

FENÓMENOS FÍSICOS NECESARIOS PARA LA FORMACIÓN DE GALAXIAS

Por
Alfredo J. Mejía

CONTENIDO

FENÓMENOS FUNDAMENTALES:

FORMACIÓN DE HALOS DE MATERIA OSCURA

FORMACIÓN DEL HALO Y DISCO GASEOSOS

FORMACIÓN ESTELAR

FUSIÓN DE HALOS

FENÓMENOS REGULADORES:

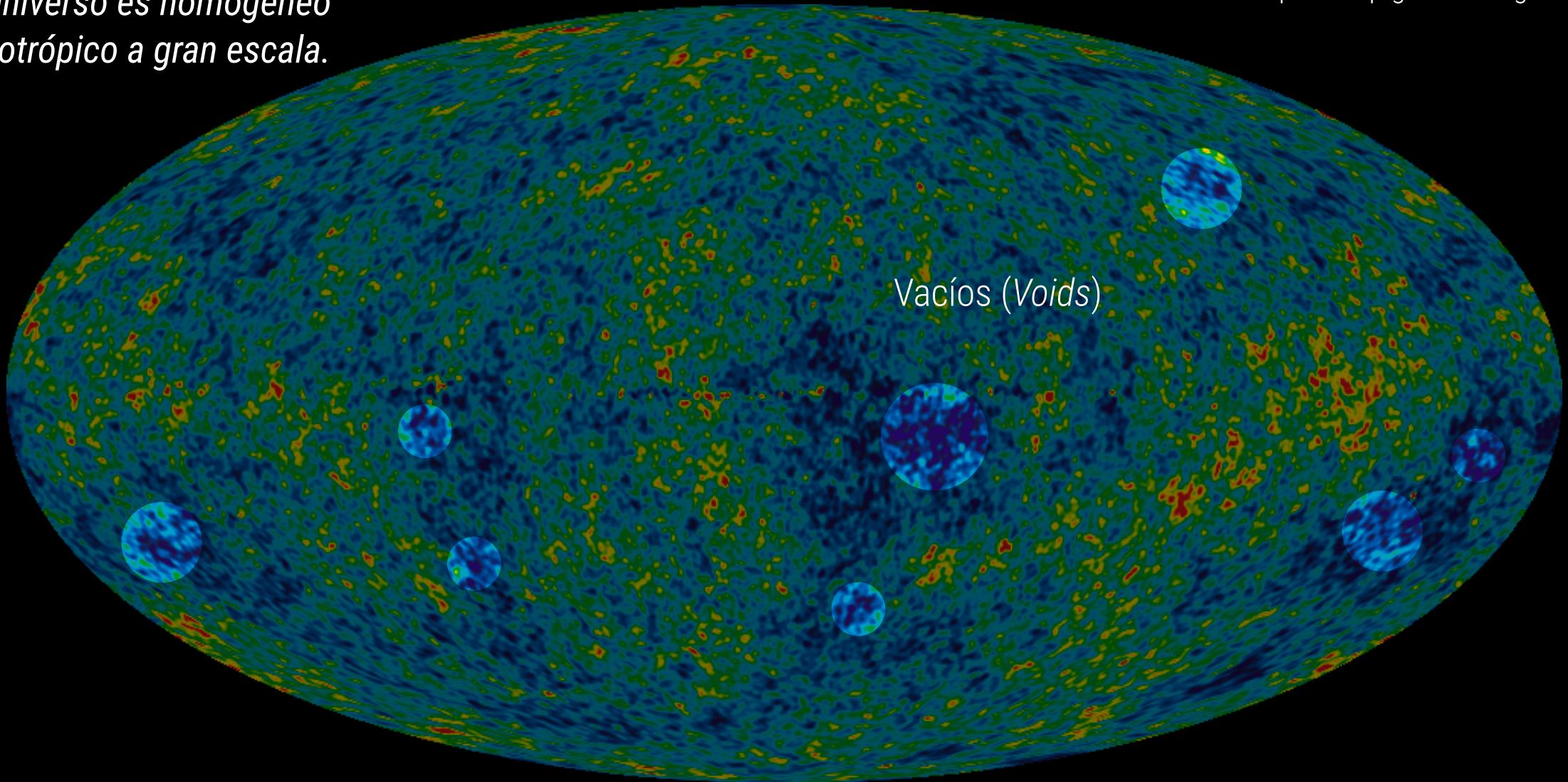
FEEDBACK ESTELAR Y EVOLUCIÓN QUÍMICA

NÚCLEOS ACTIVOS

CONDICIONES INICIALES

*El Universo es homogéneo
e isotrópico a gran escala.*

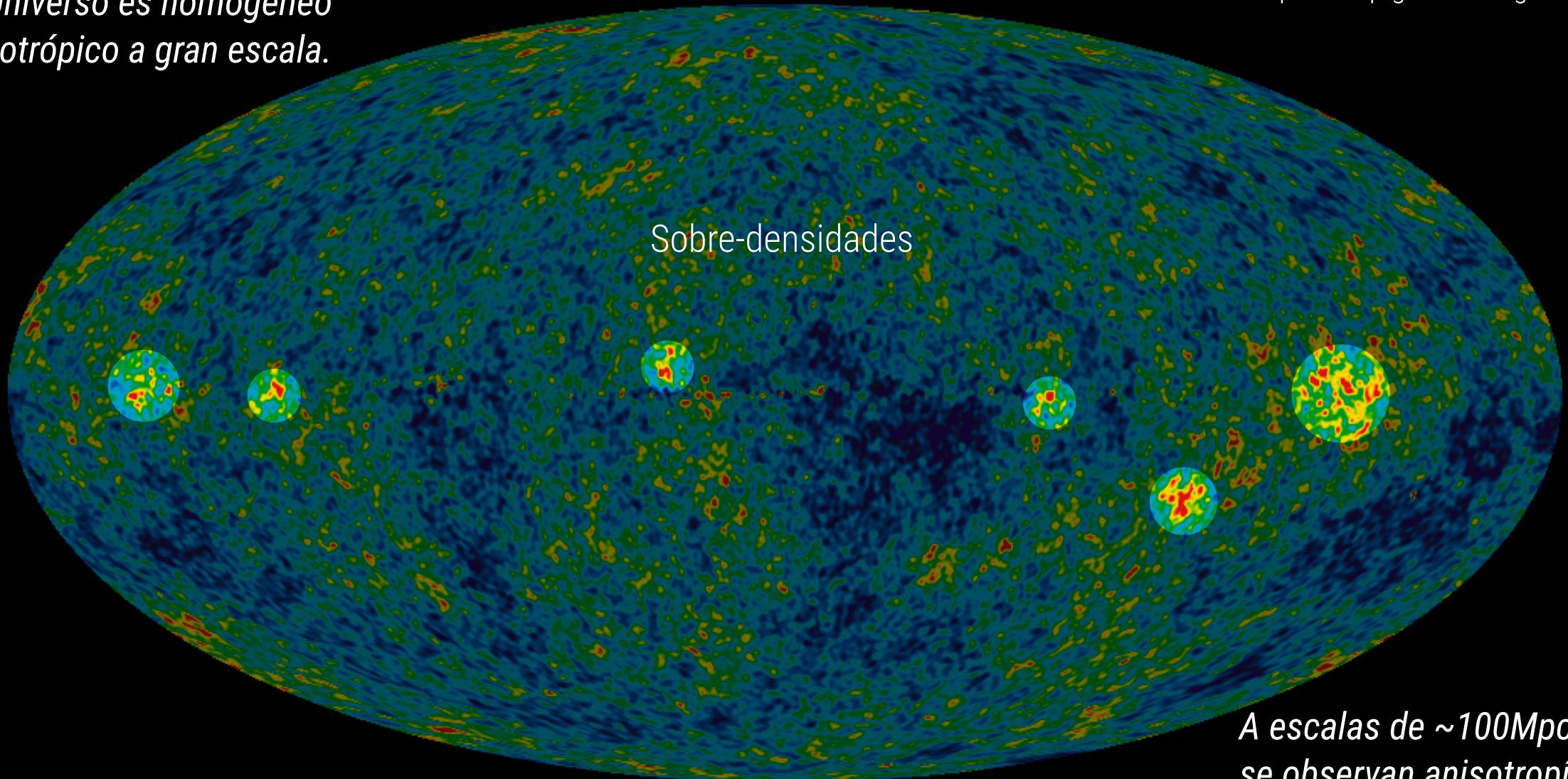
<https://map.gsfc.nasa.gov/>



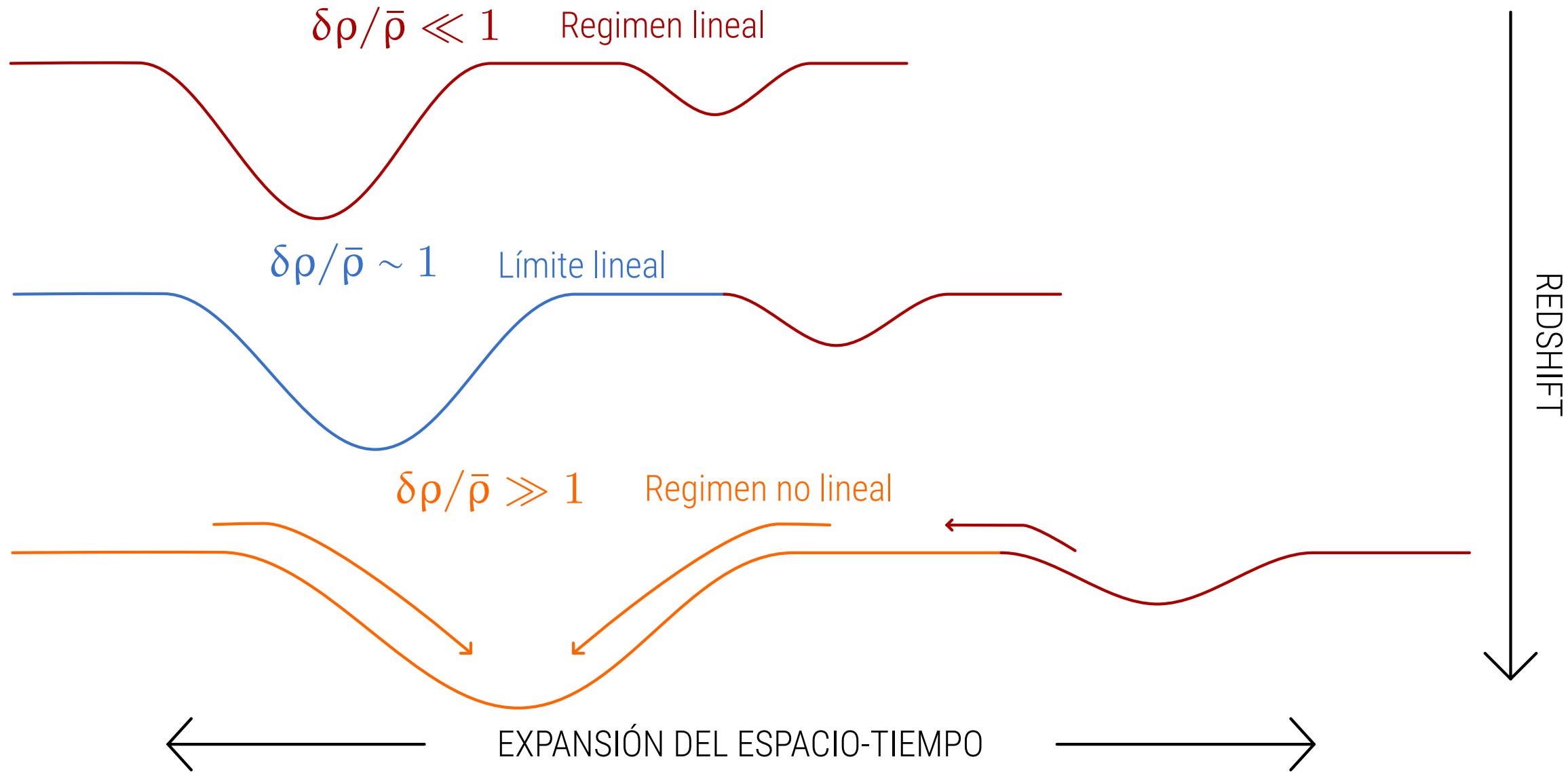
CONDICIONES INICIALES

El Universo es homogéneo e isotrópico a gran escala.

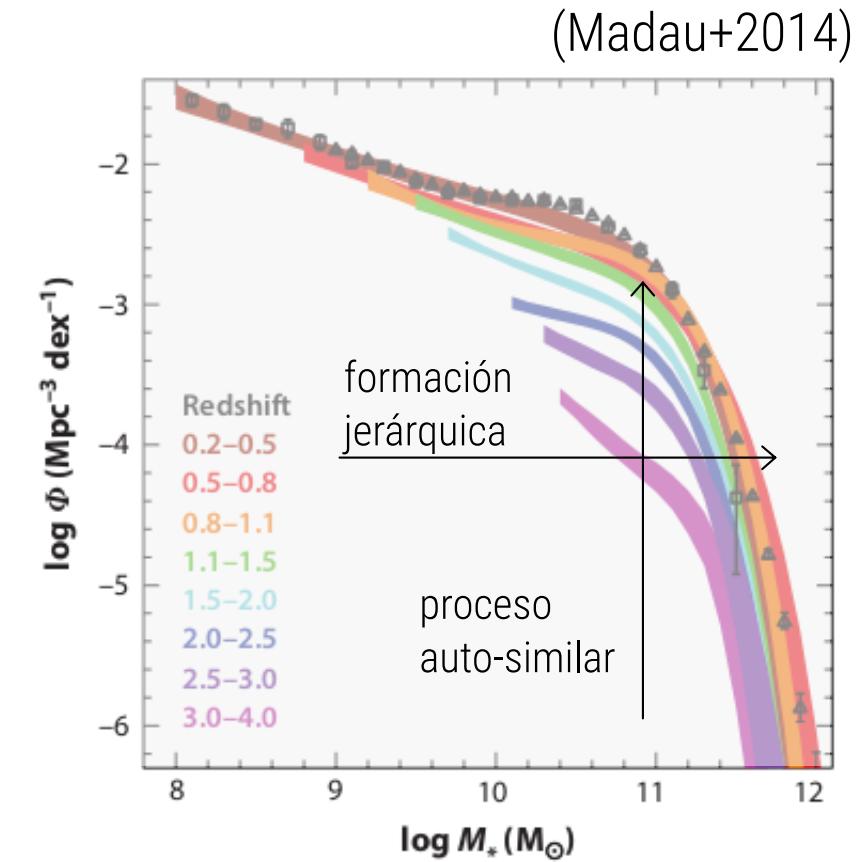
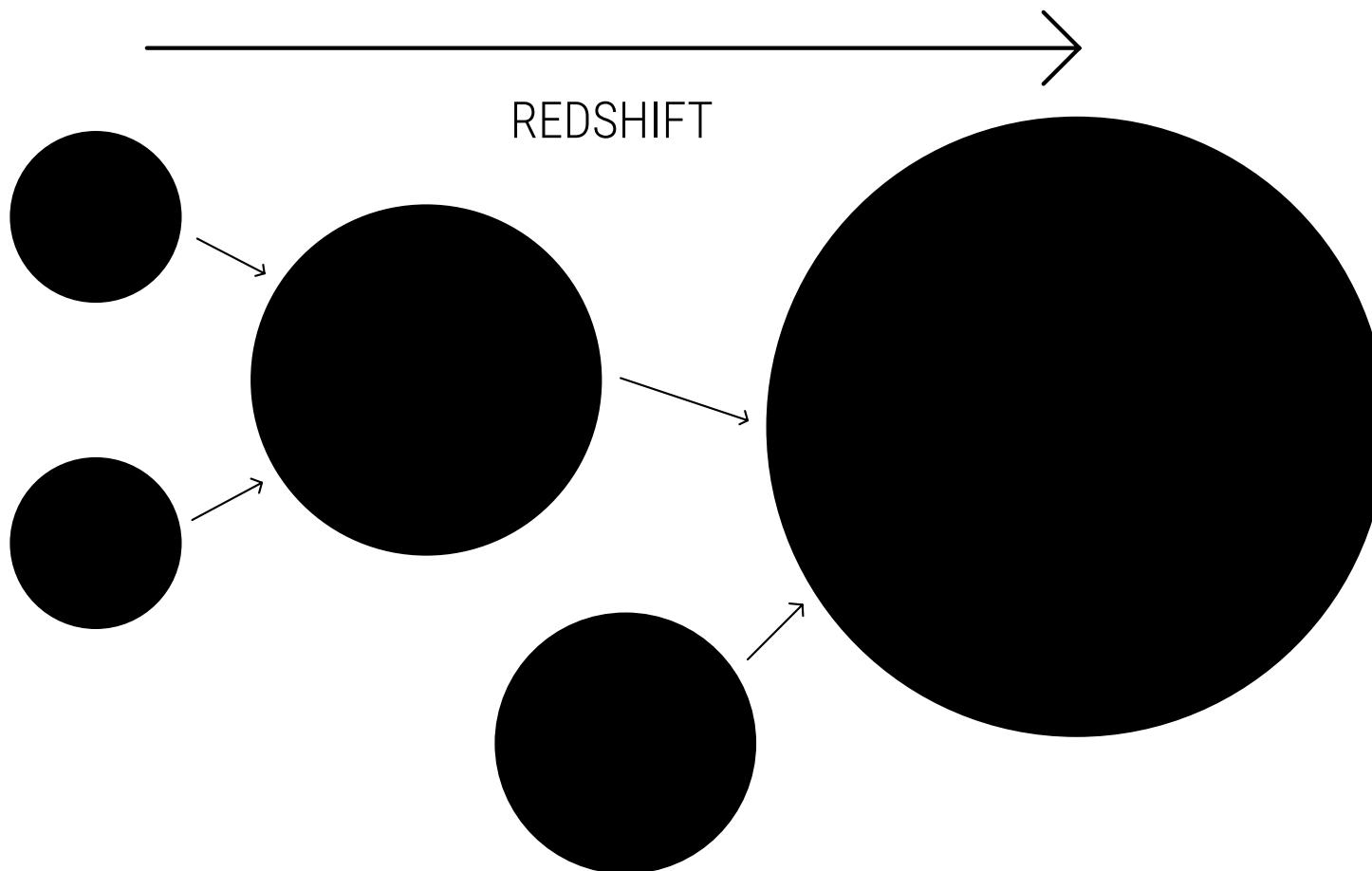
<https://map.gsfc.nasa.gov/>



FORMACIÓN DE HALOS DE MATERIA OSCURA



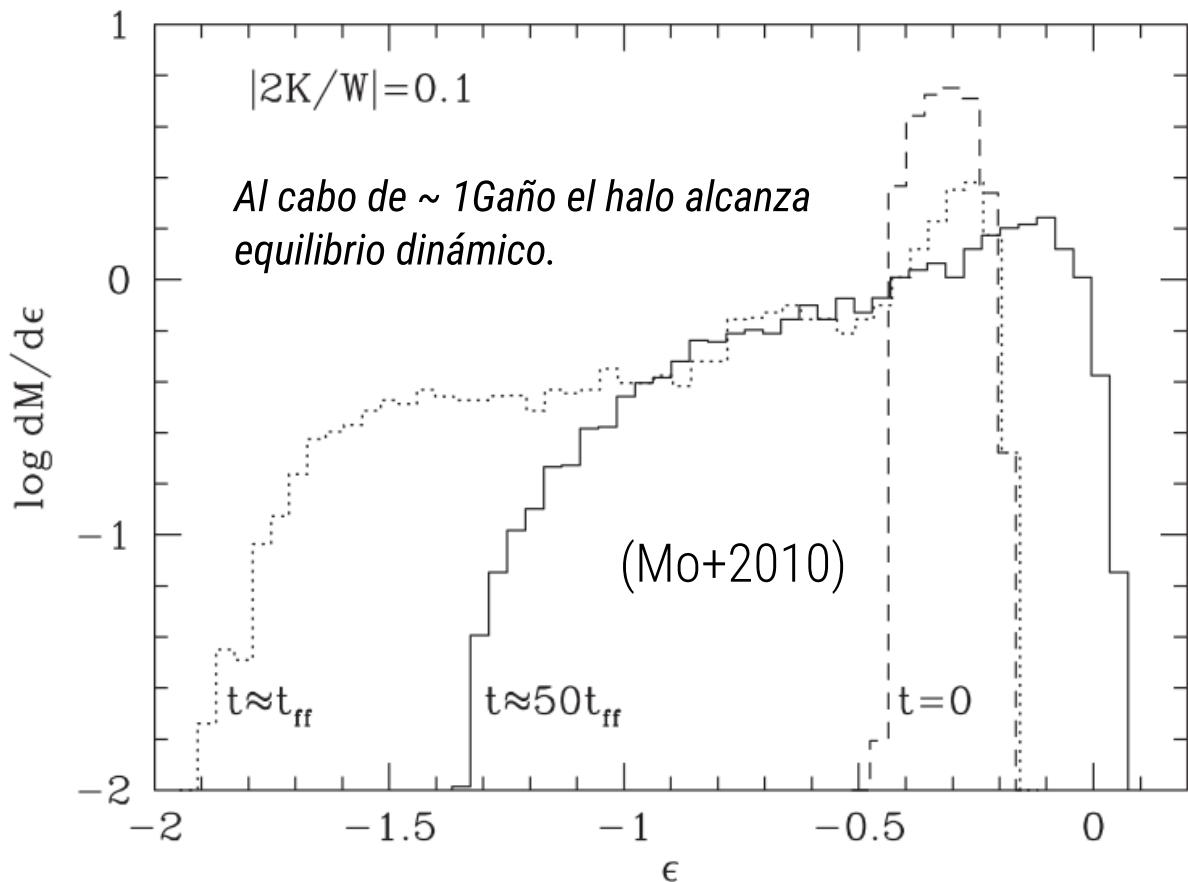
FORMACIÓN DE HALOS DE MATERIA OSCURA



De acuerdo con Press & Schechter (1974) la formación de halos de materia oscura es jerárquica y auto-similar.

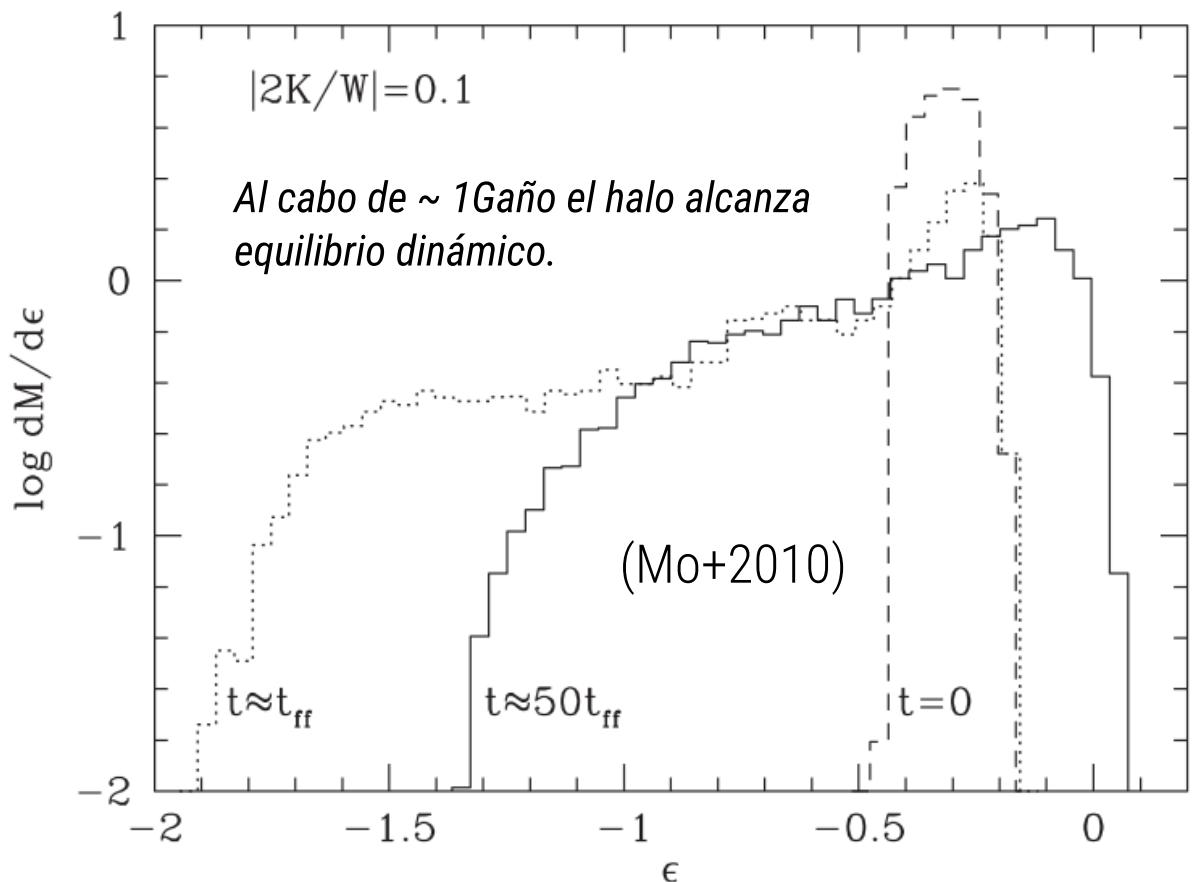
$$n(M) \propto M^{-1-\alpha} \exp \left[-\text{const} \times \left(\frac{M^{1-\alpha}}{R} \right)^2 \right]$$

FORMACIÓN DE HALOS DE MATERIA OSCURA

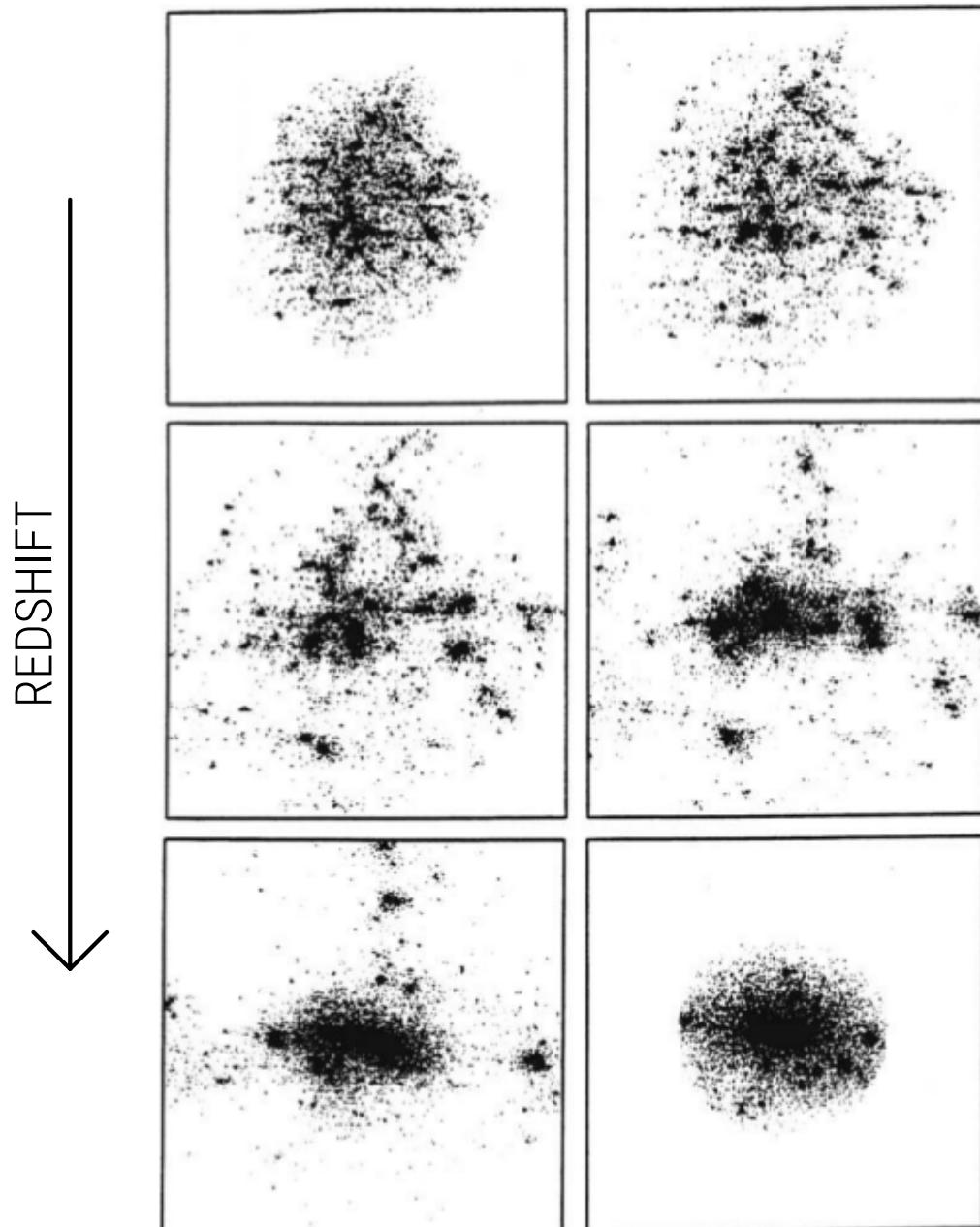


$$\tau_{\text{din}} \sim \tau_{\text{rv}} = \left\langle \frac{1}{\varepsilon^2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)^2} \right\rangle^{-1/2}$$

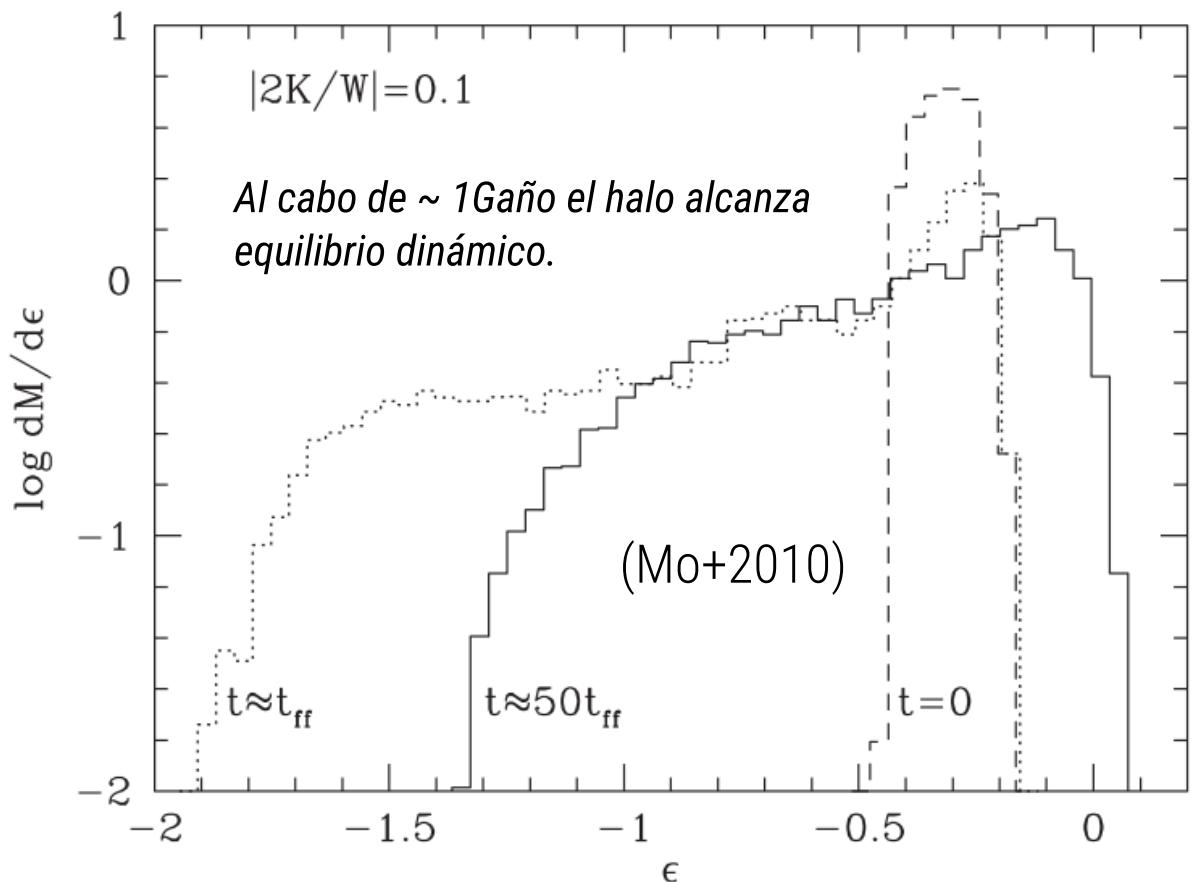
FORMACIÓN DE HALOS DE MATERIA OSCURA



$$\tau_{\text{din}} \sim \tau_{\text{rv}} = \left\langle \frac{1}{\varepsilon^2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)^2} \right\rangle^{-1/2}$$



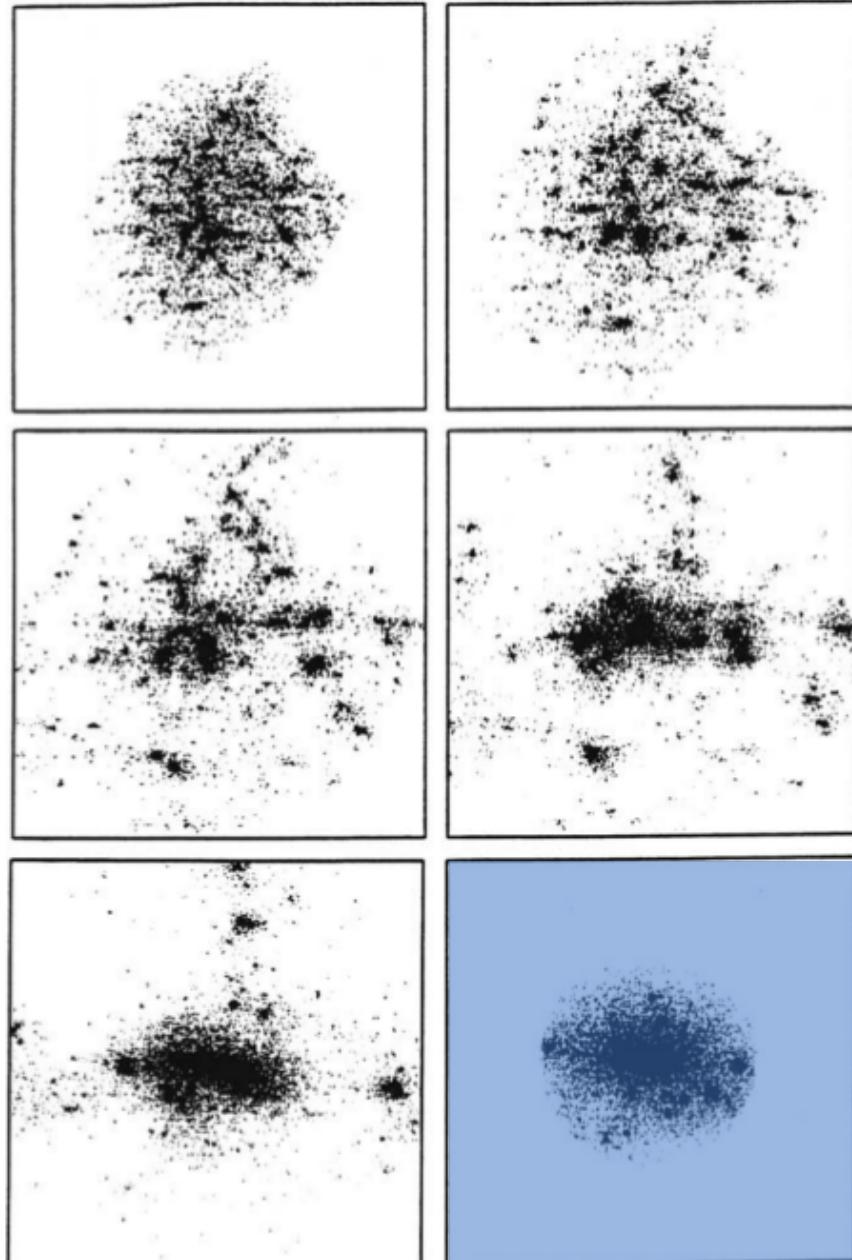
FORMACIÓN DE HALOS DE MATERIA OSCURA



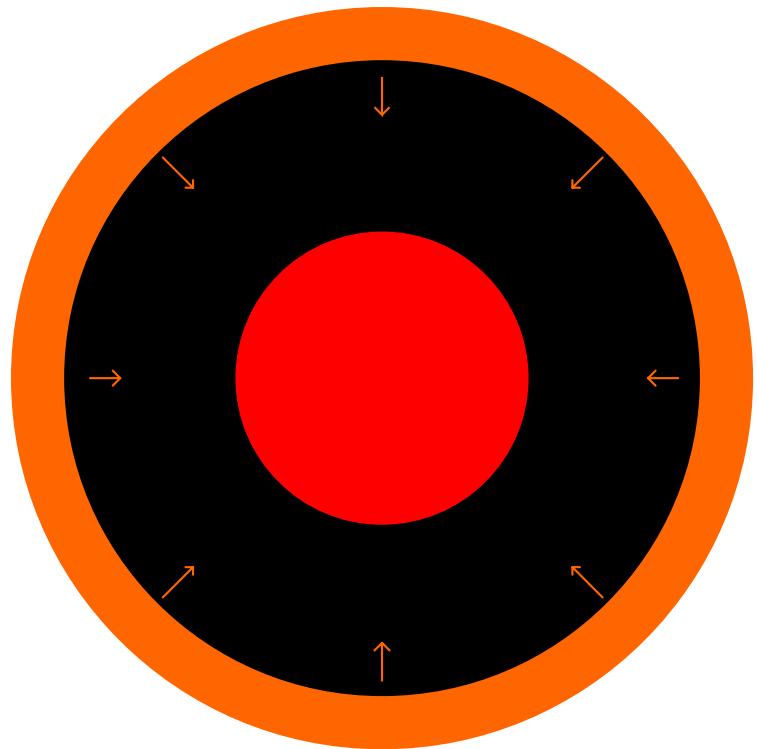
$$\tau_{\text{din}} \sim \tau_{\text{rv}} = \left\langle \frac{1}{\varepsilon^2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)^2} \right\rangle^{-1/2}$$

El halo relajado
es rico es
subestructuras

REDSHIFT



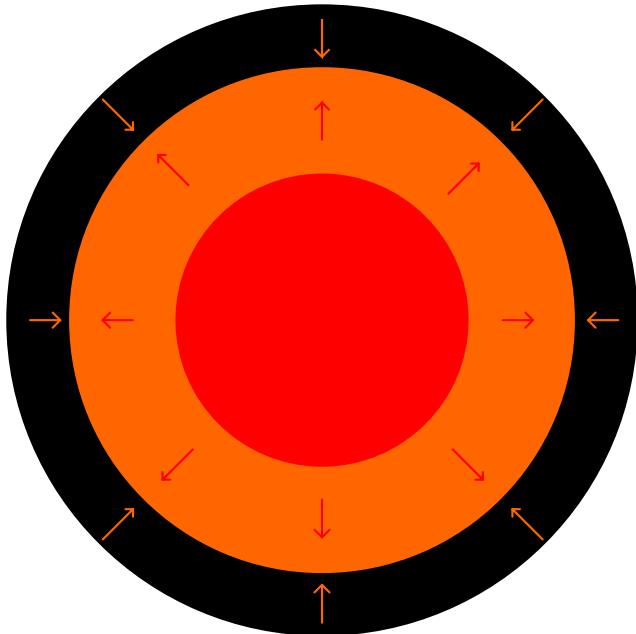
ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO



Gas virializado

Acreción del MIG

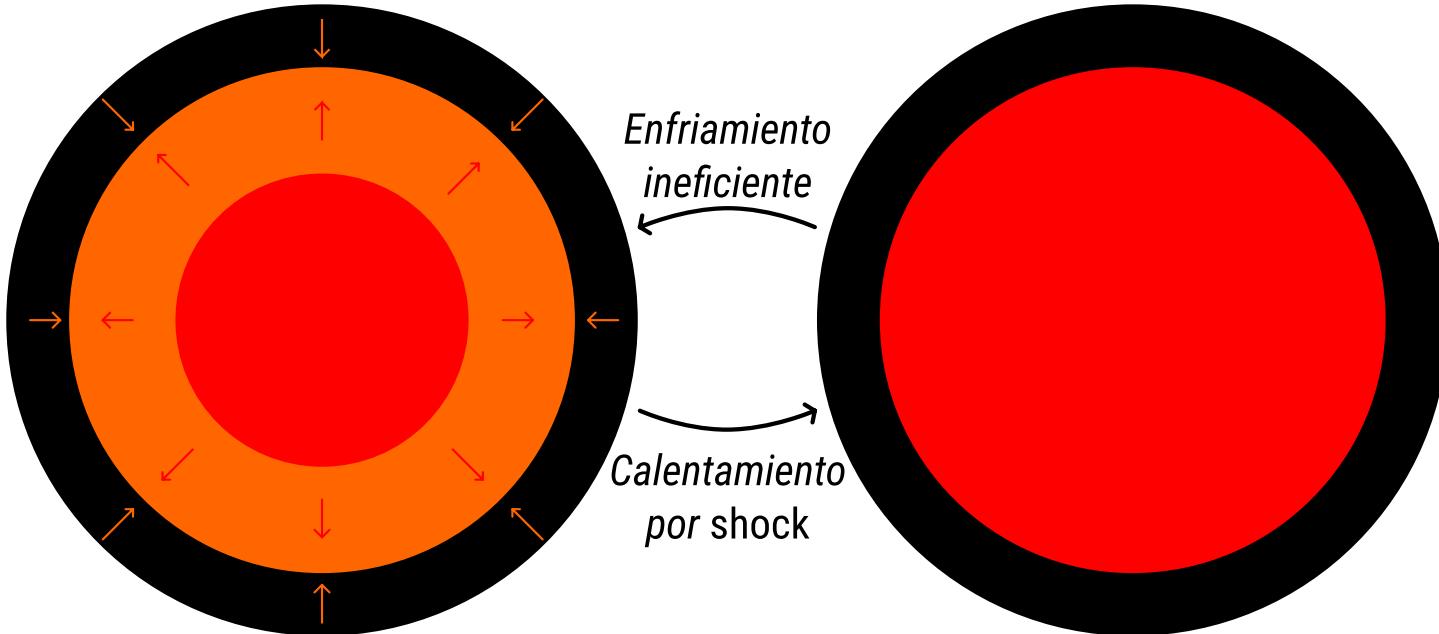
ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO



Frente de choque

Gas supersónico

ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO



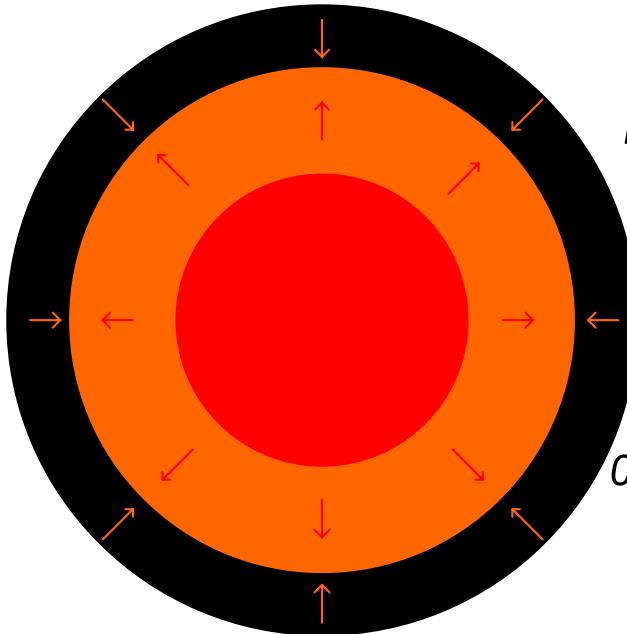
Frente de choque

Gas supersónico

Gas virializado

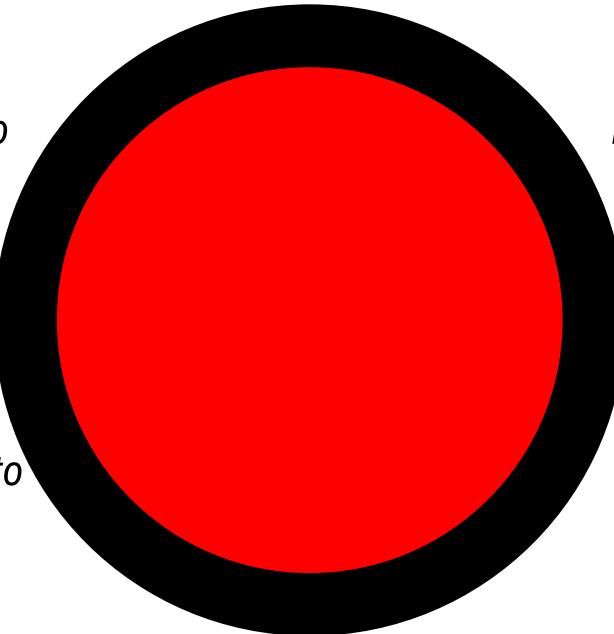
¿Acreción frenada?

ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO



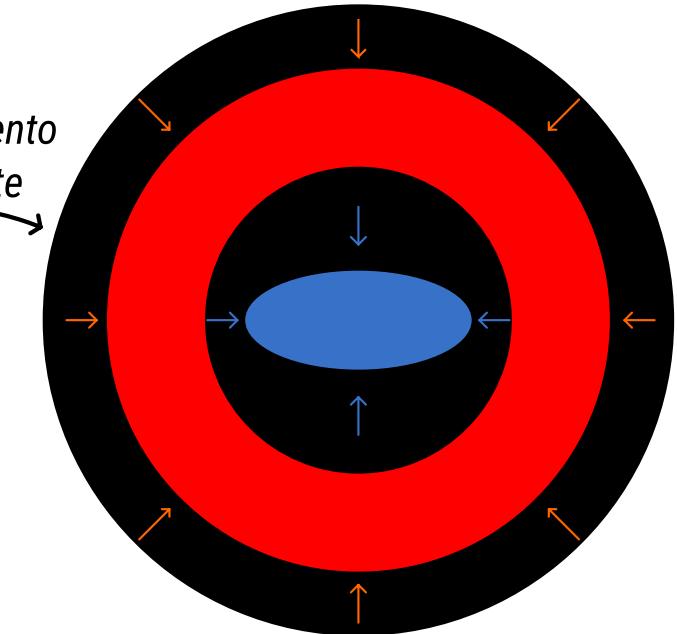
Gas virializado

Gas supersónico



Gas virializado

¿Acreción frenada?



Gas virializado

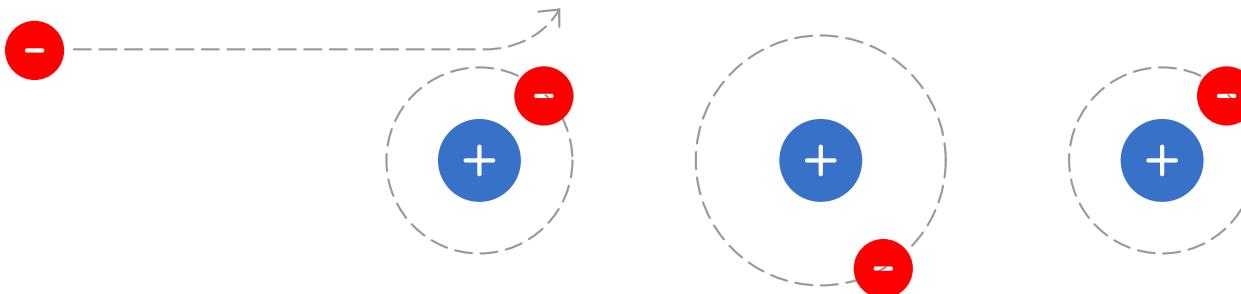
Disco de gas frío

ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO

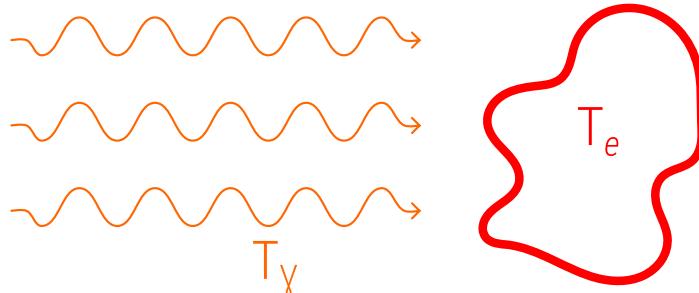
BREMSSTRAHLUNG: $T_{\text{vir}} > 10^7 \text{ K}$



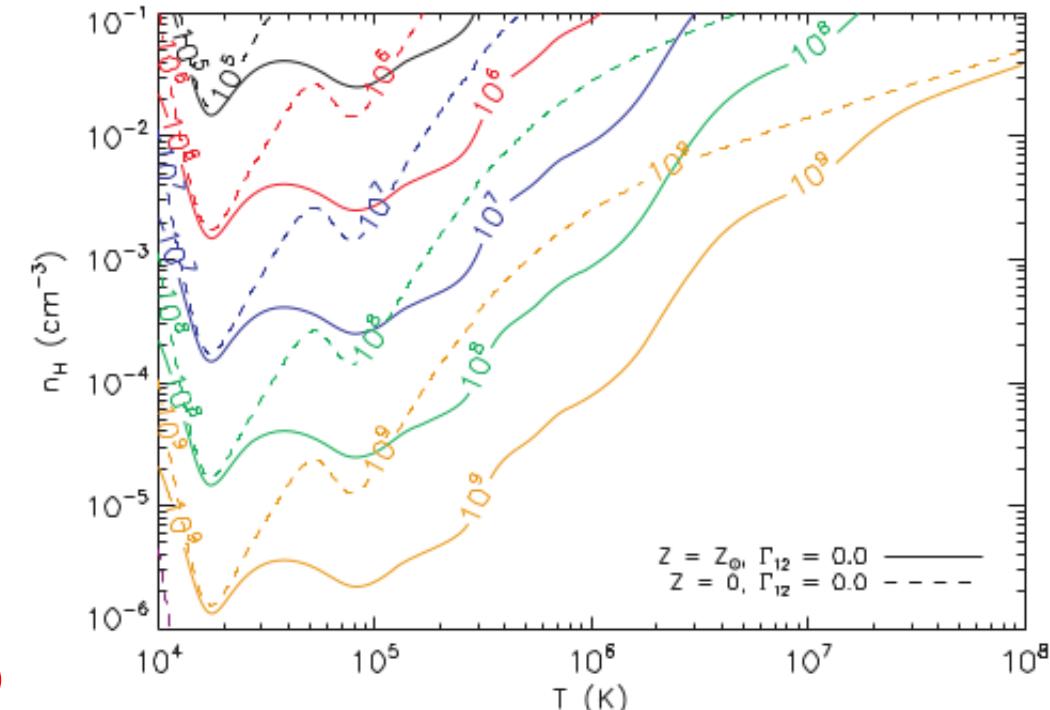
RECOMBINACIÓN: $10^4 < T_{\text{vir}} < 10^6 \text{ K}$



DISPERSIÓN COMPTON INVERSA: $z > 6, T_e \gg T_\gamma$



$$\frac{\tau_{\text{compton}}}{\tau_{\text{universo}}} \approx 350 \Omega_0^{1/2} h (1+z)^{-5/2}$$



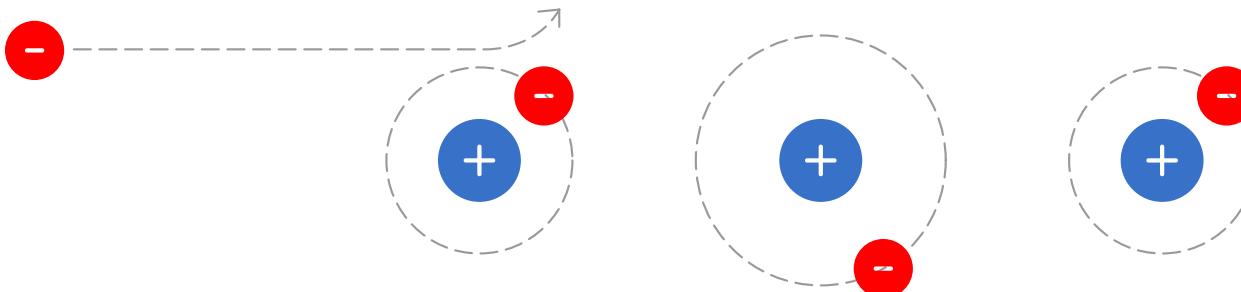
(Wiersma+2009)

ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO

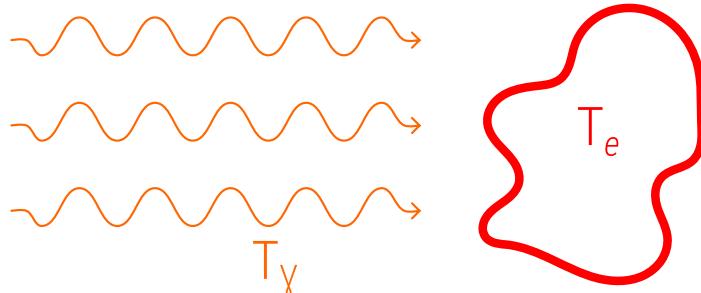
BREMSSTRAHLUNG: $T_{\text{vir}} > 10^7 \text{ K}$



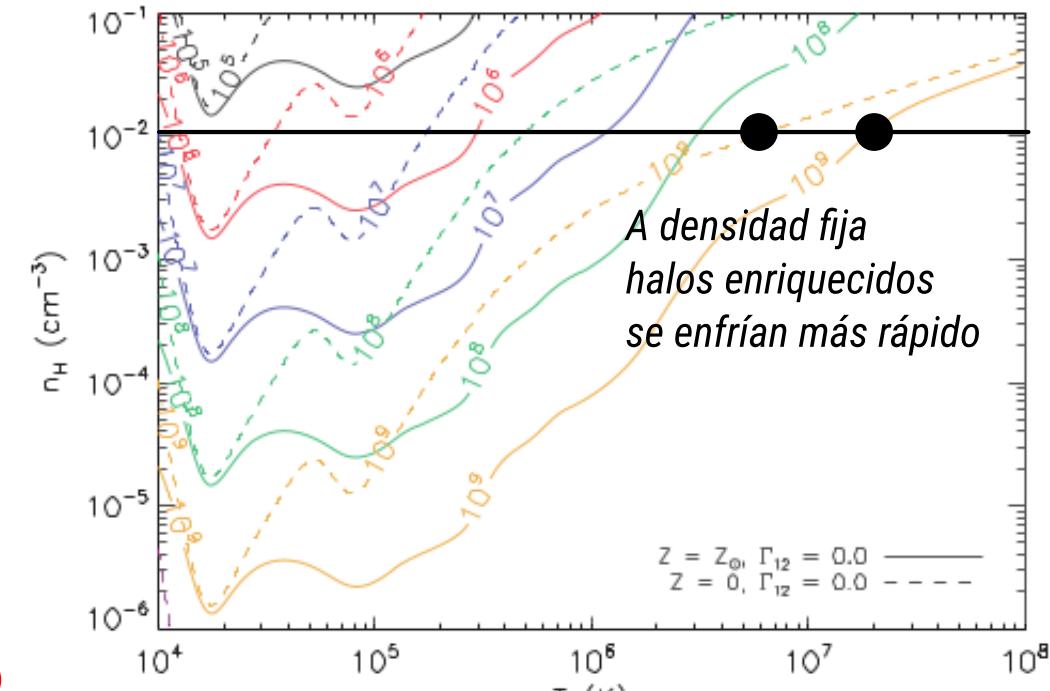
RECOMBINACIÓN: $10^4 < T_{\text{vir}} < 10^6 \text{ K}$



DISPERSIÓN COMPTON INVERSA: $z > 6, T_e \gg T_\gamma$



$$\frac{\tau_{\text{compton}}}{\tau_{\text{universo}}} \approx 350 \Omega_0^{1/2} h (1+z)^{-5/2}$$

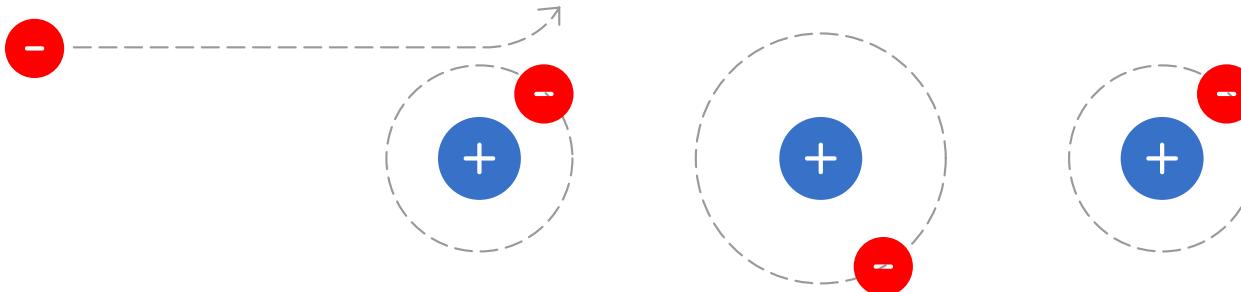


ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO

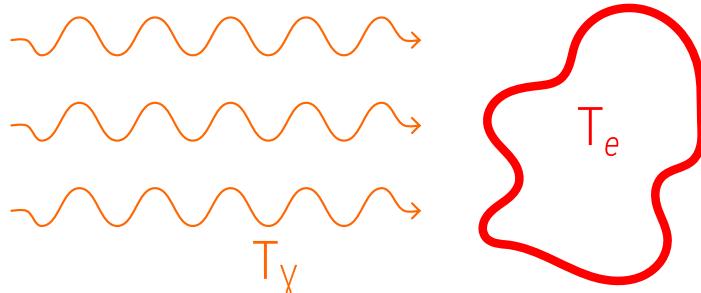
BREMSSTRAHLUNG: $T_{\text{vir}} > 10^7 \text{ K}$



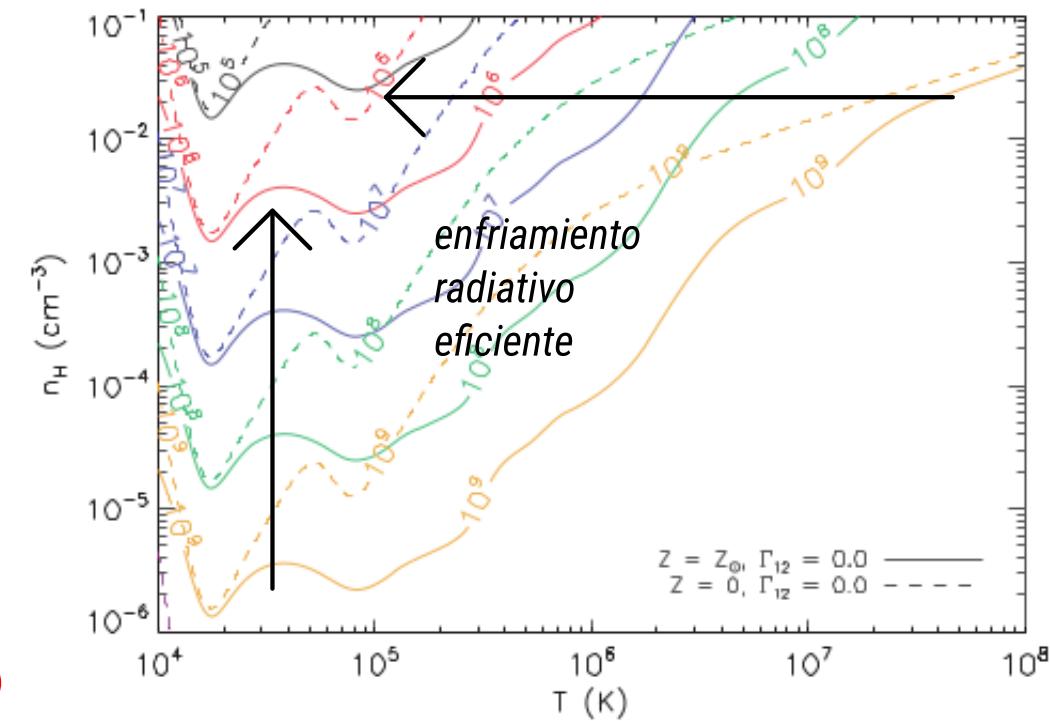
RECOMBINACIÓN: $10^4 < T_{\text{vir}} < 10^6 \text{ K}$



DISPERSIÓN COMPTON INVERSA: $z > 6, T_e \gg T_\gamma$



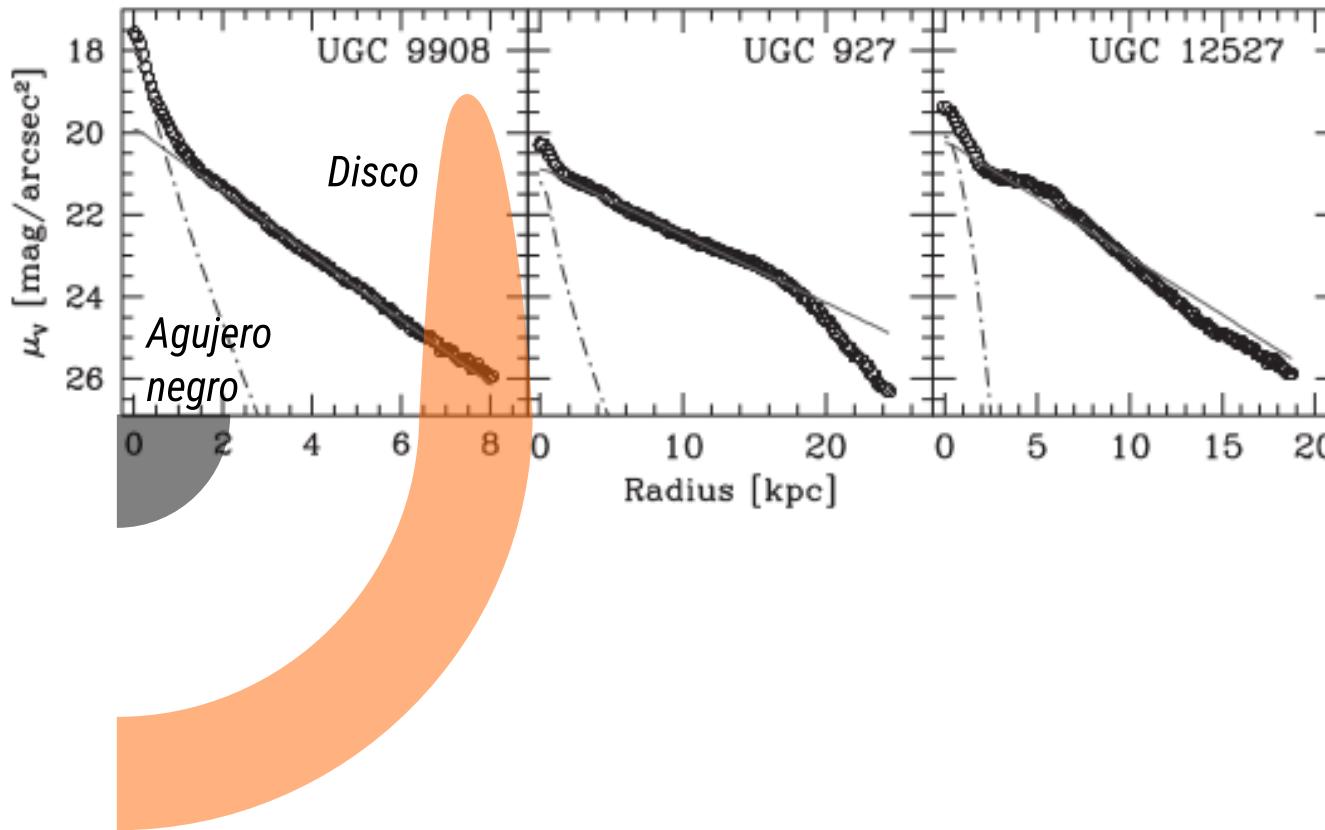
$$\frac{\tau_{\text{compton}}}{\tau_{\text{universo}}} \approx 350 \Omega_0^{1/2} h (1+z)^{-5/2}$$



(Wiersma+2009)

ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO

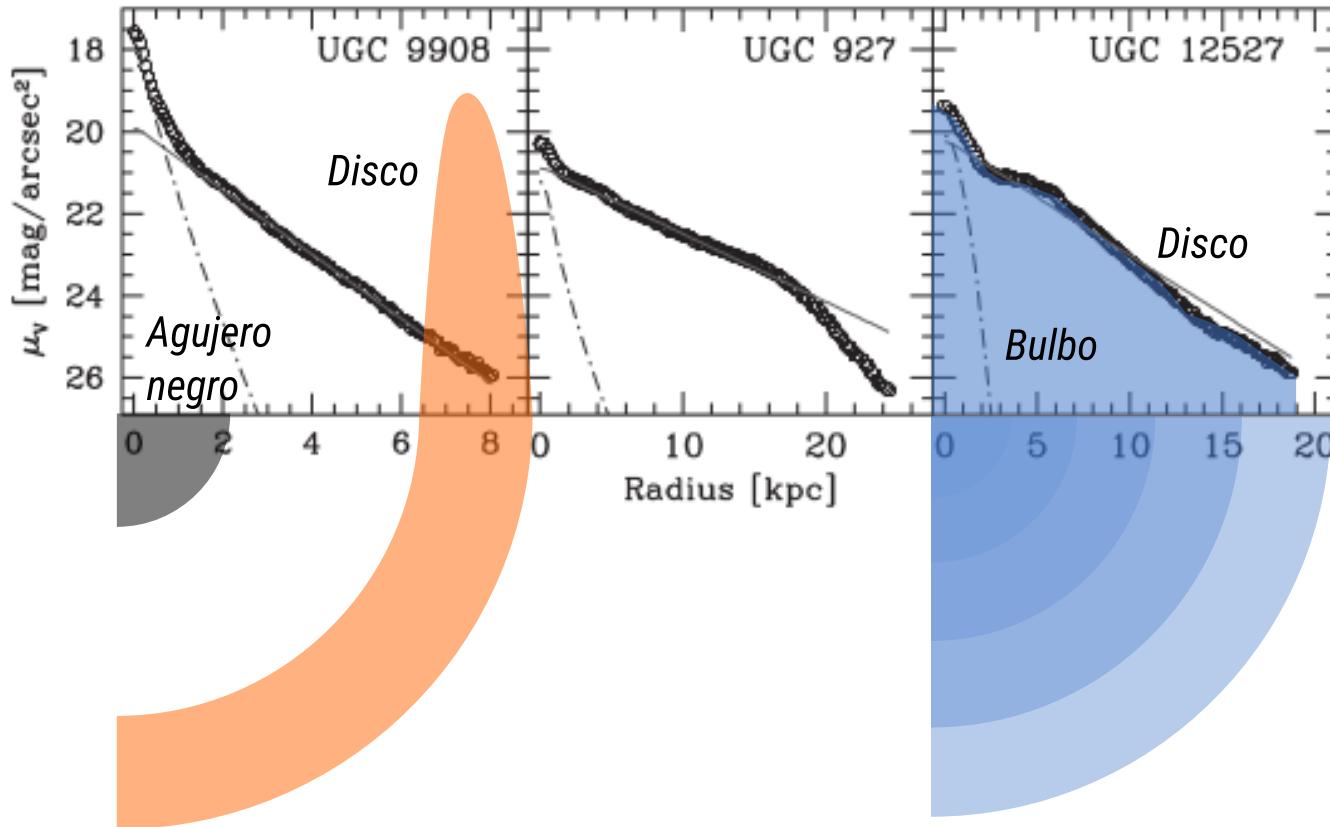
(MacArthur+2003)



En ausencia del halo
de materia oscura

ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO

(MacArthur+2003)

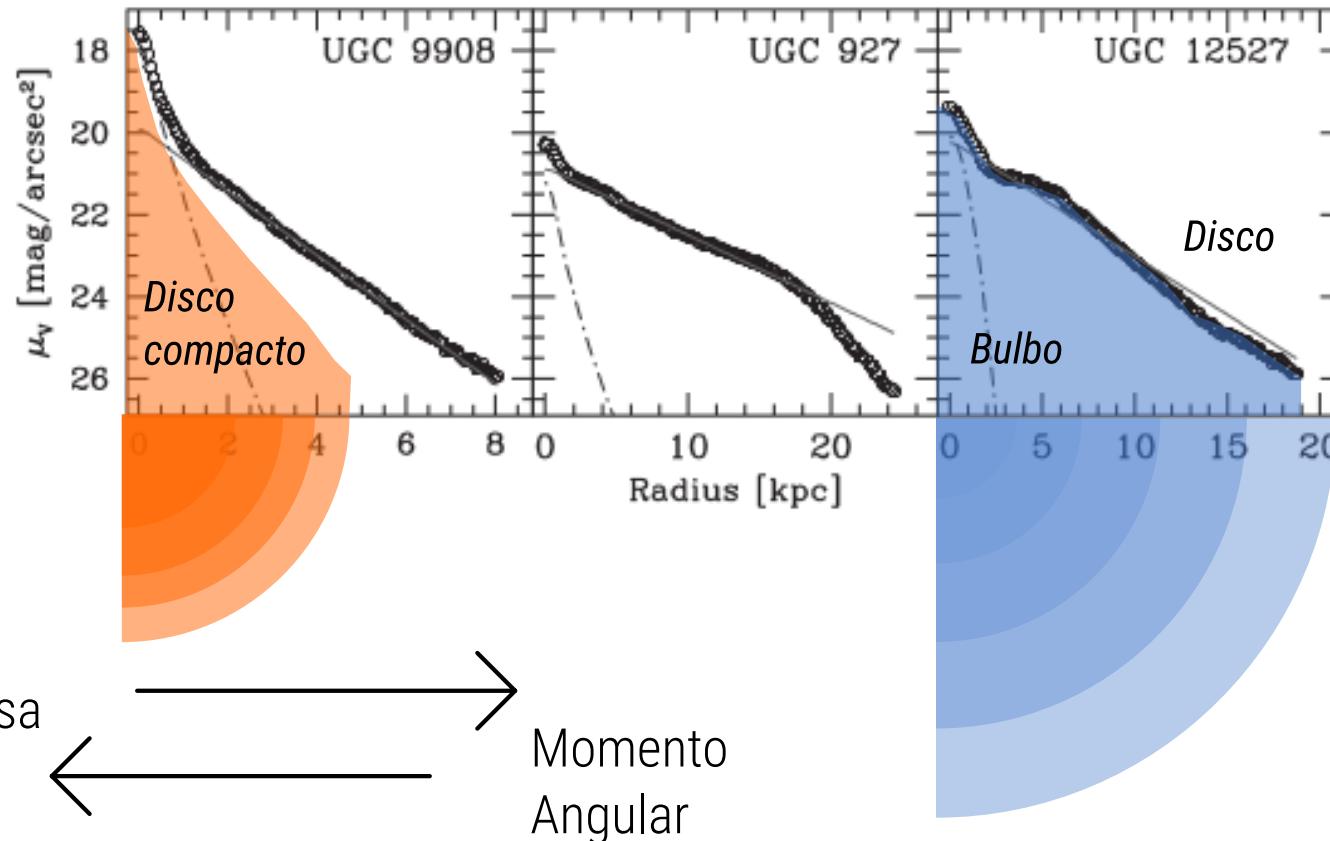


En ausencia del halo
de materia oscura

En presencia del halo
de materia oscura

ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO

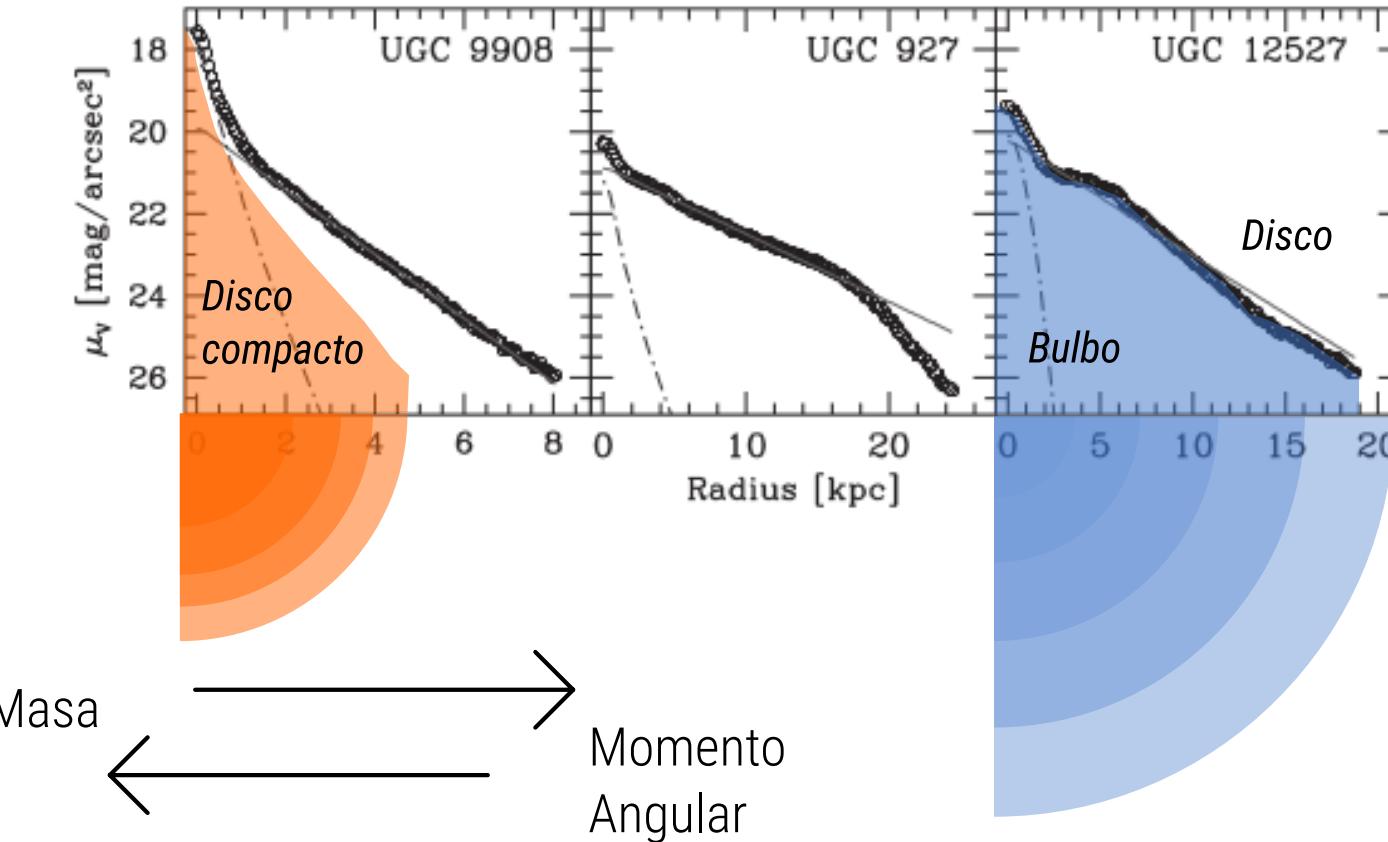
(MacArthur+2003)



*Este problema es conocido como
la catástrofe del momento angular*

ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO

(MacArthur+2003)



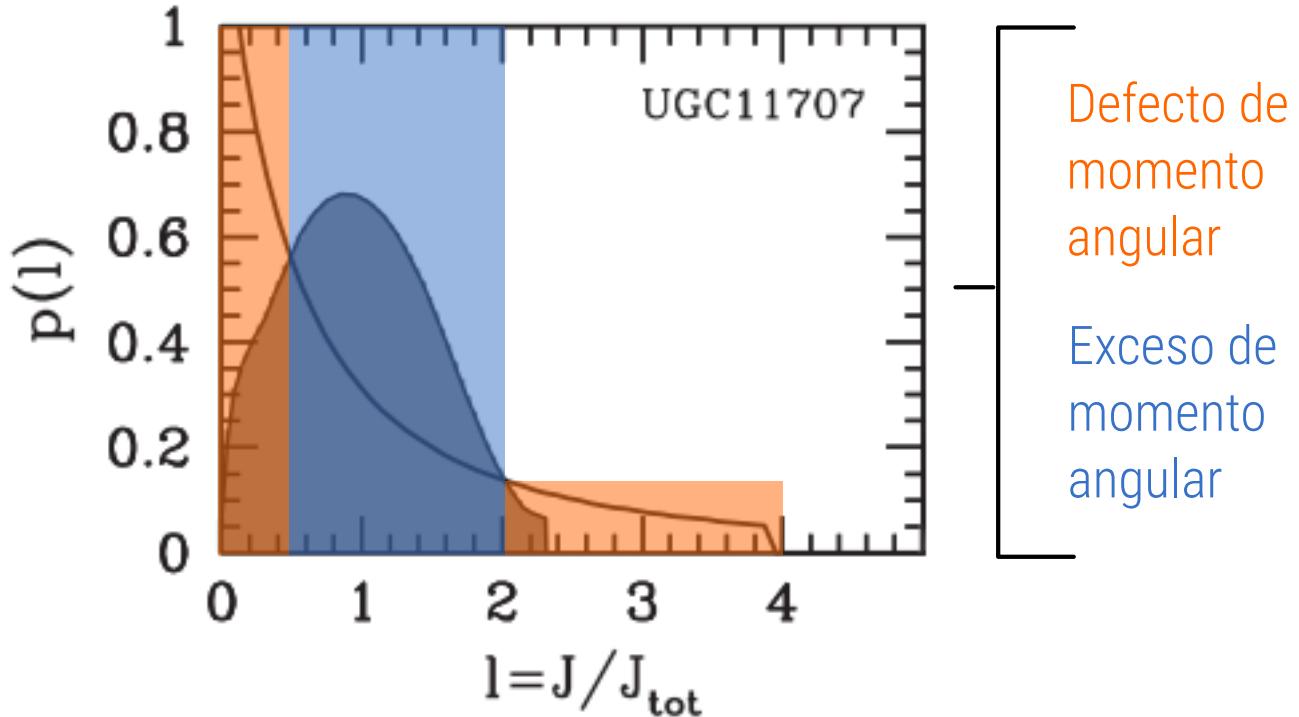
La configuración de
mínima energía no
se corresponde con
las observaciones.

$$\Sigma(R) = \Sigma_0 \exp(-R/R_0)$$

*Este problema es conocido como
la catástrofe del momento angular*

ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO

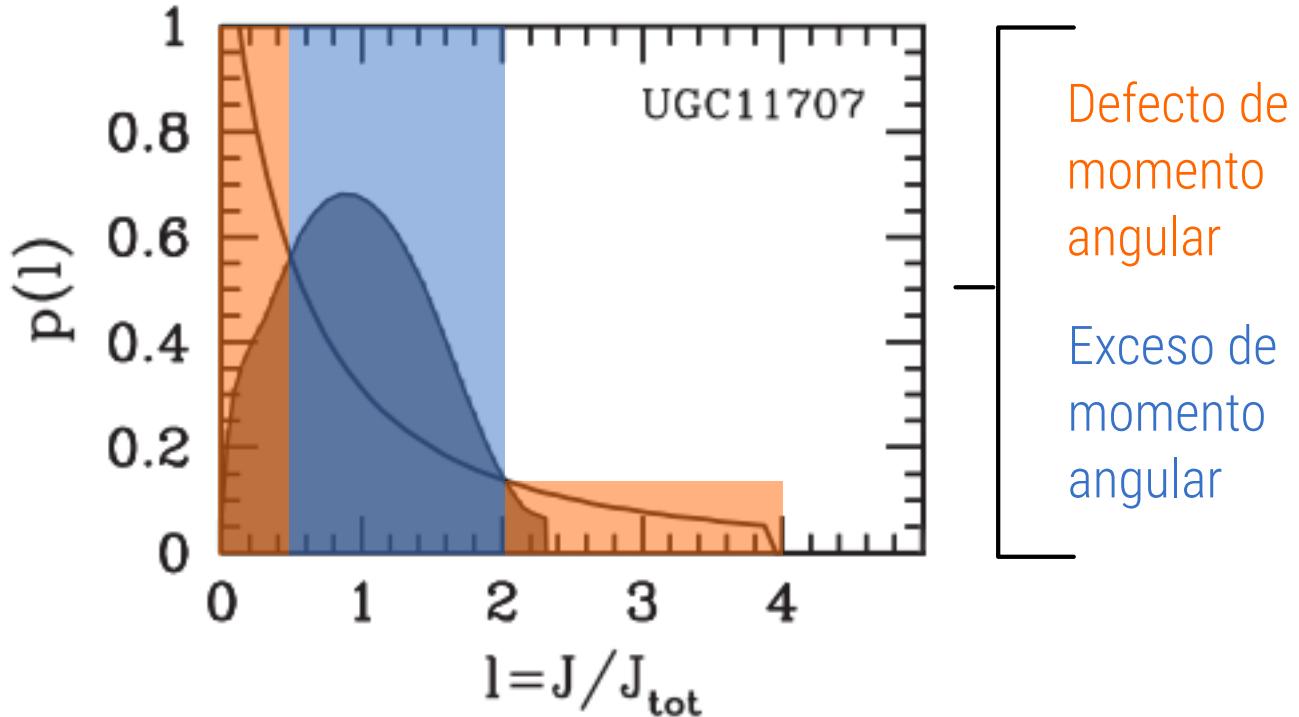
(van den Bosch+2001)



- Defecto de momento angular
- Exceso de momento angular

ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO

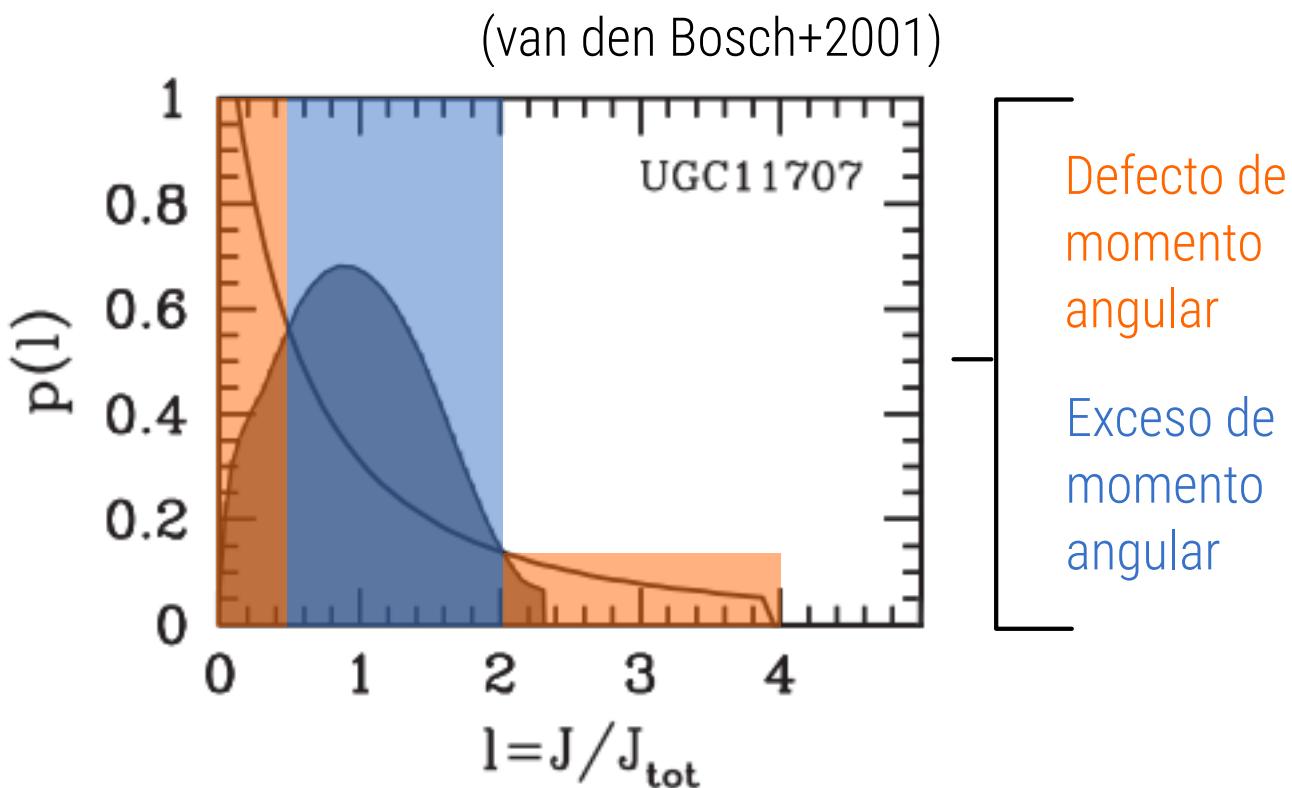
(van den Bosch+2001)



Tenemos dos problemas con los discos:

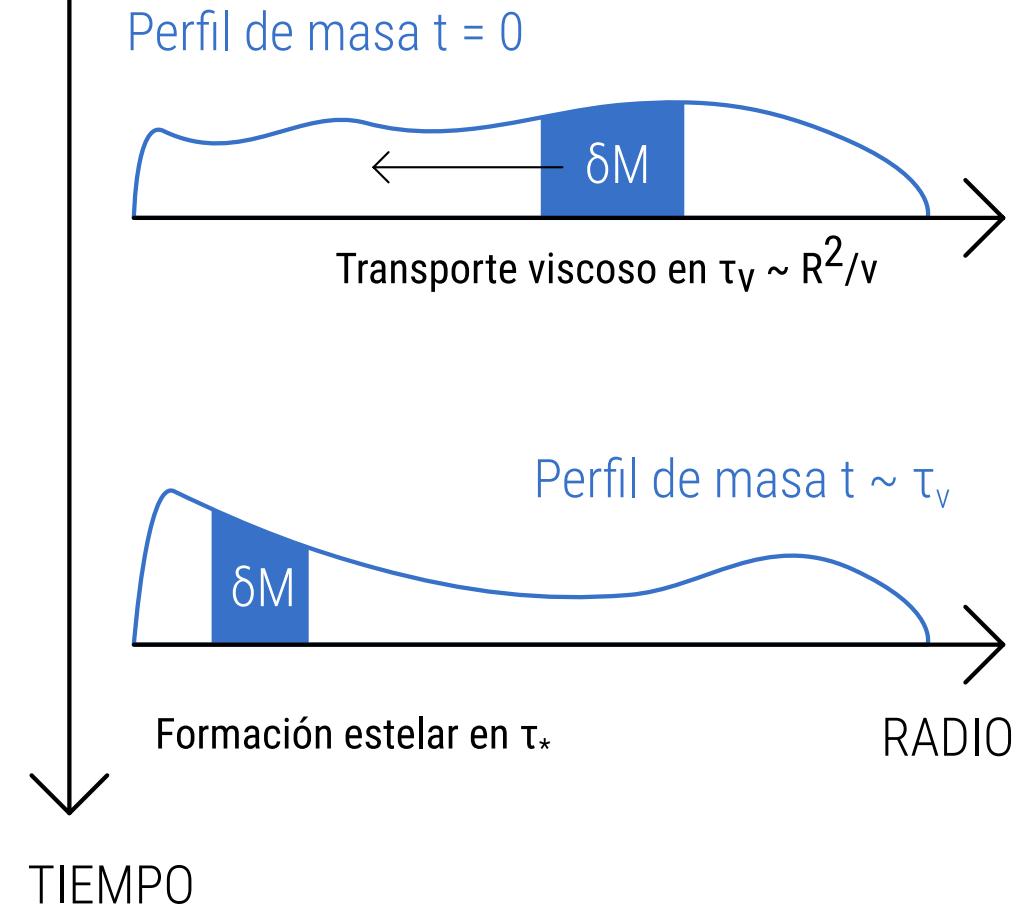
- 1) Son muy compactos
- 2) No tienen la misma distribución de momento angular que el halo.

ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO



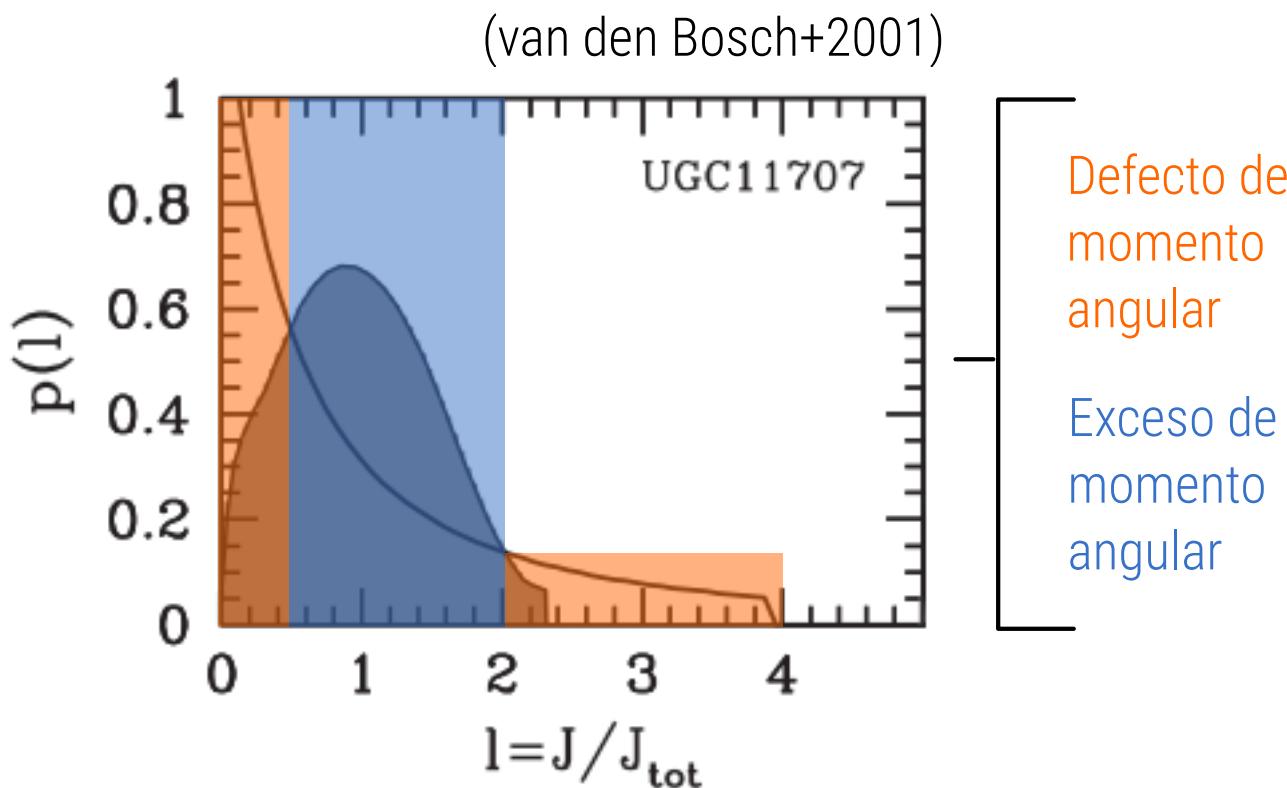
Tenemos dos problemas con los discos:

- 1) Son muy compactos
- 2) No tienen la misma distribución de momento angular que el halo.



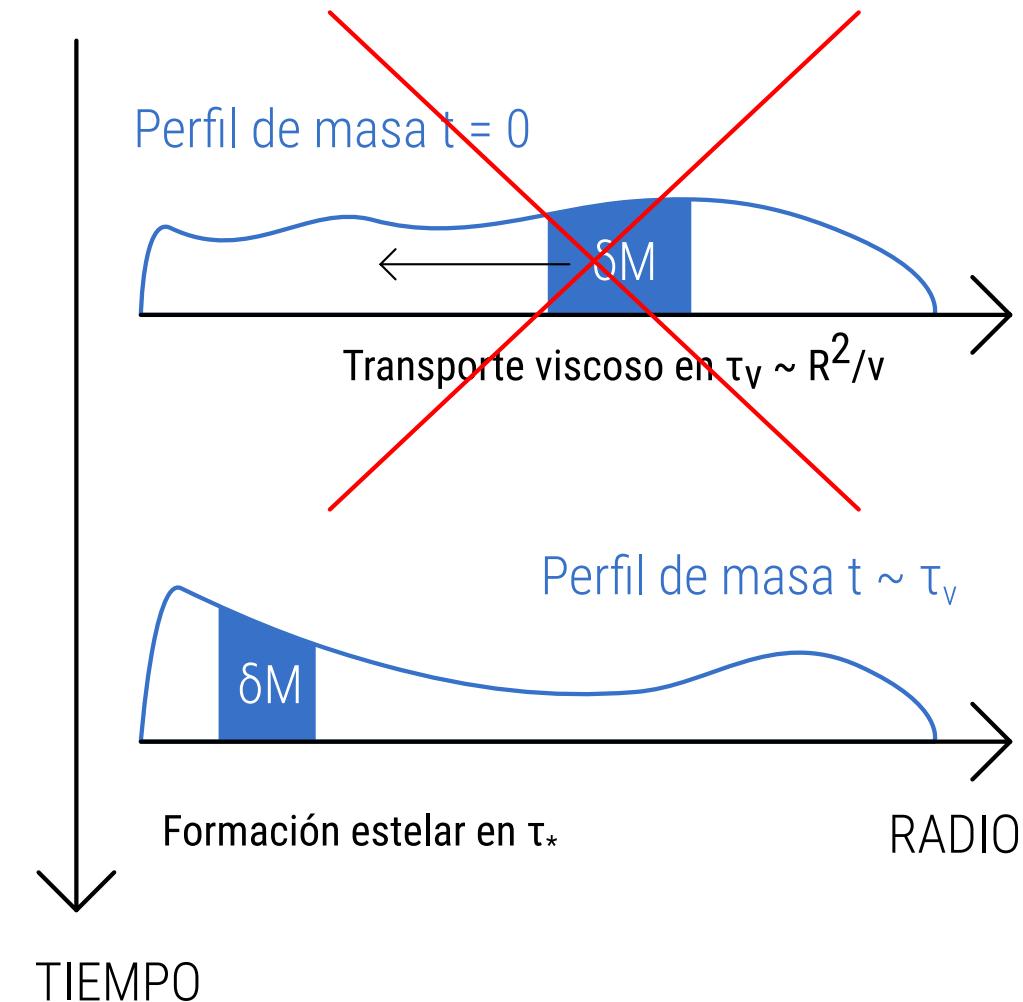
Si $\tau_v \sim \tau_*$, el perfil final será exponencial (Lin & Pringle 1987)

ENFRIAMIENTO DEL GAS BARIÓNICO



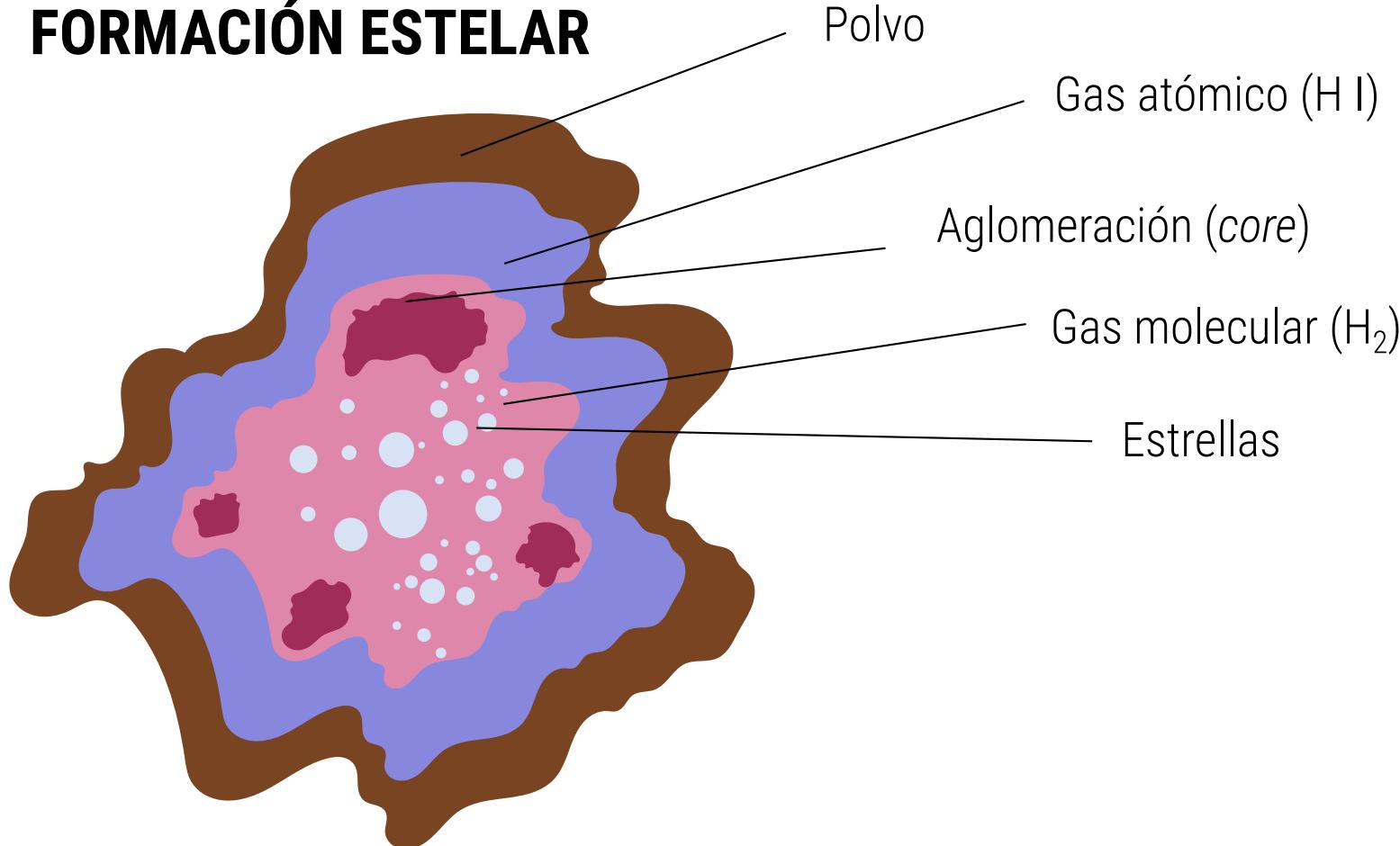
Tenemos dos problemas con los discos:

- 1) Son muy compactos
- 2) No tienen la misma distribución de momento angular que el halo.

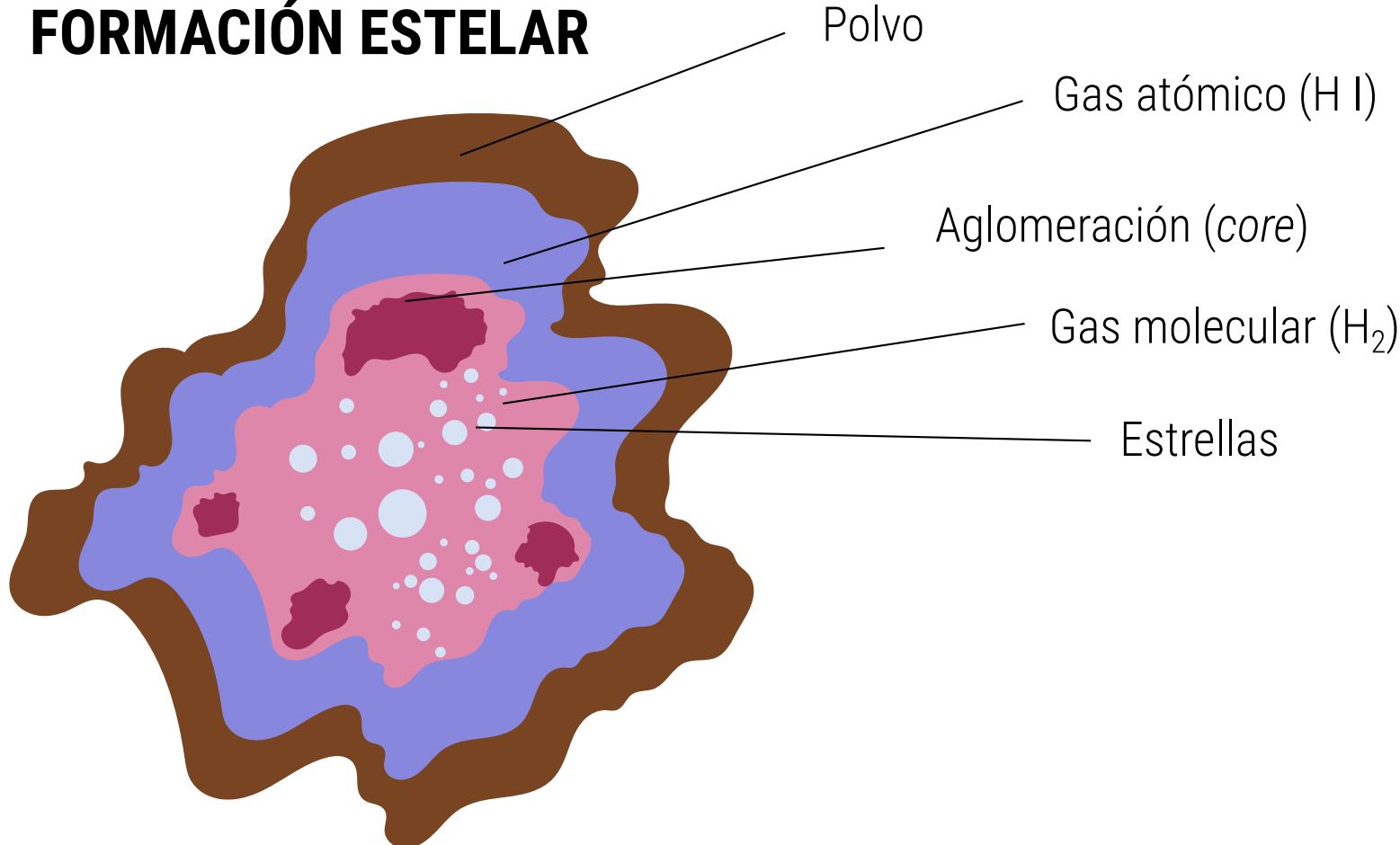


Si $\tau_v \sim \tau_*$, el perfil final será exponencial (Lin & Pringle 1987)

FORMACIÓN ESTELAR



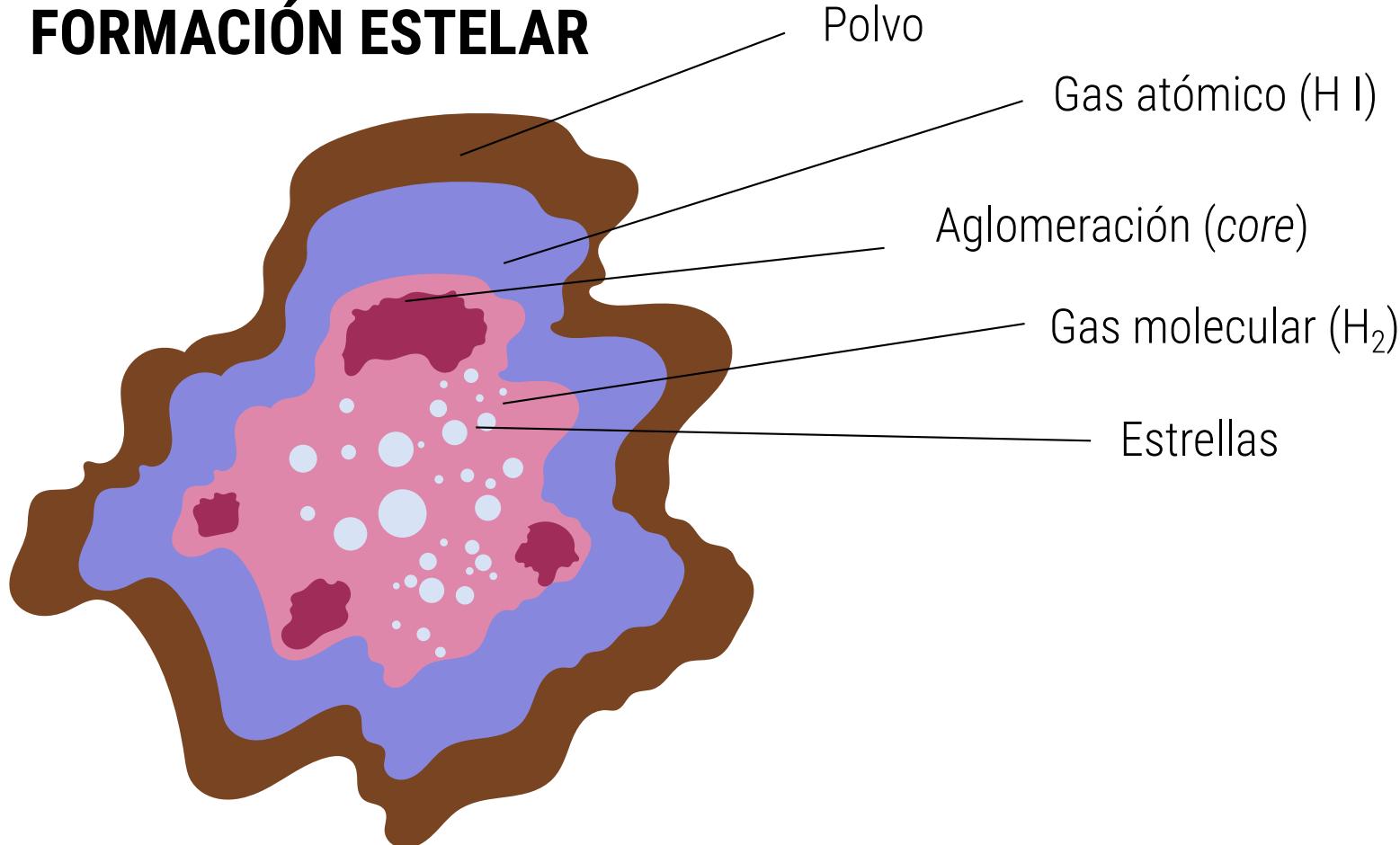
FORMACIÓN ESTELAR



En ausencia de presión, la TFE en una nube molecular típica ocurriría en una escala de:

$$\tau_{\text{cl}} \sim 4 \times 10^6 \text{ años}$$

FORMACIÓN ESTELAR



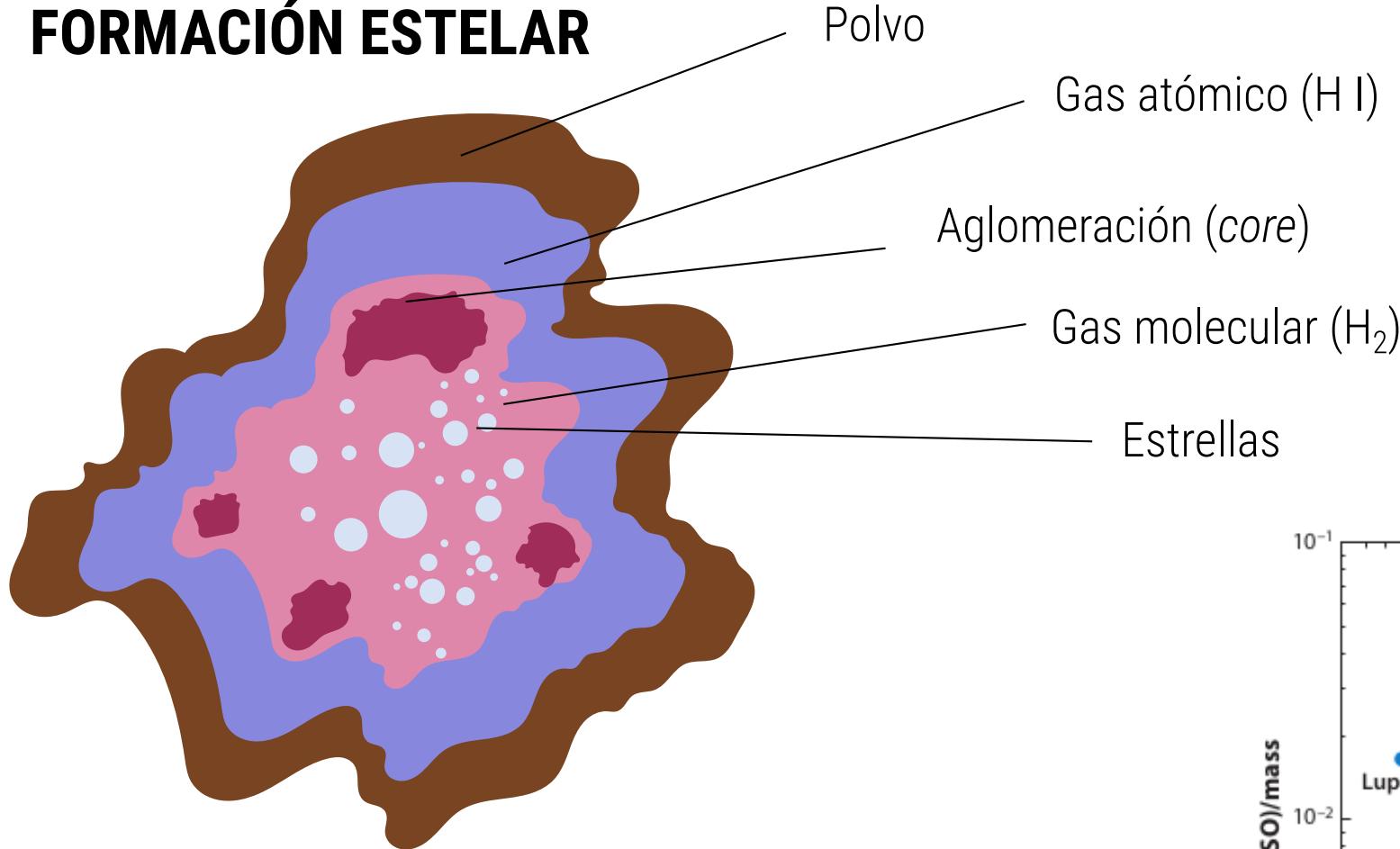
En ausencia de presión, la TFE en una nube molecular típica ocurriría en una escala de:

$$\tau_{\text{cl}} \sim 4 \times 10^6 \text{ años}$$

La escala temporal de formación de H₂, también regula la eficiencia de la TFE

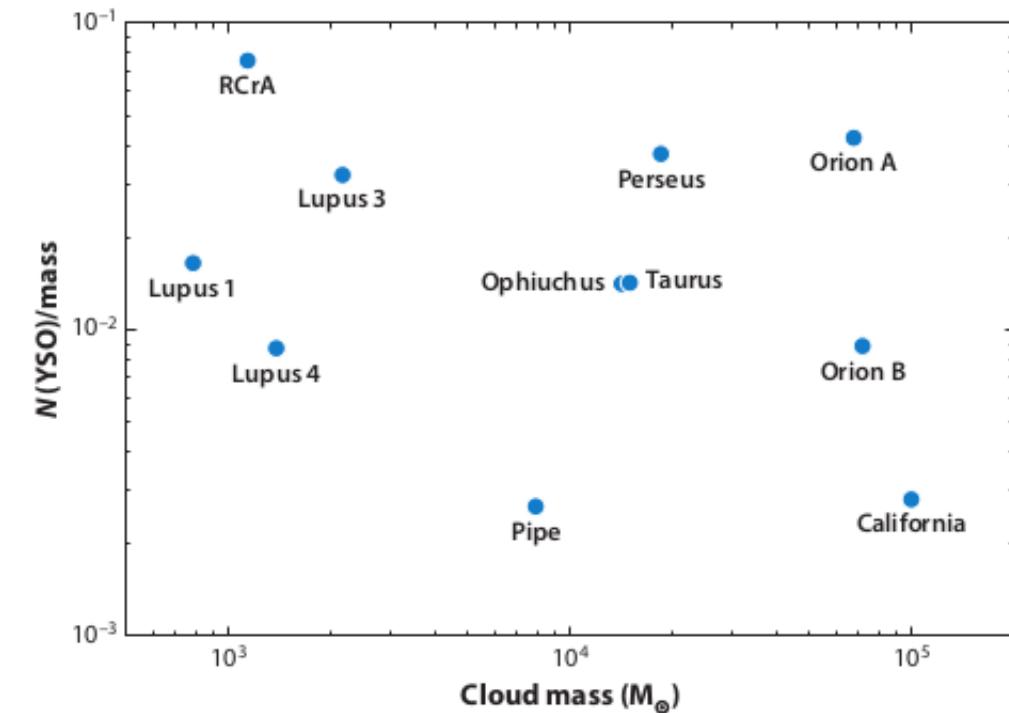
$$\tau_{\text{H}_2} \sim 1 \times 10^7 \text{ años}$$

FORMACIÓN ESTELAR

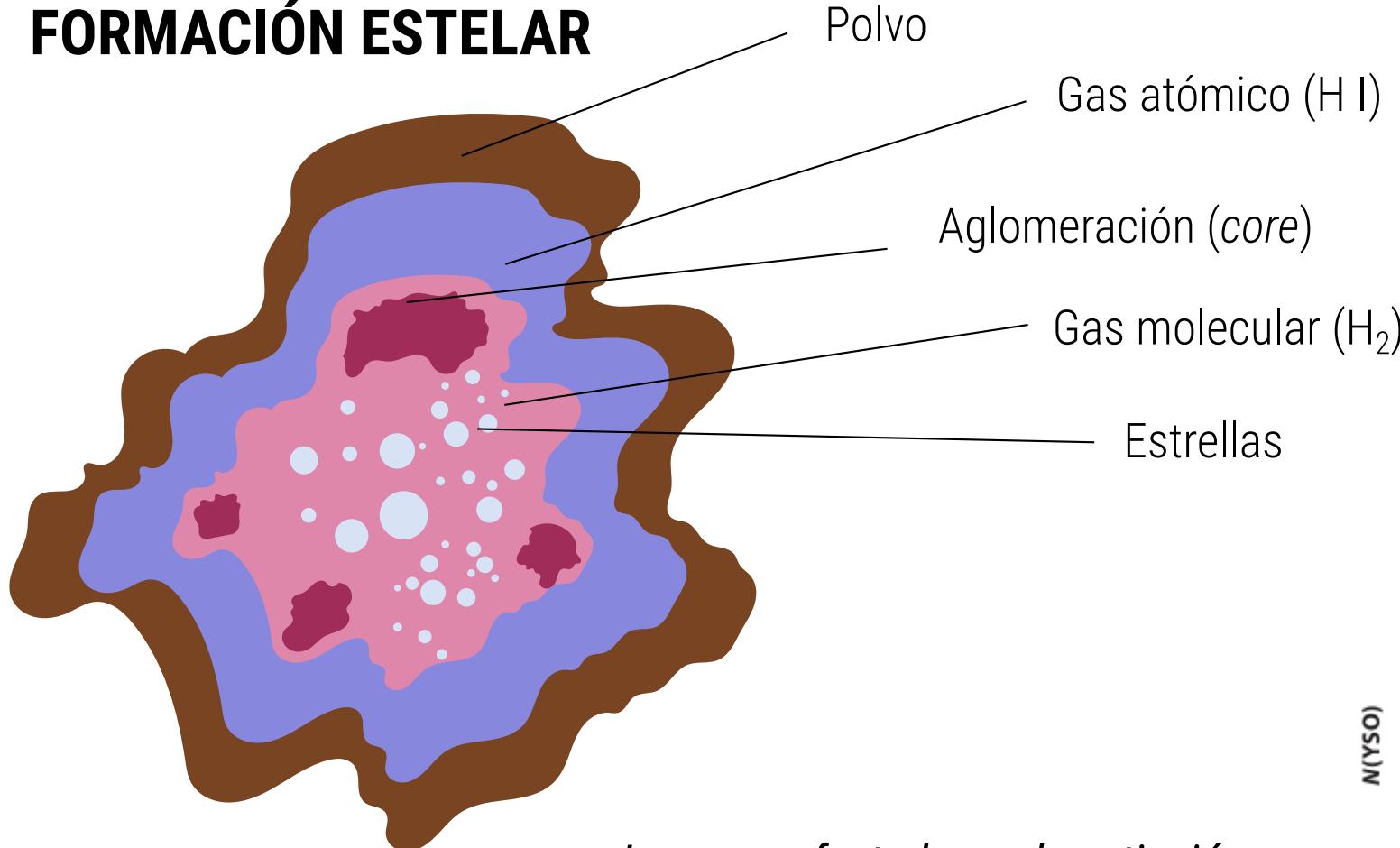


La eficiencia en la TFE es altamente variable en función de la masa de regiones de FE.

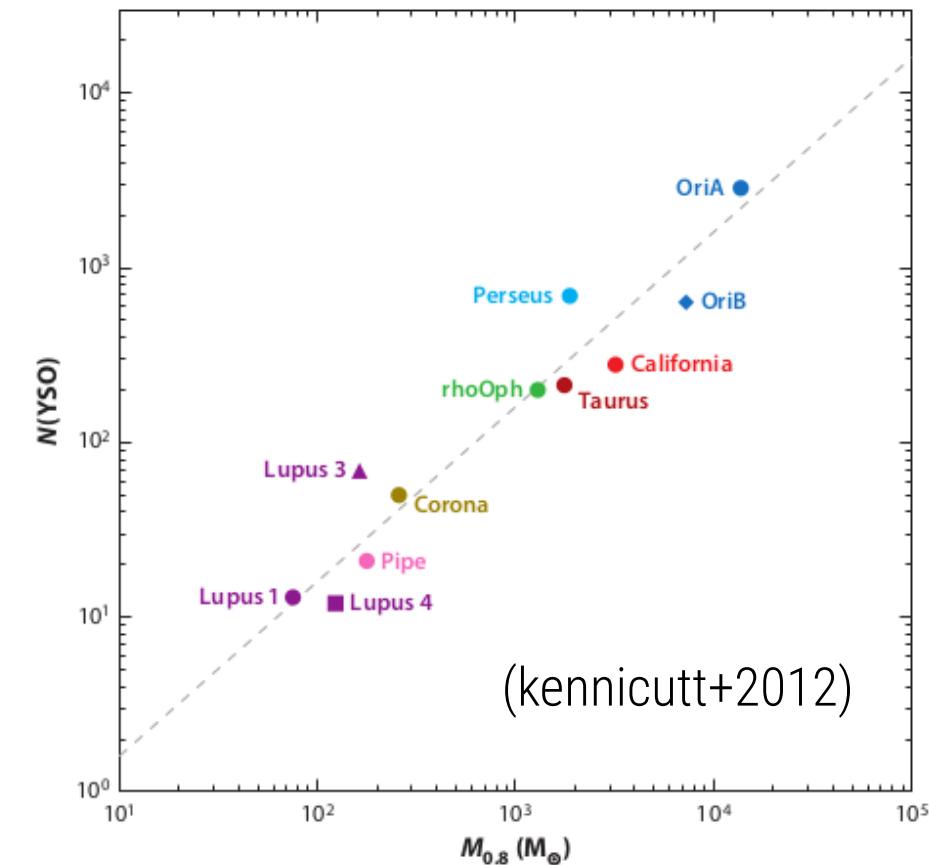
(kennicutt+2012)



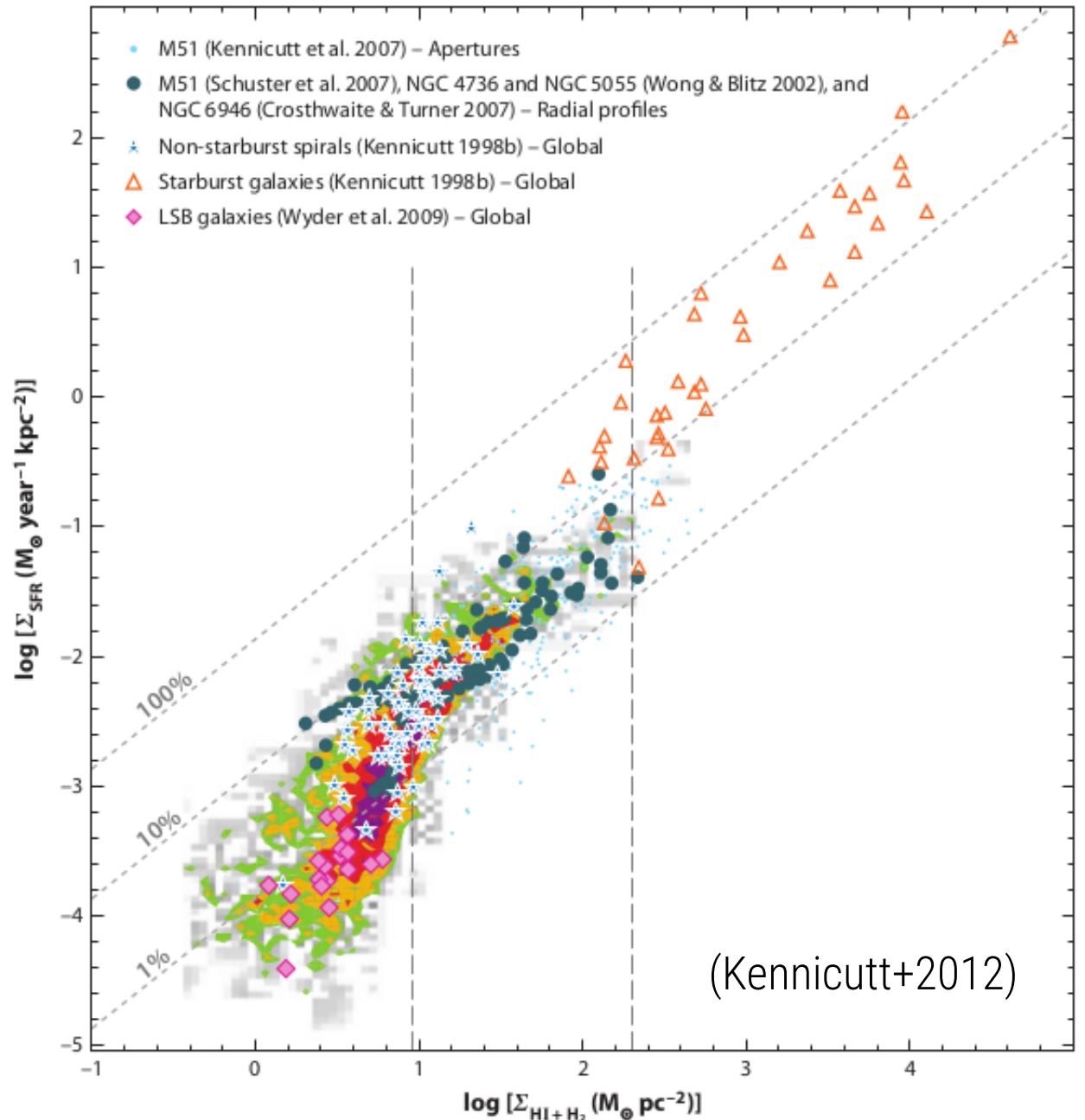
FORMACIÓN ESTELAR



La masa afectada por la extinción (>0.8 mag) en la banda K sí correlaciona con la eficiencia en la TFE.



FORMACIÓN ESTELAR

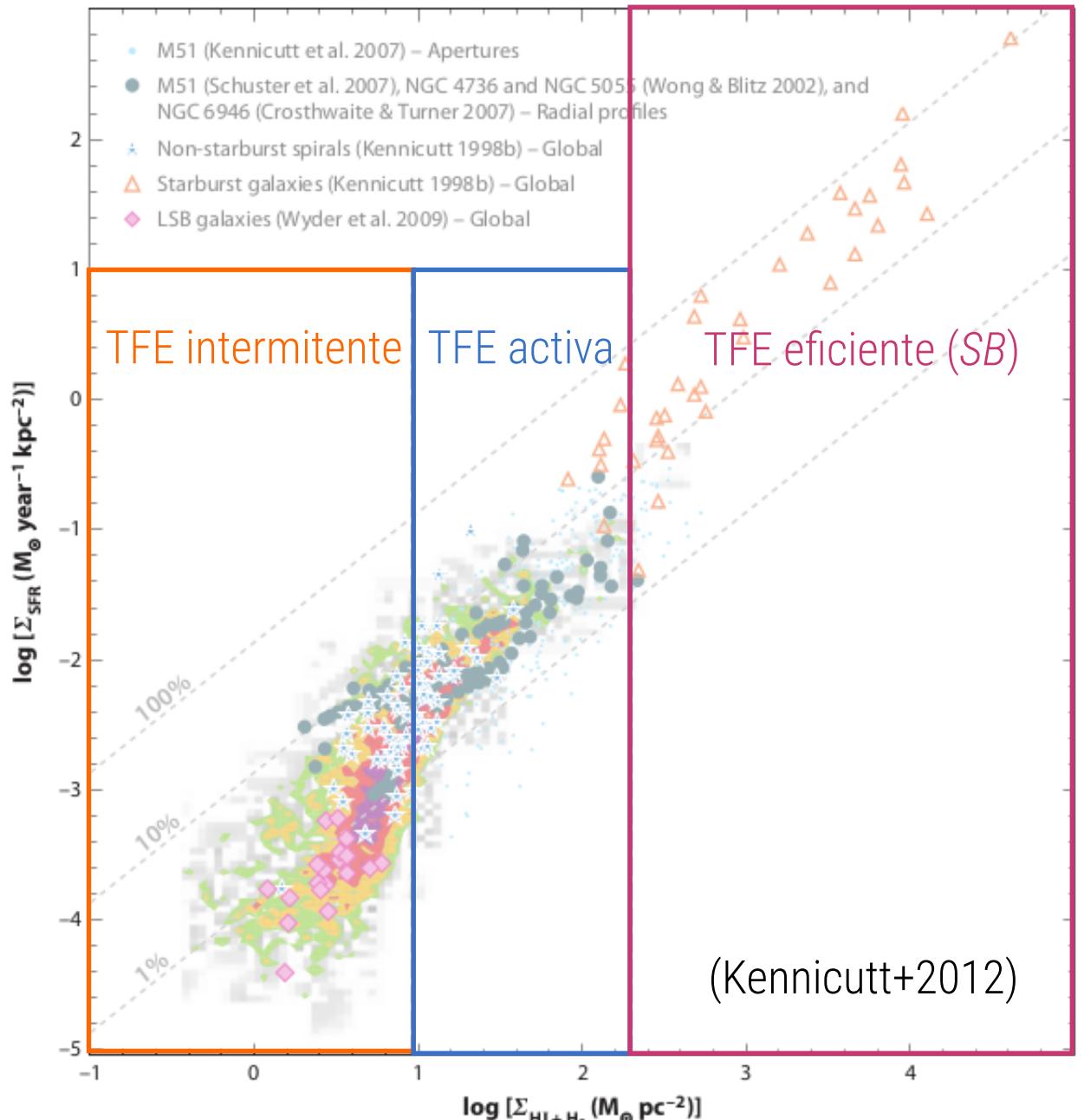


FORMACIÓN ESTELAR

Galaxias enanas
Regiones externas en discos
Regiones entre brazos espirales

La Vía Láctea
Nubes moleculares

Algunas regiones centrales
SBs
Mergers
Aglomeraciones

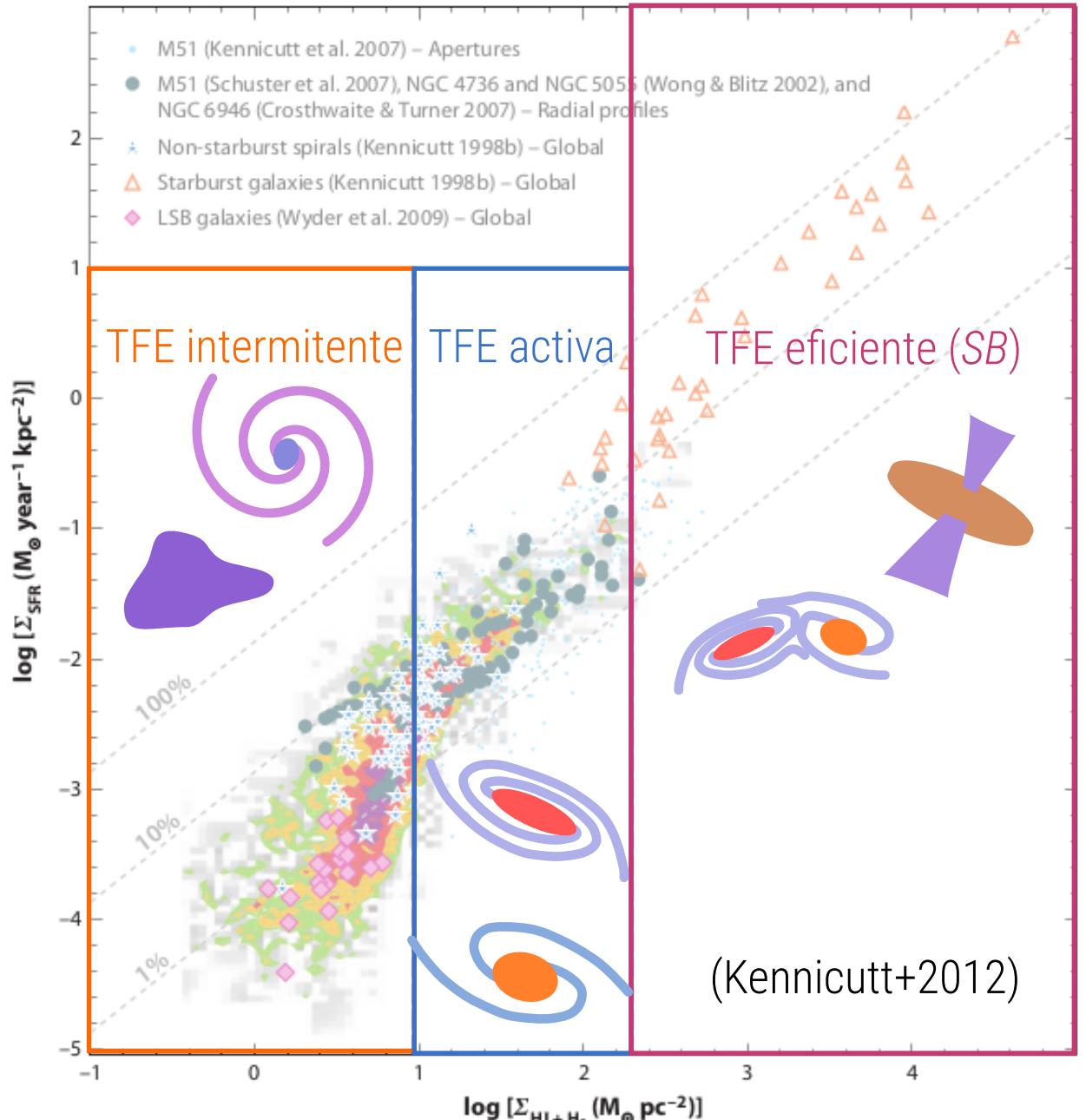


FORMACIÓN ESTELAR

Galaxias enanas
Regiones externas en discos
Regiones entre brazos espirales

La Vía Láctea
Nubes moleculares

Algunas regiones centrales
SBs
Mergers
Aglomeraciones



FUSIÓN DE HALOS – FUSIÓN NO COLISIONAL

(Naab+2017)

$$E_i = -\frac{1}{2} M_i \langle v_i^2 \rangle = -\frac{1}{2} \frac{G M_i}{r_i}$$

Sistema virializado

Incremento fraccional en masa $\left[\eta = M_a / M_i \right]$

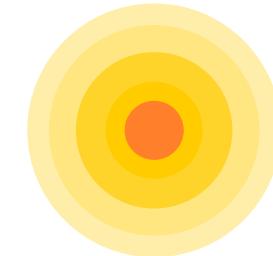
Contraste fraccional en velocidad $\left[\epsilon = \langle v_a^2 \rangle / \langle v_i^2 \rangle \right]$

$$\rho_f / \rho_i = \frac{(1 + \eta \epsilon)^3}{(1 + \eta)^5} \quad \langle v_f^2 \rangle / \langle v_i^2 \rangle = \frac{1 + \eta \epsilon}{1 + \eta} \quad r_f / r_i = \frac{(1 + \eta)^2}{1 + \eta \epsilon}$$

Incremento en densidad

Incremento en velocidad

M_a



órbita de cero
energía

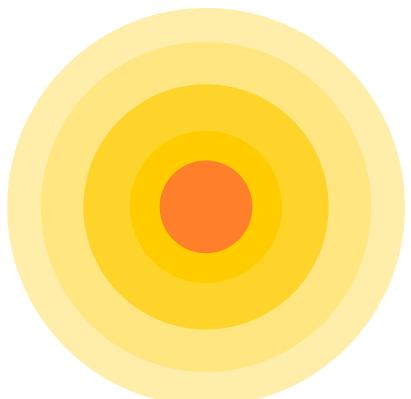
M_i



$\langle v_a^2 \rangle$

Δt

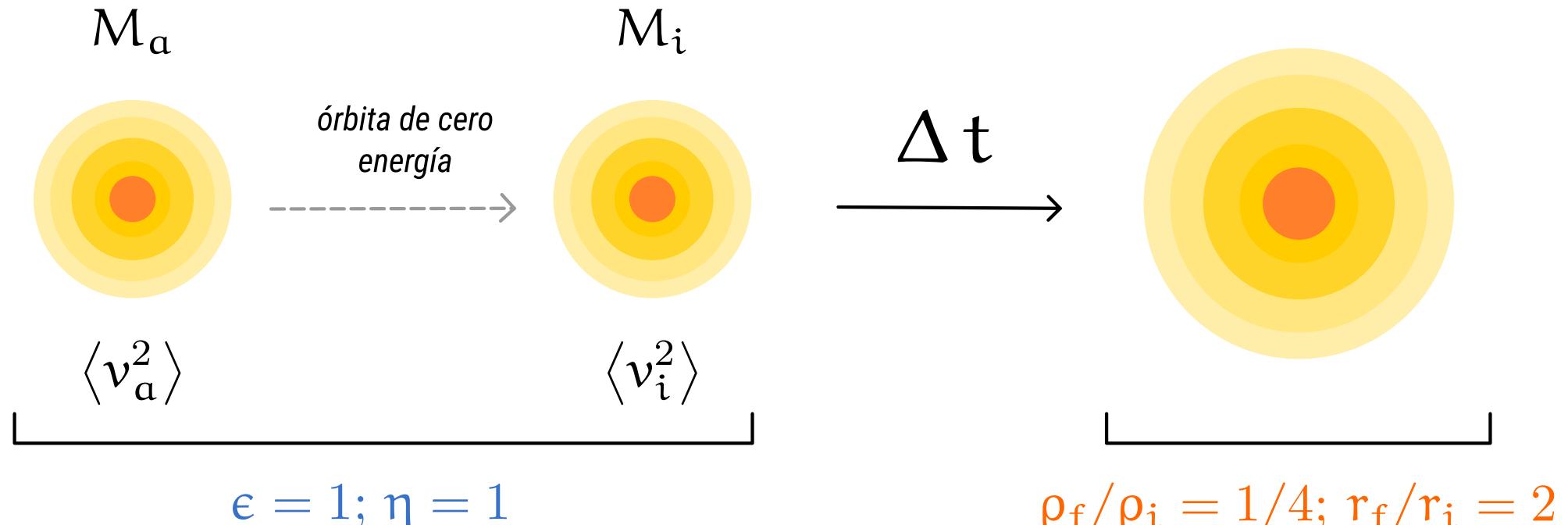
$\langle v_i^2 \rangle$



Incremento radio

FUSIÓN DE HALOS – FUSIÓN NO COLISIONAL

(Naab+2017)

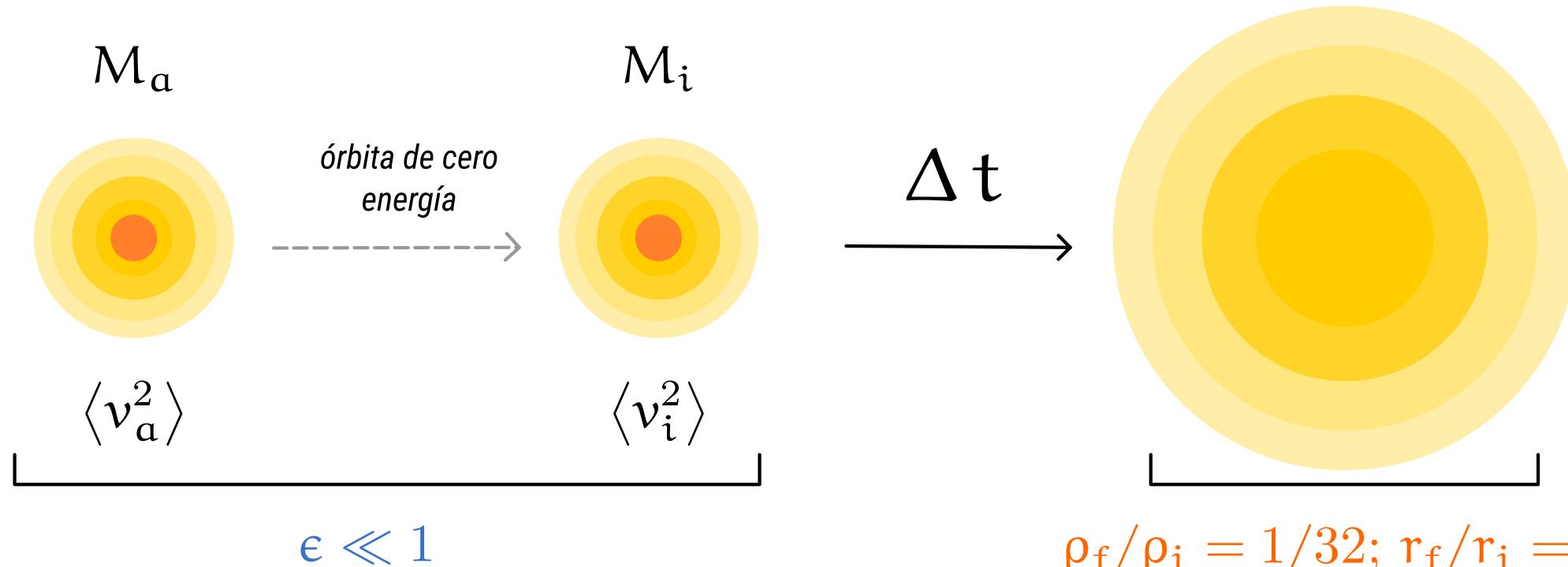


Si dos sistemas identicos
se encuentran en una fusión no colisional...

...El remanente es una galaxia esponjada
pero conserva su energía cinética.

FUSIÓN DE HALOS – FUSIÓN NO COLISIONAL

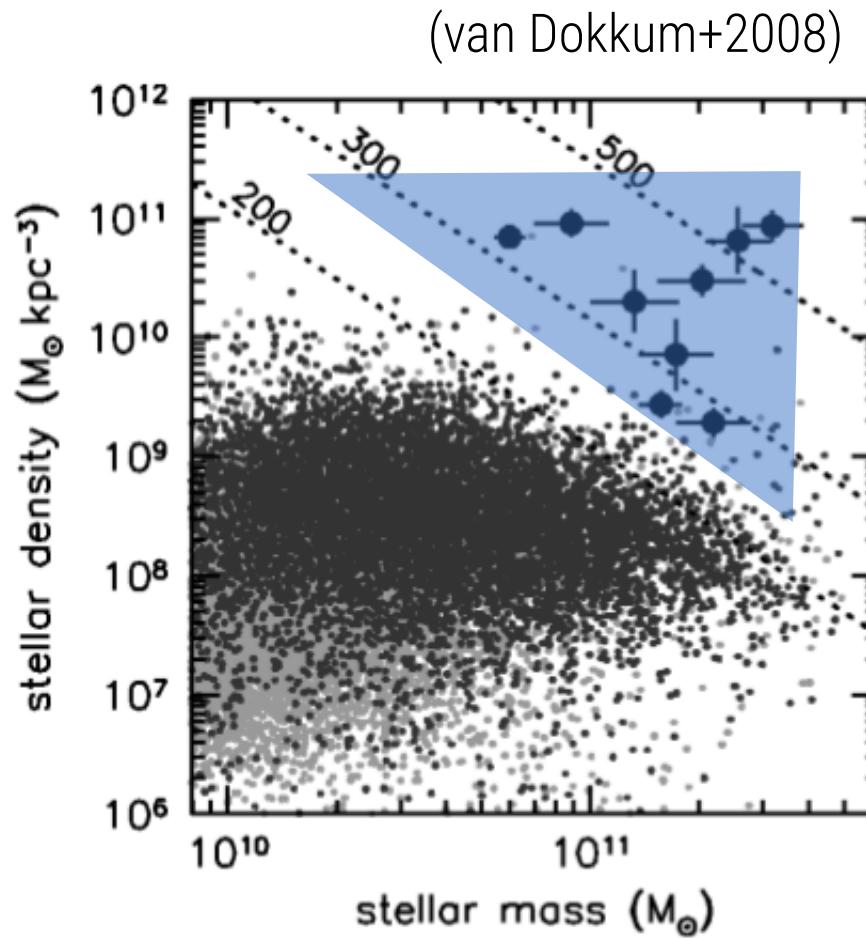
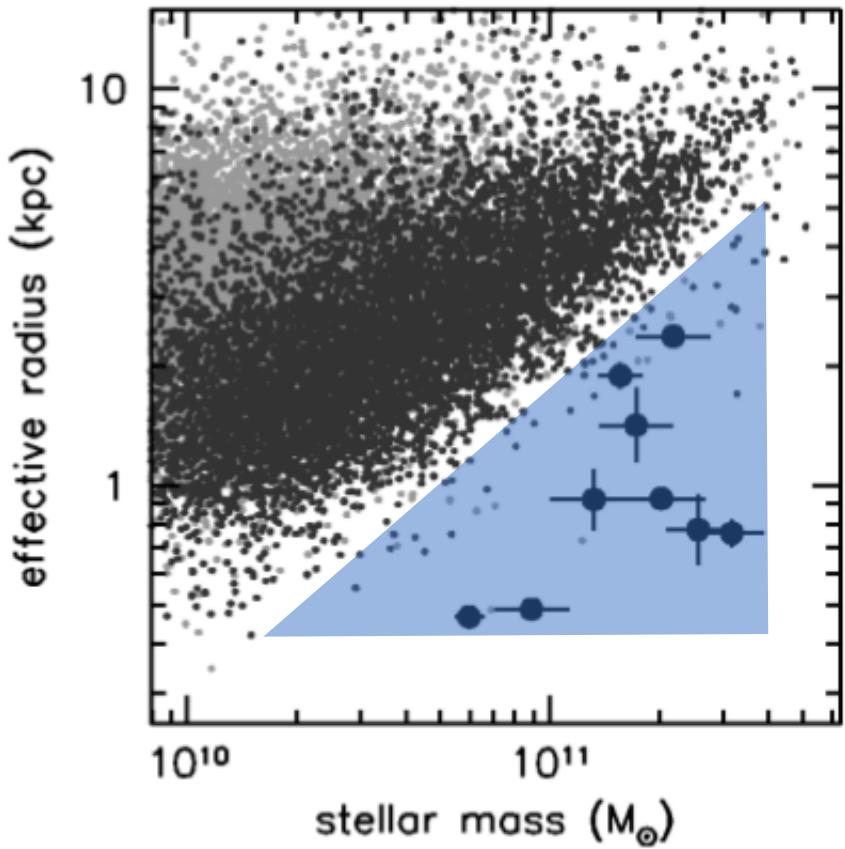
(Naab+2017)



Si dos sistemas identicos
se encuentran en una fusión no colisional...

$\rho_f/\rho_i = 1/32; r_f/r_i = 4;$
 $\langle v_f^2 \rangle / \langle v_i^2 \rangle = 1/2$
*...El remanente es una galaxia esponjada
pero parte de su energía cinética queda
en órbitas de alta energía.*

FUSIÓN DE HALOS – FUSIÓN NO COLISIONAL



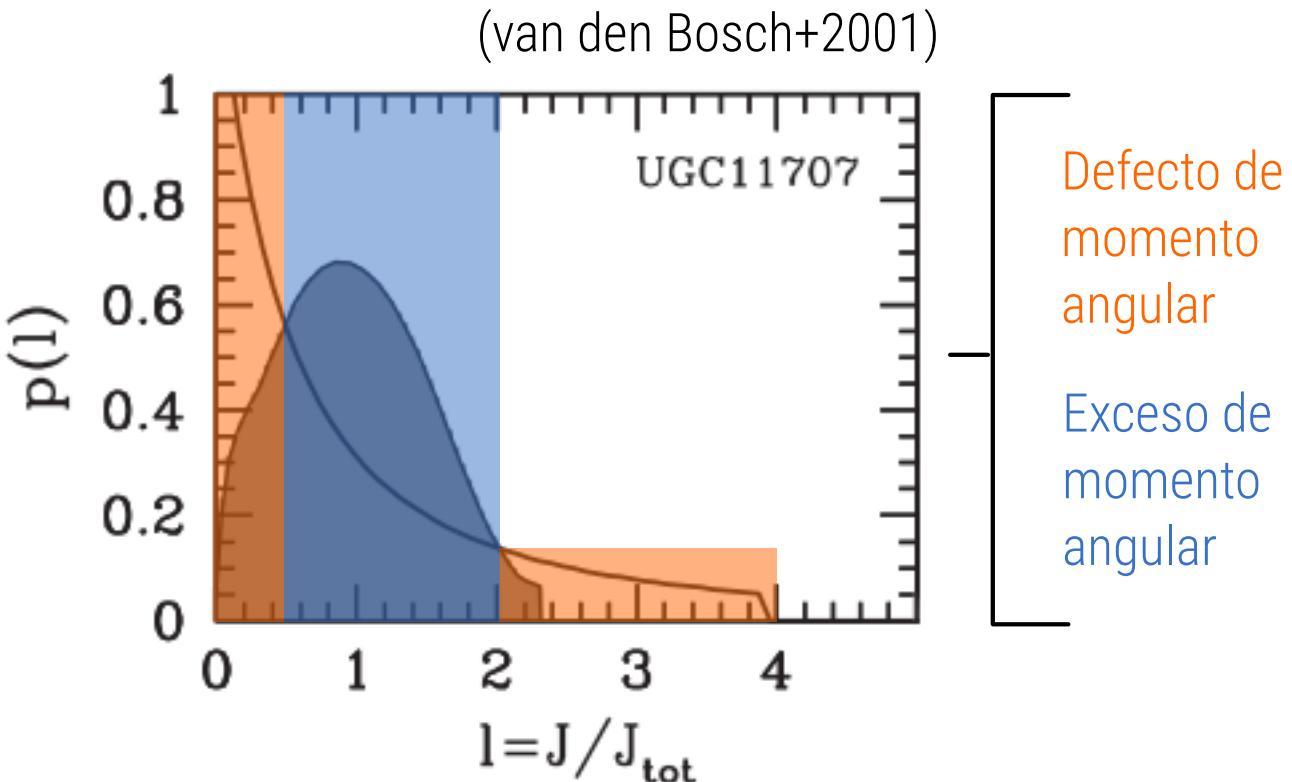
*Las galaxias tienden
a esponjarse
por la fusión de halos.*

FEEDBACK ESTELAR Y EVOLUCIÓN QUÍMICA

Supernovas ~ 48 km/s

Vientos estelares >140 km/s

Presión de radiación > 190 km/s > VNM ~ 10 km/s

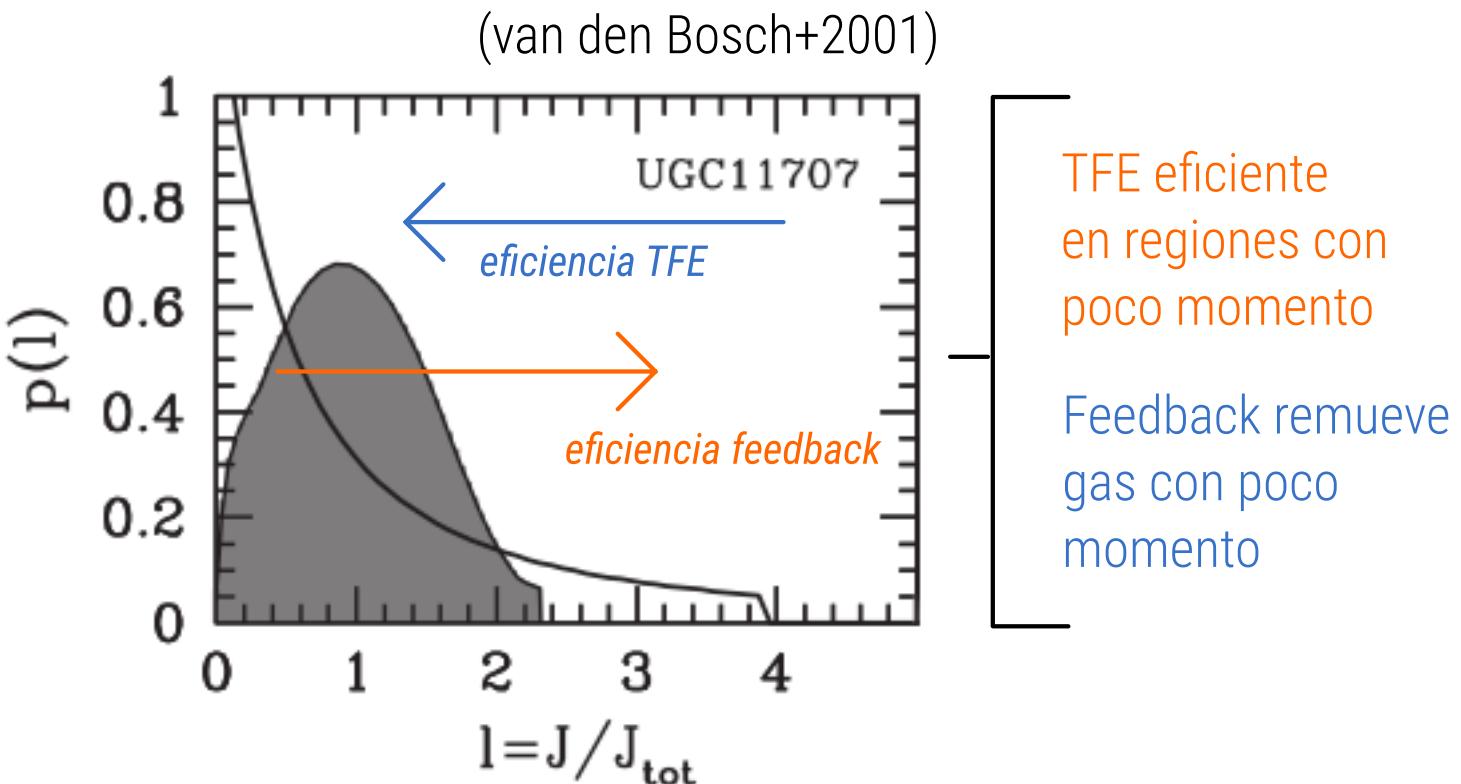


FEEDBACK ESTELAR Y EVOLUCIÓN QUÍMICA

Supernovas ~ 48 km/s

Vientos estelares >140 km/s

Presión de radiación > 190 km/s > VNM ~ 10 km/s

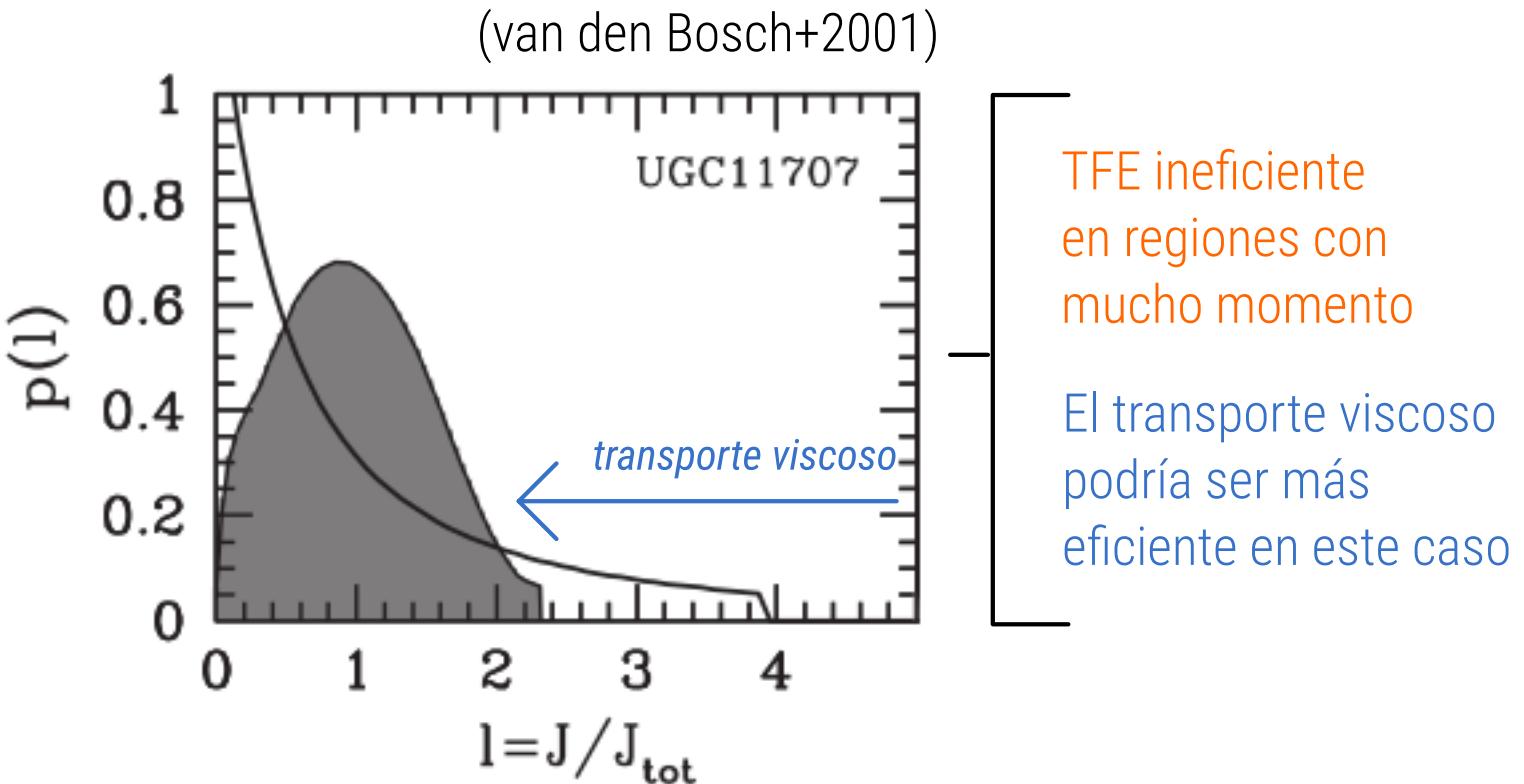


FEEDBACK ESTELAR Y EVOLUCIÓN QUÍMICA

Supernovas ~ 48 km/s

Vientos estelares >140 km/s

Presión de radiación > 190 km/s > VNM ~ 10 km/s

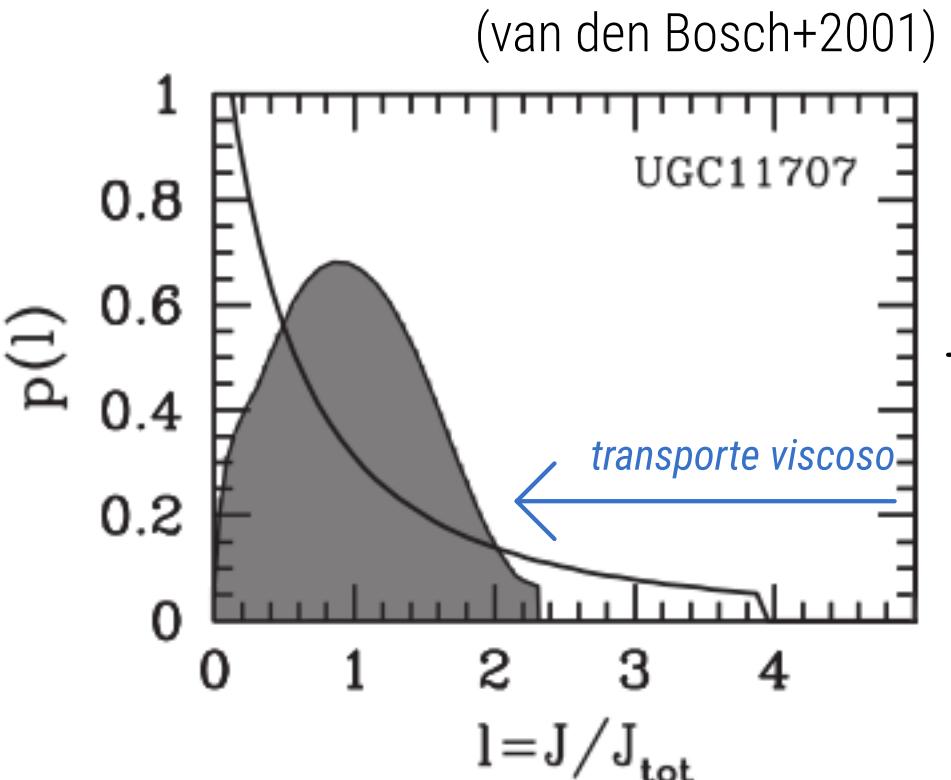


FEEDBACK ESTELAR Y EVOLUCIÓN QUÍMICA

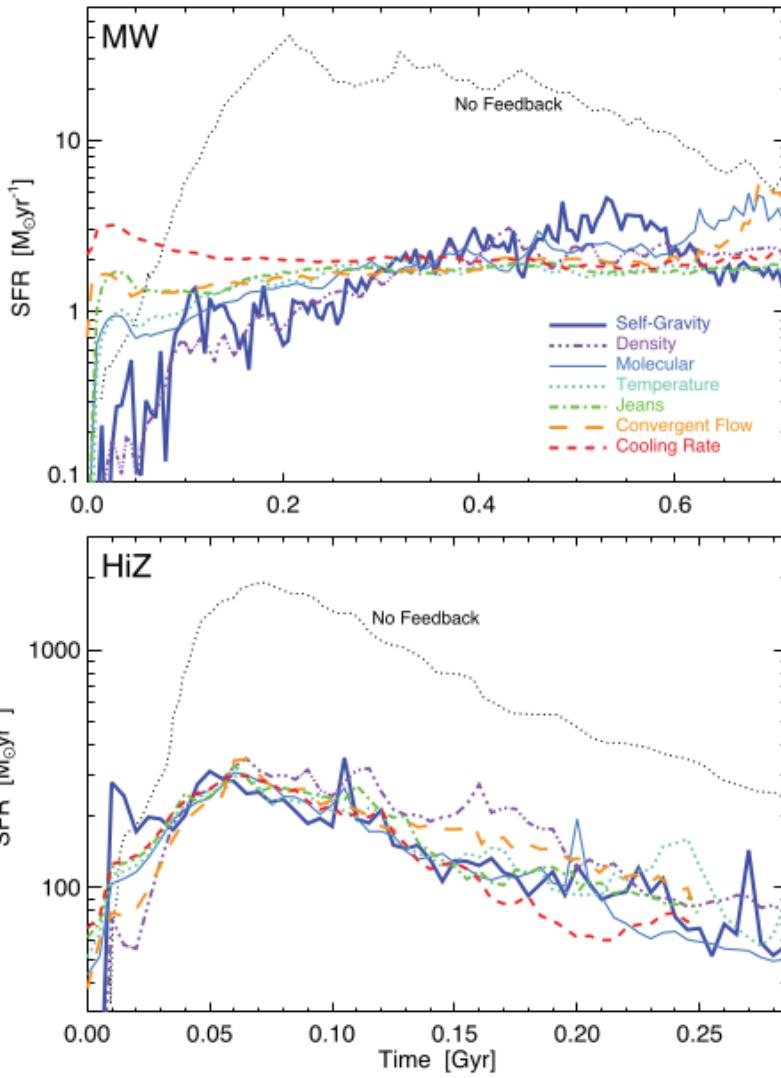
Supernovas ~ 48 km/s

Vientos estelares >140 km/s

Presión de radiación > 190 km/s > VNM ~ 10 km/s



TFE ineficiente
en regiones con
mucho momento
El transporte viscoso
podría ser más
eficiente en este caso



(Hopkins+2013)

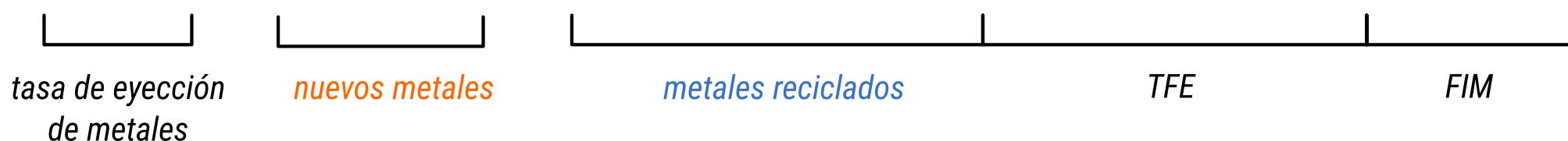
FEEDBACK ESTELAR Y EVOLUCIÓN QUÍMICA

(Yates+2013)

$$p_{\text{masa}} = \int_{m_i}^{m_s} [m - m_{\text{rem}}(m, Z_\star)] \Psi(t - \tau(m, Z_\star)) \phi(m, Z_\star) dm$$



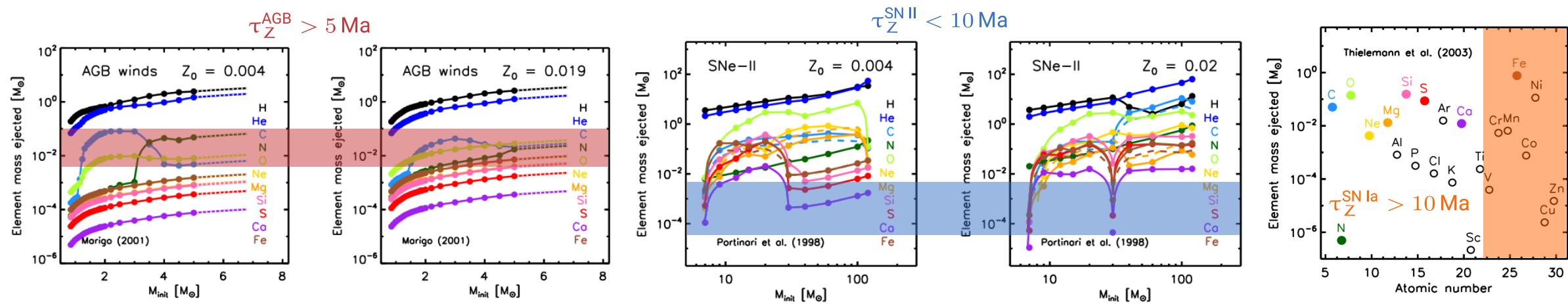
$$p_Z = \int_{m_i}^{m_s} [y(m, Z_\star) + Z_\star \times (m - m_{\text{rem}})] \Psi(t - \tau(m, Z_\star)) \phi(m, Z_\star) dm$$



FEEDBACK ESTELAR Y EVOLUCIÓN QUÍMICA

(Yates+2013)

$$p_Z = \int_{m_i}^{m_s} [y(m, Z_\star) + Z_\star \times (m - m_{\text{rem}})] \Psi(t - \tau(m, Z_\star)) \phi(m, Z_\star) dm$$



FEEDBACK ESTELAR Y EVOLUCIÓN QUÍMICA

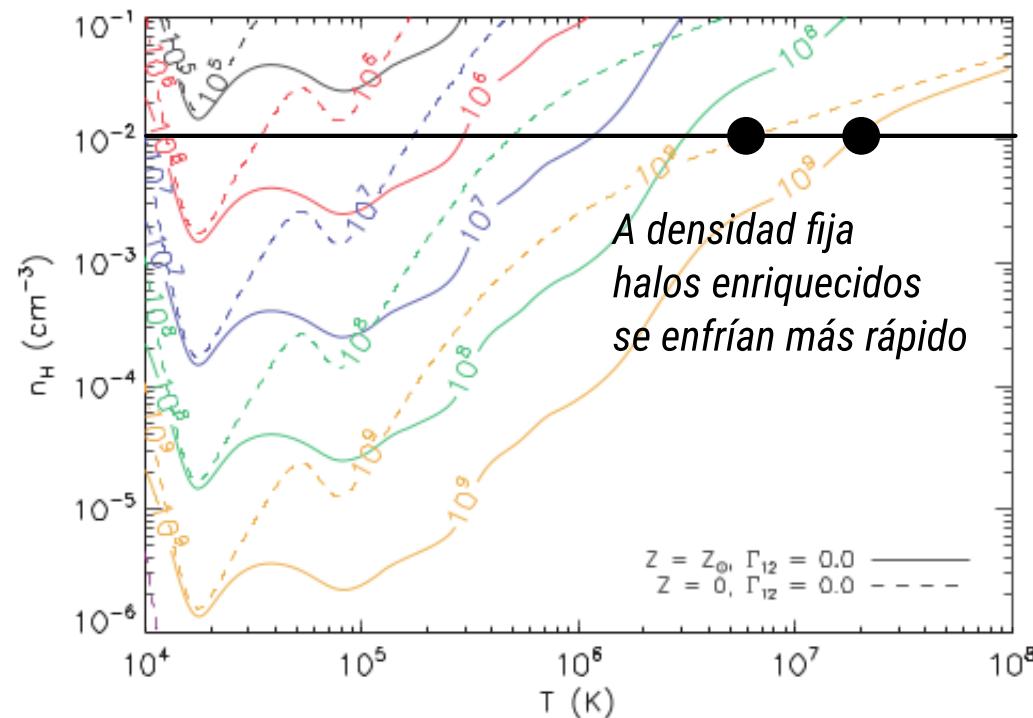
(Yates+2013)

$$p_Z = \int_{m_i}^{m_s} [y(m, Z_\star) + Z_\star \times (m - m_{\text{rem}})] \Psi(t - \tau(m, Z_\star)) \phi(m, Z_\star) dm$$



tasa de eyeción
de metales nuevos metales metales reciclados

TFE FIM



¡Recordar que la evolución química
acelera el proceso de enfriamiento!

(Wiersma+2009)

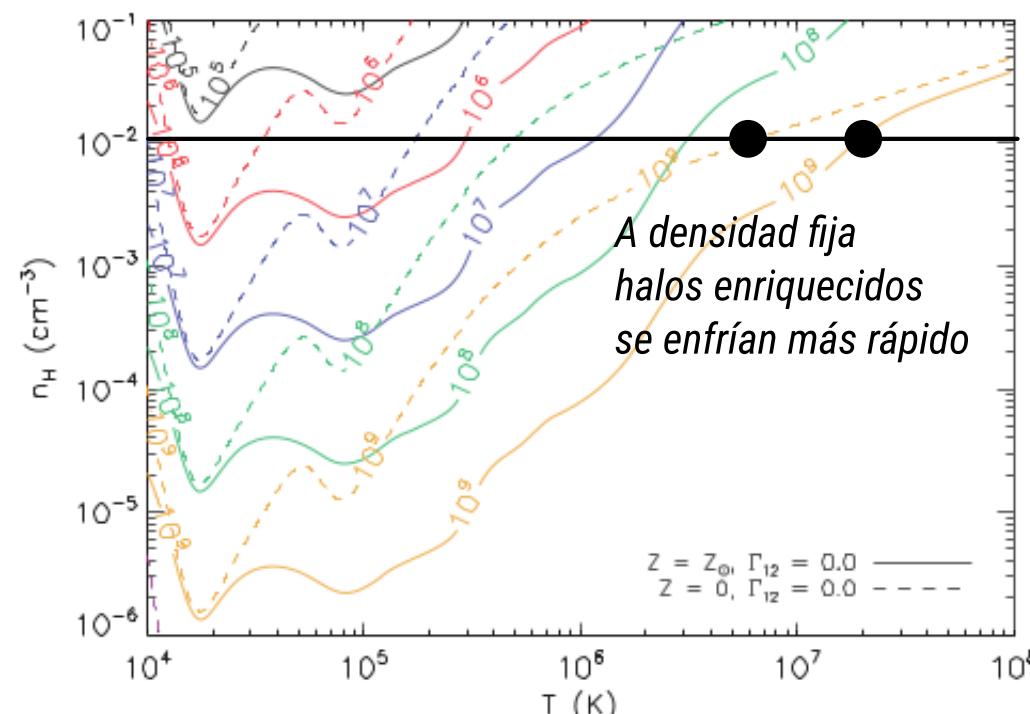
FEEDBACK ESTELAR Y EVOLUCIÓN QUÍMICA

(Yates+2013)

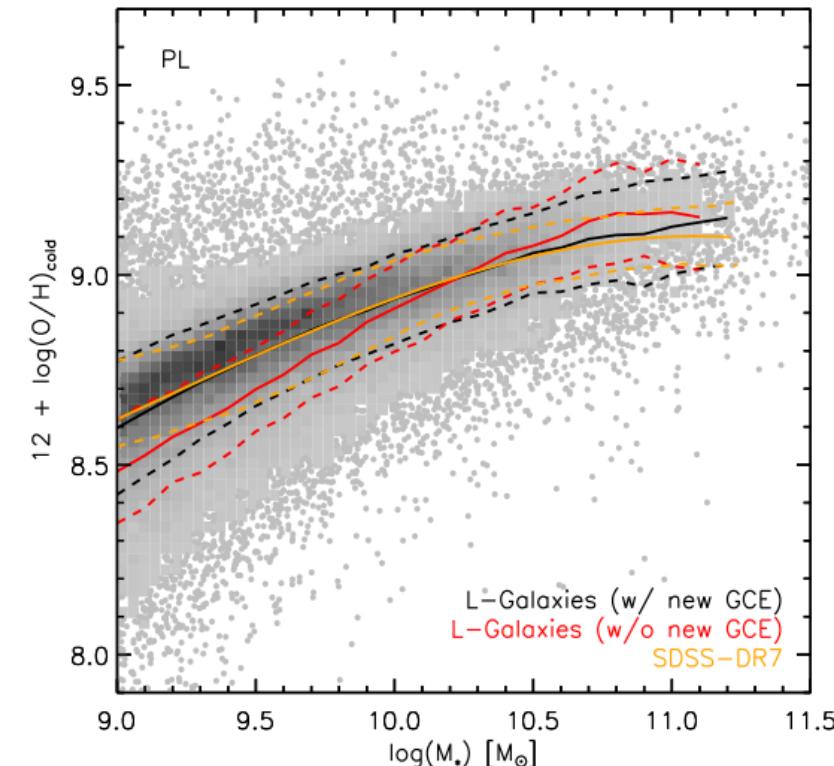
$$p_Z = \int_{m_i}^{m_s} [y(m, Z_\star) + Z_\star \times (m - m_{\text{rem}})] \Psi(t - \tau(m, Z_\star)) \phi(m, Z_\star) dm$$



tasa de eyeción
de metales nuevos metales metales reciclados



(Wiersma+2009)

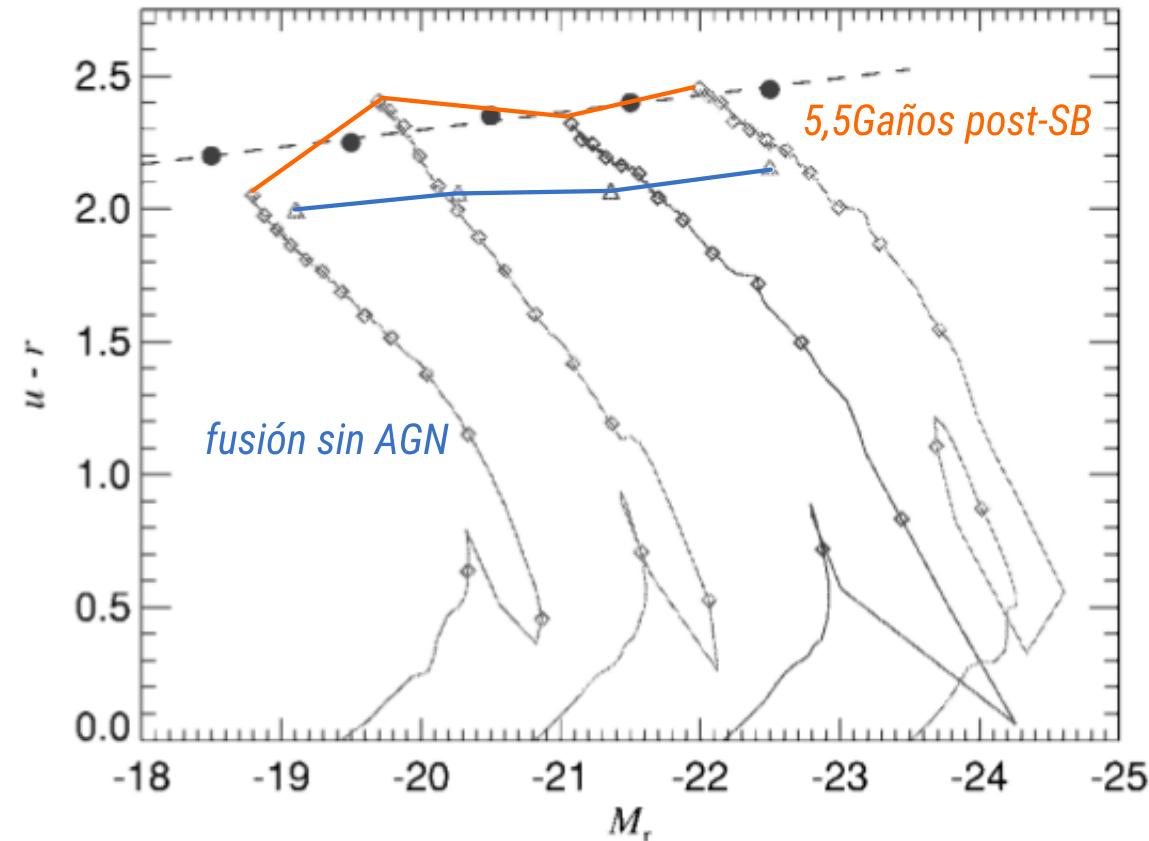


¿Cómo explicar el máximo en la metalicidad?

NÚCLEOS ACTIVOS

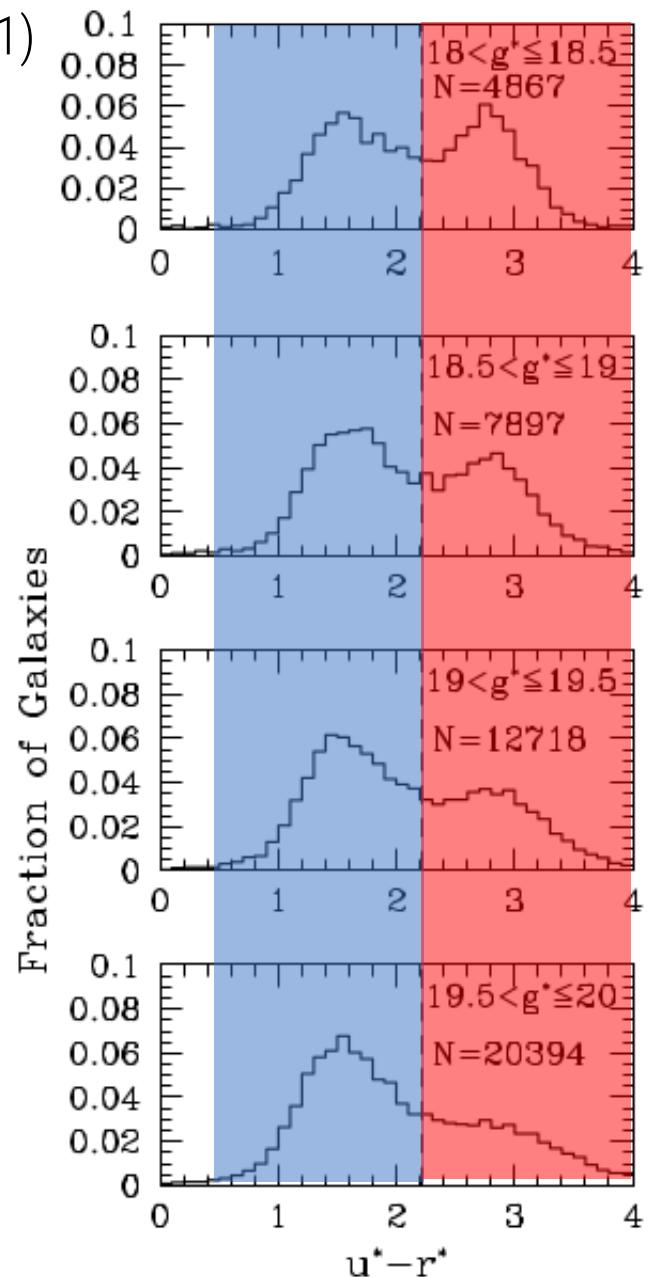
La bimodalidad en la distribución de colores define una escala temporal para la formación del contenido estelar en las galaxias tempranas.

$$\tau_{GTS} \sim 2 \text{ Gaños}$$



(Springel+2005)

(Strateva+2001)



RESUMEN

Se han identificado un conjunto de fenómenos físicos necesarios para la formación de las galaxias:

Formación de halos de materia oscura a partir de sobre-densidades primordiales.

Acreción de gas del MIG.

Enfriamiento y formación de discos.

Formación estelar

Fusión de halos (*mergers*)

Con solo estos fenómenos se pueden formar galaxias que sobrevivan hasta el presente.

Sin embargo, estas no cumplen las relaciones de escala y distribuciones observadas:

Tamaños y perfiles de discos.

Distribución de colores.

Historias de formación estelar y de evolución química.

RESUMEN

Los fenómenos reguladores (*feedback estelar y de AGN y evolución química*) resuelven todos estos problemas. Pero a expensas de introducir más parámetros libres en la teoría y, por tanto, más degeneraciones. El reto de las simulaciones de formación de galaxias actuales es restringir el rango dinámico de tales fenómenos.