

El ciclo de materia bariónica en las galaxias

Alfredo J. Mejía

18 de septiembre de 2017

MOTIVACIÓN



MOTIVACIÓN



—> GALAXIA TEMPRANA

MOTIVACIÓN



—> GALAXIA TARDÍA

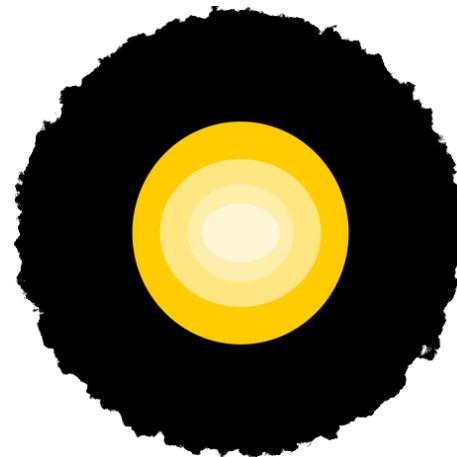


—> GALAXIA TEMPRANA

MOTIVACIÓN



—> GALAXIA TARDÍA



—> GALAXIA TEMPRANA

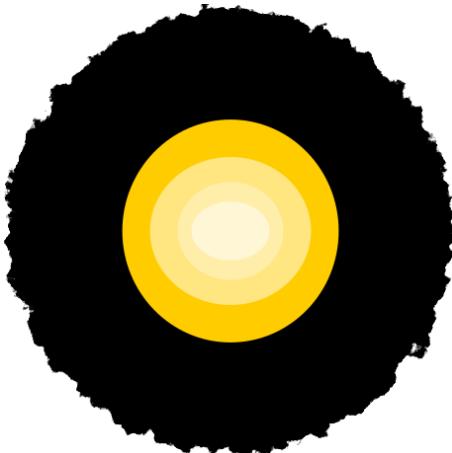
MOTIVACIÓN

DINÁMICA INESTABLE
FORMACIÓN ESTELAR
POBLACIÓN MIXTA
MIE MULTI-FASE



→ GALAXIA TARDÍA

DINÁMICA ESTABLE
EVOLUCIÓN PASIVA
POBLACIÓN VIEJA
MIE DIFUSO



→ GALAXIA TEMPRANA

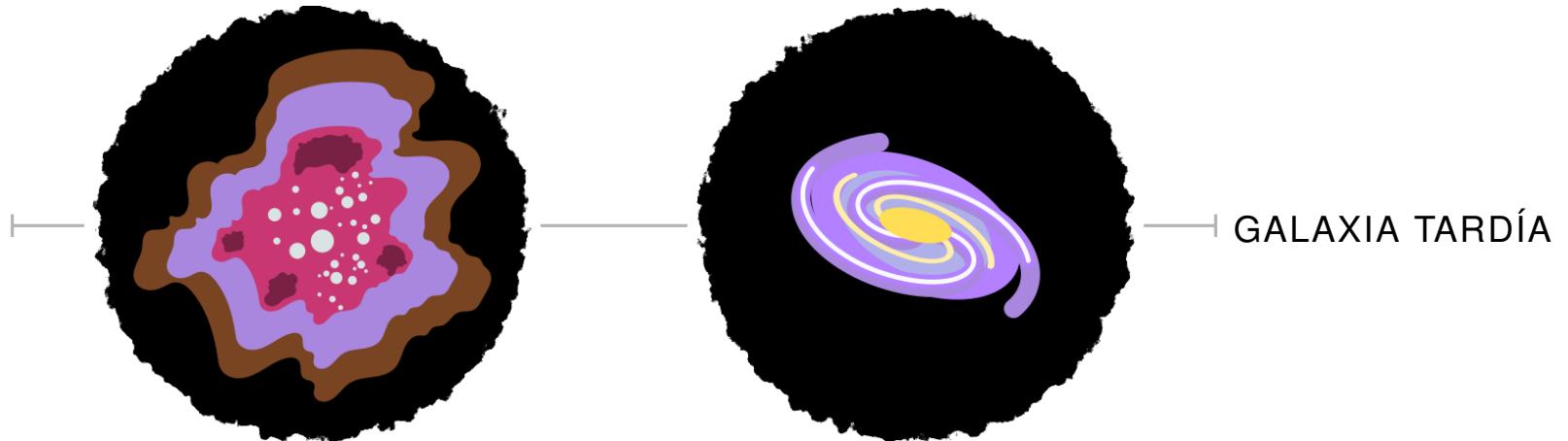
MOTIVACIÓN



—> GALAXIA TARDÍA

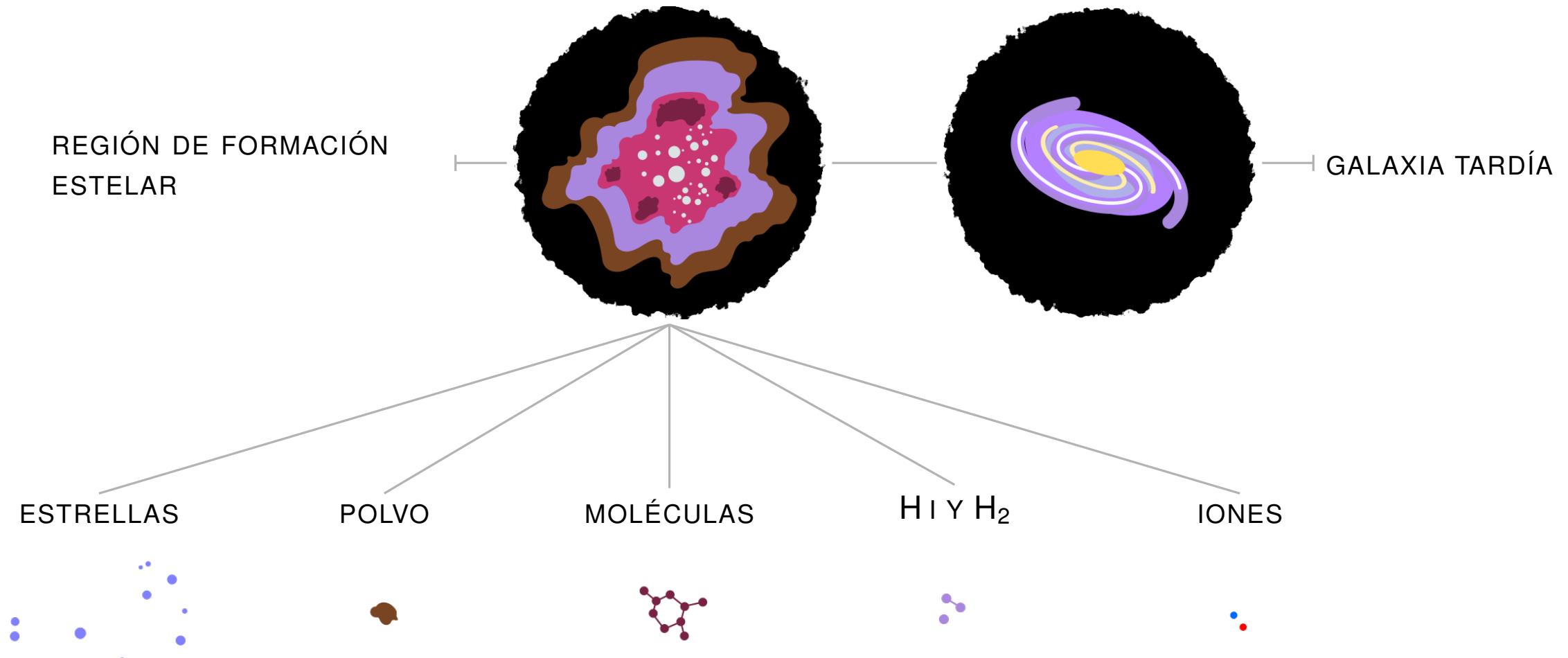
MOTIVACIÓN

REGIÓN DE FORMACIÓN
ESTELAR

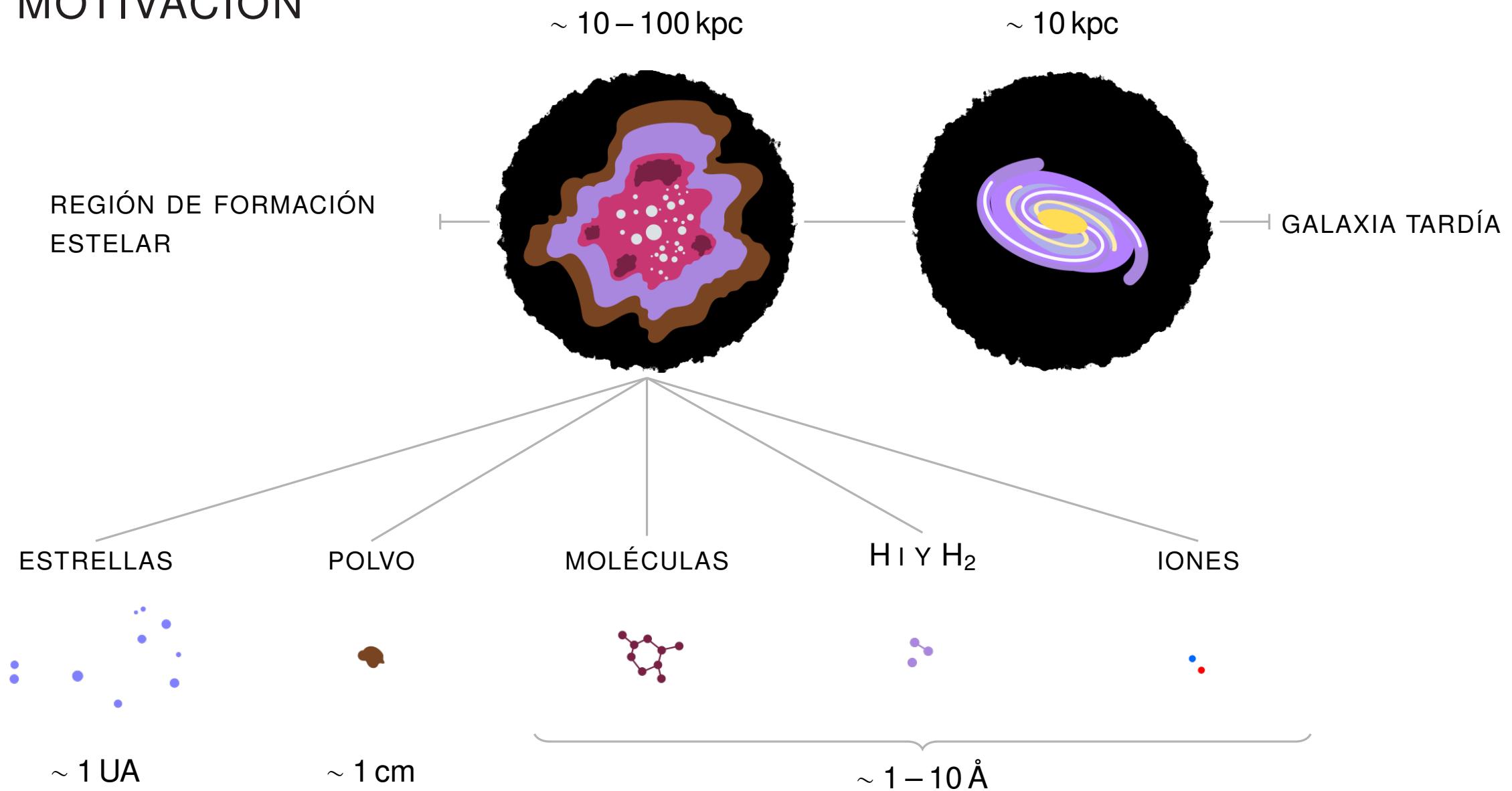


GALAXIA TARDÍA

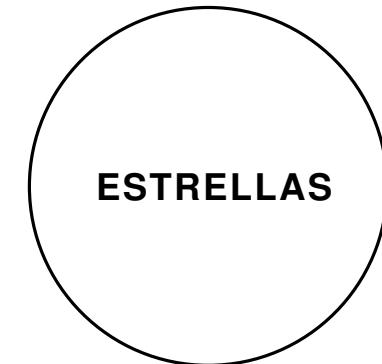
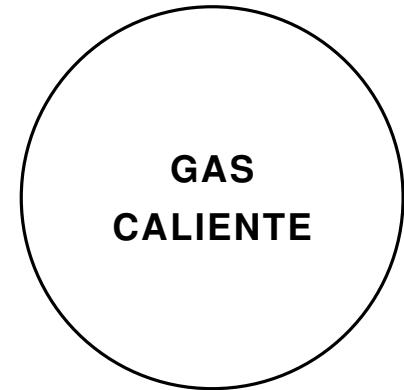
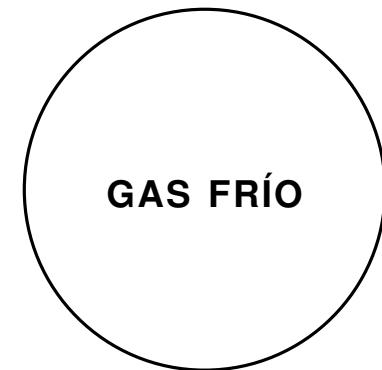
MOTIVACIÓN



MOTIVACIÓN



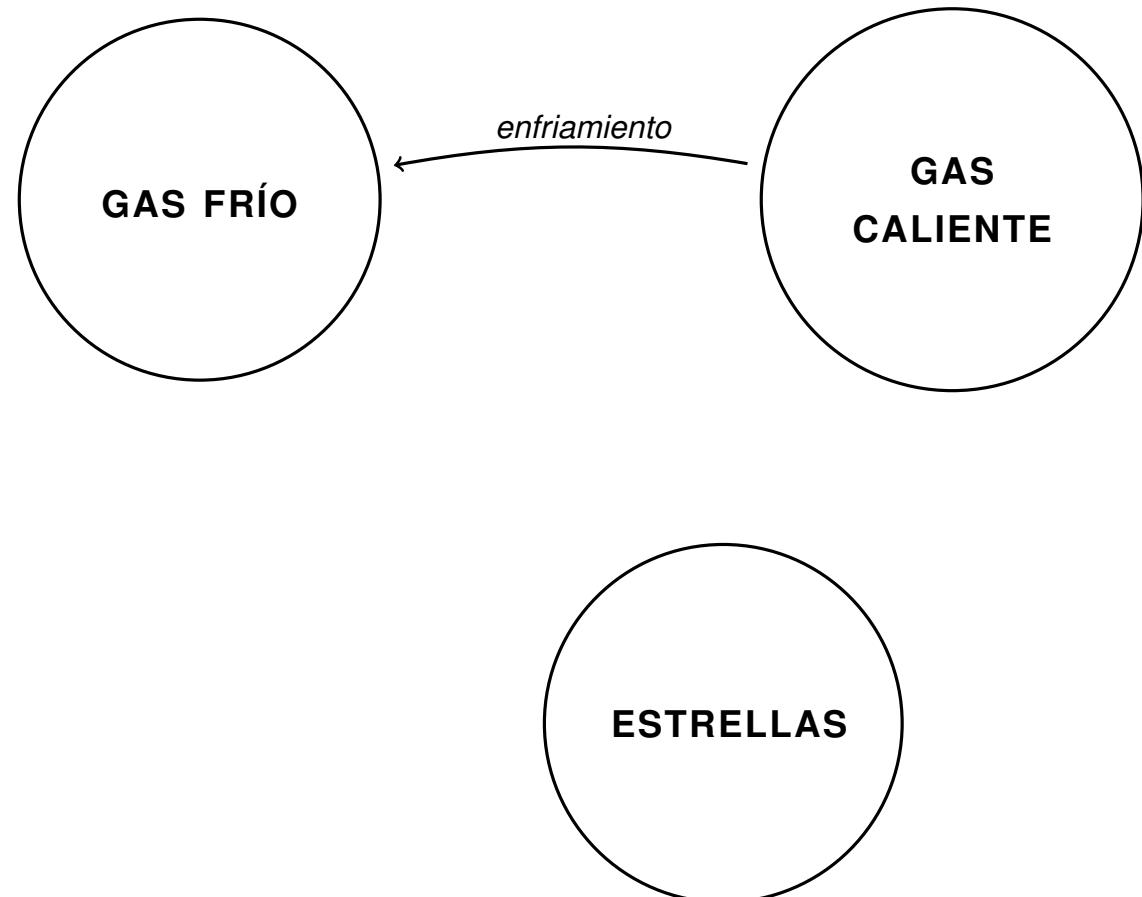
MOTIVACIÓN



MOTIVACIÓN

Procesos fundamentales:

$$\tau_{\text{enf}} \propto 1/\Lambda(\rho_{\text{cal}}, T_{\text{cal}}, Z_{\text{cal}})$$

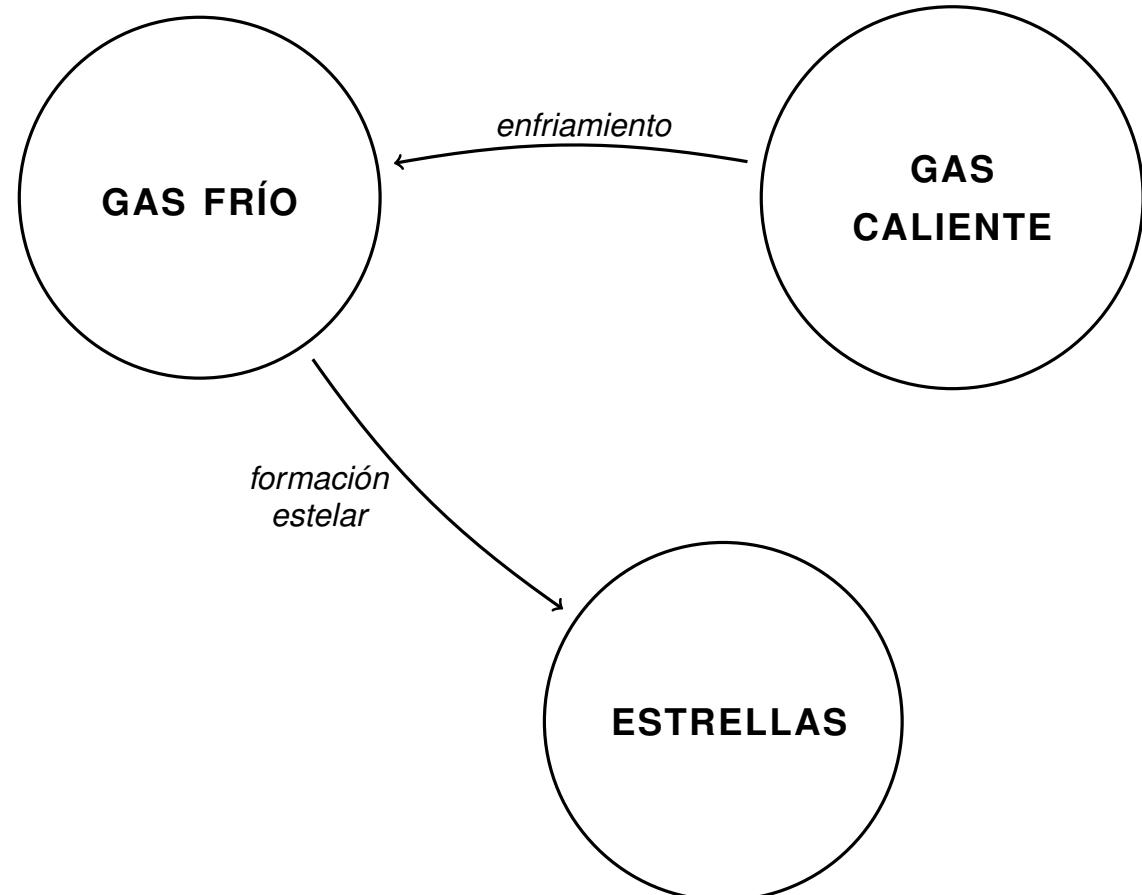


MOTIVACIÓN

Procesos fundamentales:

$$\tau_{\text{enf}} \propto 1/\Lambda(\rho_{\text{cal}}, T_{\text{cal}}, Z_{\text{cal}})$$

$$\tau_* \propto M_{\text{frío}}/\Psi$$



MOTIVACIÓN

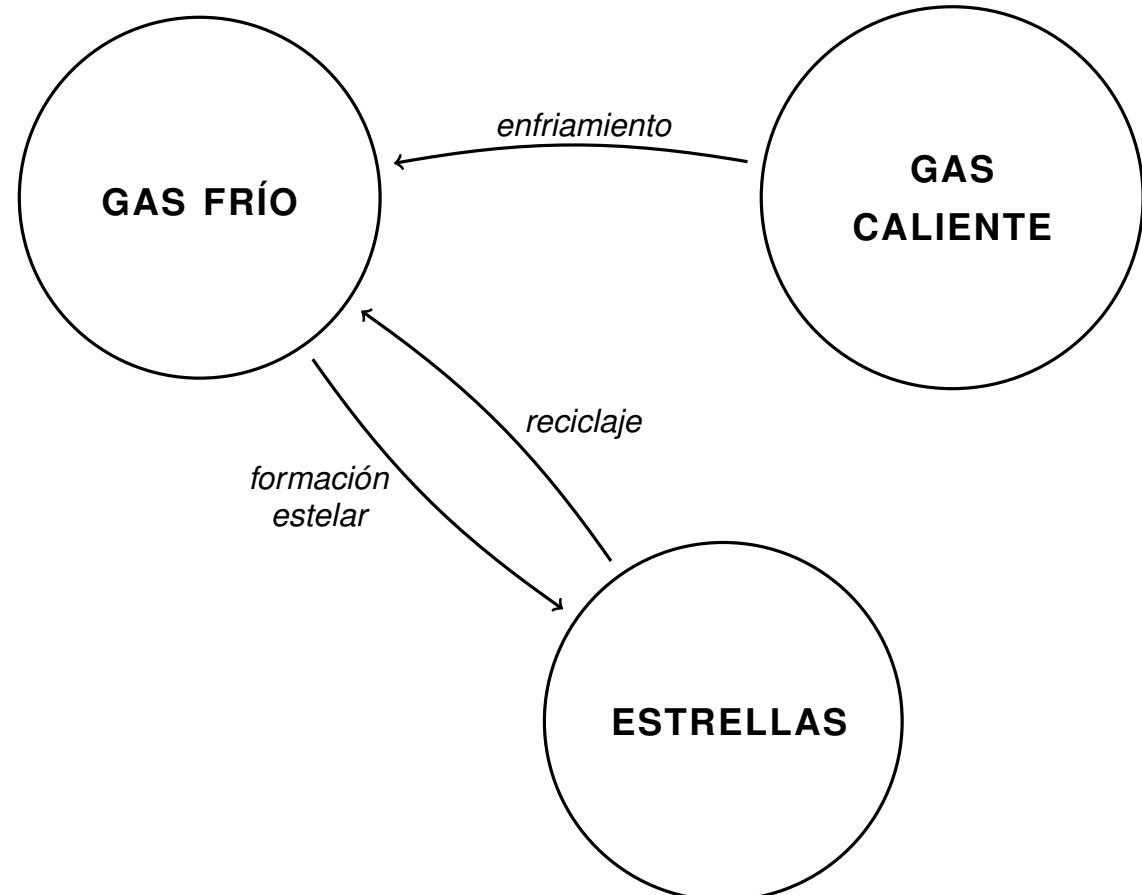
Procesos fundamentales:

$$\tau_{\text{enf}} \propto 1/\Lambda(\rho_{\text{cal}}, T_{\text{cal}}, Z_{\text{cal}})$$

$$\tau_* \propto M_{\text{frío}}/\Psi$$

Ciclo de masa:

$$\dot{M}_* = (1 - R)\Psi$$



MOTIVACIÓN

Procesos fundamentales:

$$\tau_{\text{enf}} \propto 1/\Lambda(\rho_{\text{cal}}, T_{\text{cal}}, Z_{\text{cal}})$$

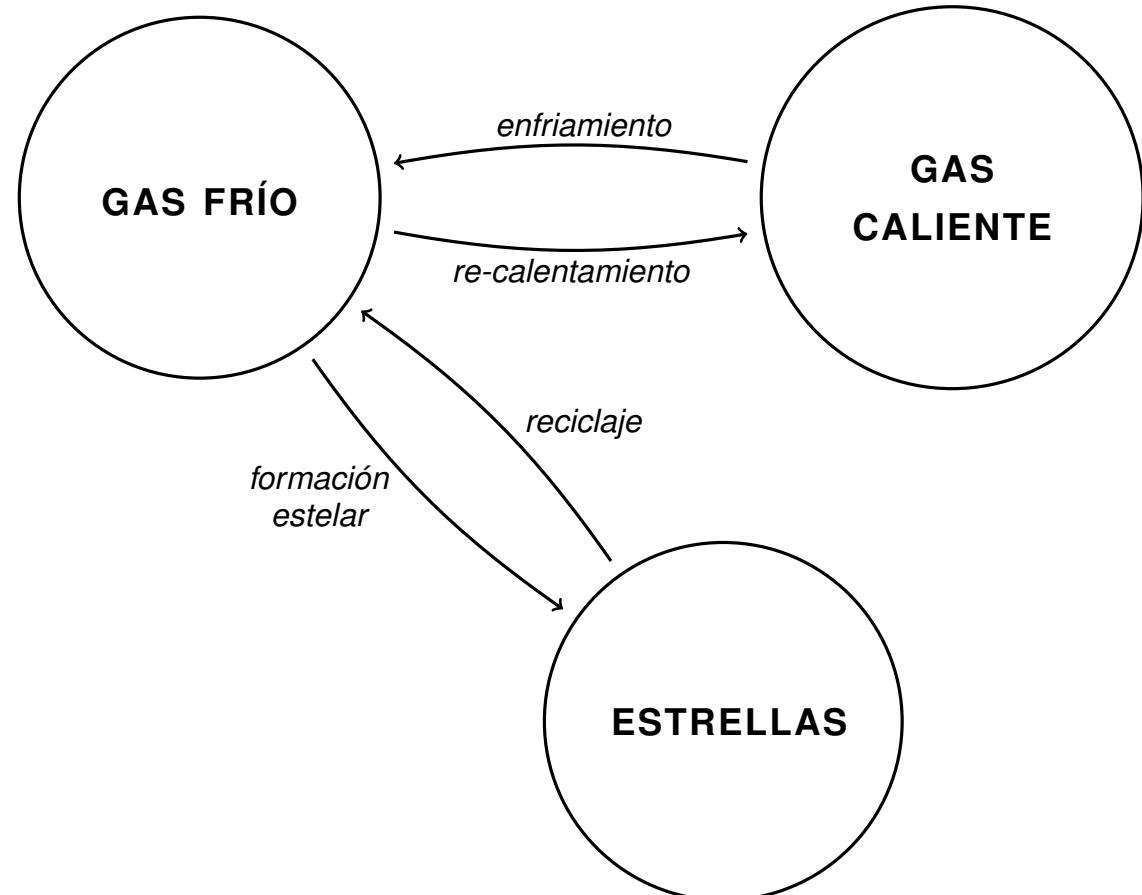
$$\tau_* \propto M_{\text{frío}}/\Psi$$

Ciclo de masa:

$$\dot{M}_* = (1 - R)\Psi$$

$$\dot{M}_{\text{cal}} = -\dot{M}_{\text{enf}} + \beta\Psi$$

$$\dot{M}_{\text{frío}} = \dot{M}_{\text{enf}} - (1 - R - \beta)\Psi$$



MOTIVACIÓN

Procesos fundamentales:

$$\tau_{\text{enf}} \propto 1/\Lambda(\rho_{\text{cal}}, T_{\text{cal}}, Z_{\text{cal}})$$

$$\tau_* \propto M_{\text{frío}}/\Psi$$

Ciclo de masa:

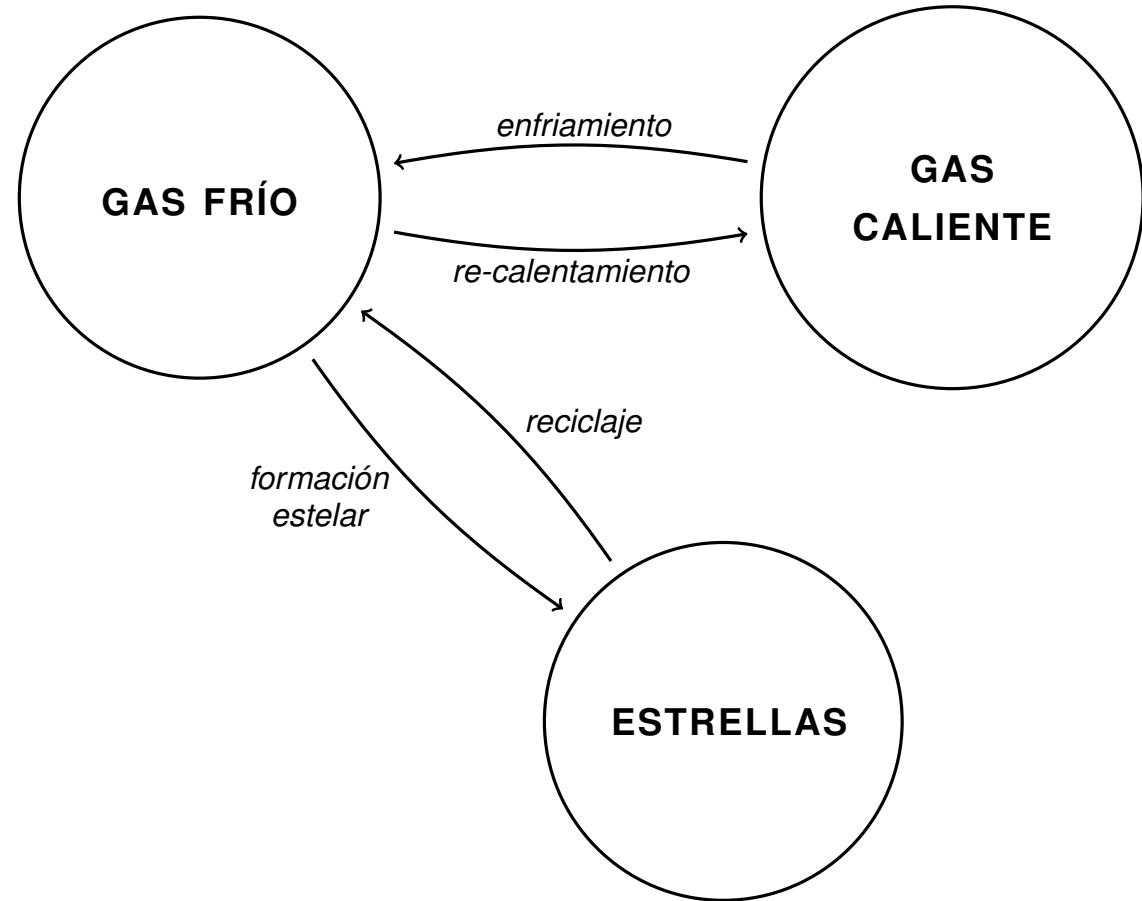
$$\dot{M}_* = (1 - R)\Psi$$

$$\dot{M}_{\text{cal}} = -\dot{M}_{\text{enf}} + \beta\Psi$$

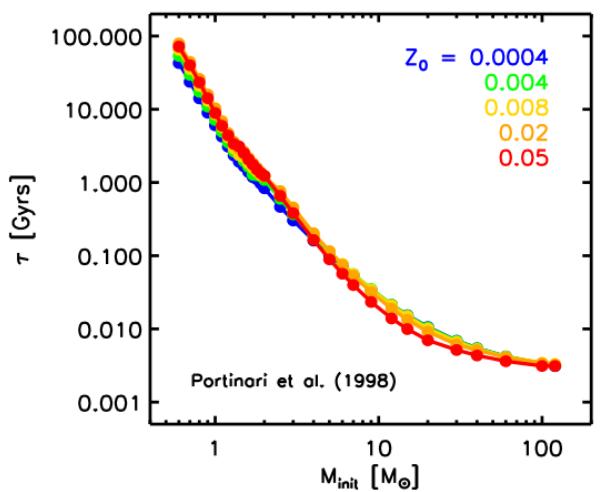
$$\dot{M}_{\text{frío}} = \dot{M}_{\text{enf}} - (1 - R - \beta)\Psi$$

¿Y la evolución química?

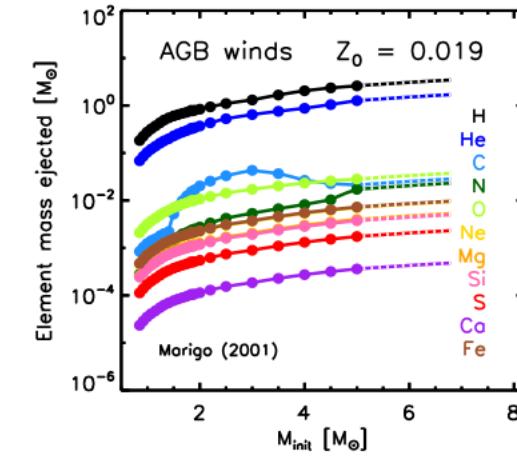
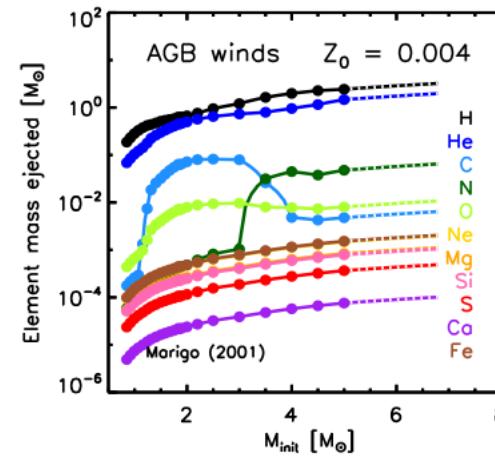
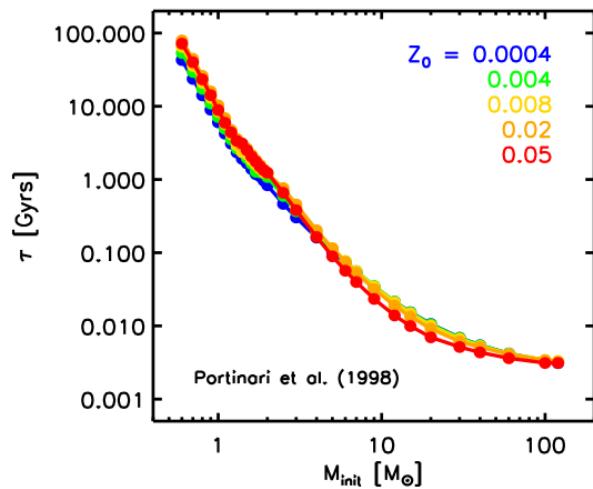
$$\tau_{\text{enf}}, \tau_* \longleftrightarrow \tau_Z$$



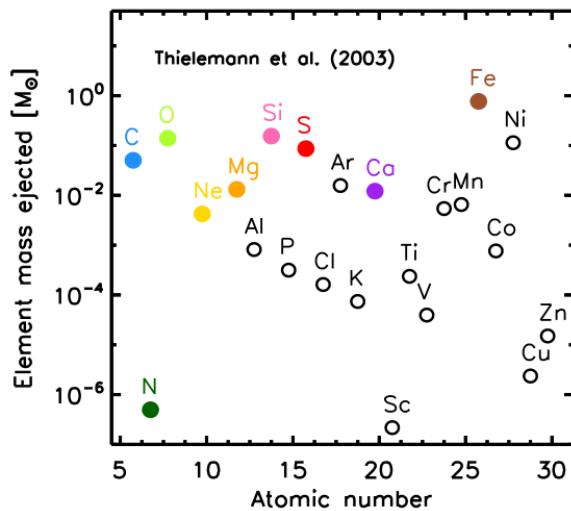
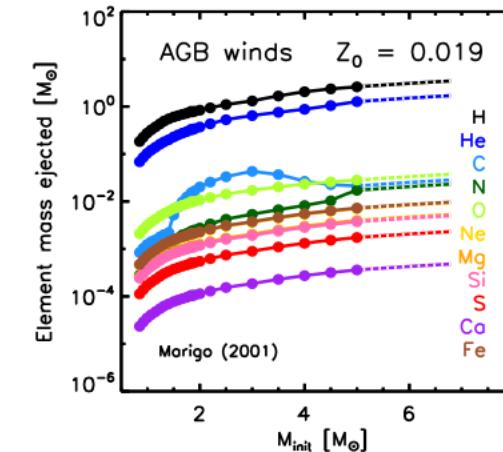
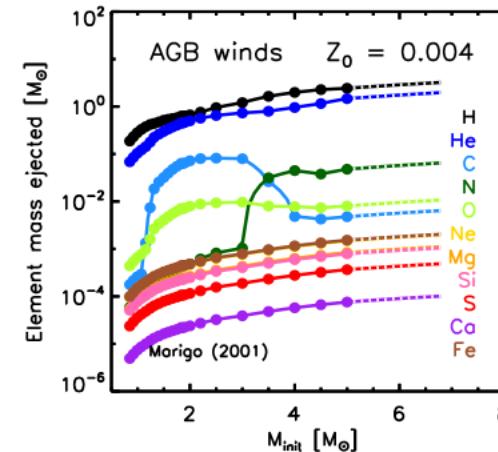
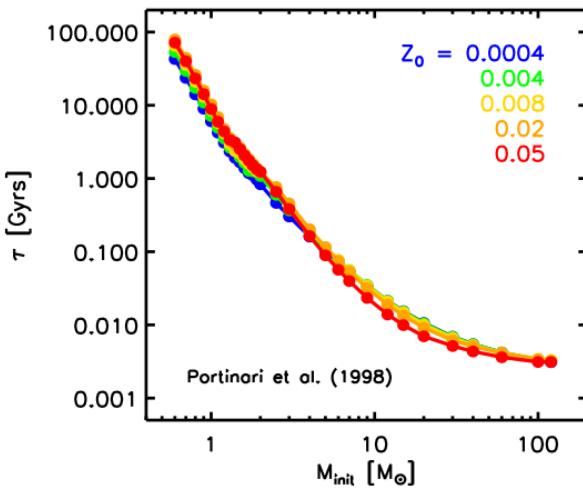
CONSIDERACIONES TEÓRICAS



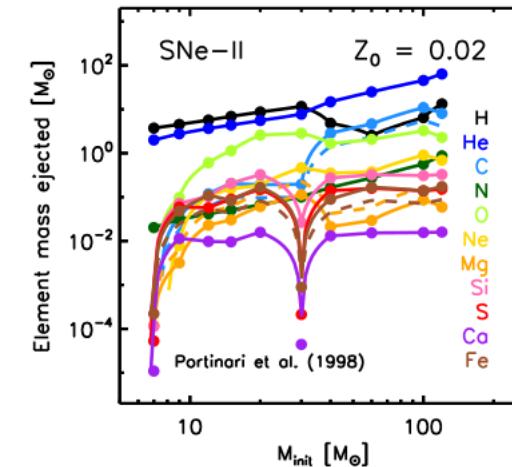
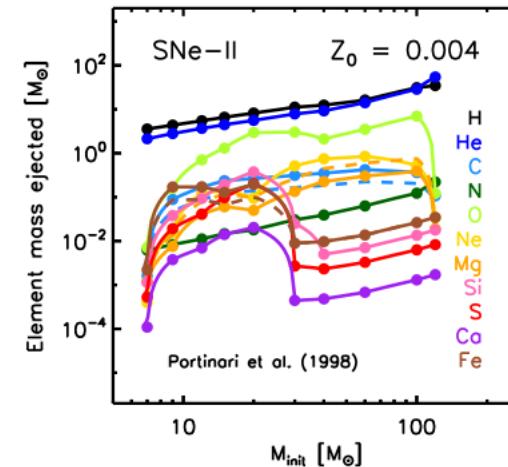
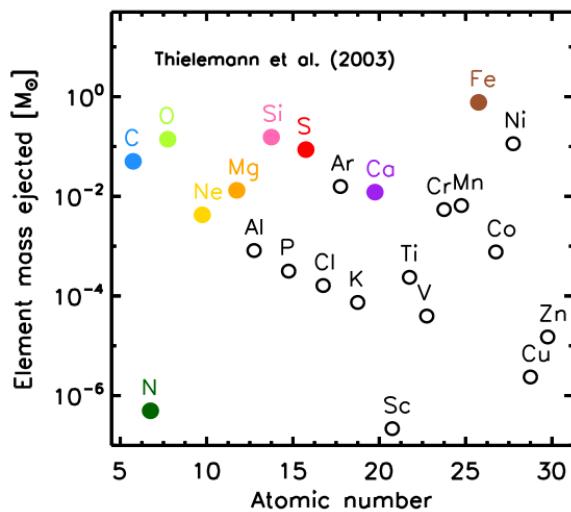
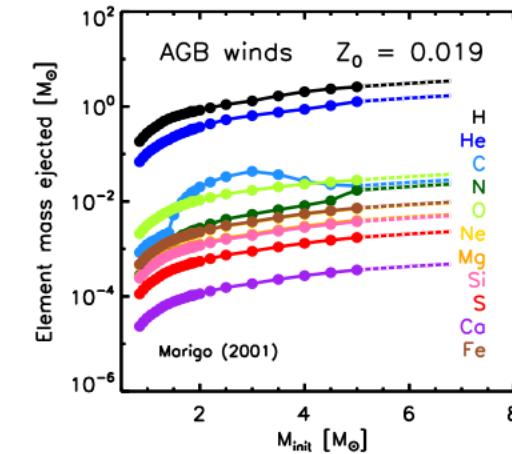
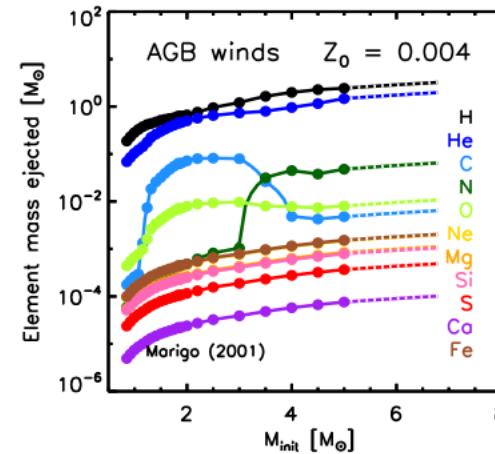
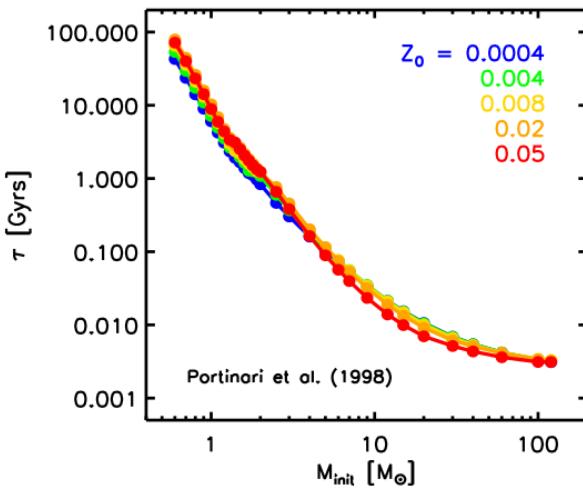
CONSIDERACIONES TEÓRICAS



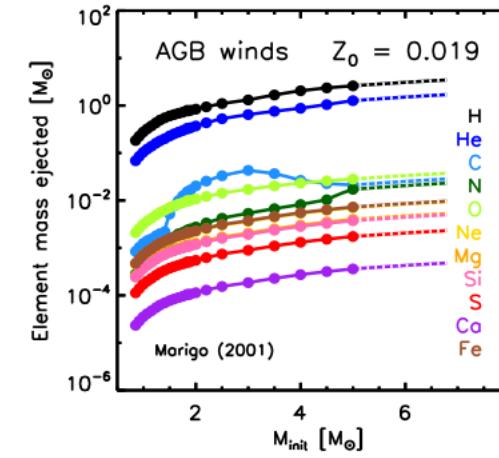
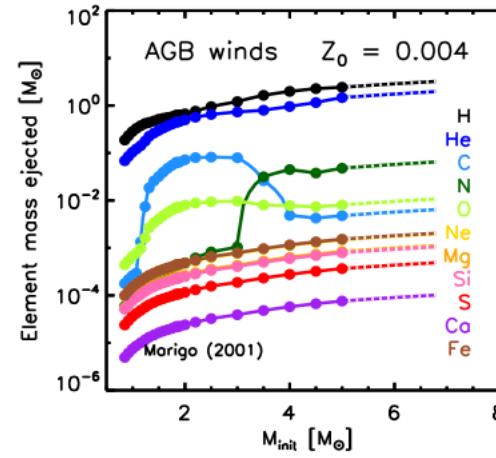
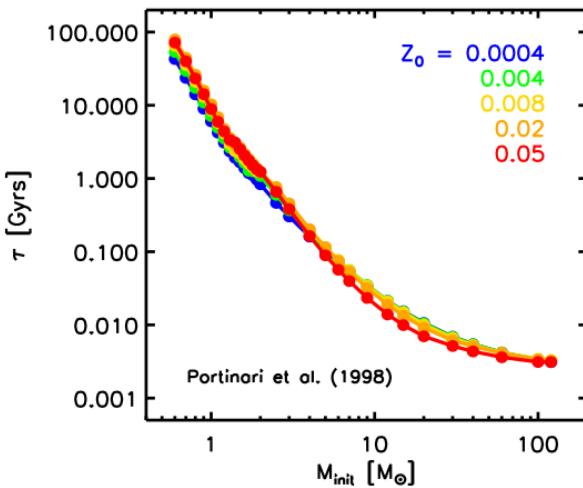
CONSIDERACIONES TEÓRICAS



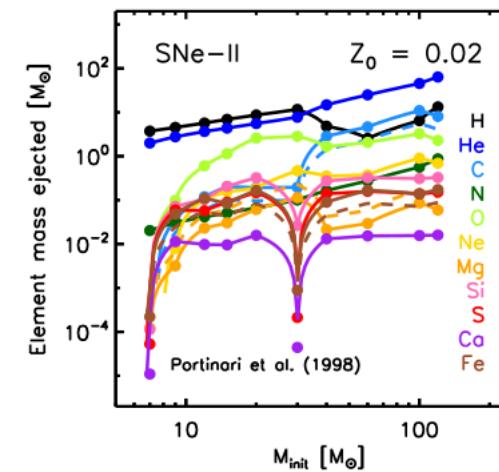
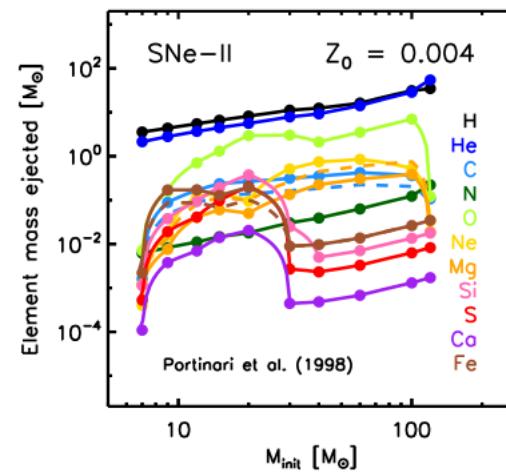
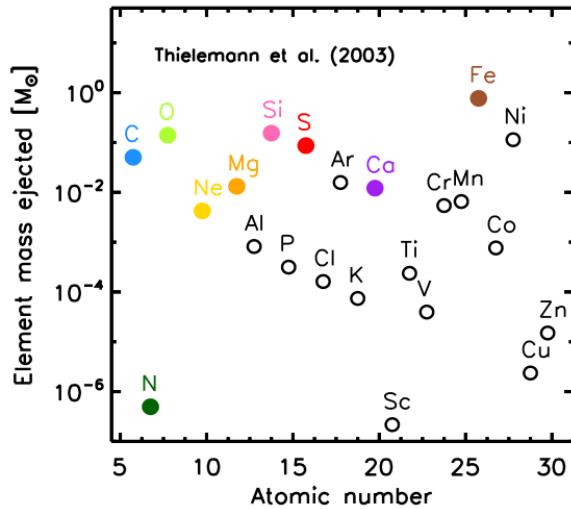
CONSIDERACIONES TEÓRICAS



CONSIDERACIONES TEÓRICAS



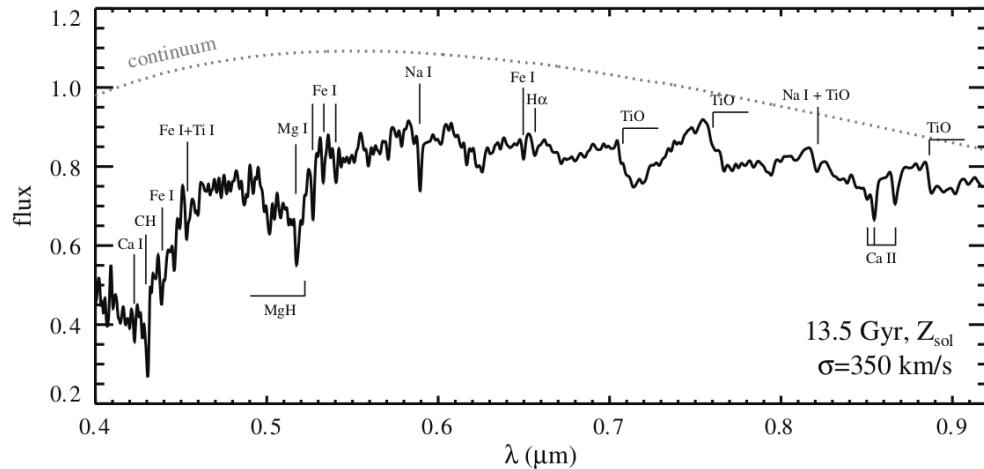
$\tau_Z^{\text{AGB}} \gtrsim 5$ Maños



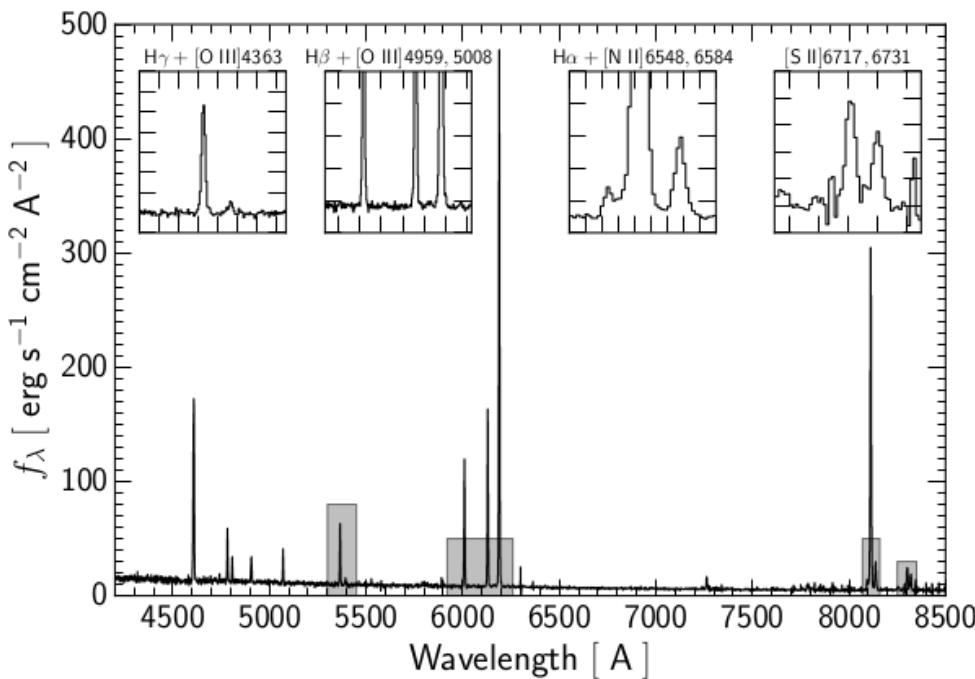
$\tau_Z^{\text{SN Ia}} \gtrsim 10$ Maños

$\tau_Z^{\text{SN II}} \lesssim 10$ Maños

CONSIDERACIONES OBSERVACIONALES



continuo estelar $\rightarrow \begin{cases} M_\star & \text{masa estelar} \\ \Psi & \text{TFE} \\ Z_\star & \text{metalidad} \end{cases}$

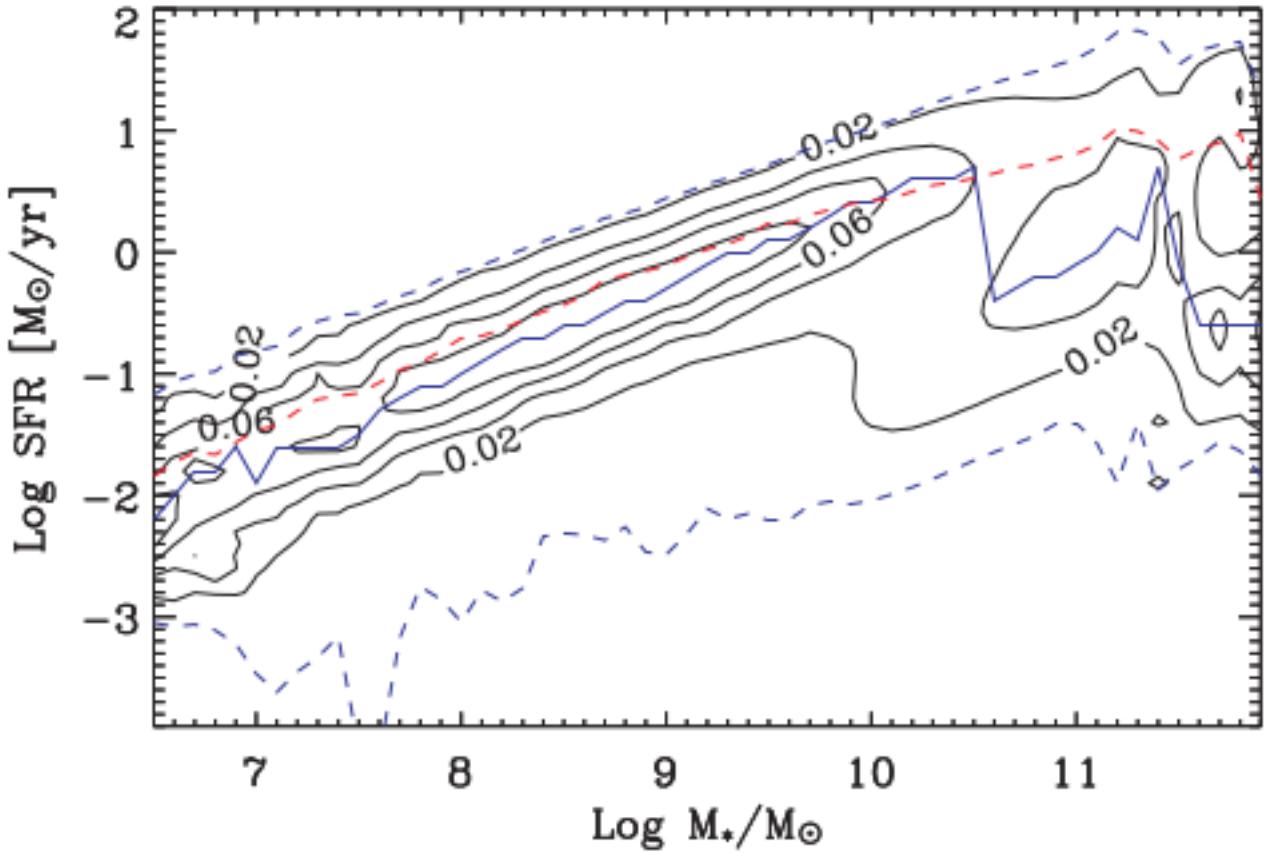


emisión nebulosa $\rightarrow \begin{cases} M_{\text{frío}} & \text{masa del gas} \\ \Psi & \text{TFE} \\ Z_{\text{frío}} & \text{metalidad del gas} \end{cases}$

RELACIONES CLÁSICAS — $M_\star - \Psi$

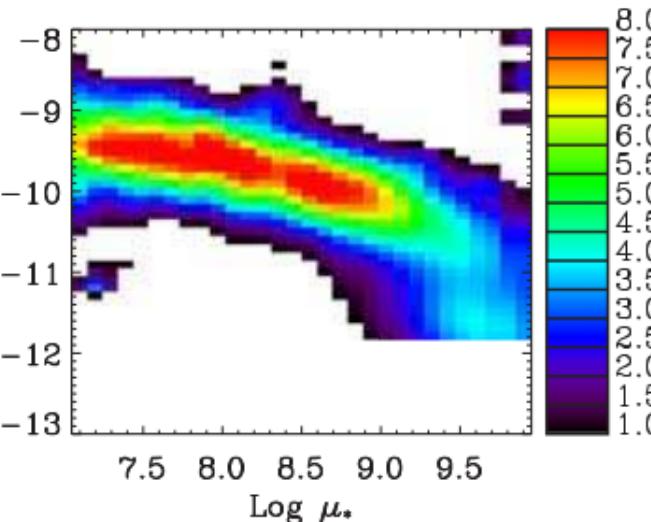
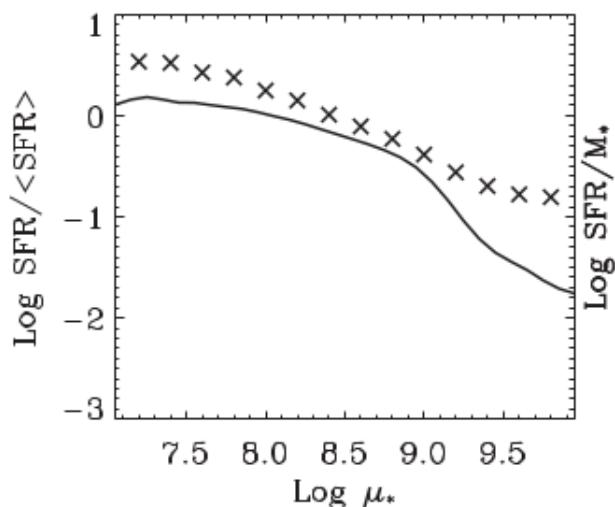
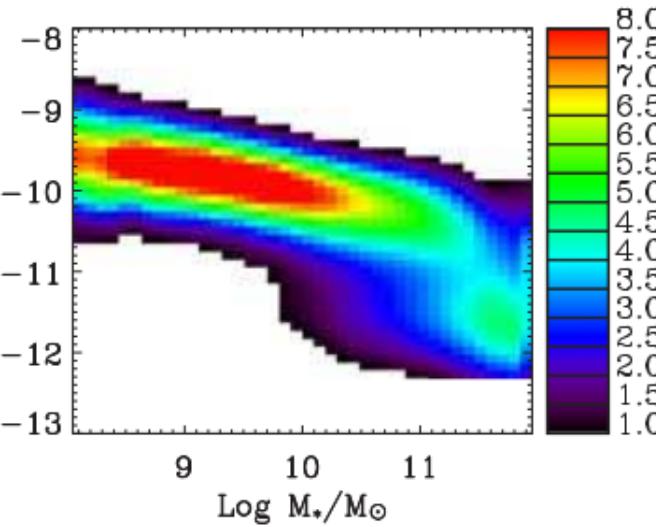
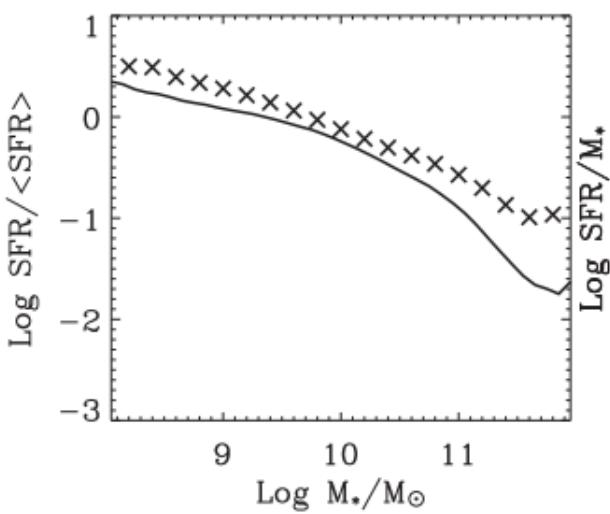
Brinchmann y col. (2004) encontró que:

- $\log \Psi \propto \log M_\star$,
- punto de quiebre a $\log M_\star/M_\odot > 10$ dex,
- dispersión ~ 2 dex,
- ¿origen global o local? (Schmidt, 1959; Kennicutt, 1998).



RELACIONES CLÁSICAS — $M_\star - \Psi$

(Brinchmann y col., 2004)

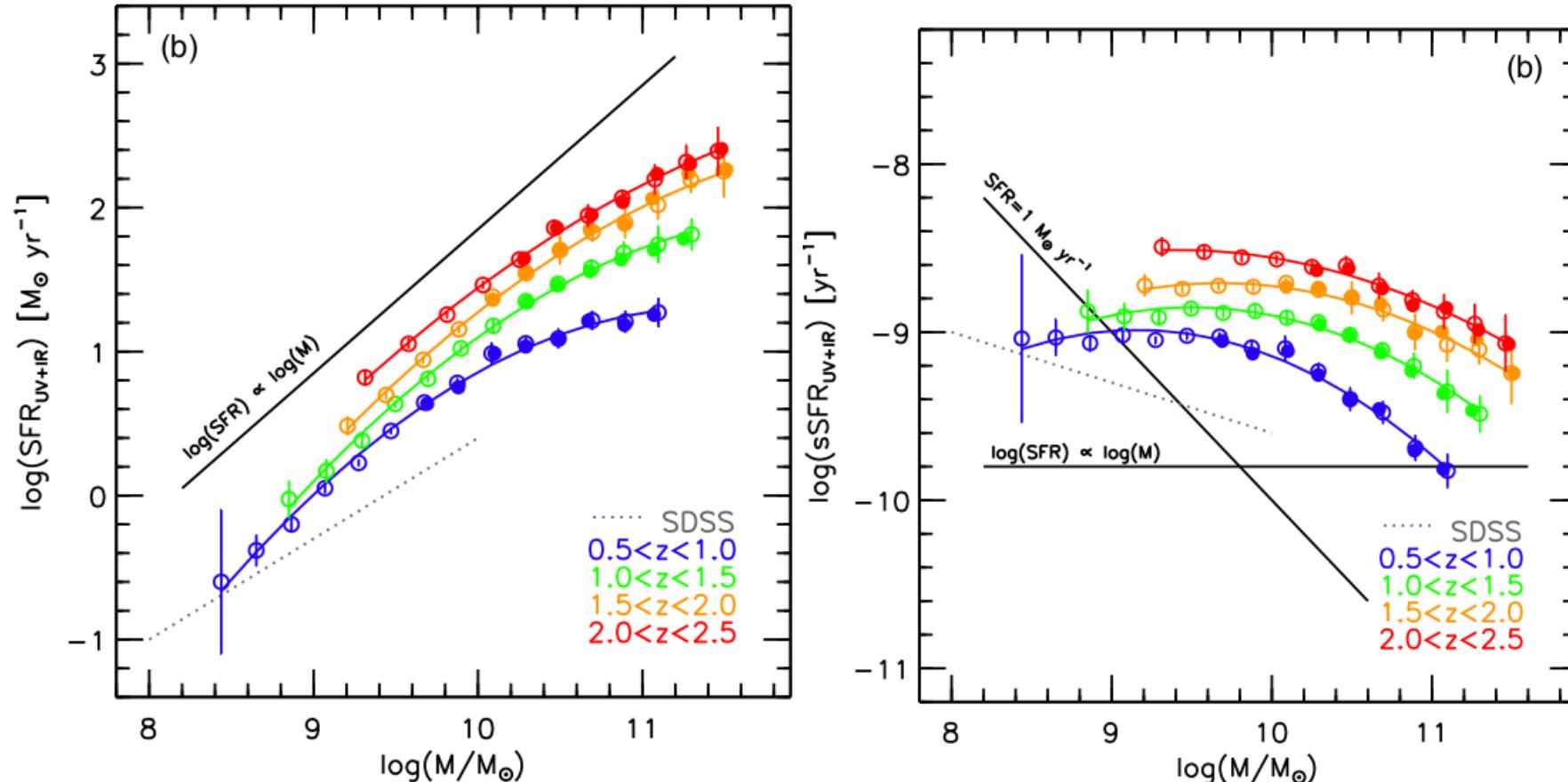


$$\left\{ \begin{array}{ll} \Psi / \langle \Psi \rangle & \text{TFE relativa} \\ \Psi / M_\star & \text{TFE específica} \\ \mu_\star & \text{densidad superficial} \end{array} \right.$$

$$\frac{\Psi}{\langle \Psi \rangle} = \frac{\Psi}{M_\star} T(1 - R)$$

- $\log \Psi / M_\star \propto -\log M_\star, \log \mu_\star,$
- *Downsizing* (Cowie y col., 1996),
- ¿relación global o local?.

RELACIONES CLÁSICAS — $M_\star - \Psi$



- *Downsizing* cosmológico,
- poca evolución en la pendiente de $M_\star - \Psi$ (Whitaker y col., 2014),
- la formación estelar es probablemente un fenómeno local.

RELACIONES CLÁSICAS — $\langle t_\star \rangle - Z_\star$

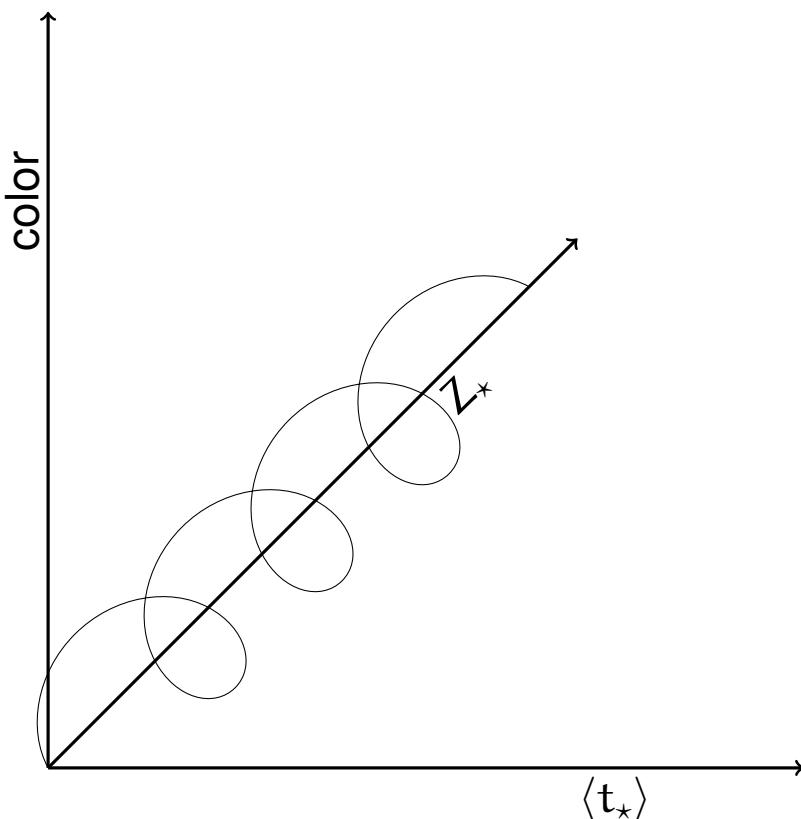
De acuerdo con Ocvirk y col. (2006):

$$\Lambda(t) = \frac{\Psi(t)}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L_\lambda^{\text{PES}}(Z; t) d\lambda \implies \langle t_\star \rangle \sim \Psi$$

RELACIONES CLÁSICAS — $\langle t_\star \rangle - Z_\star$

De acuerdo con Ocvirk y col. (2006):

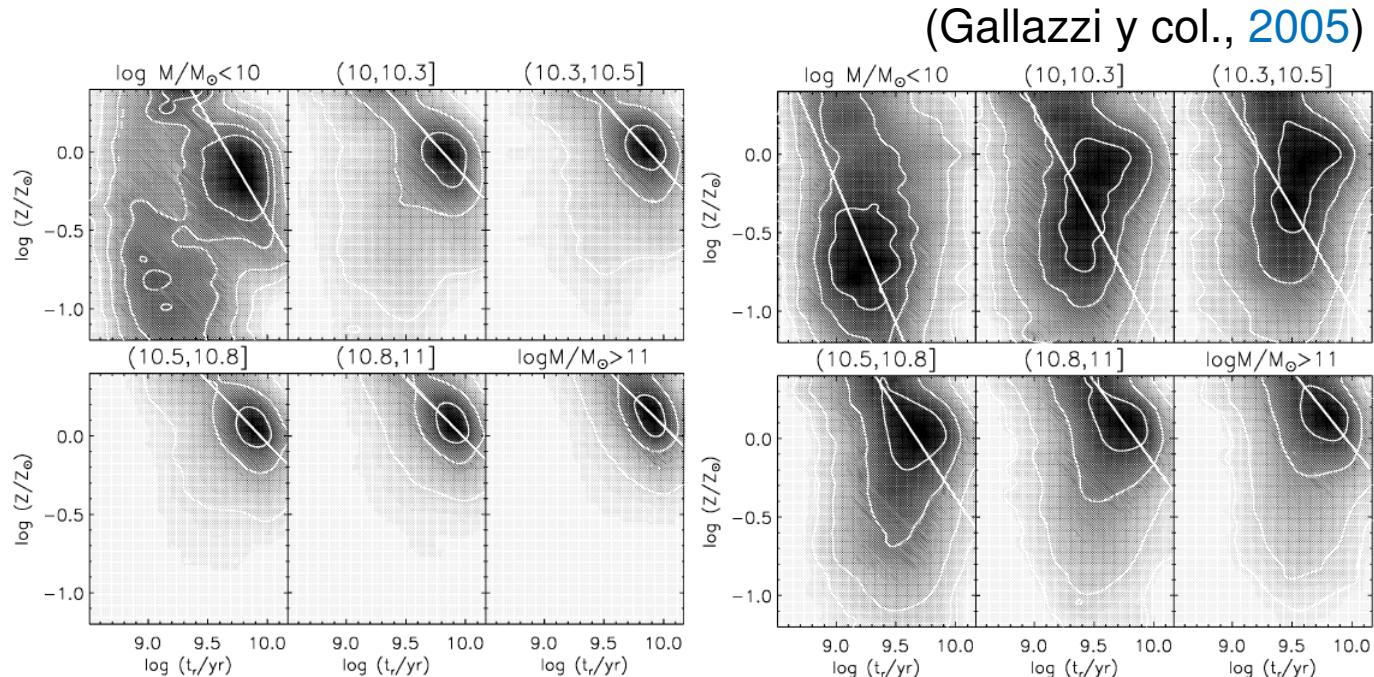
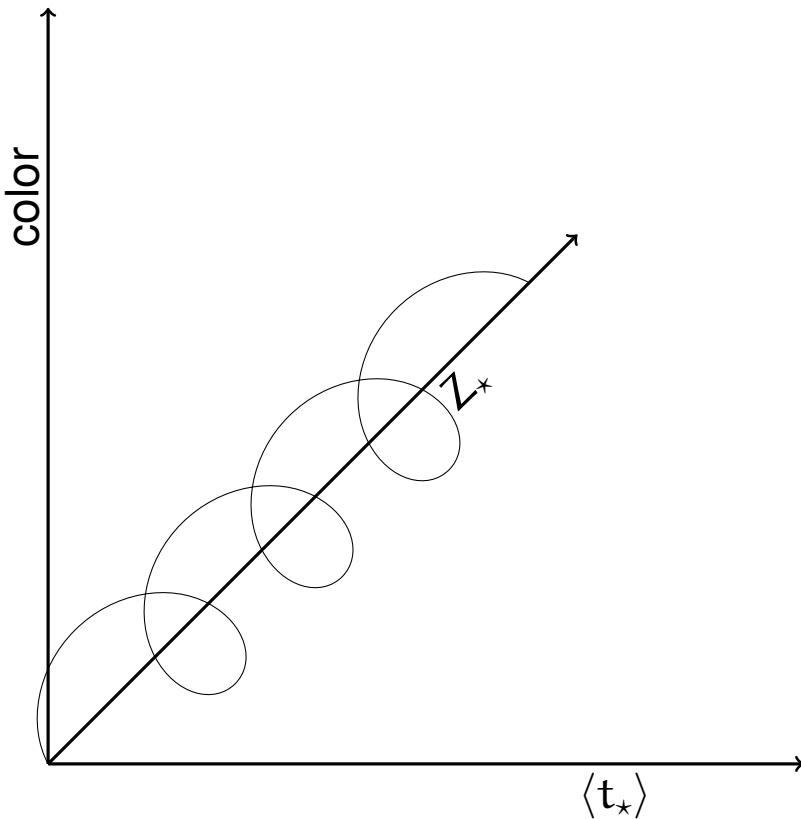
$$\Lambda(t) = \frac{\Psi(t)}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L_\lambda^{\text{PES}}(Z; t) d\lambda \implies \langle t_\star \rangle \sim \Psi$$



RELACIONES CLÁSICAS — $\langle t_* \rangle - Z_*$

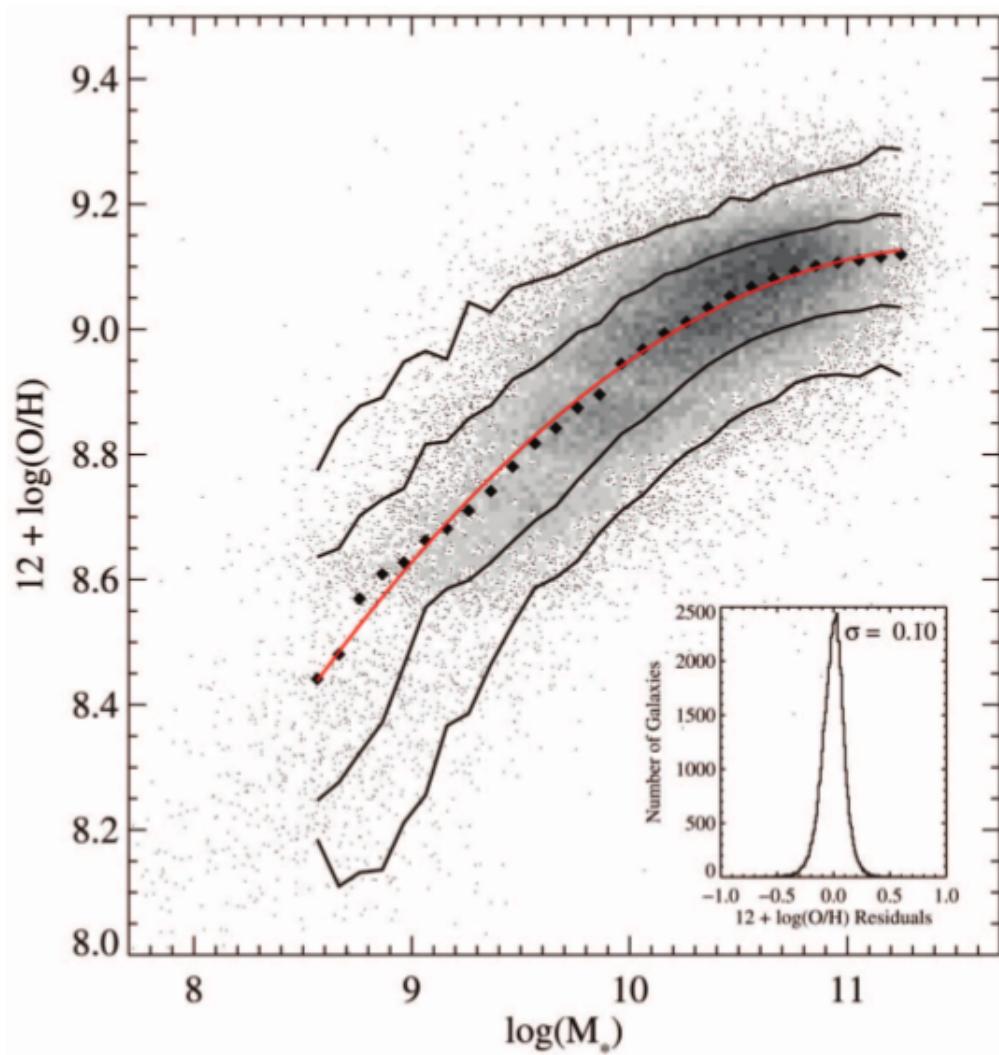
De acuerdo con Ocvirk y col. (2006):

$$\Lambda(t) = \frac{\Psi(t)}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L_\lambda^{\text{PES}}(Z; t) d\lambda \implies \langle t_* \rangle \sim \Psi$$



- Las galaxias tempranas sufren de degeneración $t_* - Z_*$,
- su relación $t_* - Z_*$ es casi independiente de M_* , y
- las galaxias tardías abarcan un amplio rango en Z_* ,
- muestran fuerte dependencia $M_* - Z_*$

RELACIONES CLÁSICAS — M_{\star} — $Z_{\text{frío}}$



El O es una de las especies más abundantes en el MIE en fase de gas:

$$12 + \log \text{O/H} \sim Z_{\text{frío}}$$

Hipótesis discutidas por Tremonti y col. (2004):

$\tau_Z \rightarrow M \rightarrow \begin{cases} \text{Las galaxias más masivas} \\ \text{forman más metales en } \tau_H \\ \text{que las de menor masa.} \end{cases}$

$\tau_Z \not\rightarrow M \rightarrow \begin{cases} \text{Las galaxias menos masivas} \\ \text{han perdido de manera} \\ \text{selectiva sus metales.} \end{cases}$

RELACIONES CLÁSICAS — $M_\star - Z_{\text{frío}}$

$$y_{\text{ef}} = \frac{y_0}{1 + (M_0/M_{\text{bar}})^{0,57}}$$

y_{ef} *yield* efectivo,

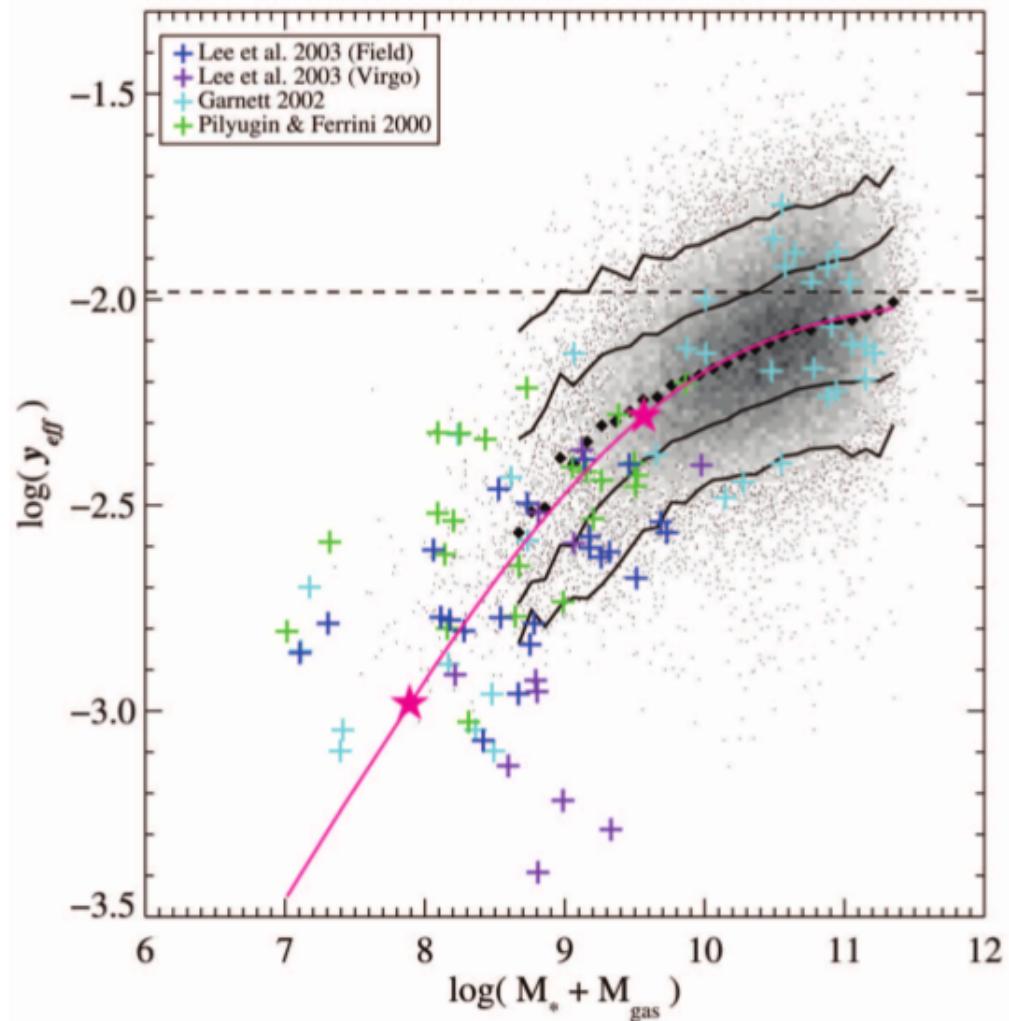
y_0 *yield* en modelo de caja cerrada,

M_{bar} masa bariónica total,

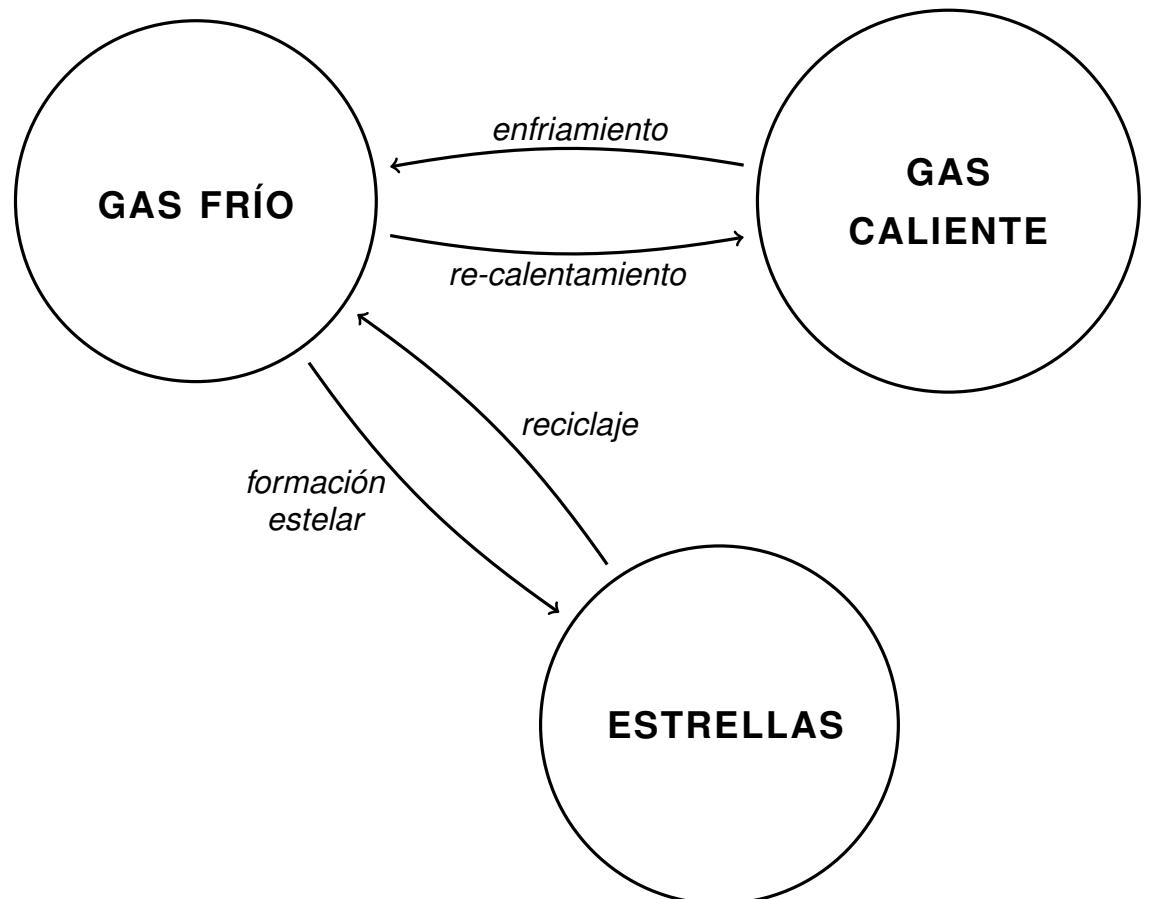
M_0 masa bariónica a la cual $y_{\text{ef}} = y_0/2$.

- Existe una correlación $M_{\text{bar}} - y_{\text{ef}}$,
- $y_0 = 0,0104$ y
 $M_0 = 3,67 \times 10^9 M_\odot \sim 260 \text{ km s}^{-1} \lesssim V_{\text{esc}}$,
- los fenómenos que regulan el ciclo de masa tienen un rol importante en la definición de Z .

(Tremonti y col., 2004)



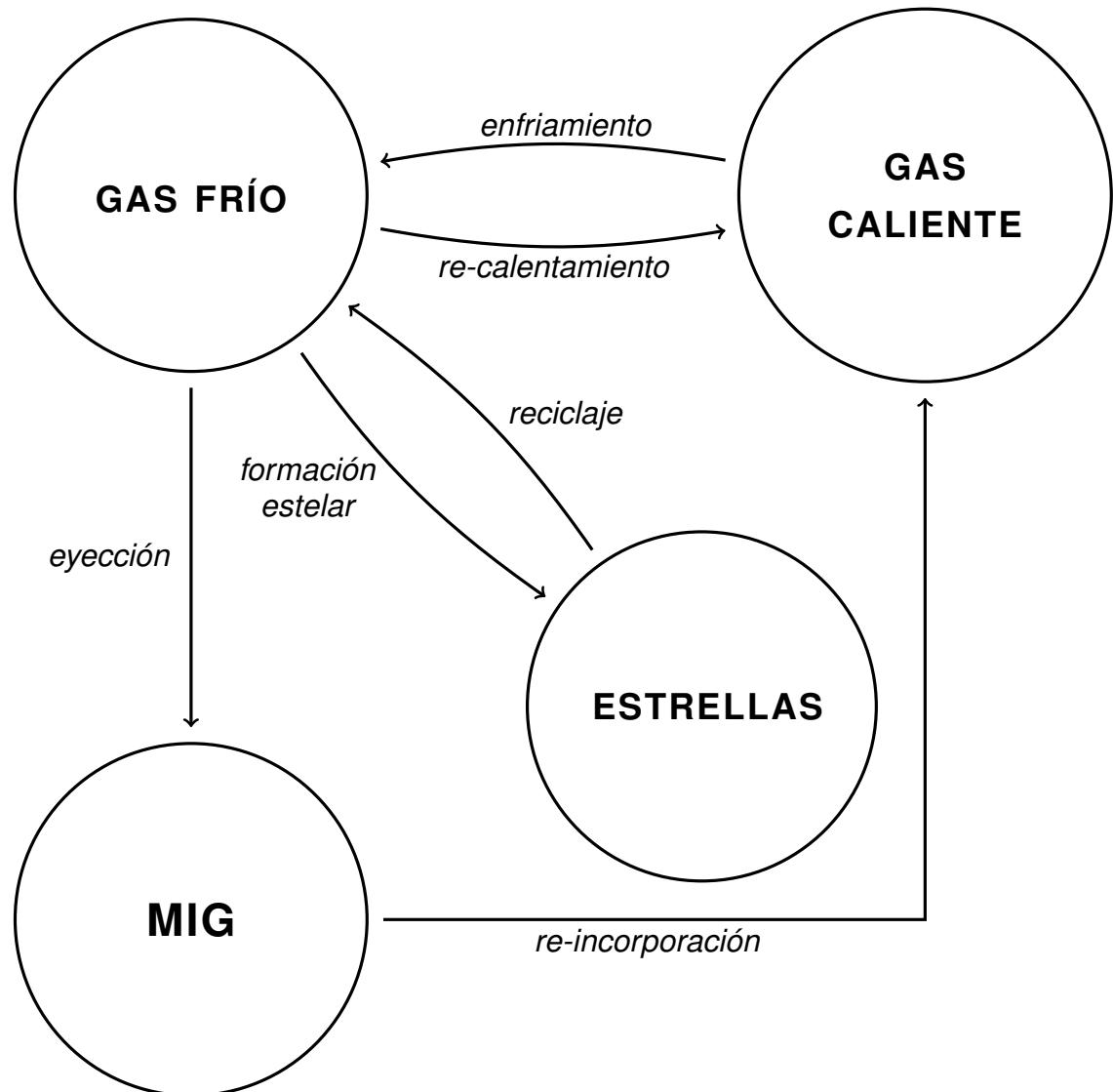
RELACIONES CLÁSICAS — RESUMEN



RELACIONES CLÁSICAS — RESUMEN

- Existe una relación $M_*, \mu_* - \Psi$, cuyo origen está probablemente relacionado con la ley de KS (Kennicutt, 1998):

$$\Sigma_\Psi \propto \Sigma_{\text{frío}}^n.$$

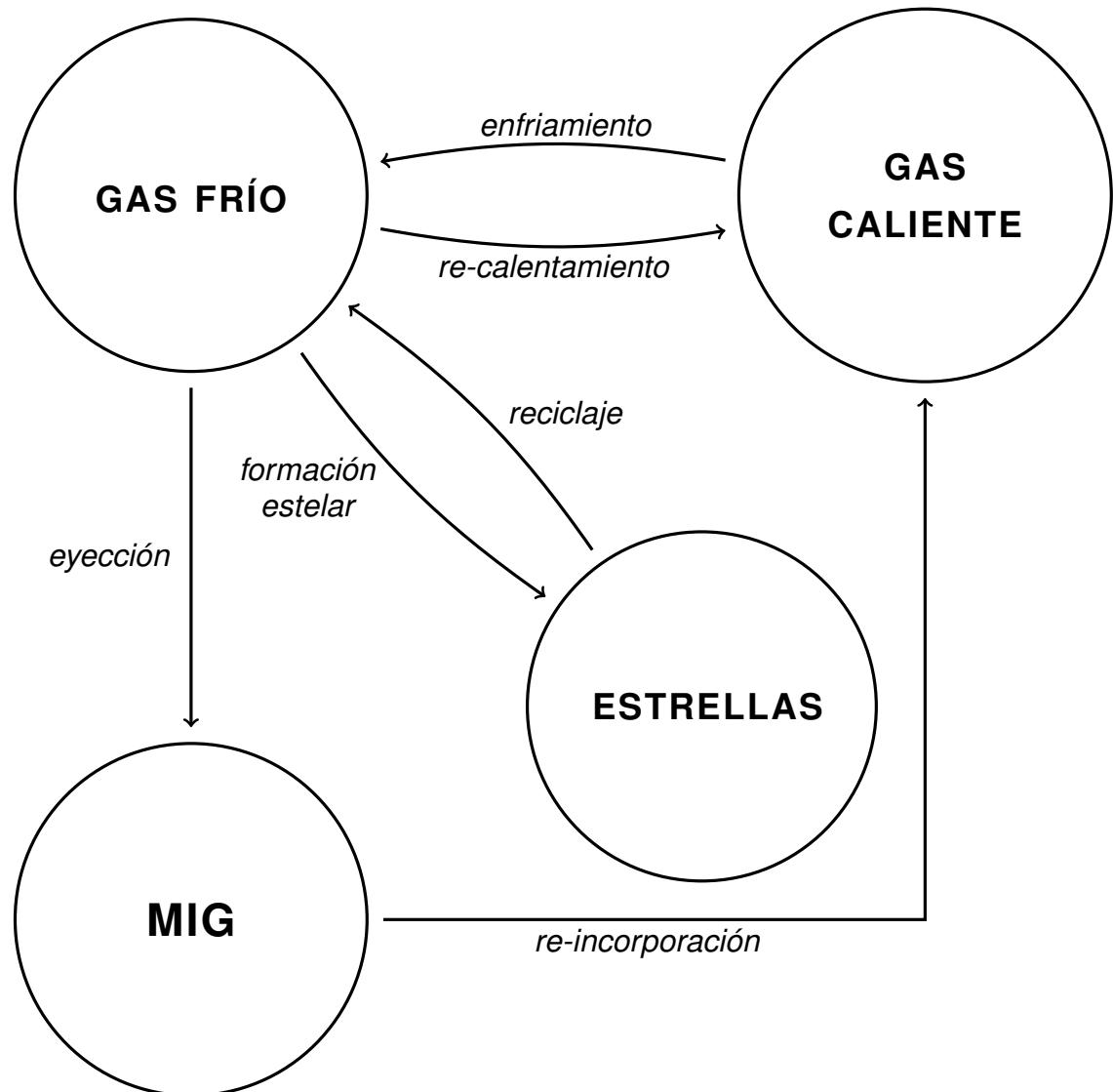


RELACIONES CLÁSICAS — RESUMEN

- Existe una relación $M_*, \mu_* - \Psi$, cuyo origen está probablemente relacionado con la ley de KS (Kennicutt, 1998):

$$\Sigma_\Psi \propto \Sigma_{\text{frío}}^n.$$

- Aunque las galaxias menos masivas forman menos estrellas por unidad de tiempo que las más masivas, la TFE específica sigue una relación $\Psi/M_* - M_*$ con pendiente negativa, evidencia del *downsizing* (Cowie y col., 1996).

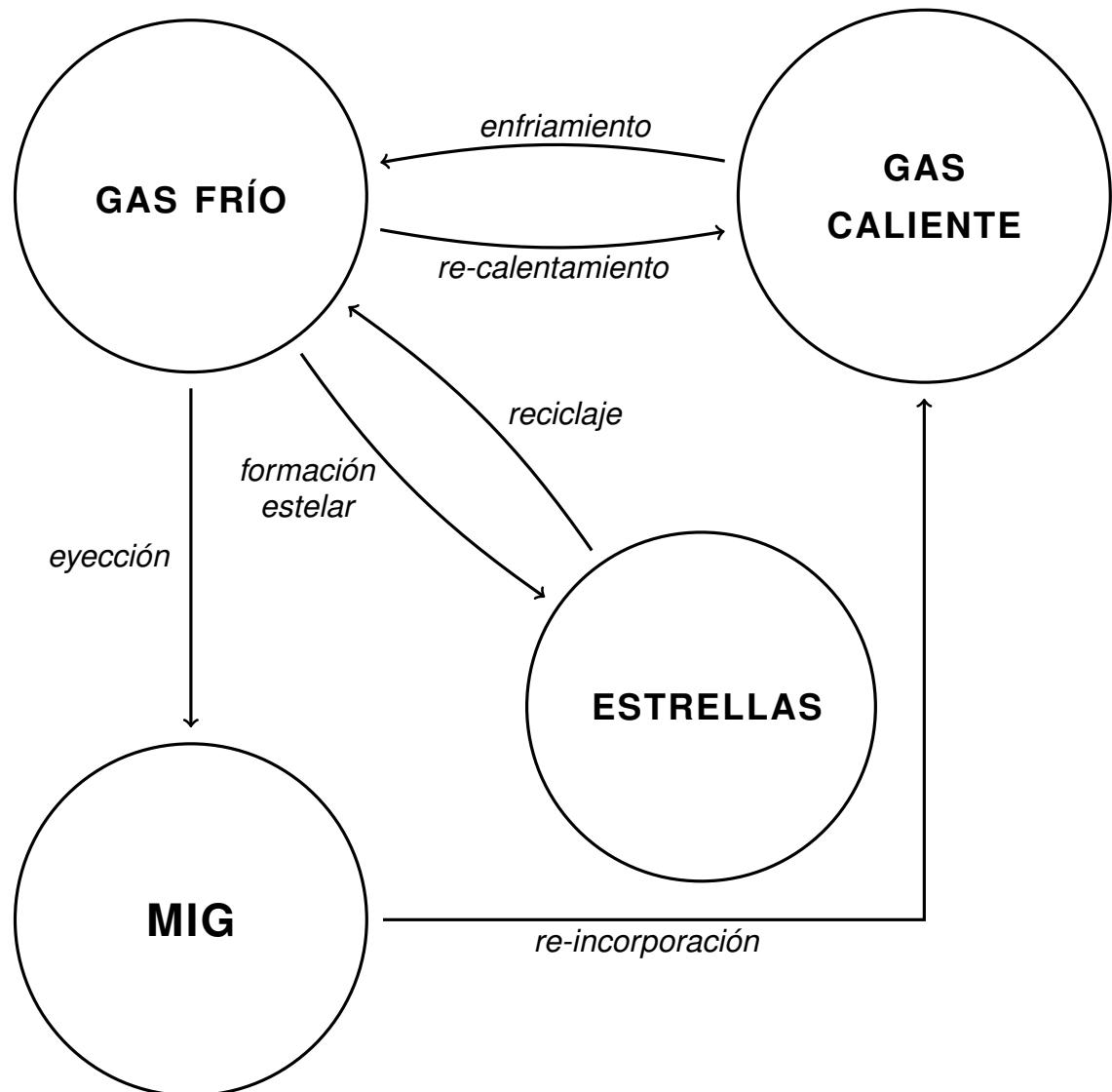


RELACIONES CLÁSICAS — RESUMEN

- Existe una relación $M_*, \mu_* - \Psi$, cuyo origen está probablemente relacionado con la ley de KS (Kennicutt, 1998):

$$\Sigma_\Psi \propto \Sigma_{\text{frío}}^n.$$

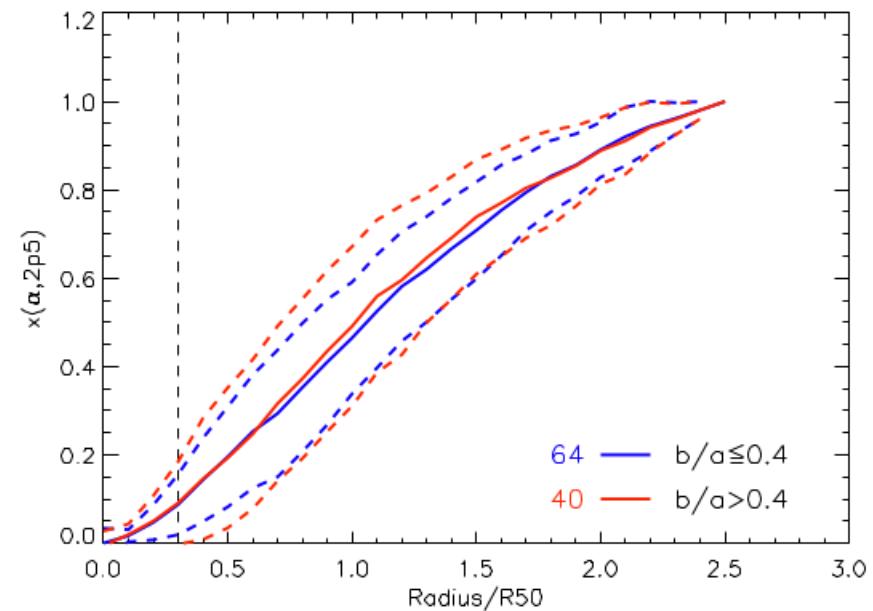
- Aunque las galaxias menos masivas forman menos estrellas por unidad de tiempo que las más masivas, la TFE específica sigue una relación $\Psi/M_* - M_*$ con pendiente negativa, evidencia del *downsizing* (Cowie y col., 1996).
- En las galaxias más masivas no hay una relación clara $t_*, \Psi - Z_*$. En cambio las galaxias se distribuyen de acuerdo a la degeneración edad-metalicidad.



RELACIONES CLÁSICAS — RESUMEN

La falta de resolución espacial impide estudiar efectivamente la importancia relativa de los fenómenos locales y globales.

(Iglesias-Páramo y col., 2013)



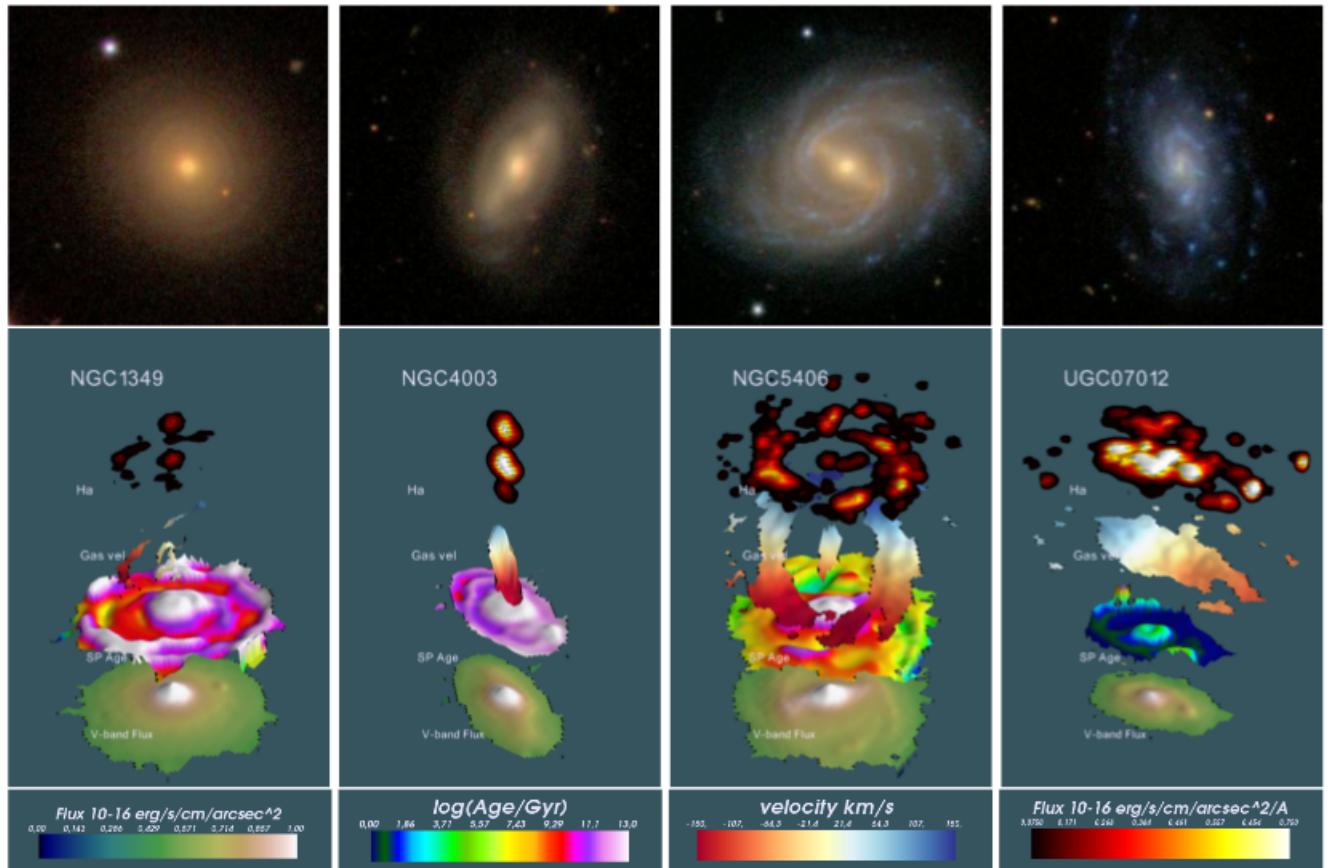
RELACIONES CLÁSICAS — RESUMEN

placeholder

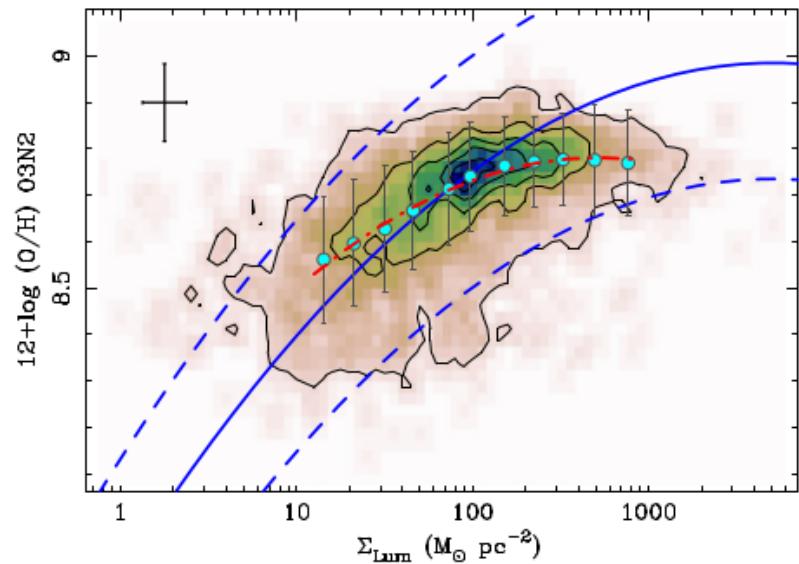
CALIFA — UNA NUEVA FORMA DE VER EL CICLO DE MASA

(Sánchez y col., 2012; Husemann y col., 2013)

- Resolución espacial,
- resoluciónpectral $R \sim 1000$,
- muestra de 600 galaxias de todas las clases morfológicas.

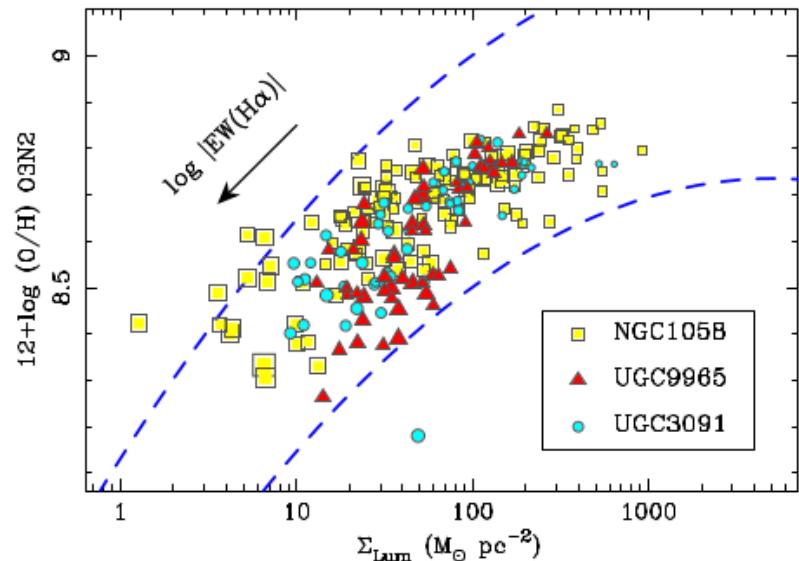


CICLO DE MASA VISTO POR CALIFA — $\Sigma_\star - Z_{\text{frío}}$

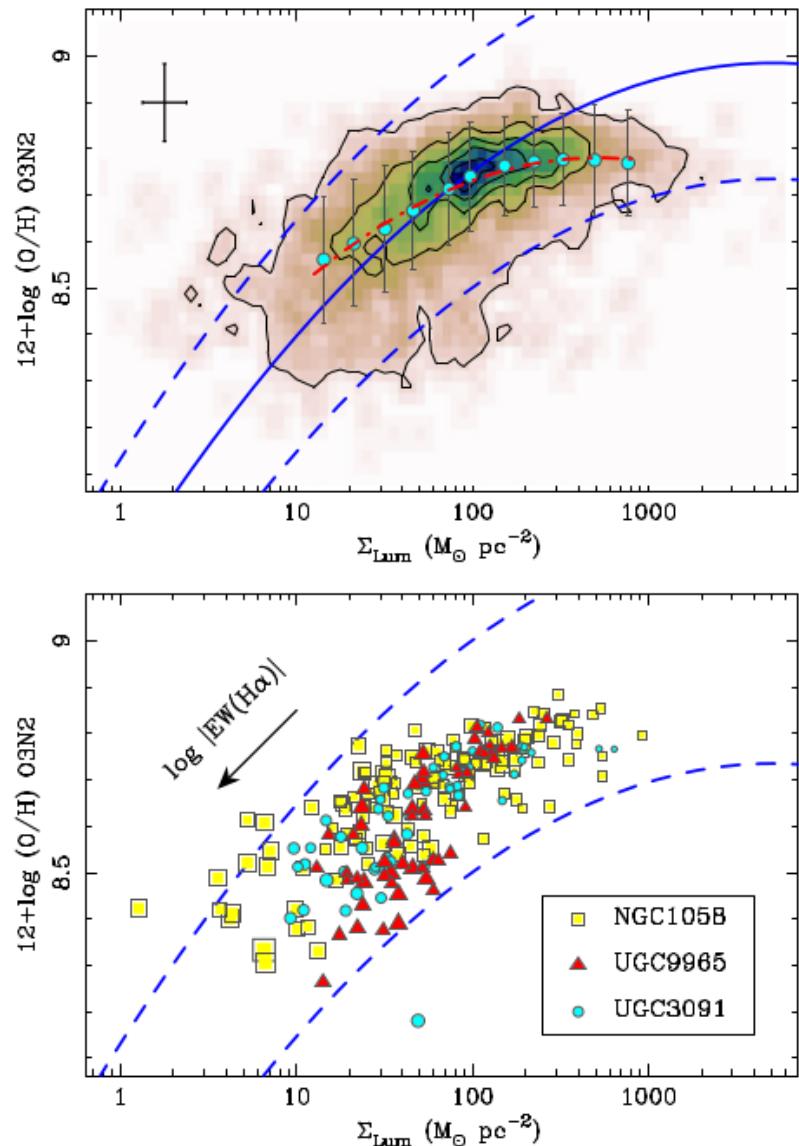


- La relación $\Sigma_\star - Z_{\text{frío}}$ es similar a la relación *global*,
- regiones más densas tienden a τ_Z corta,
- regiones menos densas tienden a τ_Z larga,
- esto se corresponde con un crecimiento *inside-out*.

(Rosales-Ortega y col., 2012)

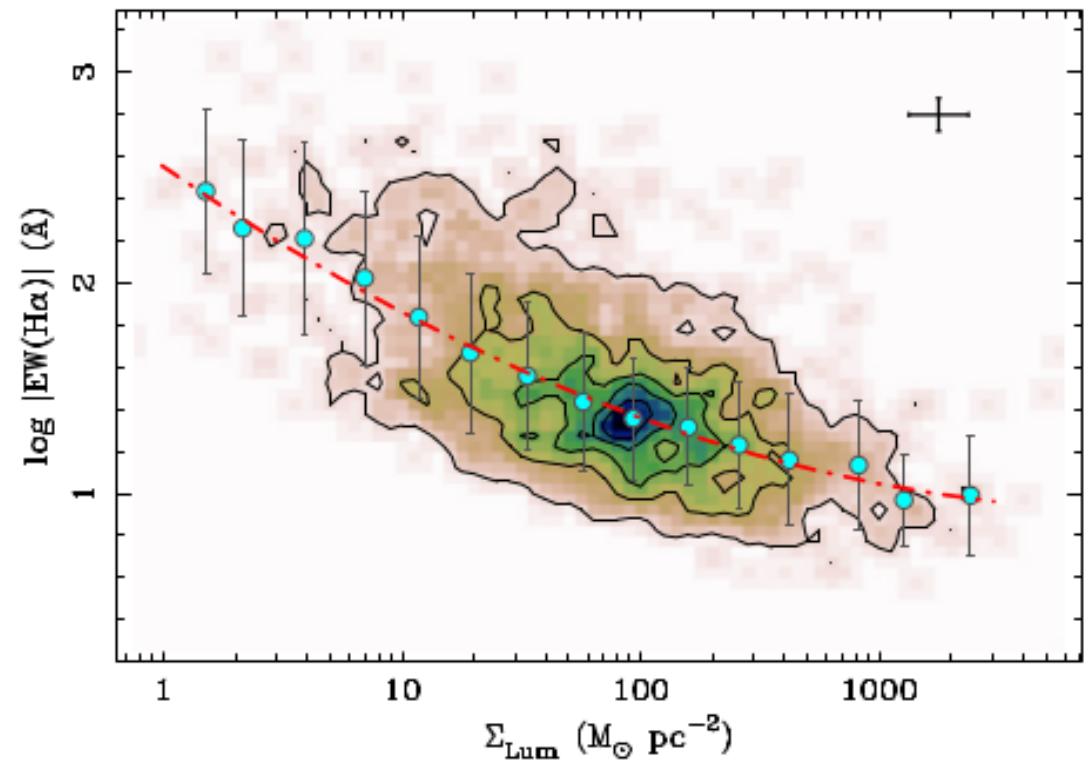


CICLO DE MASA VISTO POR CALIFA — Σ_{\star} – $Z_{\text{frío}}$



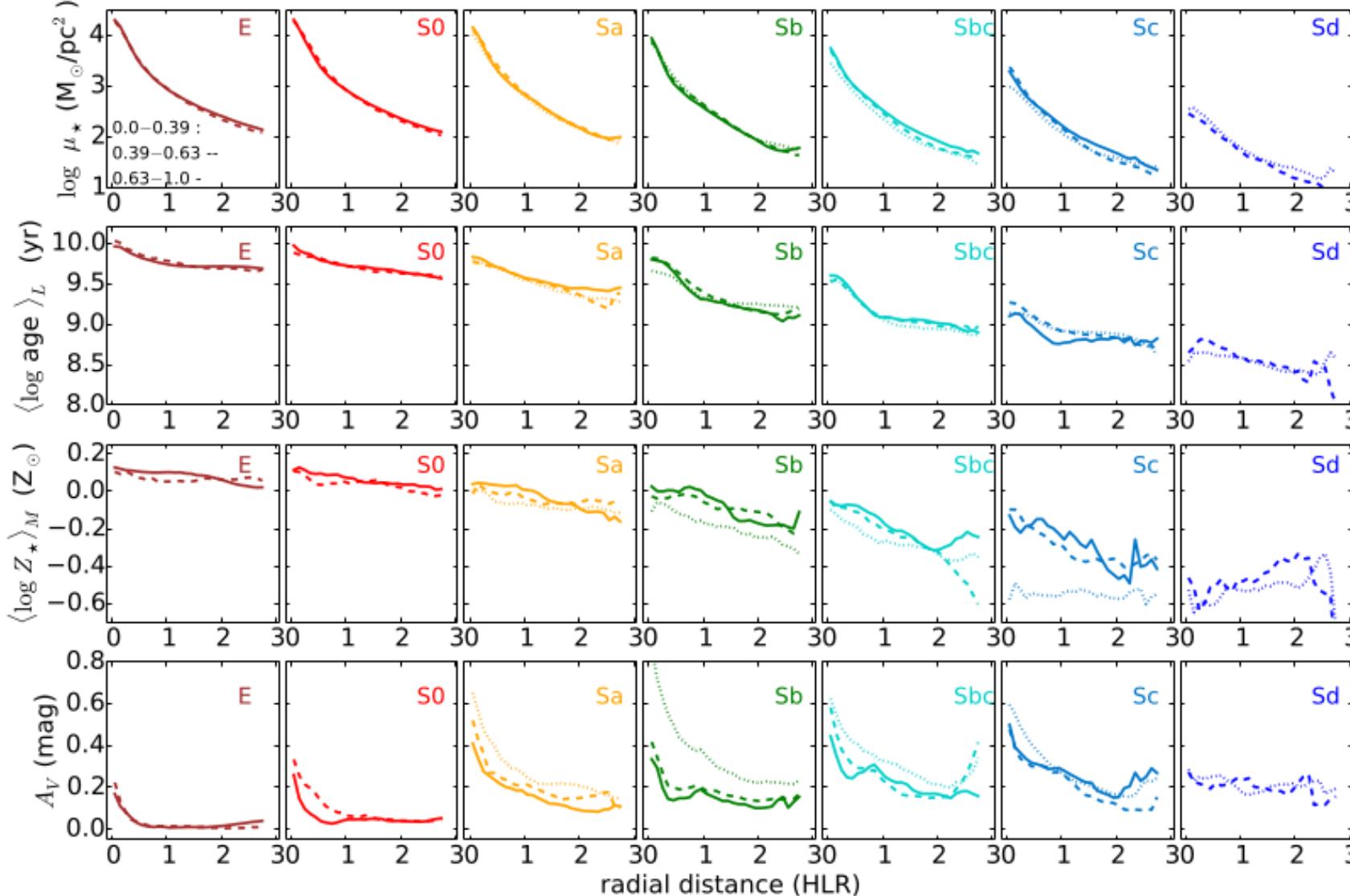
- Existe una anticorrelación Σ_{\star} – $\text{EW}(\text{H}\alpha)$,
- regiones más densas tienden a τ_{\star} larga en el presente,
- regiones menos densas tienden a τ_{\star} corta en el presente,
- esto se corresponde con un *downsizing* local.

(Rosales-Ortega y col., 2012)



CICLO DE MASA VISTO POR CALIFA — $\Sigma_\star - Z_{\text{frío}}$

(González Delgado y col., 2015)



Los perfiles de densidad de masa estelar no evolucionan significativamente a lo largo de la secuencia de Hubble.

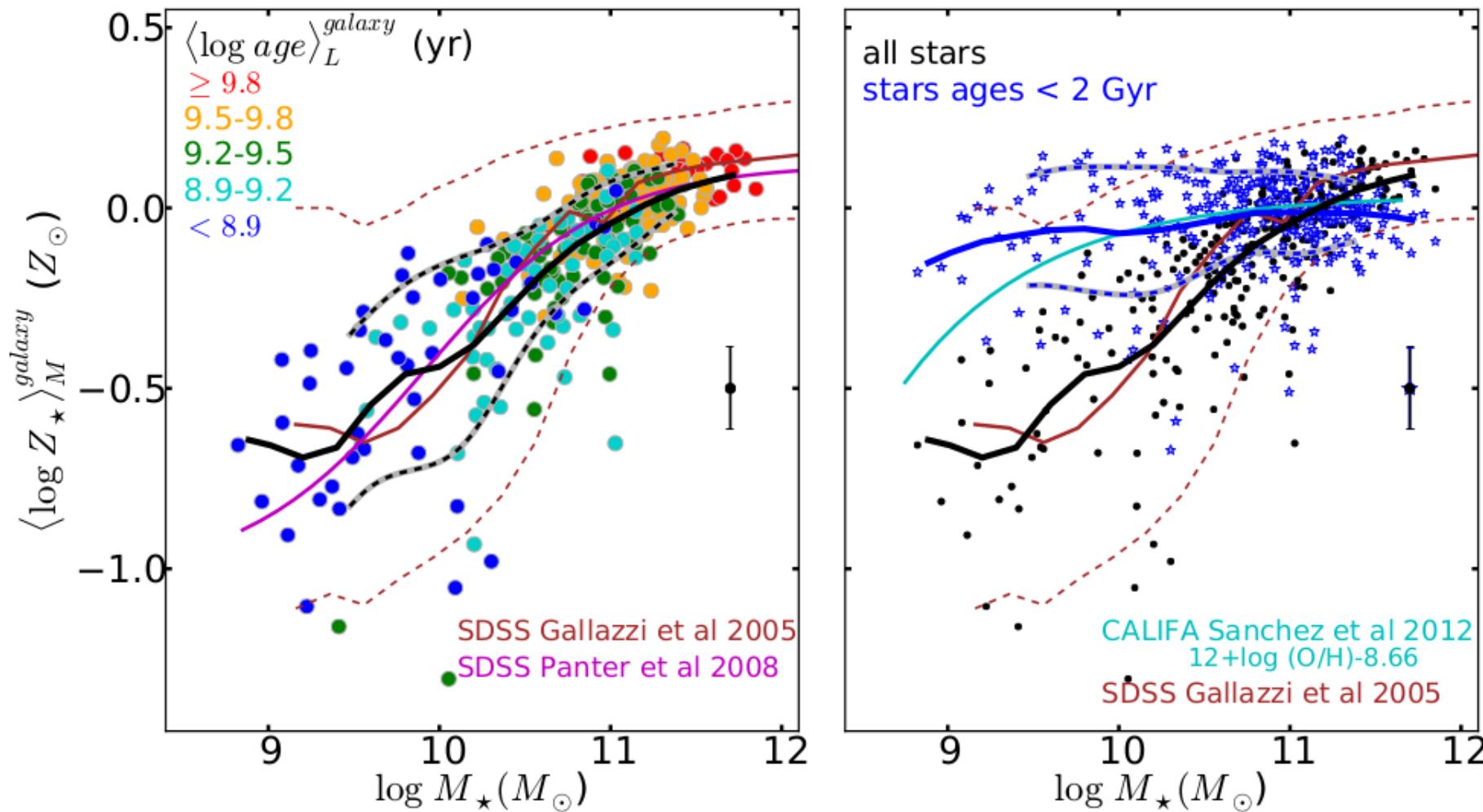
Los perfiles de edad estelar son esencialmente uniformes en galaxias E, S0 y Sd; y muestran un quiebre en galaxias Sb, Sbc y Sc.

Los perfiles de metalicidad estelar muestran mayor dependencia con la inclinación especialmente en galaxias tardías.

Los perfiles de extinción en V muestran grandes variaciones con la inclinación en galaxias tardías.

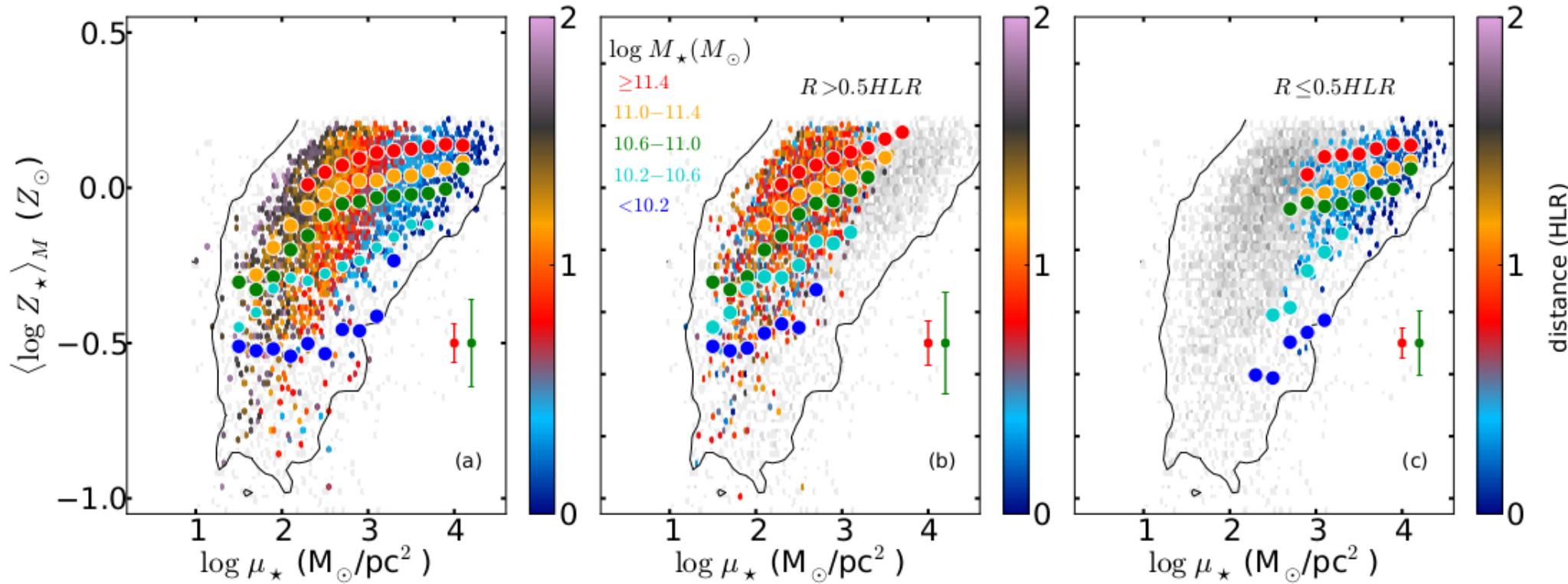
CICLO DE MASA VISTO POR CALIFA — $M_\star - Z_\star$

(González Delgado y col., 2014)



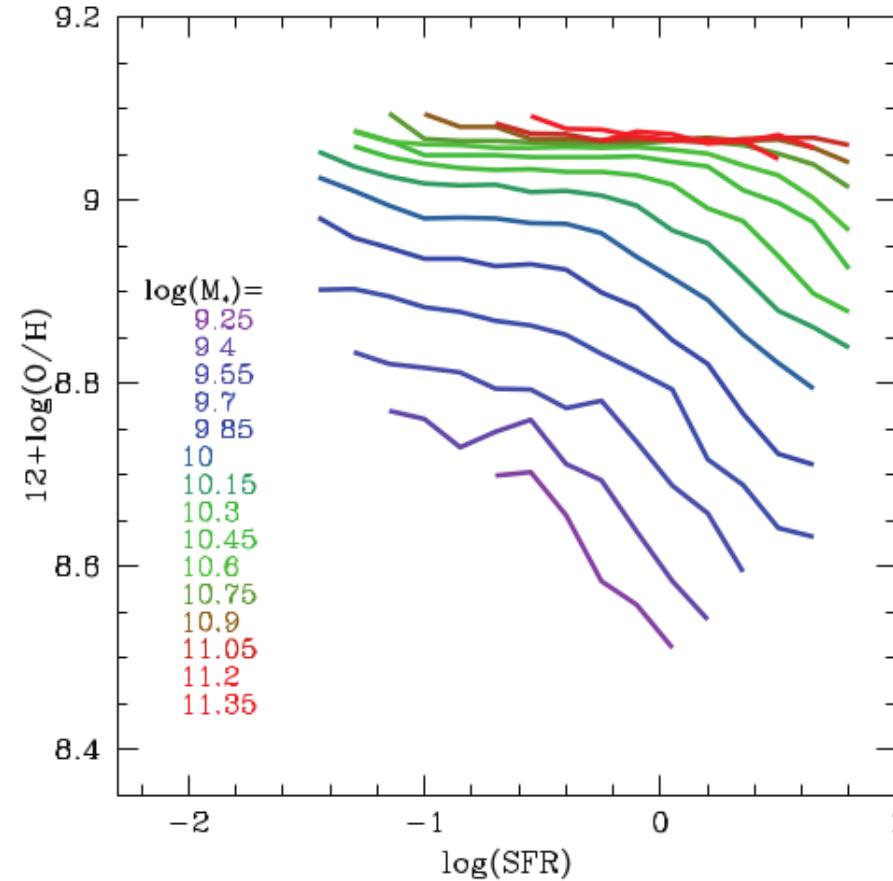
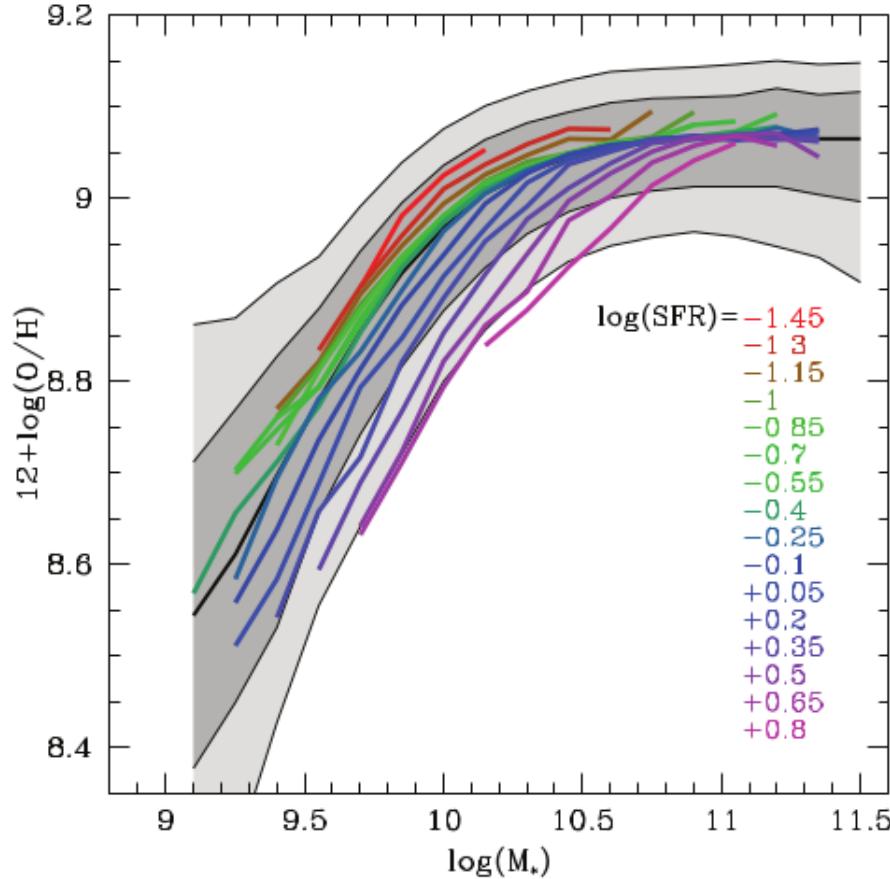
CICLO DE MASA VISTO POR CALIFA — $M_\star - Z_\star$

(González Delgado y col., 2014)



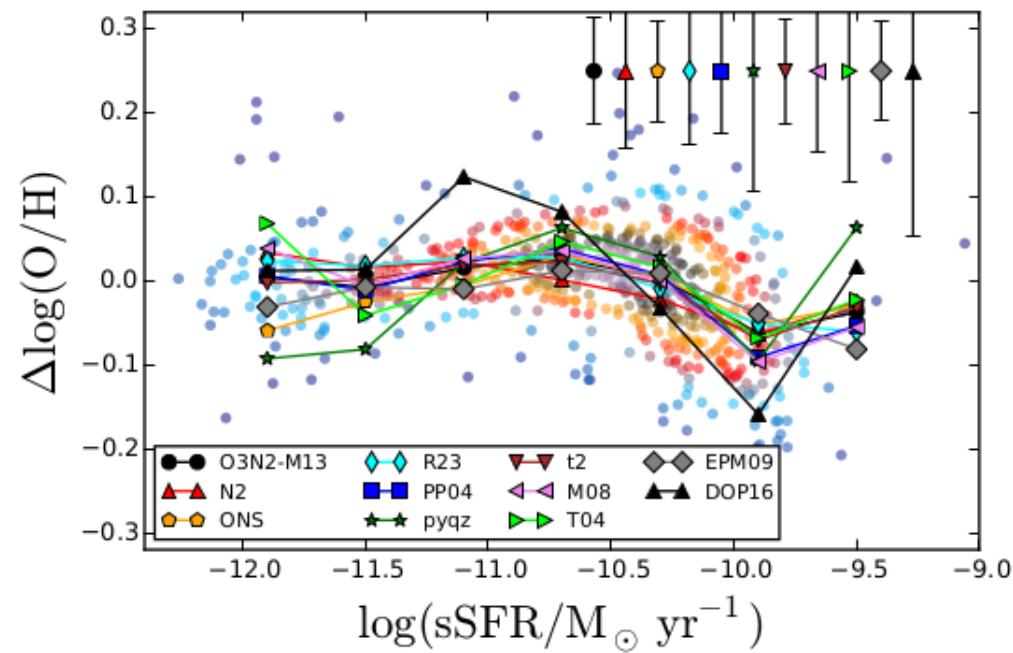
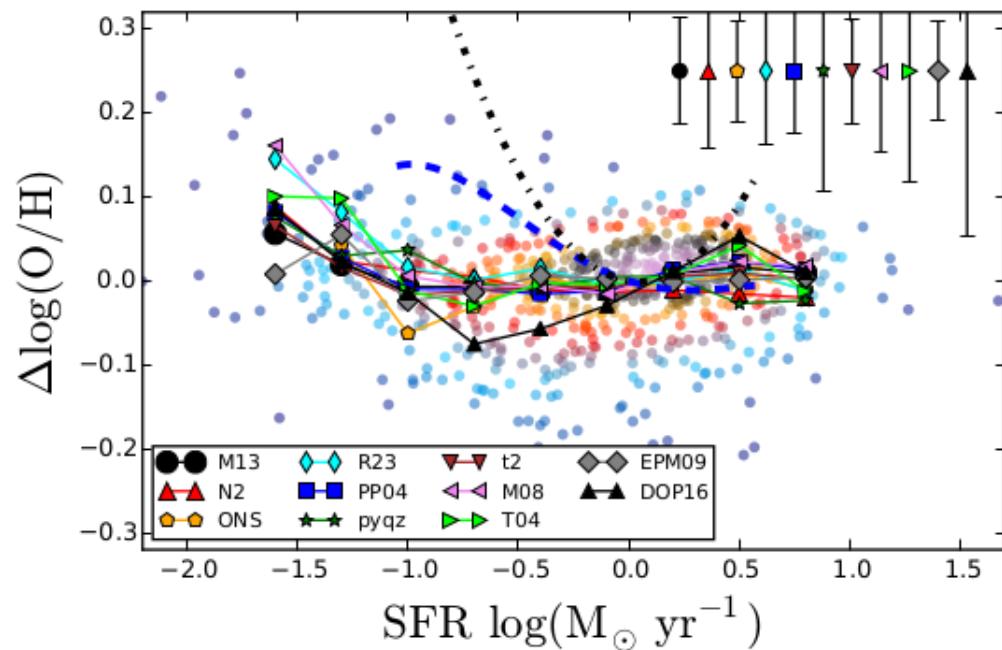
CICLO DE MASA VISTO POR CALIFA — M_\star — $Z_{\text{frío}}$ — Ψ

(Mannucci y col., 2010)



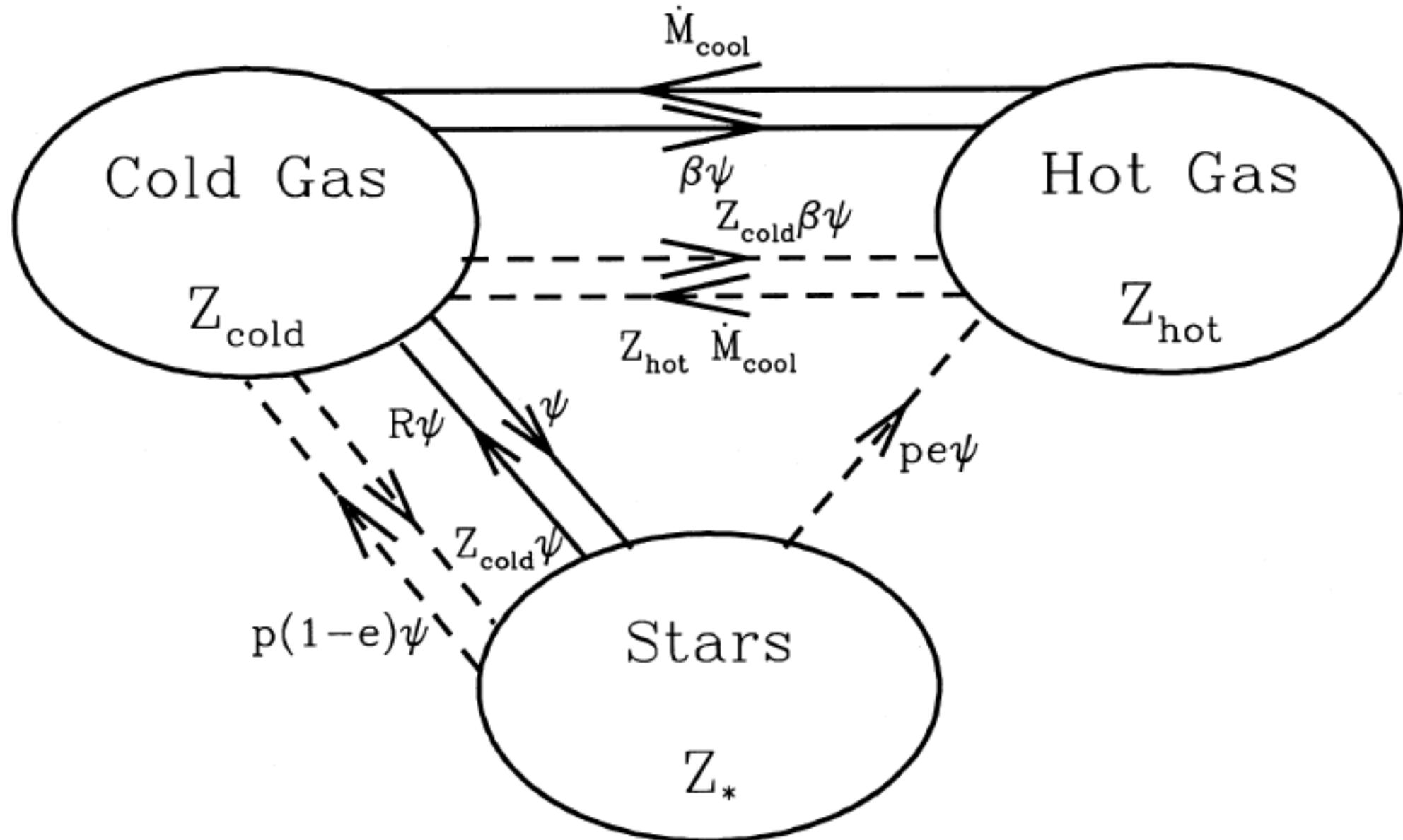
CICLO DE MASA VISTO POR CALIFA — M-Z- Ψ

(Sánchez y col., 2017)



CICLO DE MASA VISTO POR CALIFA — RESUMEN

UNA VISIÓN TEÓRICA DEL CICLO DE MASA



UNA VISIÓN TEÓRICA DEL CICLO DE MASA

$$\dot{M}_* = (1 - R)\psi \quad (1a)$$

$$\dot{M}_{\text{hot}} = -\dot{M}_{\text{cool}} + \beta\psi \quad (1b)$$

$$\dot{M}_{\text{cold}} = \dot{M}_{\text{cool}} - (1 - R + \beta)\psi \quad (1c)$$

$$\dot{M}_*^Z = (1 - R)Z_{\text{cold}}\psi \quad (1d)$$

$$\dot{M}_{\text{hot}}^Z = -\dot{M}_{\text{cool}}Z_{\text{hot}} + (pe + \beta Z_{\text{cold}})\psi \quad (1e)$$

$$\dot{M}_{\text{cold}}^Z = \dot{M}_{\text{cool}}Z_{\text{hot}} + [p(1 - e) - (1 + \beta - R)Z_{\text{cold}}]\psi \quad (1f)$$

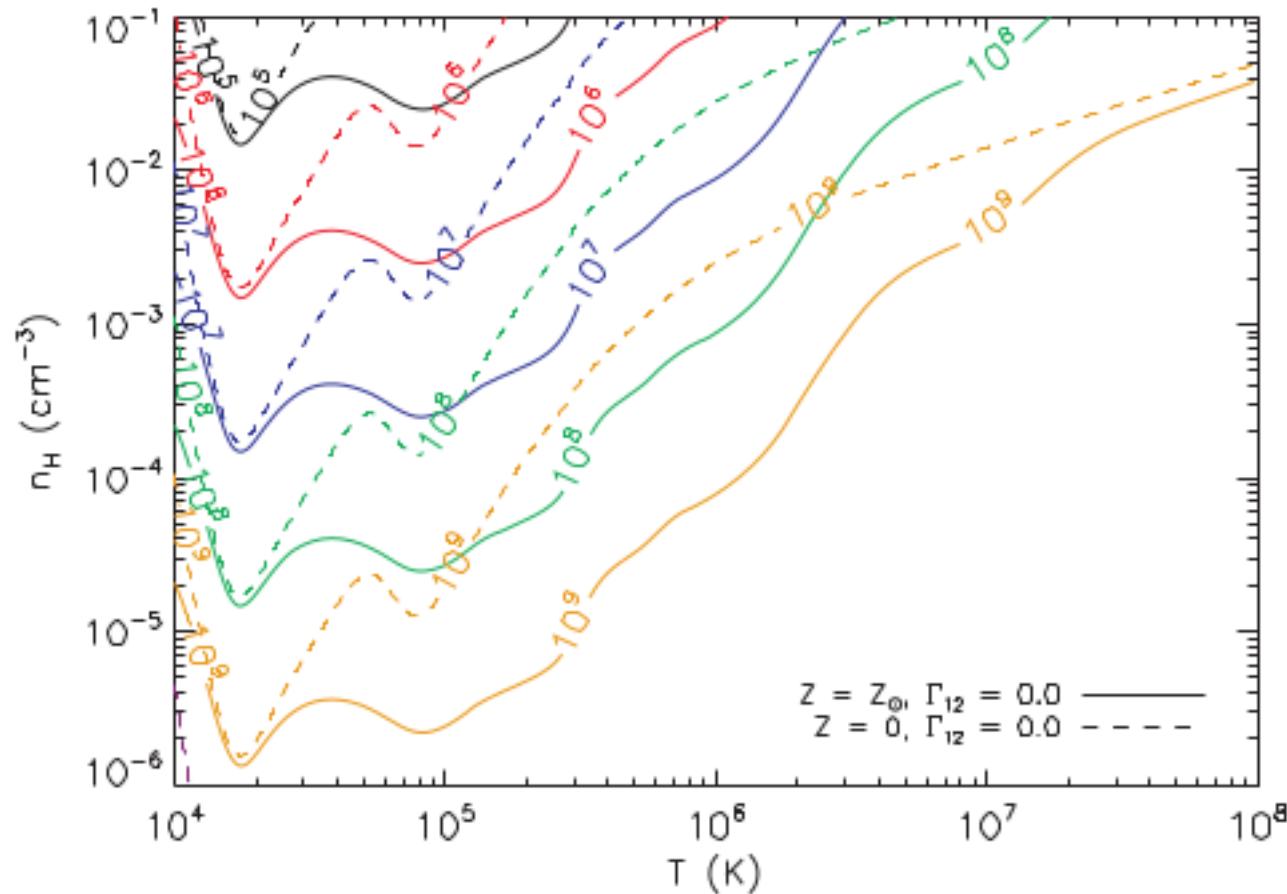
UNA VISIÓN TEÓRICA DEL CICLO DE MASA

$$\dot{Z}_\star = (1 - R) \frac{\psi}{M_\star} (Z_{\text{cold}} - Z_\star) \quad (2a)$$

$$\dot{Z}_{\text{cold}} = (Z_{\text{hot}} - Z_{\text{cold}}) \frac{\dot{M}_{\text{cool}}}{M_{\text{cold}}} + p(1 - e) \frac{\psi}{M_{\text{cold}}} \quad (2b)$$

UNA VISIÓN TEÓRICA DEL CICLO DE MASA

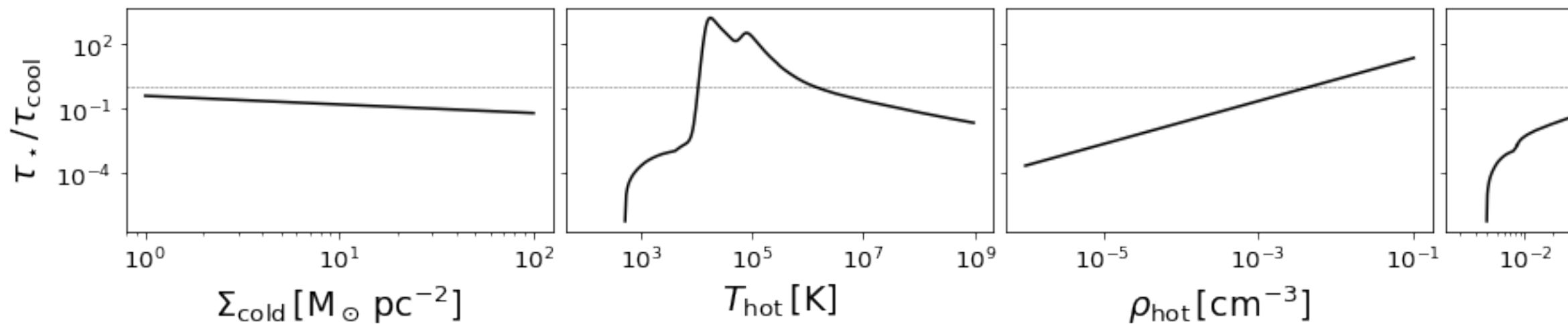
$$\tau_{\text{TFE}} = (4 \pm 1) \times 10^9 \text{ años} \left[\frac{\Sigma_{\text{frio}}}{1 M_{\odot} \text{ pc}^{-2}} \right]$$



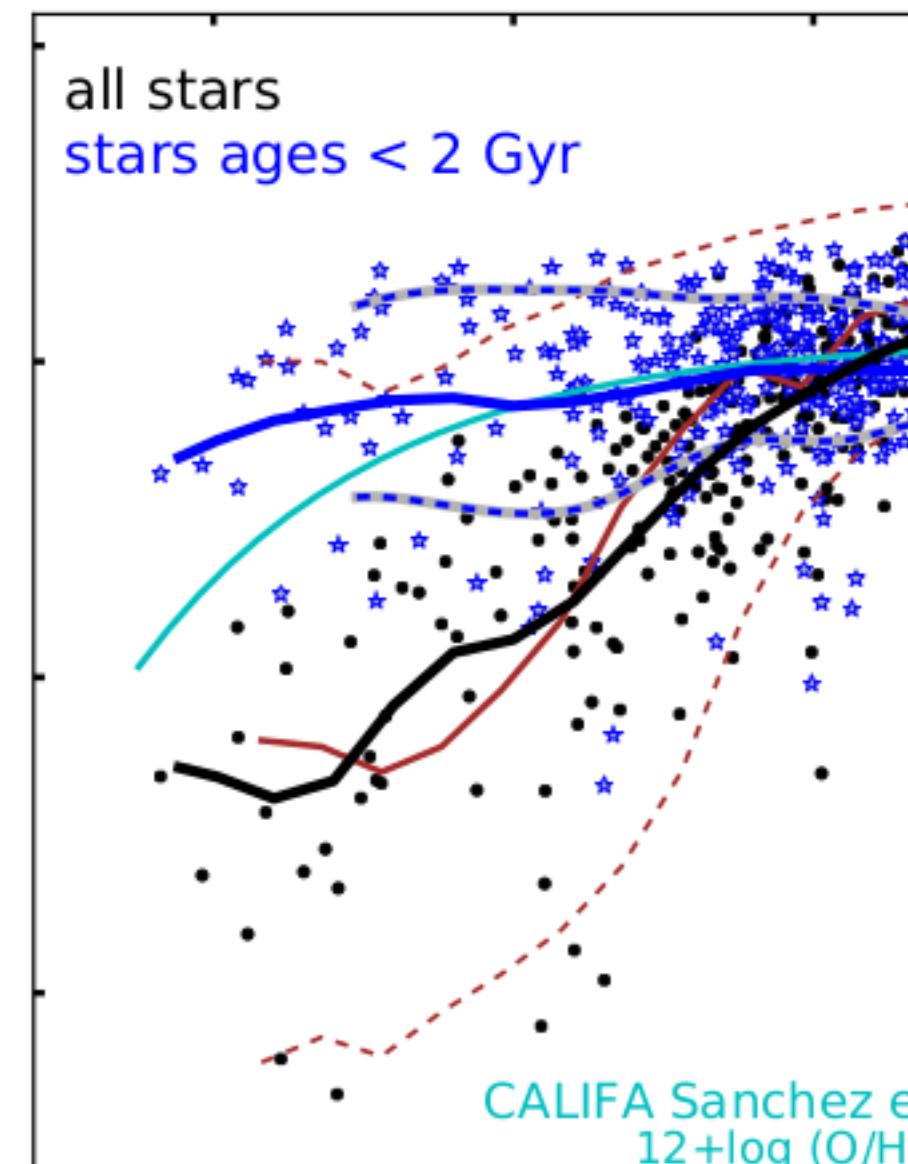
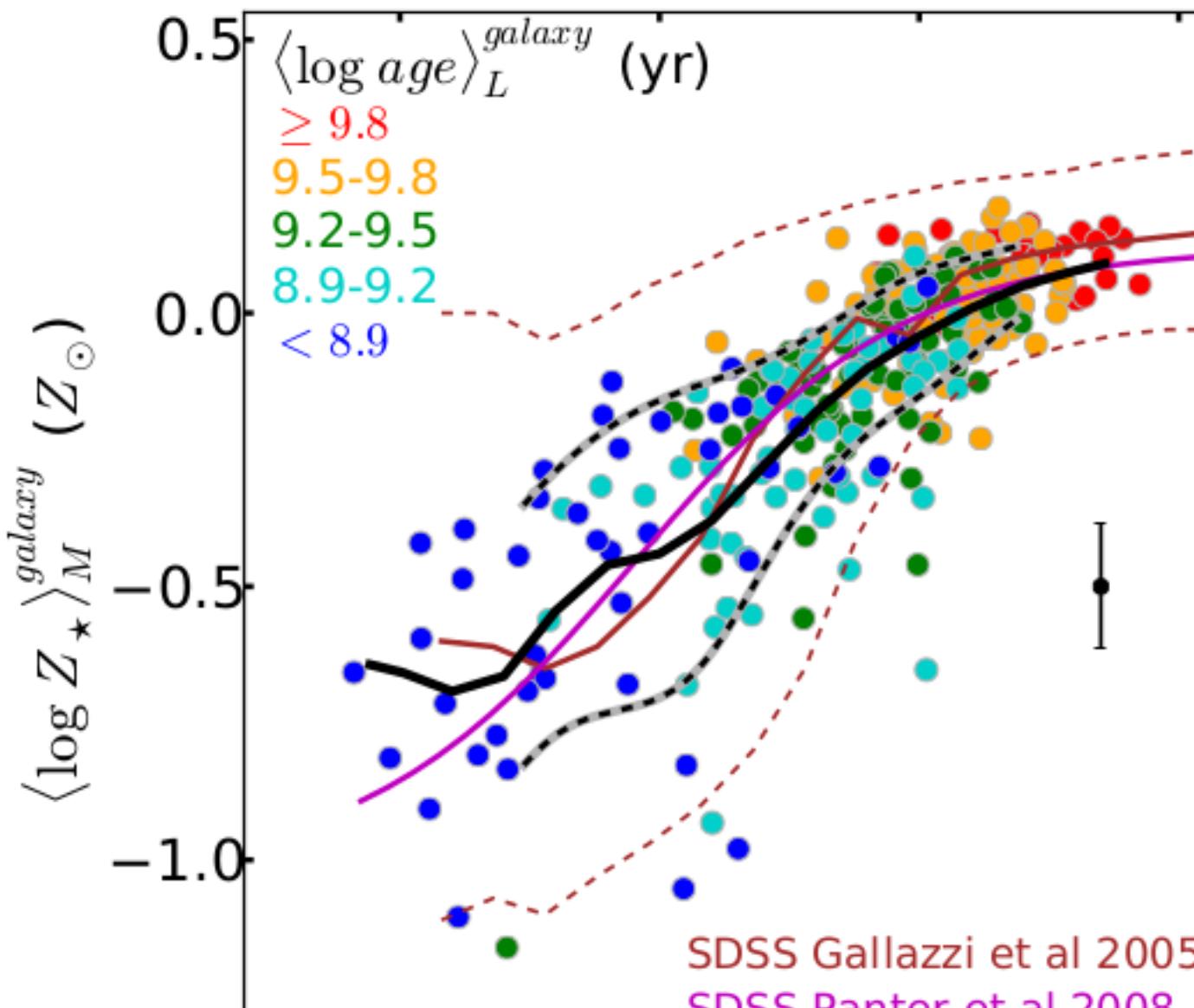
$$\tau_{\text{enf}} \approx 10 \times 10^9 \text{ años} \left[\frac{T}{10^7 \text{ K}} \right] \left[\frac{10^{-3} \text{ g cm}^{-3}}{\rho_{\text{cal}}} \right] \left[\frac{10^{-23} \text{ erg cm}^3}{\Lambda_n} \right]$$

UNA VISIÓN TEÓRICA DEL CICLO DE MASA

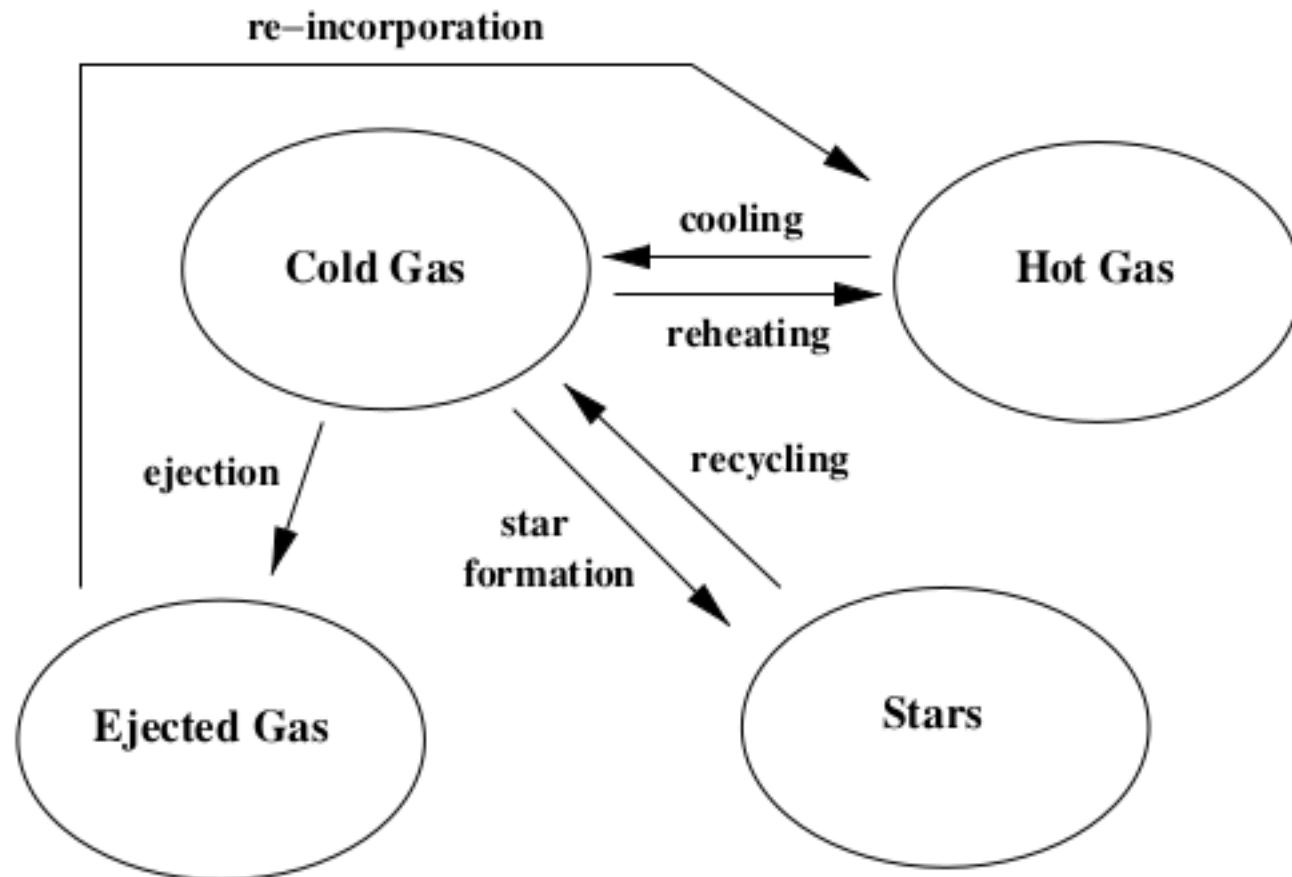
$$\frac{\tau_*}{\tau_{\text{cool}}} \approx 0,4 \left(\frac{\Sigma_{\text{cold}}}{1 \text{ M}_\odot \text{ pc}^{-2}} \right)^{-0,4} \left(\frac{10^7}{T_{\text{hot}}} \right) \left(\frac{\rho_{\text{hot}}}{10^{-3} \text{ cm}^{-3}} \right) \left(\frac{\Lambda(T_{\text{hot}}, Z_{\text{hot}})}{10^{-23} \text{ erg cm}^3 \text{ s}^{-1}} \right)$$



UNA VISIÓN TEÓRICA DEL CICLO DE MASA



UNA VISIÓN TEÓRICA DEL CICLO DE MASA



PRÓLOGO — EXPECTATIVAS PARA EL FUTURO

ANTECEDENTES DE SONDEOS CON IFU I

El problema de adquisición de imágenes astronómicas es, en el sentido general, un problema de dos dimensiones espaciales y una dimensión espectral ($x, y; \lambda$). Desafortunadamente, debido a limitaciones de ingeniería, la mayoría de los esfuerzos que ofrecen una resolución espectral $R \sim 1000$, están limitados a una dimensión espacial, i. e. $(x; \lambda)$. El uso del formato *long-slit* (rendija) resuelve parcialmente el problema de la dimensión perdida por espectrógrafos convencionales: si la dispersión de la luz proveniente de las fuentes se hace perpendicular al largo de la rendija, es posible en principio obtener espectros de distintas regiones de un mismo objeto extendido (e. g. una galaxia en el Universo local) o de varios objetos adyacentes en su proyección en el cielo. Existen sin embargo varias limitaciones que complican la adquisición efectiva de la segunda dimensión usando este formato, todas relacionadas con el hecho de que las componentes espaciales y la espectral están correlacionadas.

Las unidades de campo integrado (IFU en inglés Vanderriest, 1980) aparecieron en escena para resolver las limitaciones de resolución espacial de los previos intentos por registrar espectros de los objetos celestes. Vanderriest presentó un primer prototipo de IFU que consistía en un arreglo de fibras ópticas con forma hexagonal capaz de resolver espacialmente objetos en un campo de unas pocas decenas de segundos de arco ($\sim 20''$) y bajo brillo superficial. Tal dispositivo permitiría estudios de objetos cercanos siempre que la resolución espectral no fuera un factor importante para su desarrollo.

A mediado de los 90s aparecieron los primeros resultados obtenidos a partir del análisis de datos de IFU como fuera concebida por Courtes (1982) (véase Bacon y col., 1995, para un resumen de los hallazgos con el dispositivo TIGER).

ANTECEDENTES DE SONDEOS CON IFU II

- Primera medida de campos de velocidad estelar en la región central de galaxias cercanas (Bacon y col., 1995).
- Prueba de que las componentes de la cruz de Einstein (2237+0305) son en realidad imágenes múltiples del mismo objeto (Fitte y Adam, 1994).
- Se logró resolver y mapear fuentes de emisión y continuo en NGC 1275 (Ferruit y Pecontal, 1994).
- etc.

Las principales limitaciones eran el campo de visión, que seguía siendo demasiado pequeño para un estudio sistemático de una fuente extendida y la resolución espectral.

En los últimos 20 años las IFU han alcanzado madurez y han permitido estudios sistemáticos de muestras completas de galaxias en el universo local, abarcando en la mayoría de los casos la totalidad de la imagen proyectada de los objetos. En buena parte de lo que resta de este seminario hablaré de los resultados más importantes que estos sondeos han permitido y en qué sentido han cambiado los paradigmas en el contexto de la formación y la evolución de las galaxias.

SONDEOS CON IFU EN LA ACTUALIDAD I

Las IFU de la actualidad (< 2012) presentan las siguientes ventajas frente a la primera generación de IFUs:

- Tienen grandes campos de visión, usualmente permitiendo abarcar la imagen proyectada de galaxias a $z \sim 0,05$
- Tienen una mejor función de respuesta que permite integrar espectros de fuentes más débiles en exposiciones cortas ~ 30 min.

. Aún así, dos principales desventajas permanecen: la limitada resolución espectral y solo una fuente por exposición puede observarse.

CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS I

Los datos que se obtienen viven en el espacio (x, y, λ) , por lo tanto la información que permitiría construir mapas de determinada información espectral, a una resolución espacial fija, depende del rango y de la resolución espectral. Desde el punto de vista poblacional, probablemente los estudios más atractivos tienen que ver con la dependencia ambiental de las propiedades físicas de las galaxias, i. e., cómo cambian los promedios en la edad, la composición química, las propiedades del polvo, tasa de formación estelar (TFE), como función de la densidad bariónica, por ejemplo y a su vez como cambian estas propiedades de una galaxia a otra. Por supuesto, como mostré en el seminario anterior, los resultados de sondeos con IFU han permitido el refinamiento de los modelos dinámicos de galaxias y una clasificación morfológica basada en las propiedades físicas de las galaxias.

El seminario anterior fue intencionalmente sesgado a galaxias tempranas porque la mayoría de los esfuerzos de los sondeos con IFU están también sesgados de la misma manera. Construir muestras de galaxias que permitan estudios cinemáticos sistemáticos necesariamente improndrá un sesgo hacia galaxias tempranas. Ahora mostraré los resultados de los estudios poblacionales, en los que la secuencia de Hubble se abarca en completitud. Por lo tanto los resultados que mostraré estarán claramente sesgados hacia los de CALIFA, que ya ha completado el sondeo de la muestra

Referencias I

- Schmidt, M. (1959). “The Rate of Star Formation.” En: *ApJ* 129, pág. 243.
- Vanderriest, C. (1980). “A fiber-optics dissector for spectroscopy of nebulosities around quasars and similar objects”. En: *PASP* 92, págs. 858-862.
- Courtes, G. (1982). “An Integral Field Spectrograph (IFS) for Large Telescopes”. En: *IAU Colloq. 67: Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes*. Ed. por C. M. Humphries. Vol. 92. Astrophysics and Space Science Library, pág. 123.
- Ferruit, P. y E. Pecontal (1994). “Sub-arcsecond resolution 2D spectrography of the central regions of NGC 1275 with TIGER”. En: *A&A* 288, págs. 65-76.
- Fitte, C. y G. Adam (1994). “Sub-arcsecond integral field spectroscopy of the Einstein Cross 2237+0305: Lensing and microlensing effects”. En: *A&A* 282, págs. 11-18.

Referencias II

- Bacon, R. y col. (1995). “3D spectrography at high spatial resolution. I. Concept and realization of the integral field spectrograph TIGER.” En: *A&AS* 113, pág. 347.
- Cowie, L. L. y col. (1996). “New Insight on Galaxy Formation and Evolution From Keck Spectroscopy of the Hawaii Deep Fields”. En: *AJ* 112, pág. 839.
- Kennicutt Jr., R. C. (1998). “The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies”. En: *ApJ* 498, págs. 541-552.
- Brinchmann, J. y col. (2004). “The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe”. En: *MNRAS* 1179.4, págs. 1151-1179. ISSN: 00358711.
- Tremonti, C. A. y col. (2004). “The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey”. En: *ApJ* 613, págs. 898-913.
- Gallazzi, A. y col. (2005). “The ages and metallicities of galaxies in the local universe”. En: *MNRAS* 362, págs. 41-58.

Referencias III

- Ocvirk, P. y col. (2006). “STECMAP: STEllar Content from high resolution galactic spectra via Maximum A Posteriori”. En: *MNRAS* 365, págs. 46-73.
- Mannucci, F. y col. (2010). “A fundamental relation between mass, star formation rate and metallicity in local and high-redshift galaxies”. En: *MNRAS* 408, págs. 2115-2127.
- Rosales-Ortega, F. F. y col. (2012). “A New Scaling Relation for H II Regions in Spiral Galaxies: Unveiling the True Nature of the Mass-Metallicity Relation”. En: *ApJ* 756, L31, pág. L31.
- Sánchez, S. F. y col. (2012). “CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. I. Survey presentation”. En: *A&A* 538, A8, A8.
- Husemann, B. y col. (2013). “CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. II. First public data release”. En: *A&A* 549, A87, A87.
- Iglesias-Páramo, J. y col. (2013). “Aperture corrections for disk galaxy properties derived from the CALIFA survey. Balmer emission lines in spiral galaxies”. En: *A&A* 553, L7, pág. L7.

Referencias IV

- González Delgado, R. M. y col. (2014). “Insights on the Stellar Mass-Metallicity Relation from the CALIFA Survey”. En: *ApJ* 791, L16, pág. L16.
- Whitaker, K. E. y col. (2014). “Constraining the Low-mass Slope of the Star Formation Sequence at $0.5 < z < 2.5$ ”. En: *ApJ* 795, 104, pág. 104.
- González Delgado, R. M. y col. (2015). “The CALIFA survey across the Hubble sequence. Spatially resolved stellar population properties in galaxies”. En: *A&A* 581, A103, A103.
- Sánchez, S. F. y col. (2017). “The mass-metallicity relation revisited with CALIFA”. En: *MNRAS* 469, págs. 2121-2140.