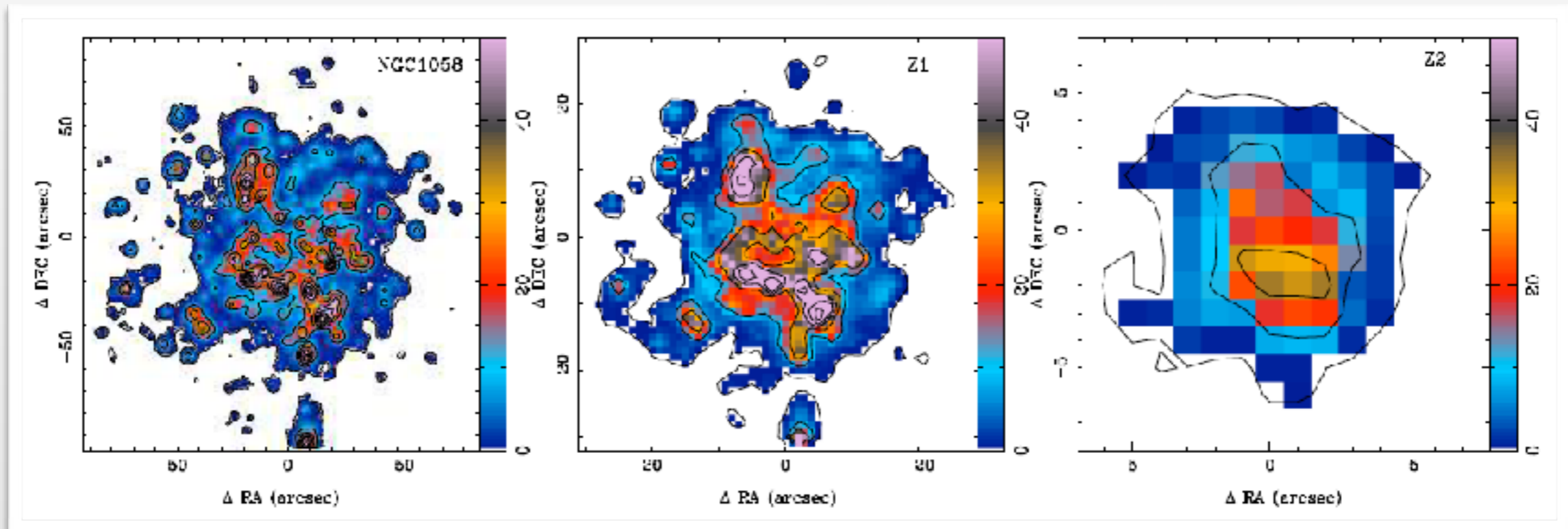
Efectos de resolución espacial en IFS

Mast et al. 2013

PINGS: $z \sim 0$

CALIFA: $z \sim 0.02$

MaNGA: $z \sim 0.05$



2 Reff ~ 80-100

25-30

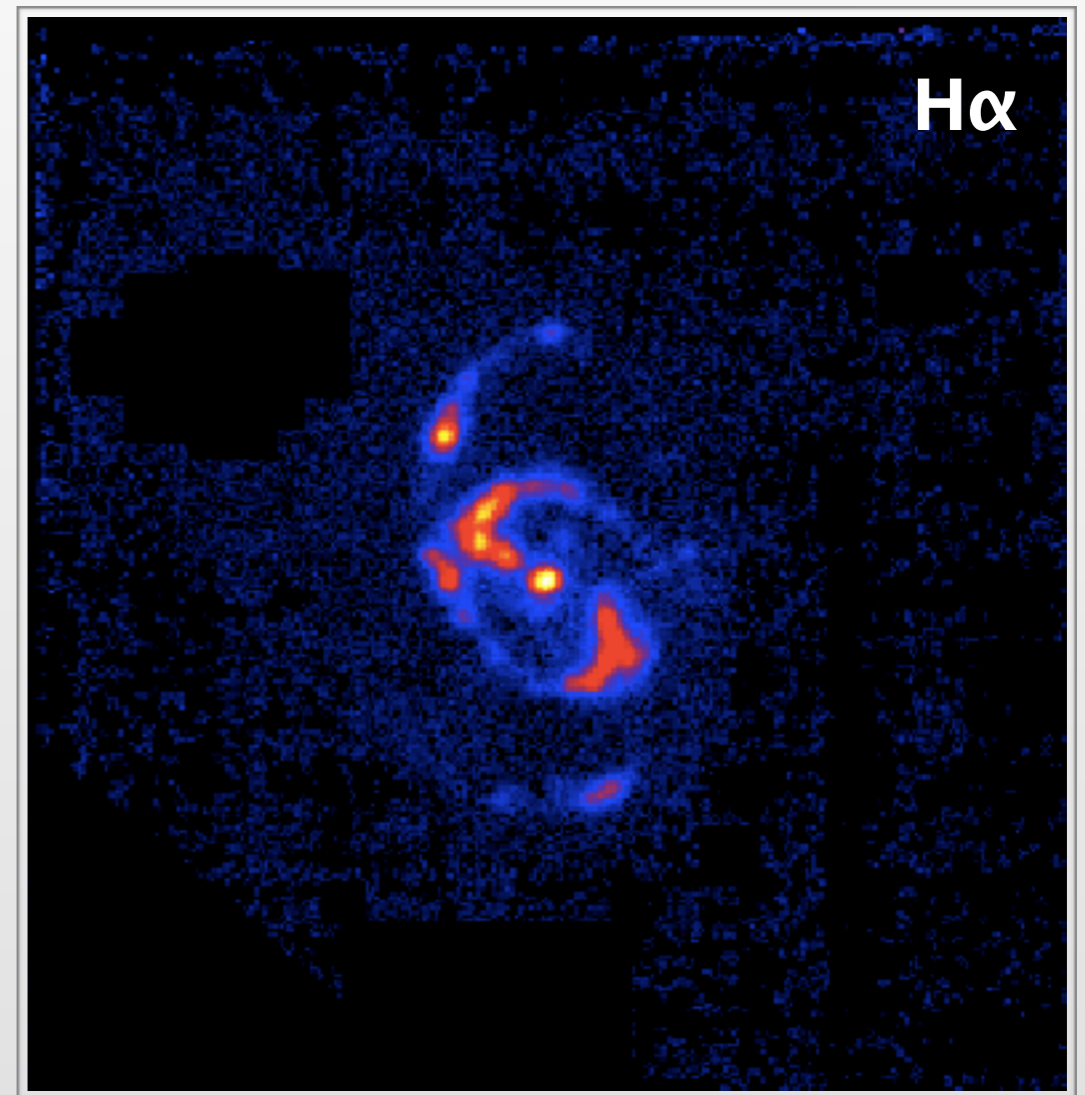
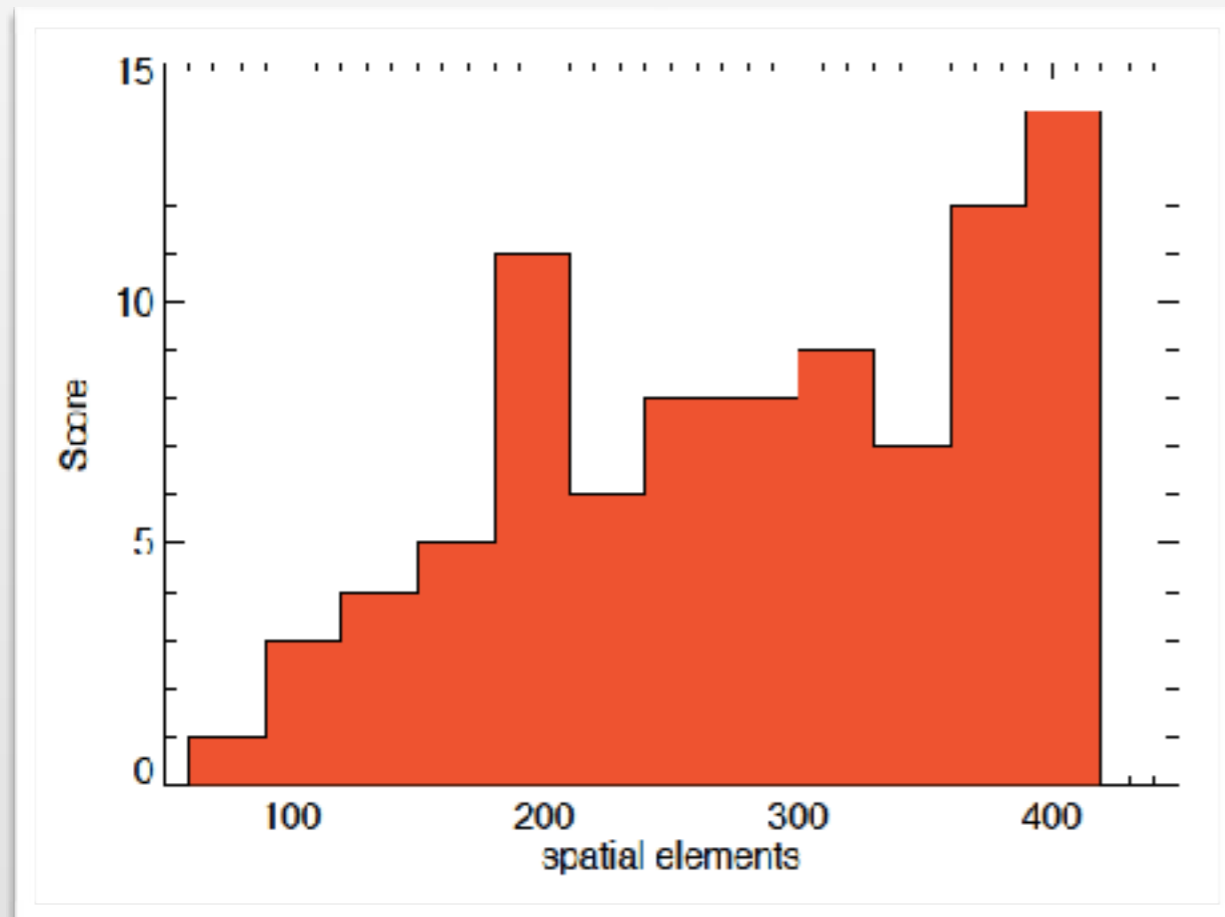
5-10

Parámetro clave: número de elementos espaciales

Caracterización de AMUSING

2MASXJ01460987

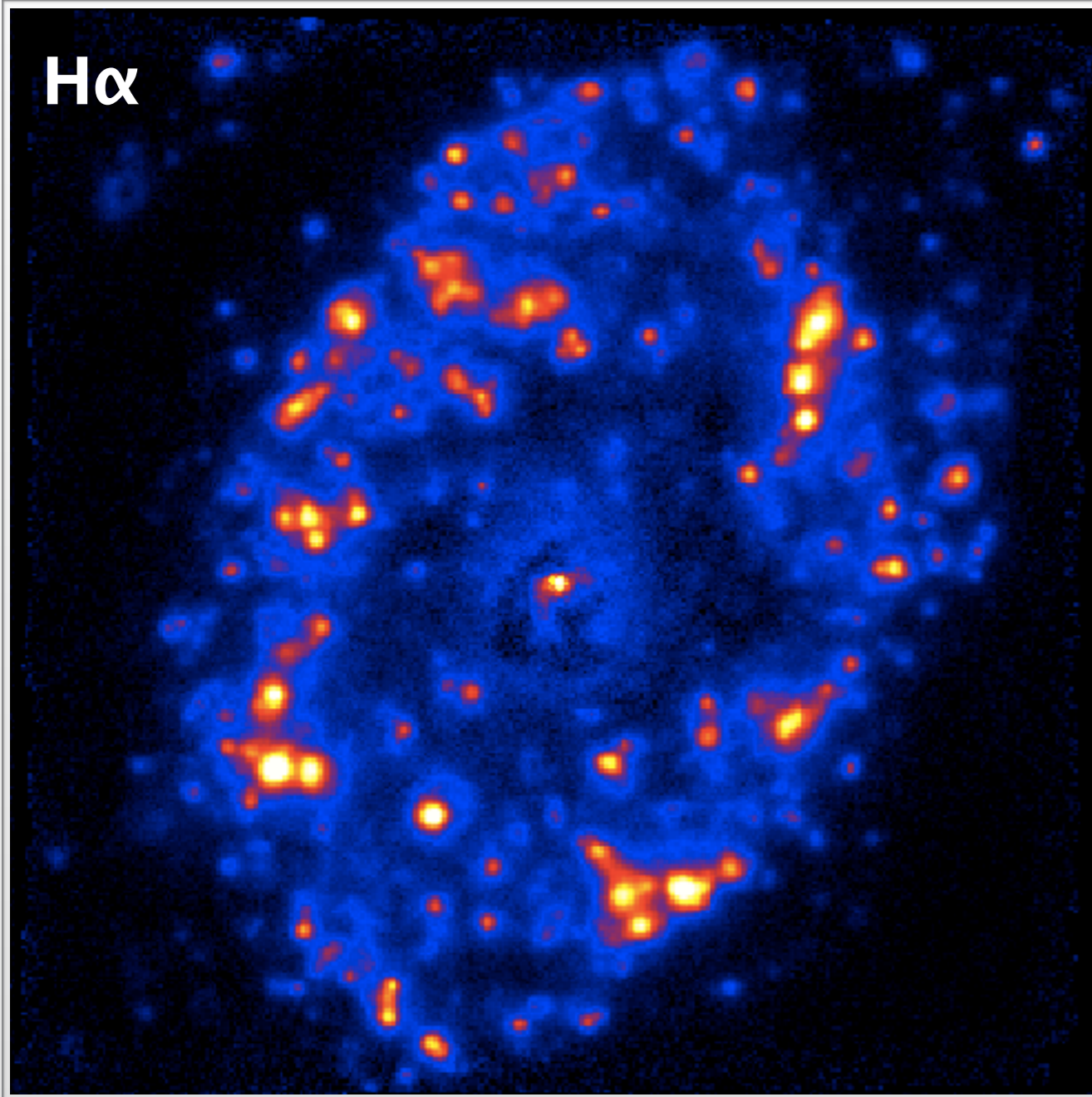
Elementos espaciales a D_{25}



$z = 0.086$

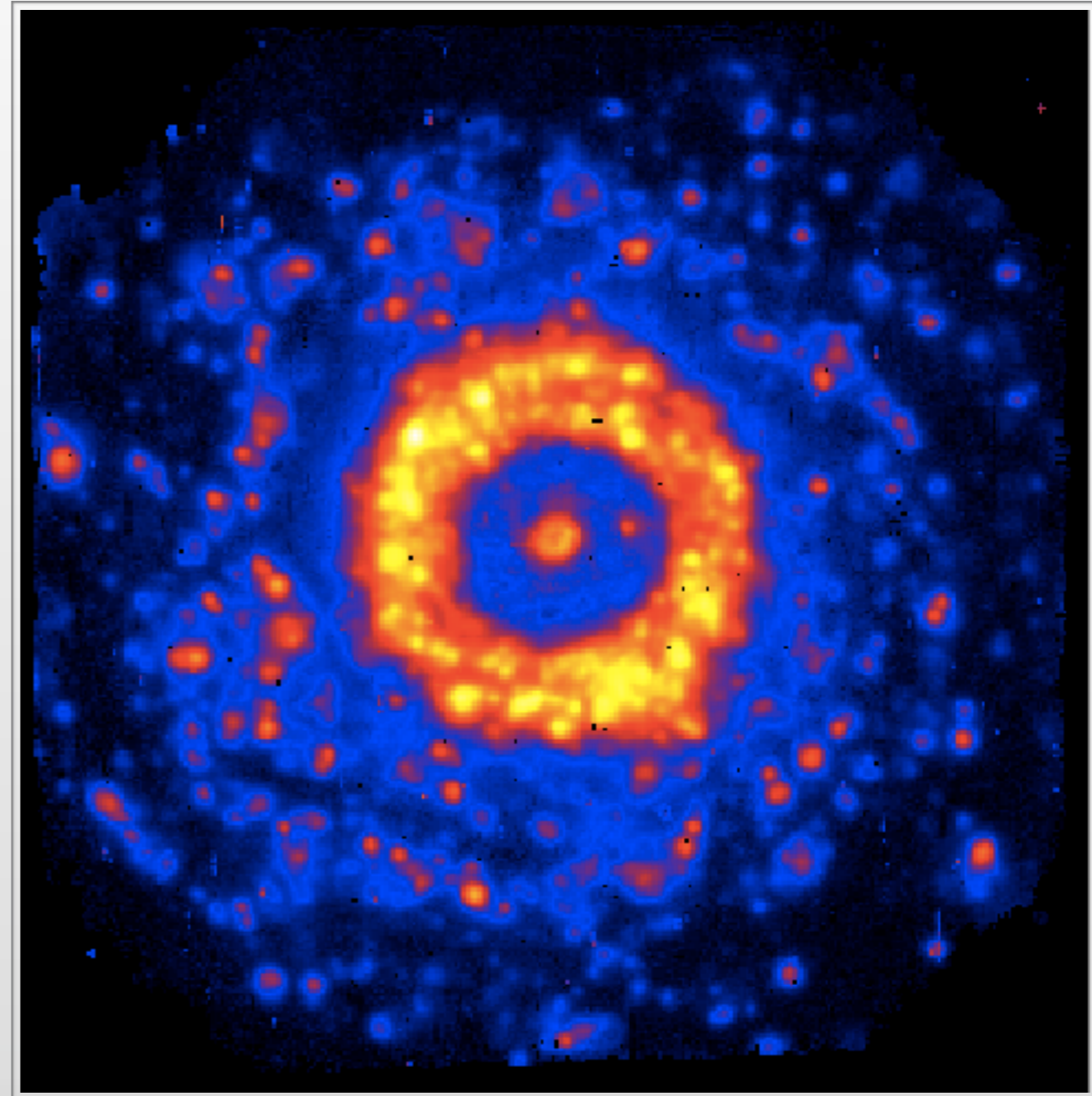
Galaxias AMUSING-DIG

H α

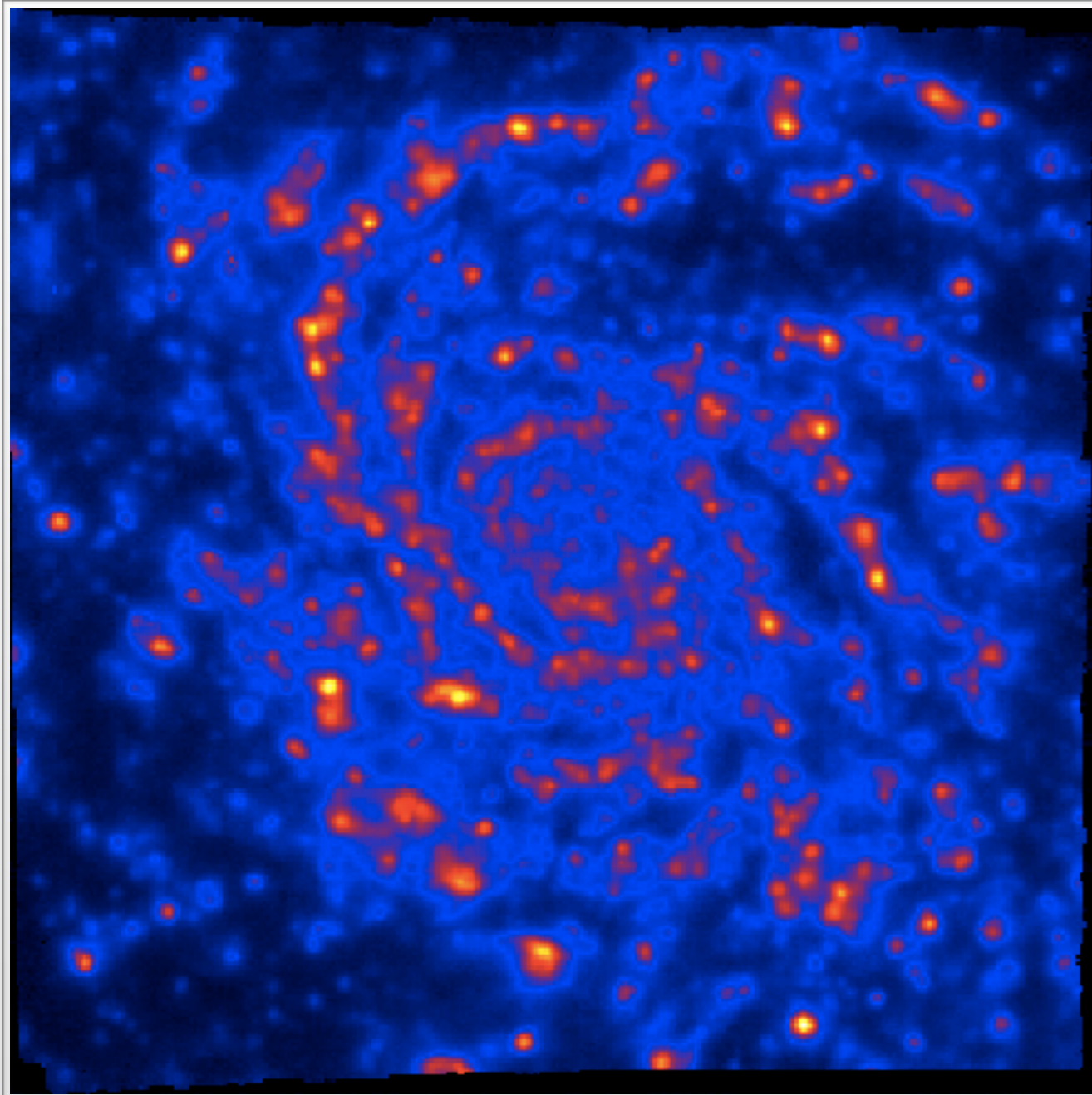


NGC 6902

NGC 7742

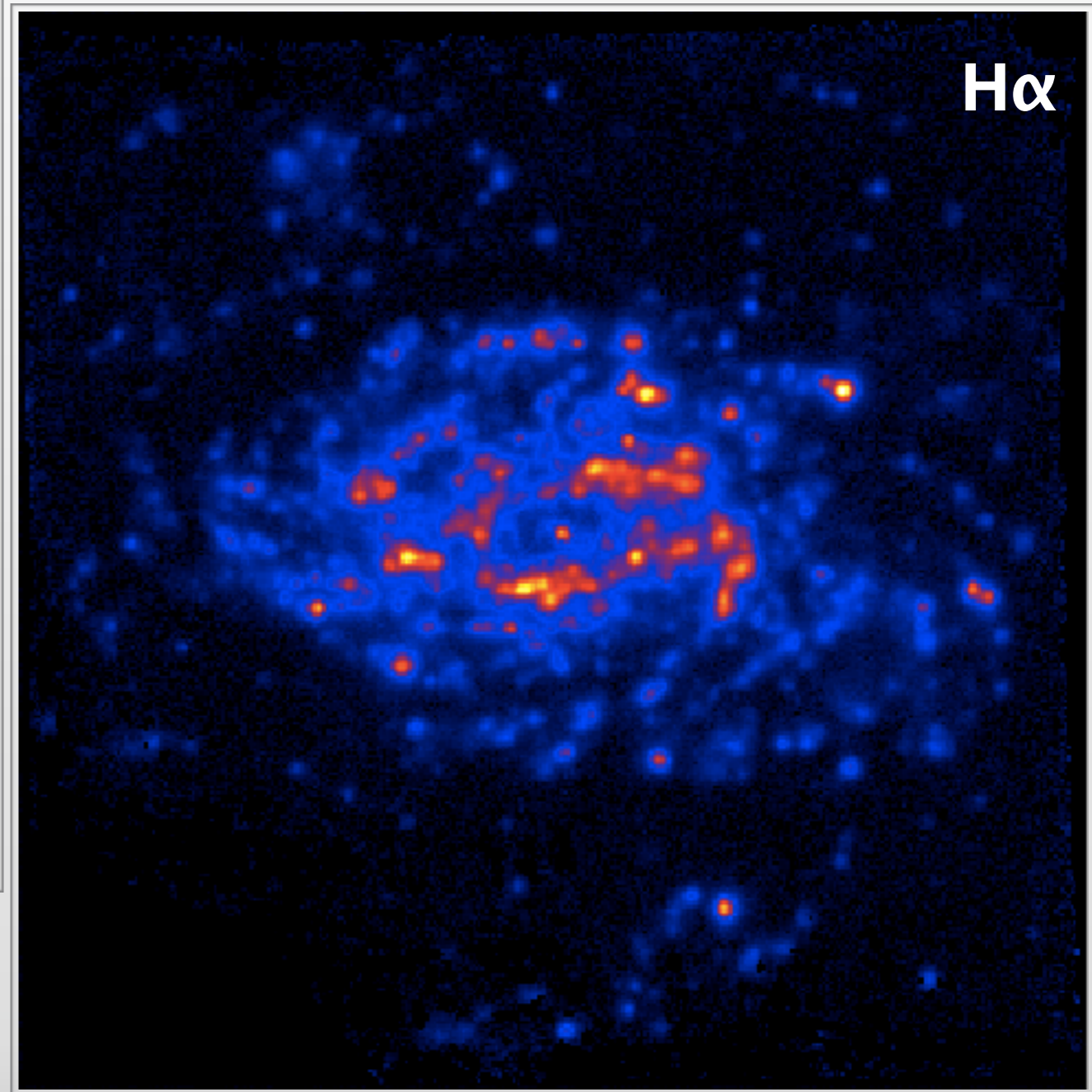


Galaxias AMUSING-DIG



NGC 4030

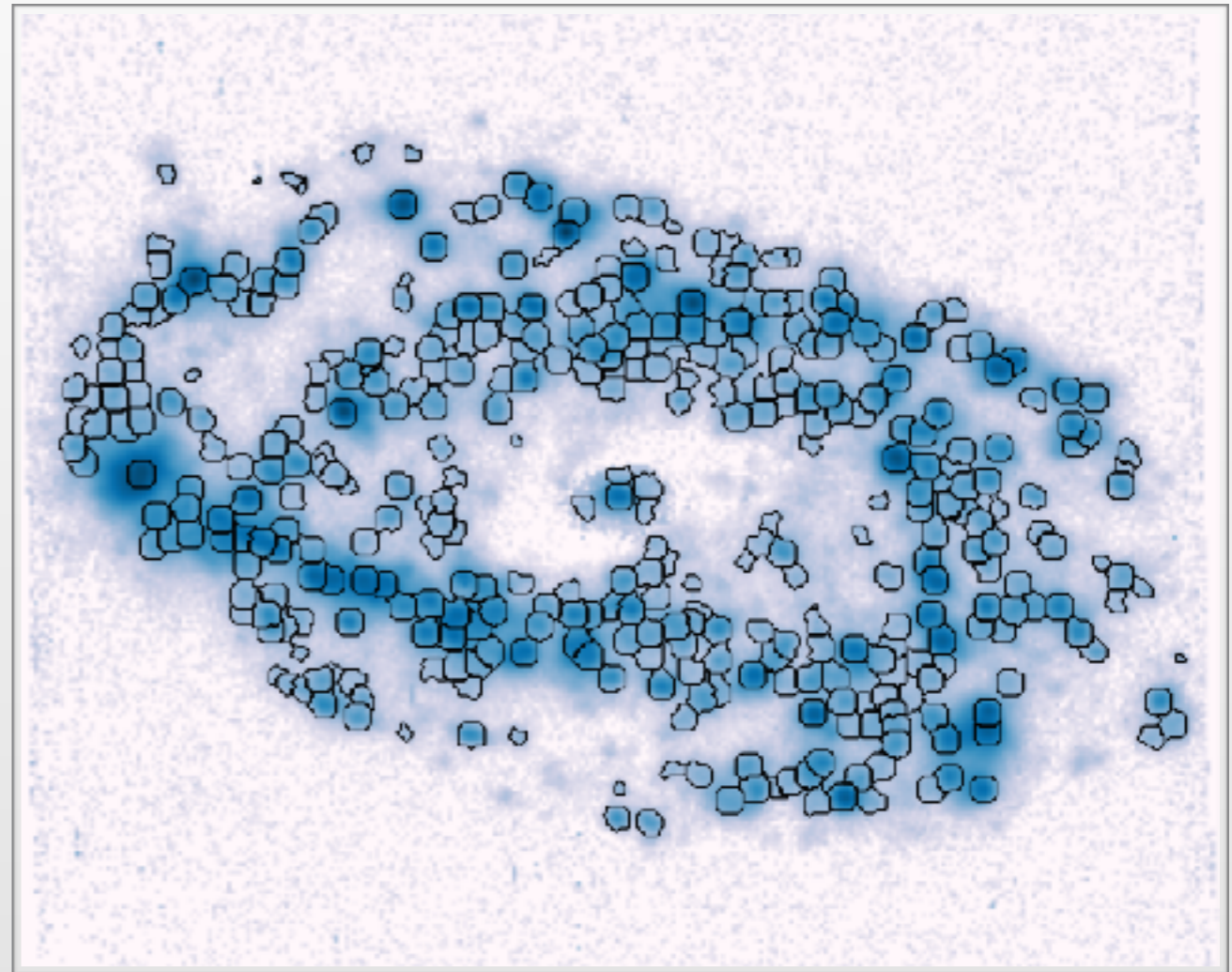
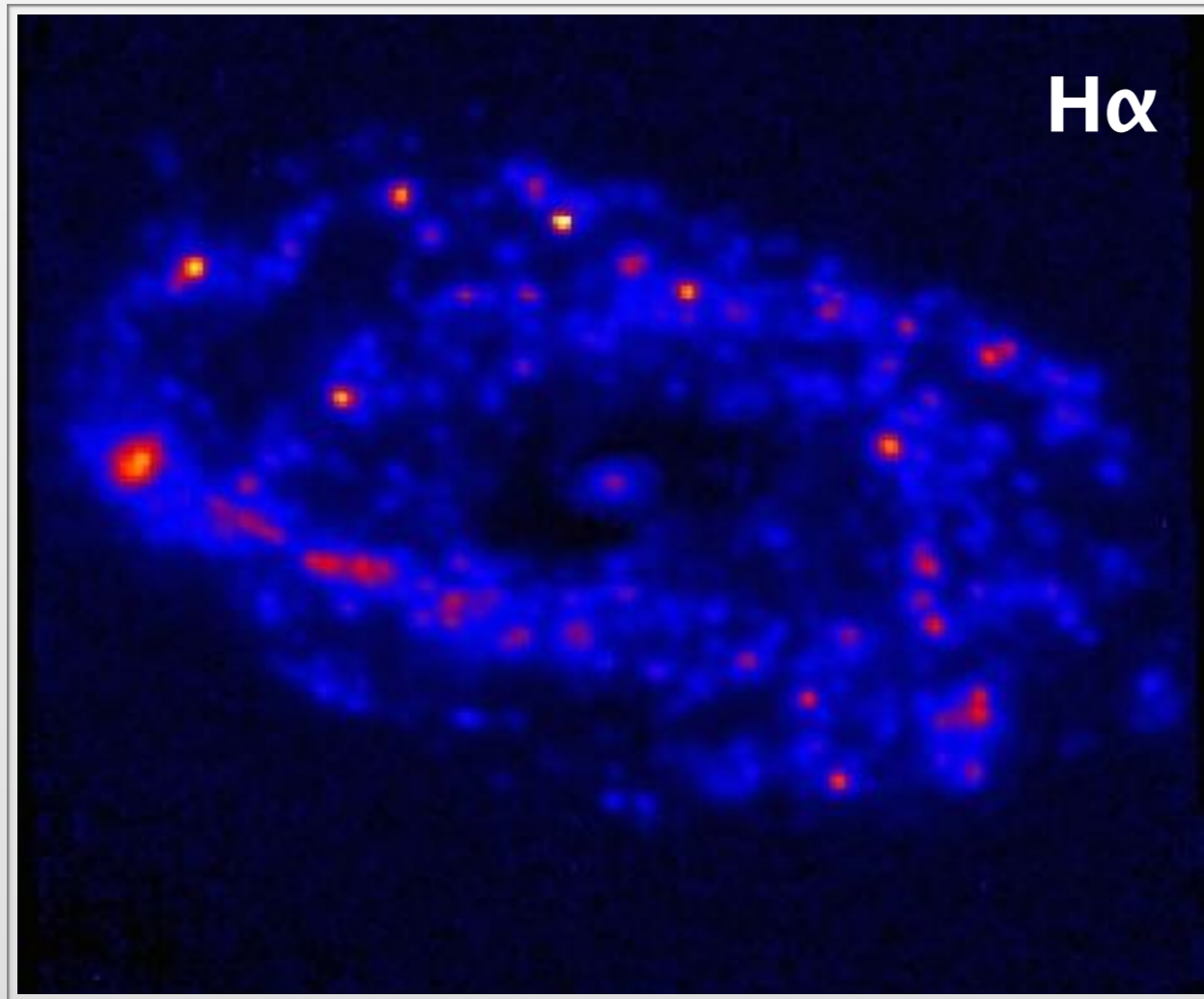
IC 320



H α

Detección del DIG en AMUSING

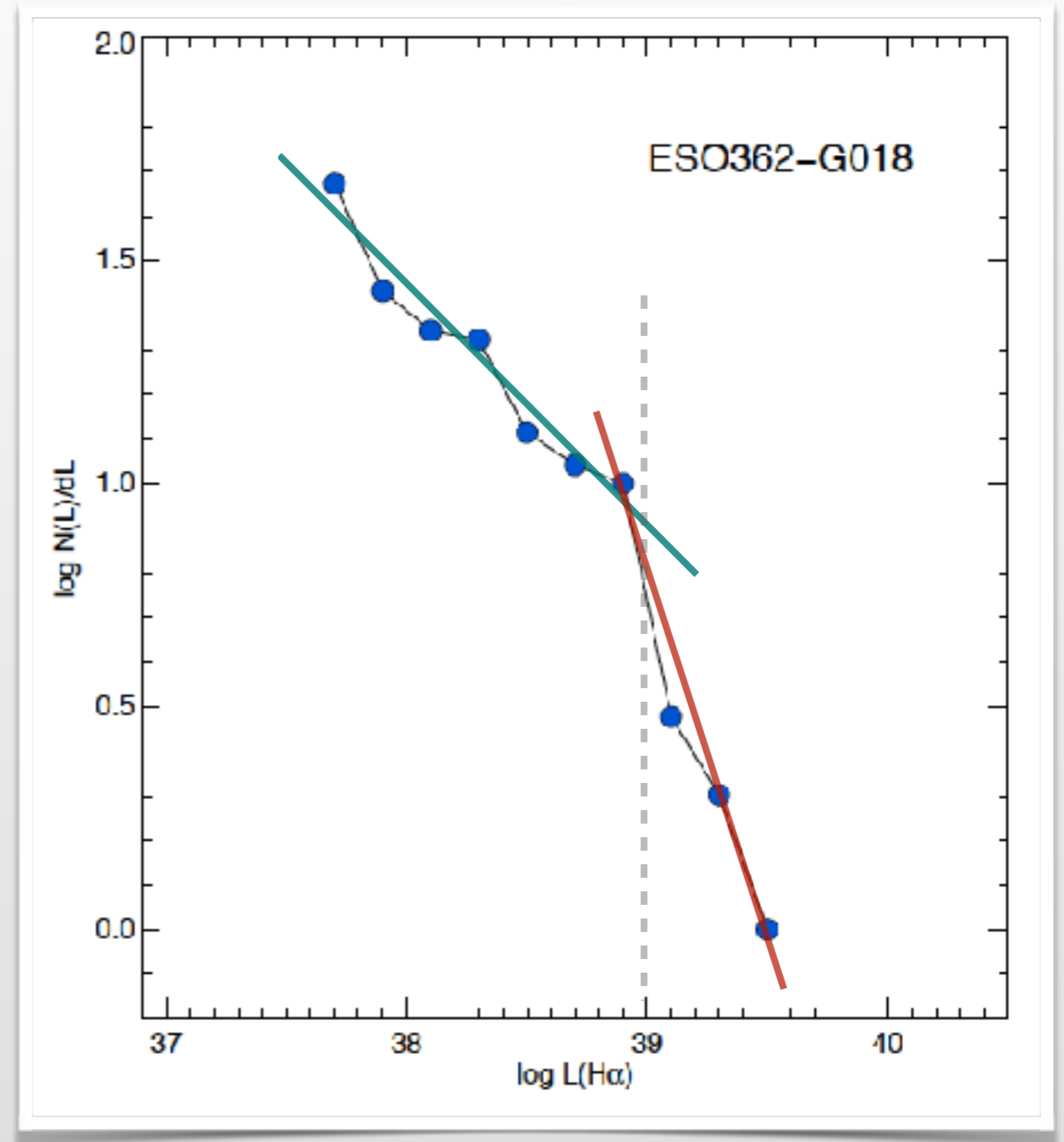
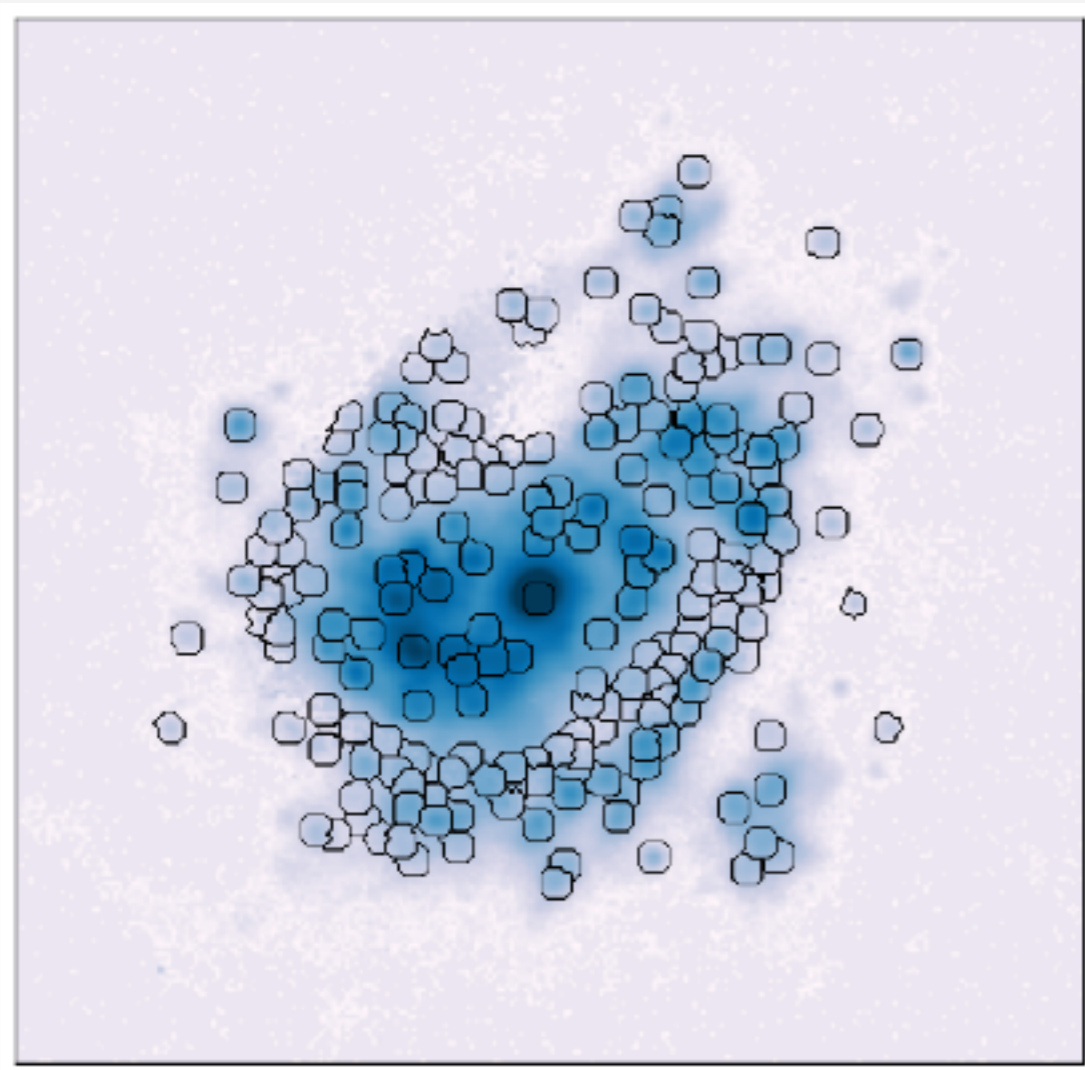
Metodología: Zurita et al. (2000)



HIIexplorer (Sánchez et al. 2012)

Función de luminosidad regiones HII

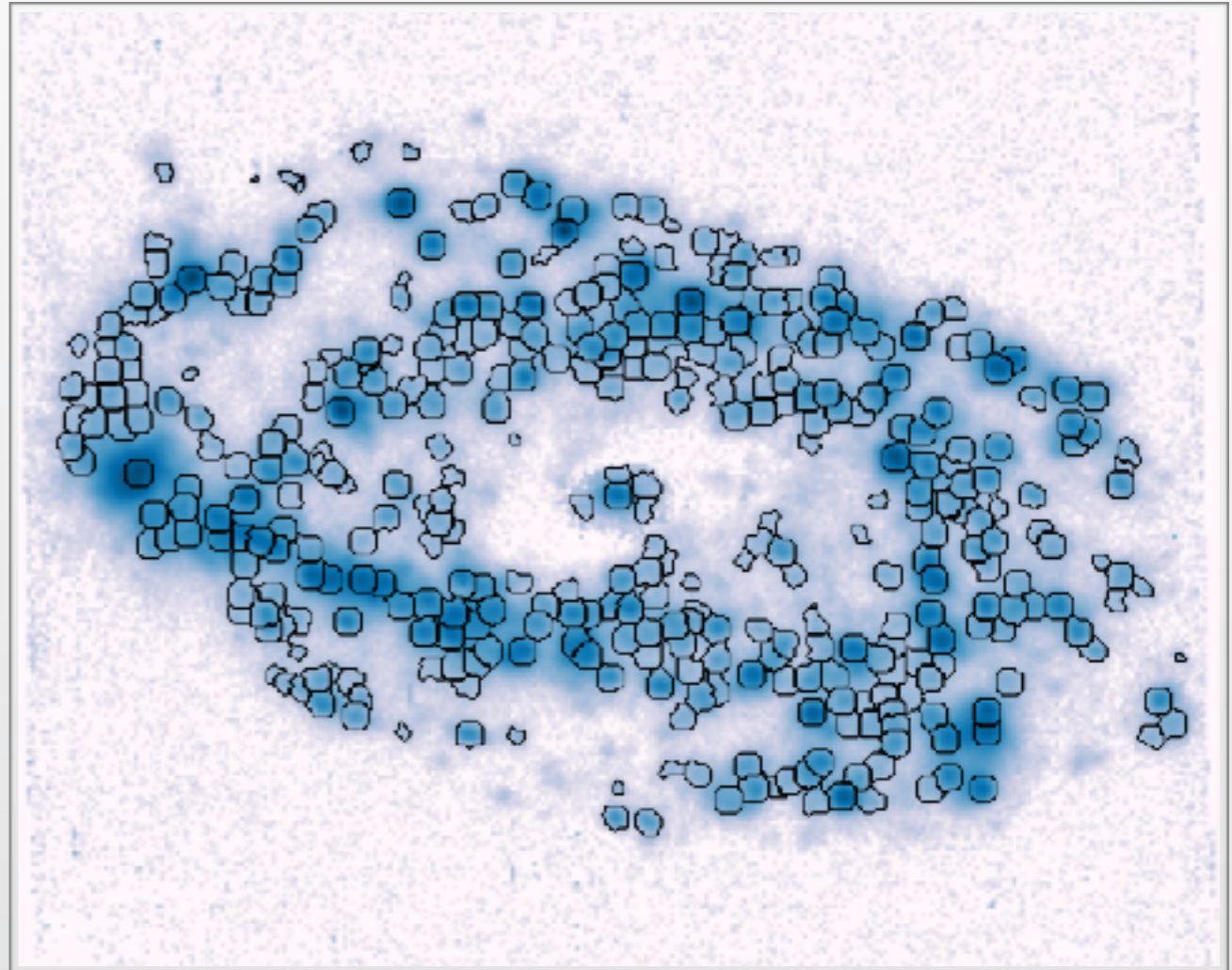
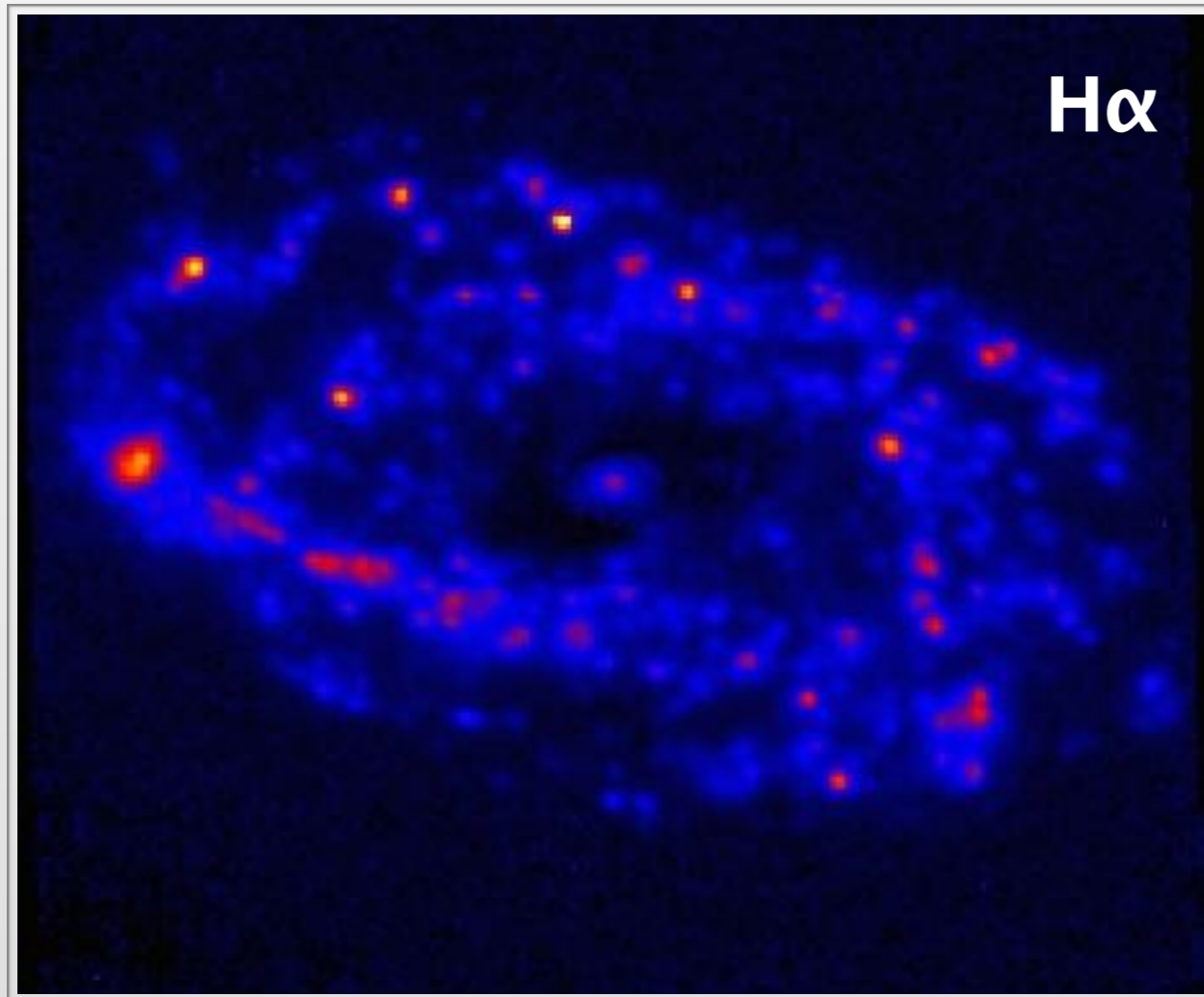
ESO 362-G018



HII LF break: Kennicutt et al. (1989)

Detección del DIG en AMUSING

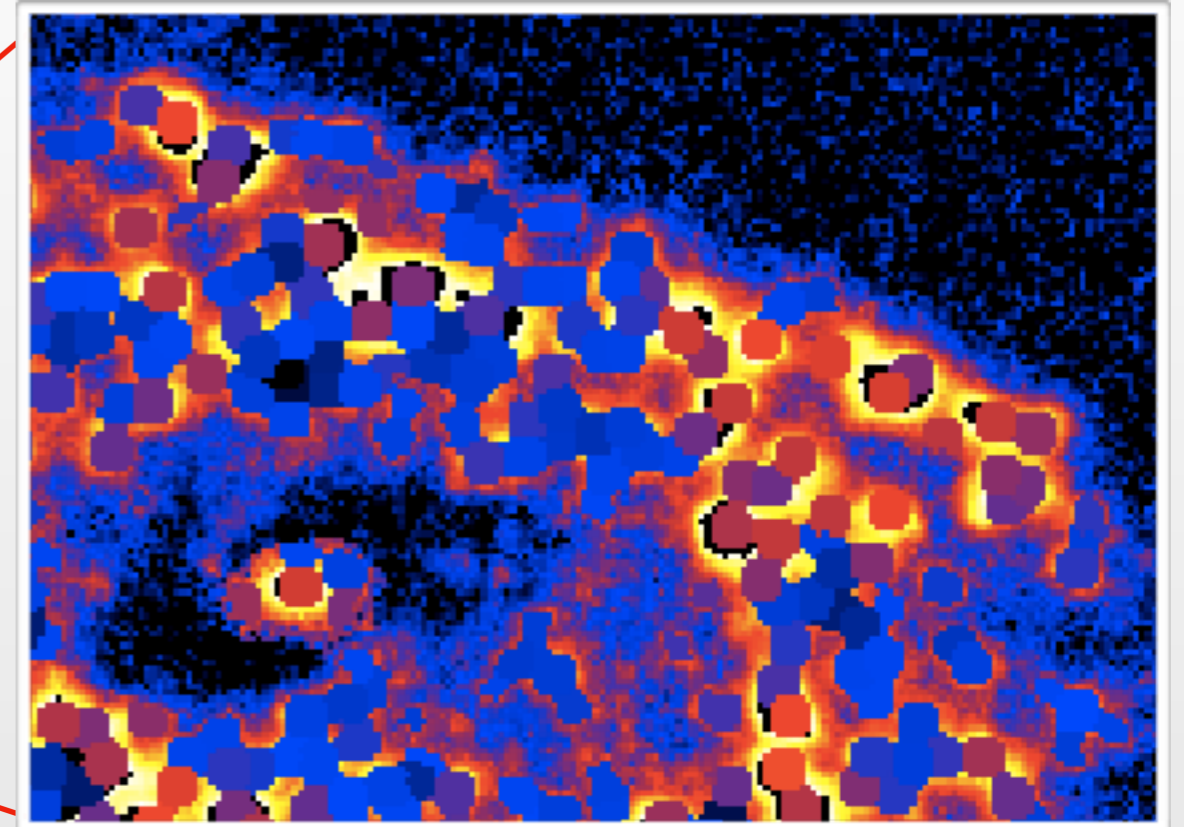
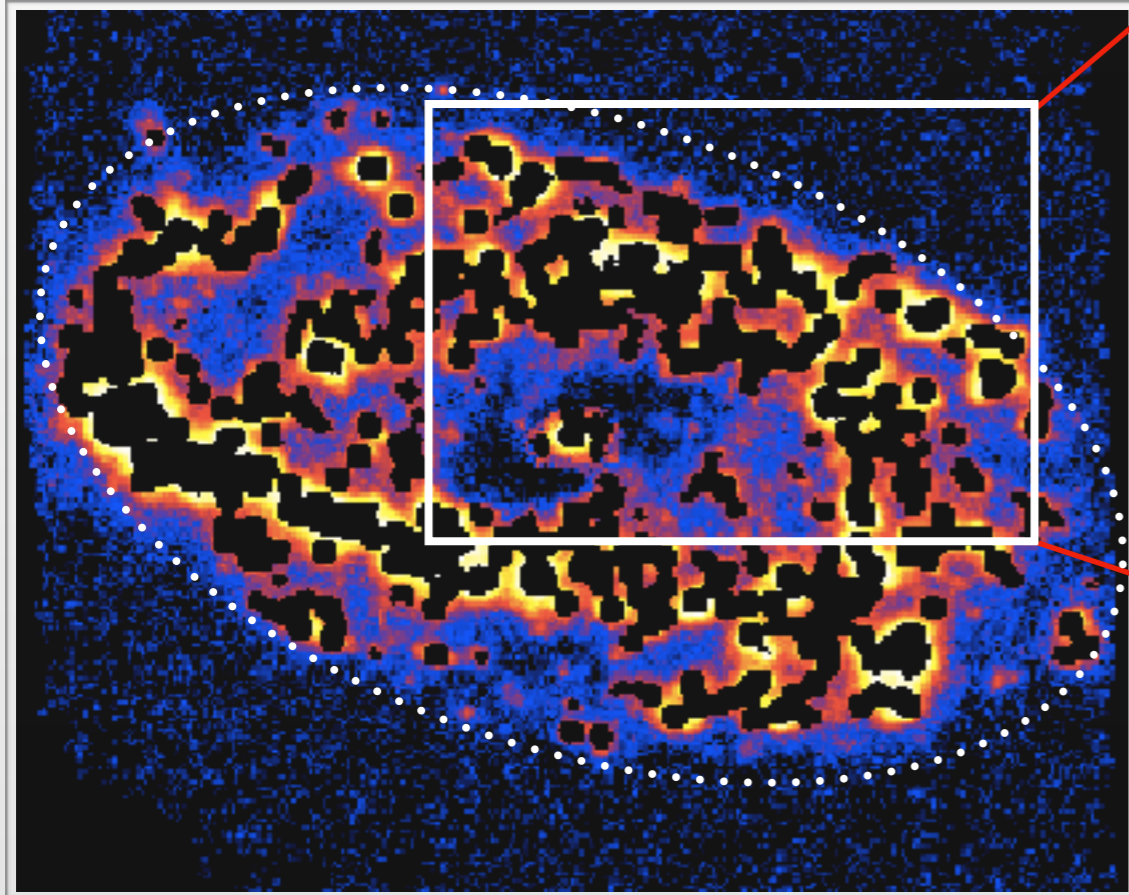
Metodología: Zurita et al. (2000)



HIIexplorer (Sánchez et al. 2012)

Detección del DIG en AMUSING

Mapa sin regiones HII

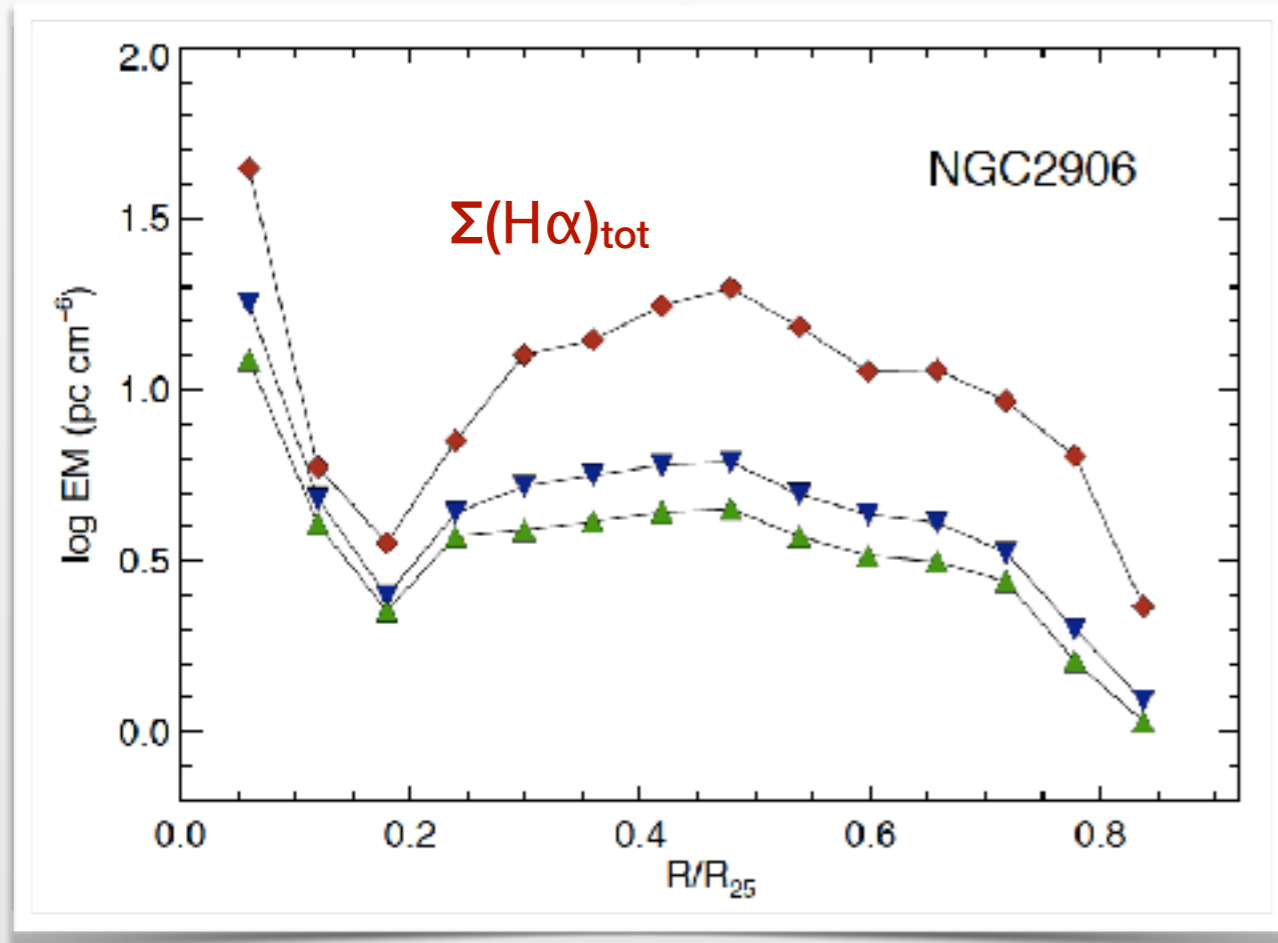


Contribución proporcional:
 $A(\text{HII}) \times \Sigma(\text{DIG})$

Límite inferior DIG

Límite superior DIG

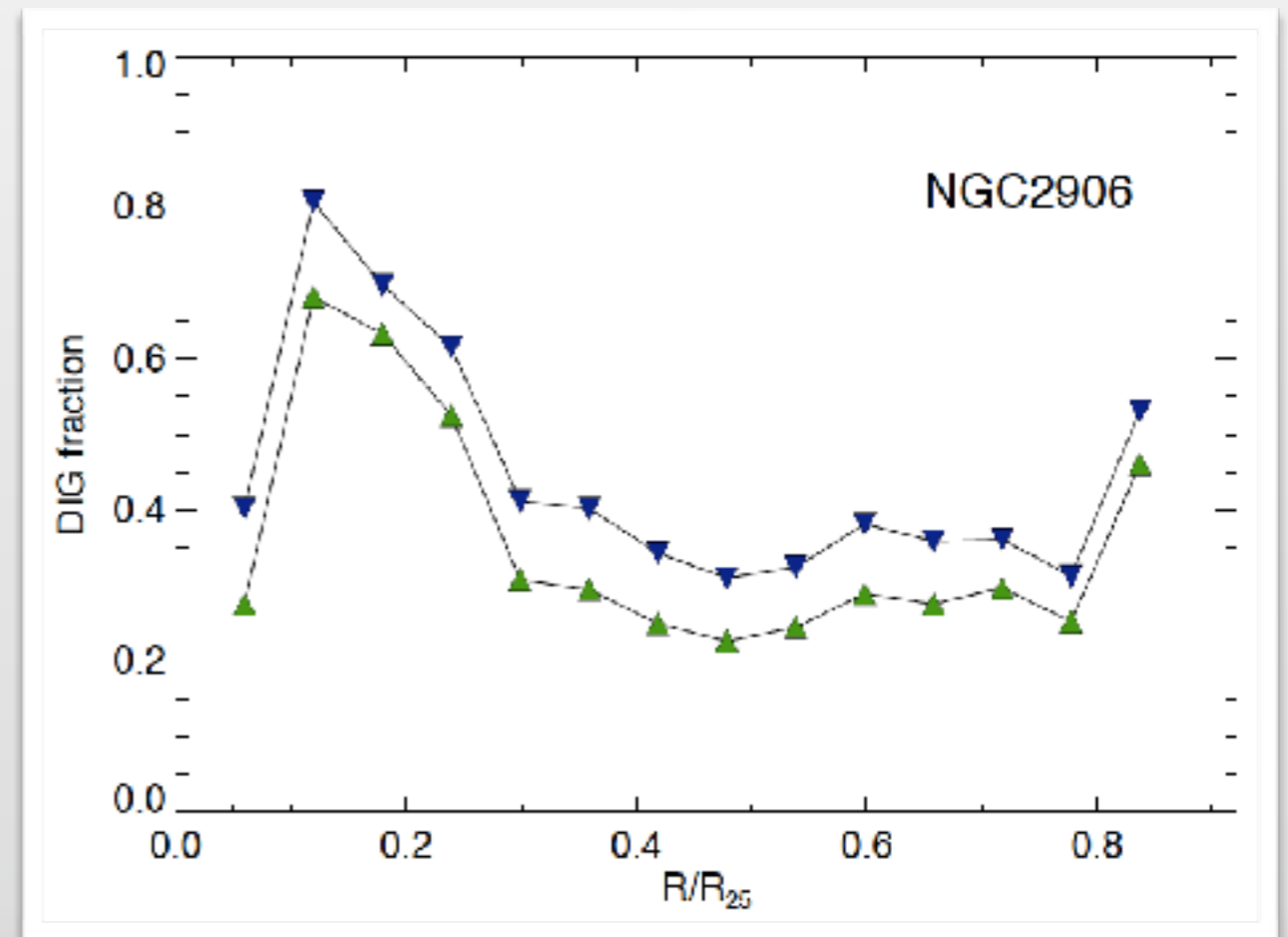
Detección del DIG en AMUSING



Perfil radial de $\Sigma(H\alpha)$

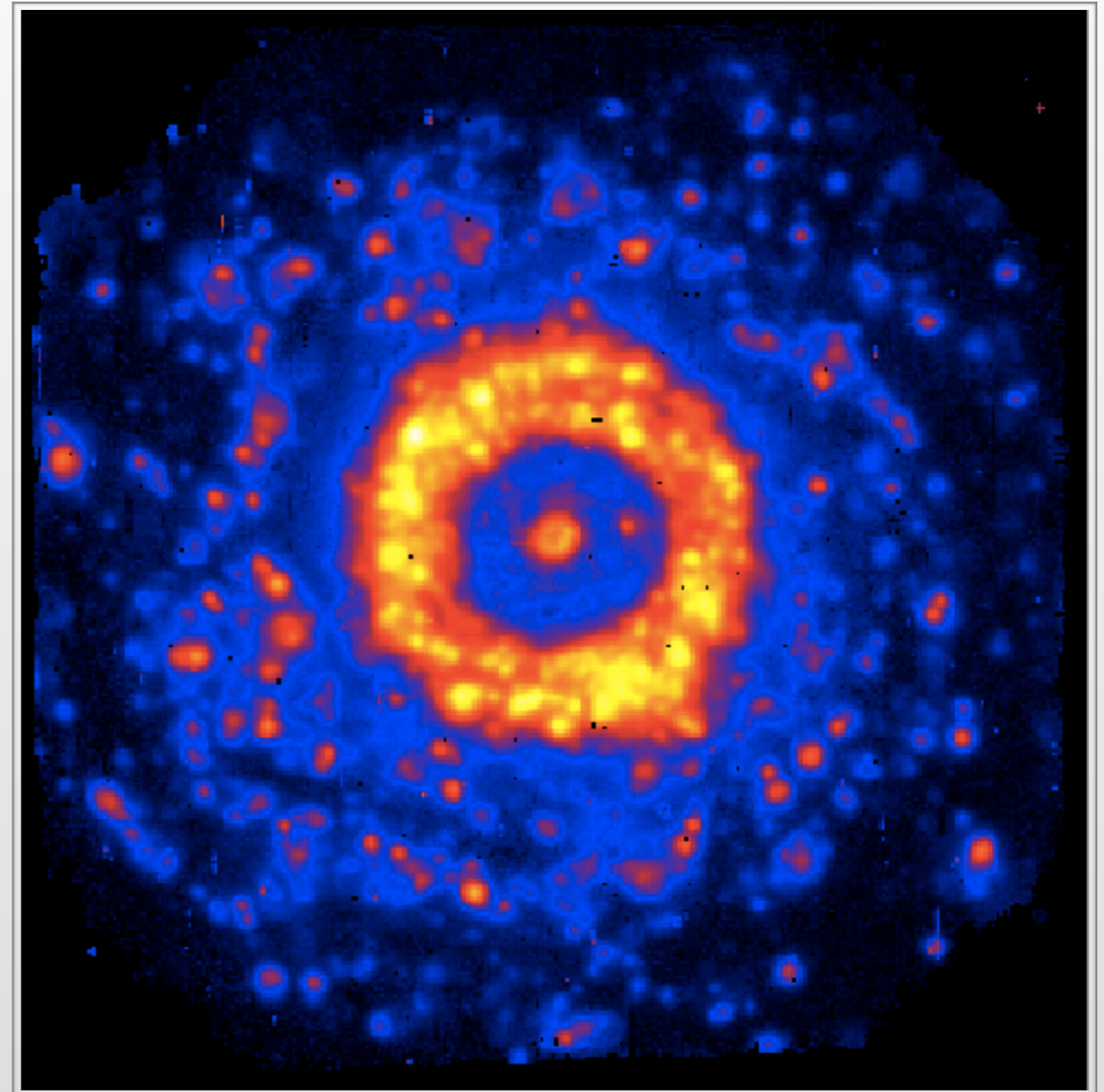
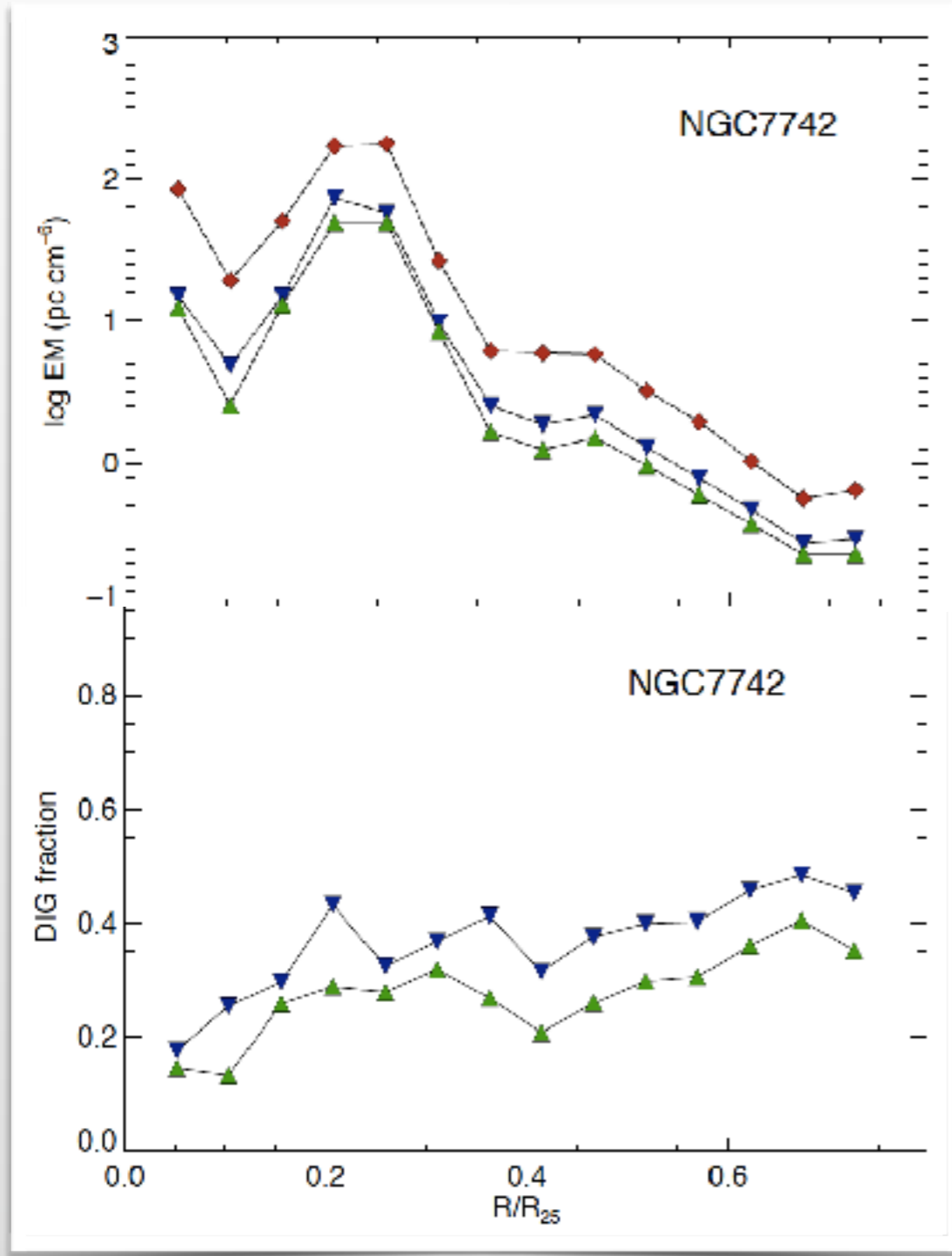
- ◆ ◆ Límite superior
- ◆ ◆ Límite inferior

Fracción DIG vs Radio



Detección del DIG en AMUSING

NGC 7742



Trabajo en progreso: AMUSING-DIG

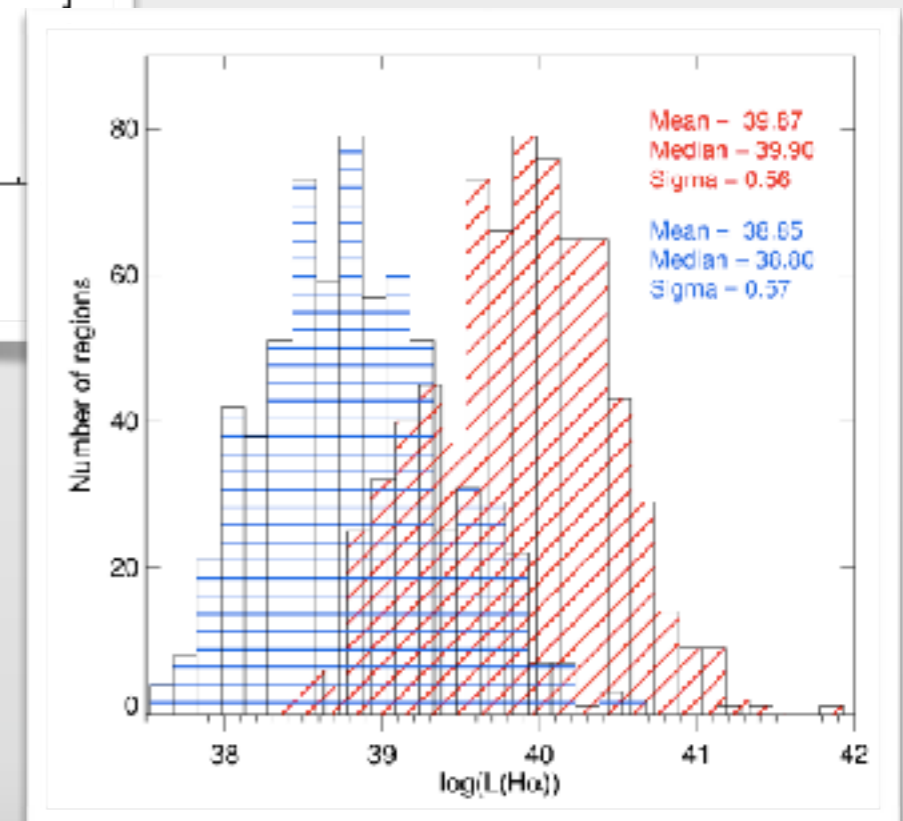
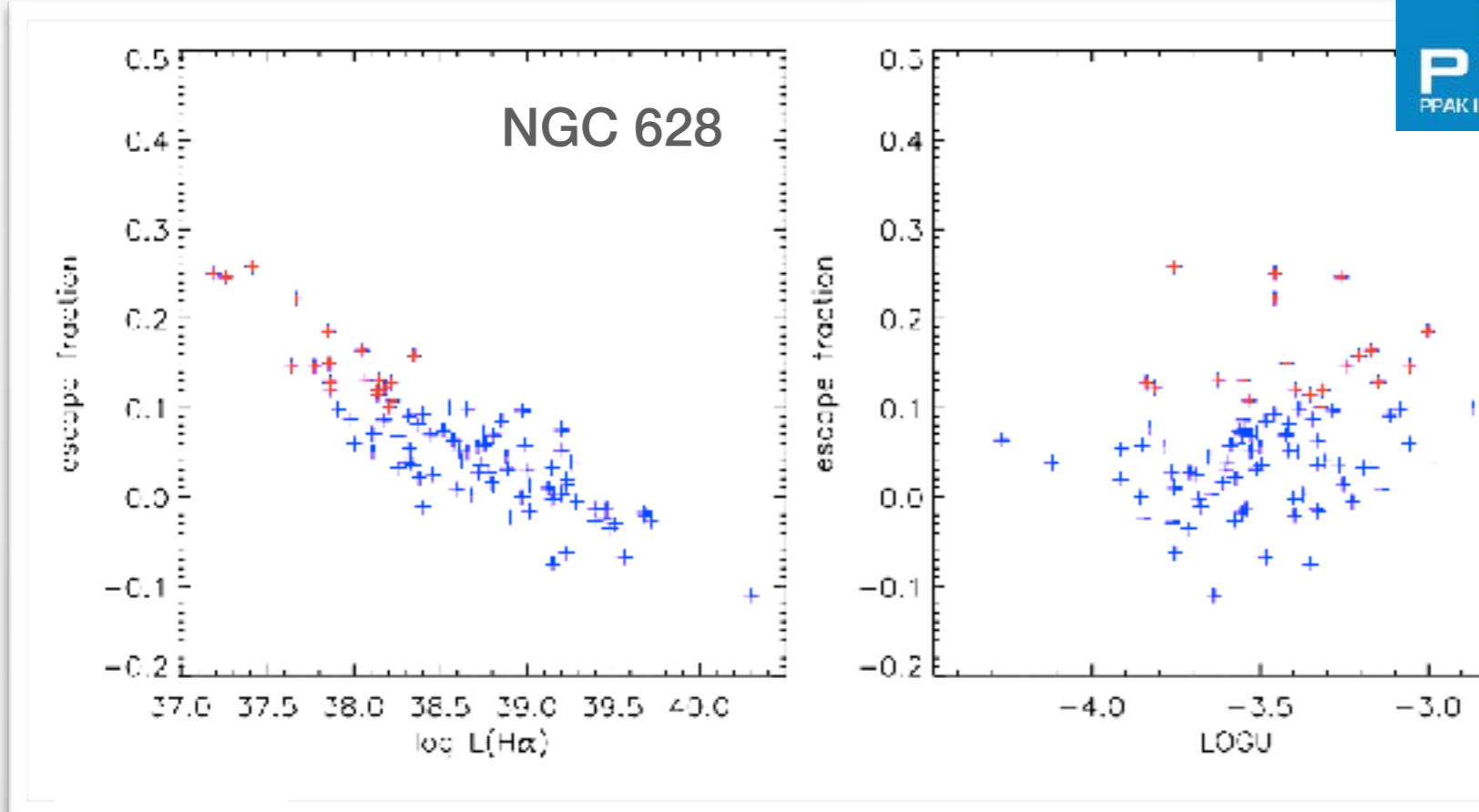
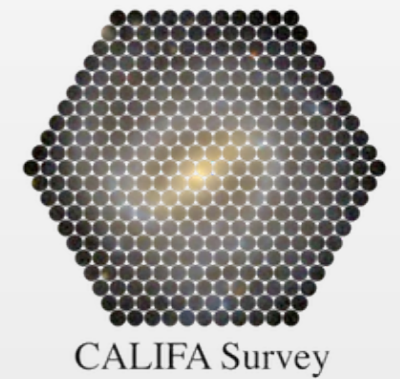
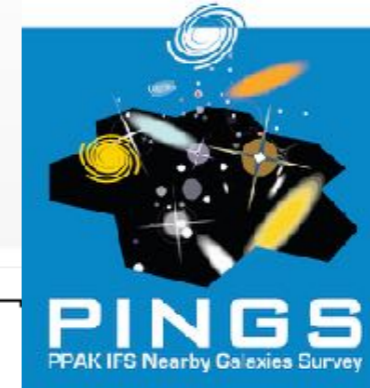
Emisión H α

- ◆ Fracción del DIG para toda la muestra.
- ◆ Explorar otras metodologías, eg. EW(H α).
- ◆ Propiedades radiales/acimutales del DIG.

Estudio espectroscópico

- ◆ Diagnóstico del DIG, [S II], [N II], [OIII], etc.
- ◆ Nueva metodología: $\Sigma(\text{H}\alpha) + \text{EW}(\text{H}\alpha) + \text{líneas emisión (?)}$
- ◆ **Fracción de escape, log(U)**

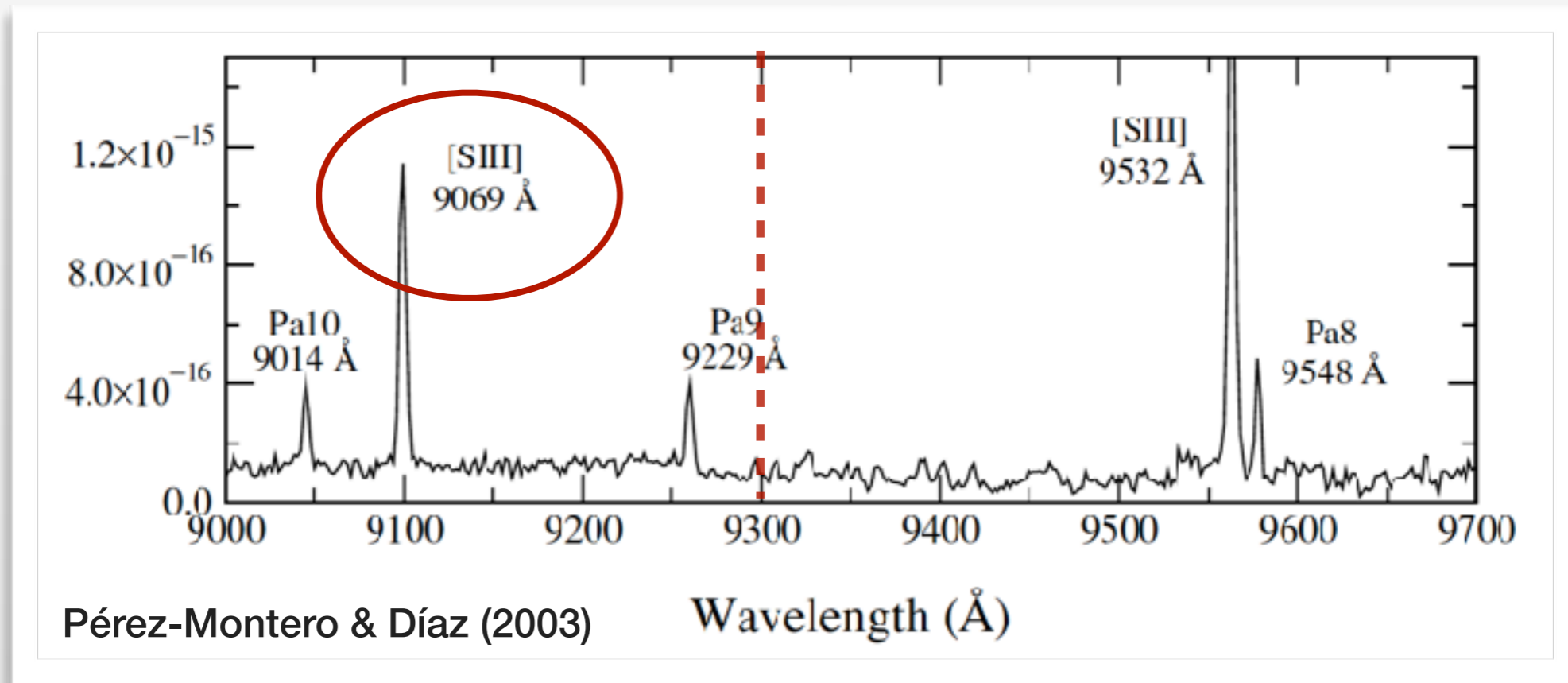
Fracción de escape vs. $L(H\alpha)$



Rodríguez-Baras et al. (2018)

Detección del DIG en AMUSING

log(U) & fracción escape: [O II] λ 3727



$$\frac{[\text{S III}] \lambda 9532}{[\text{S III}] \lambda 9069} = 2.48$$

$$\text{Log}(U) = -1.69 \text{Log} \left(\frac{[\text{S II}]}{[\text{S III}]} \right) - 2.99.$$

Díaz et al. (1991)

Conclusiones

- ◆ El WIM/DIG es una componente omnipresente en el ISM.
- ◆ No existe un **consenso** sobre el **mecanismo** de ionización del DIG.
- ◆ Estudios tradicionales (imágenes H α /long-slit), favorecen **Lyc**.
- ◆ Estudios recientes basados en IFS (baja resolución espacial) favorecen **HOLMES**.

AMUSING-DIG

- ◆ Análisis de **+180 galaxias** cercanas ($z \sim 0.02$) de la muestra AMUSING.
- ◆ En progreso:
 - Explorar nuevas metodologías y diagnósticos del DIG.
 - Cuantificar la fracción de escape de radiación ionizante.
 - Comparar con modelos teóricos.



BUAP

¡Gracias!



Bienvenidos a Puebla

Explorando el gas difuso con MUSE, CNA Puebla, oct 2018