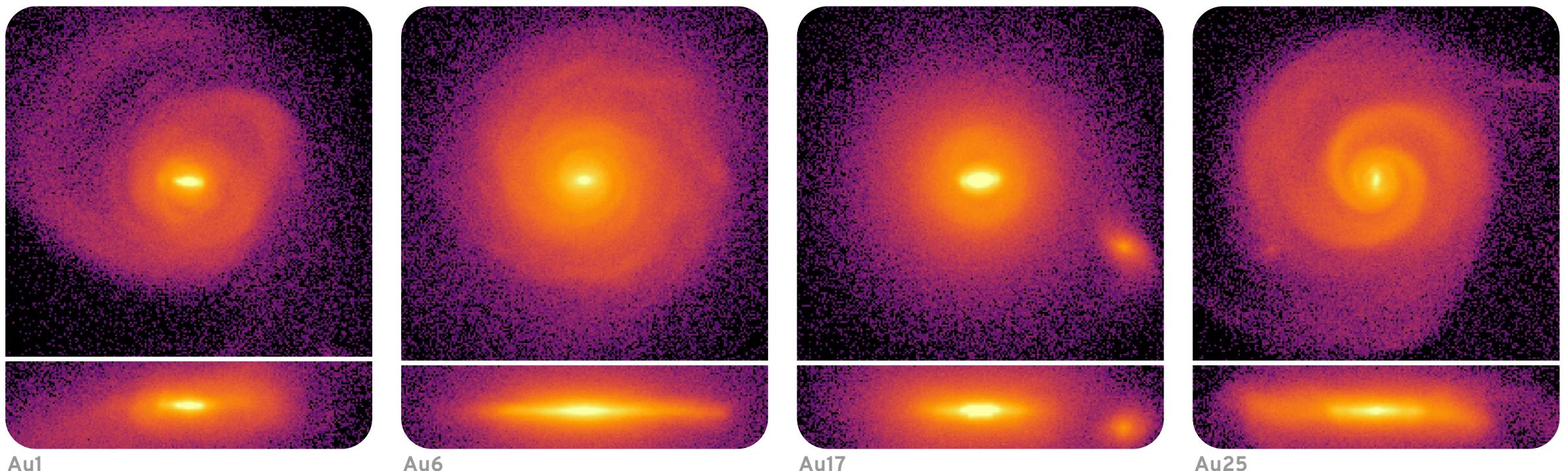


# **Historia de acreción de gas en los discos estelares de las galaxias tipo Vía Láctea de las simulaciones Auriga**

Federico G. Iza, Cecilia Scannapieco, Sebastián E. Nuza, Robert J. J. Grand,  
Facundo A. Gómez, Volker Springel, Rüdiger Pakmor, Federico Marinacci



Au1

Au6

Au17

Au25

## CONTENIDOS

1

### Introducción

Proceso de formación de las galaxias y acreción gaseosa.

# CONTENIDOS

**1**

## Introducción

Proceso de formación de las galaxias y acreción gaseosa.

**2**

## Simulaciones

Descripción del proyecto Auriga y principales propiedades de las galaxias simuladas.

# CONTENIDOS

**1**

## Introducción

Proceso de formación de las galaxias y acreción gaseosa.

**2**

## Simulaciones

Descripción del proyecto Auriga y principales propiedades de las galaxias simuladas.

**3**

## Métodos y resultados

Cuantificación de la acreción gaseosa en los discos de las galaxias simuladas y comportamiento promedio en muestras seleccionadas.

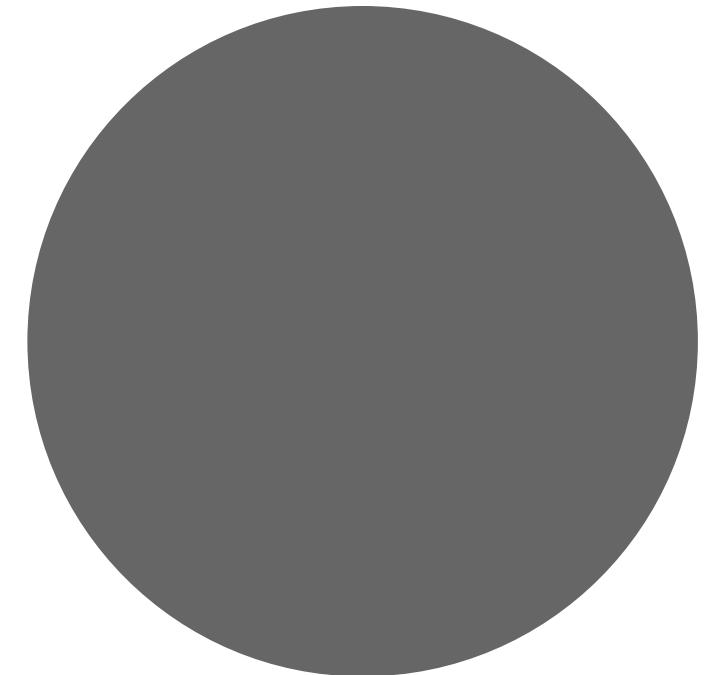
# **INTRODUCCIÓN**

## Formación y evolución de galaxias

## PROCESO DE FORMACIÓN GALÁCTICA

1

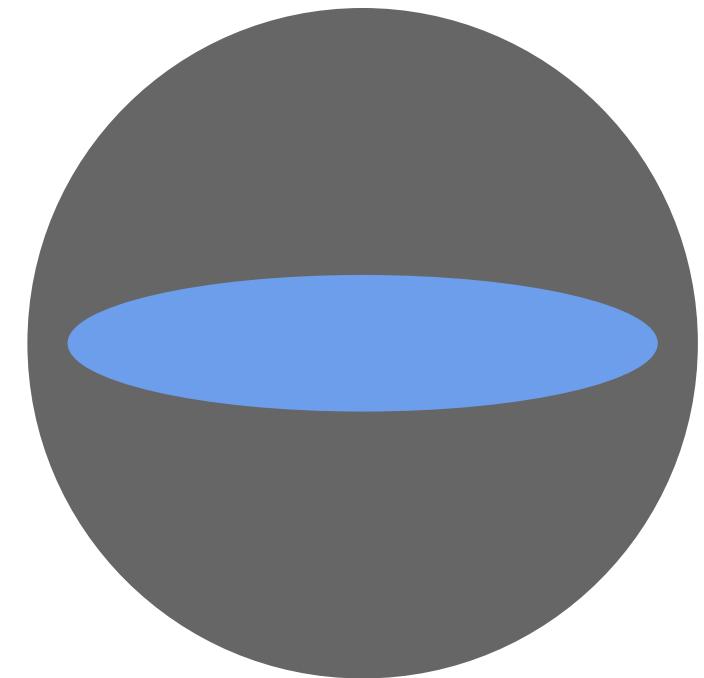
GRAVEDAD → Formación del halo de materia oscura.



## PROCESO DE FORMACIÓN GALÁCTICA

1 GRAVEDAD → Formación del halo de materia oscura.

2 ENFRIAMIENTO → Condensación del gas dentro de los halos.

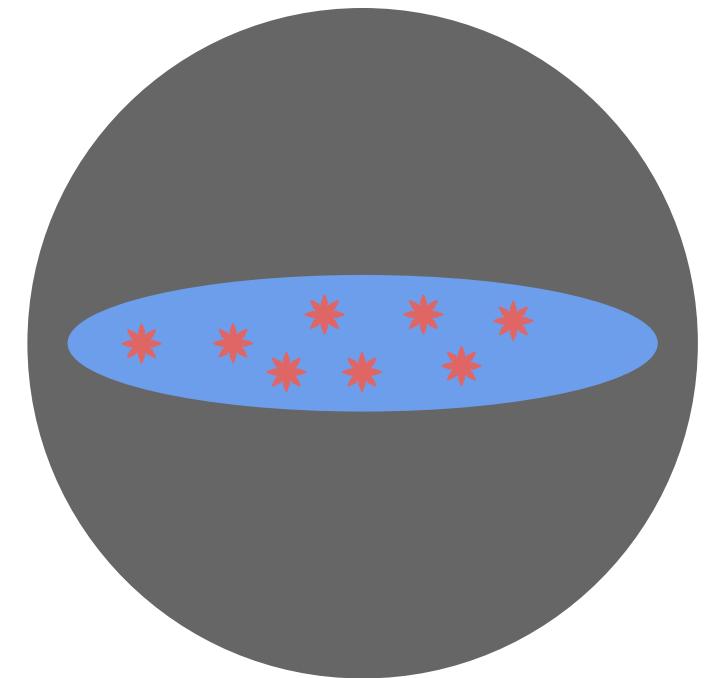


# PROCESO DE FORMACIÓN GALÁCTICA

1 GRAVEDAD → Formación del halo de materia oscura.

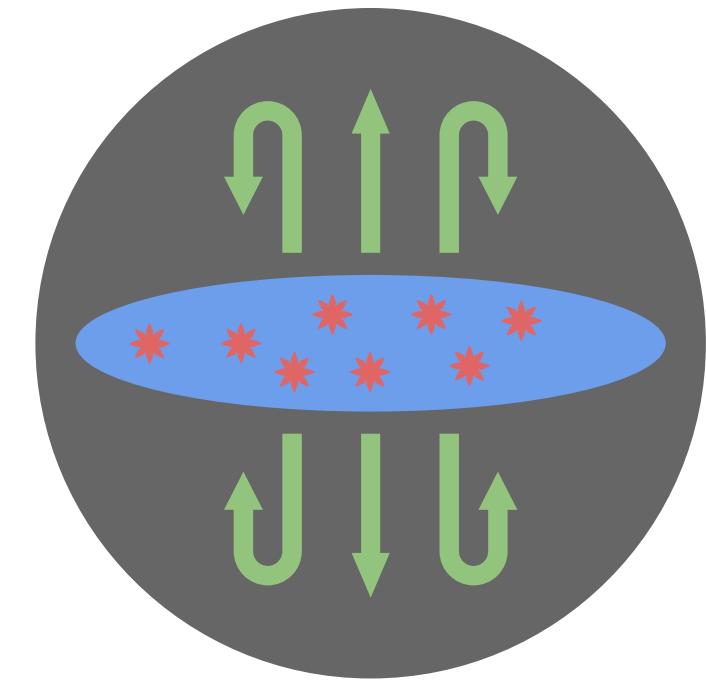
2 ENFRIAMIENTO → Condensación del gas dentro de los halos.

3 FORMACIÓN ESTELAR → A partir del gas denso y frío.



# PROCESO DE FORMACIÓN GALÁCTICA

- 1 GRAVEDAD → Formación del halo de materia oscura.
- 2 ENFRIAMIENTO → Condensación del gas dentro de los halos.
- 3 FORMACIÓN ESTELAR → A partir del gas denso y frío.
- 4 FEEDBACK ESTELAR → Retorno de elementos químicos y energía al medio interestelar.



# PROCESO DE FORMACIÓN GALÁCTICA

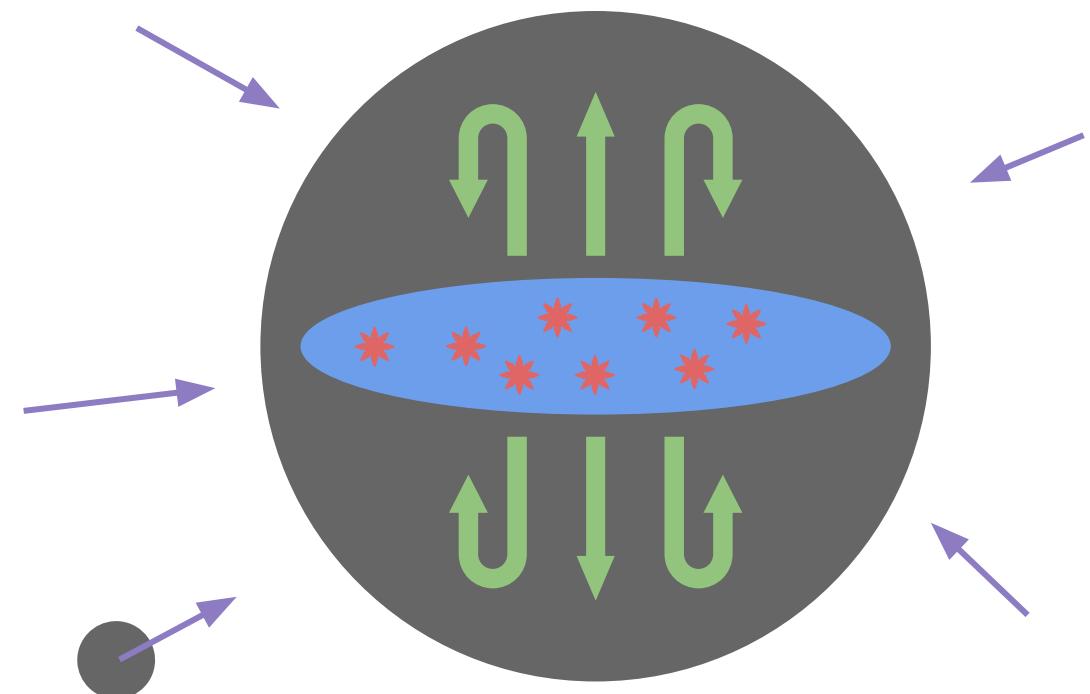
1 GRAVEDAD → Formación del halo de materia oscura.

2 ENFRIAMIENTO → Condensación del gas dentro de los halos.

3 FORMACIÓN ESTELAR → A partir del gas denso y frío.

4 FEEDBACK ESTELAR → Retorno de elementos químicos y energía al medio interestelar.

+ EFECTOS COSMOLOGICOS → Acreción de masa y colisiones con satélites.



# PROCESO DE FORMACIÓN GALÁCTICA

INFLOWS

Las estrellas se forman  
a partir del gas denso  
y frío que acreta a la  
galaxia.

SFR

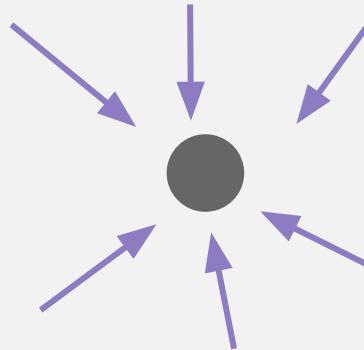
# PROCESO DE FORMACIÓN GALÁCTICA

INFLOWS

Las estrellas se forman a partir del gas denso y frío que acreta a la galaxia.

SFR

Acreción temprana



Acreción abrupta a tiempos tempranos provee material para formar estrellas en el bulbo, mientras que...

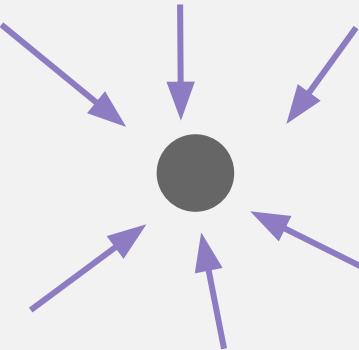
# PROCESO DE FORMACIÓN GALÁCTICA

INFLOWS

Las estrellas se forman a partir del gas denso y frío que acreta a la galaxia.

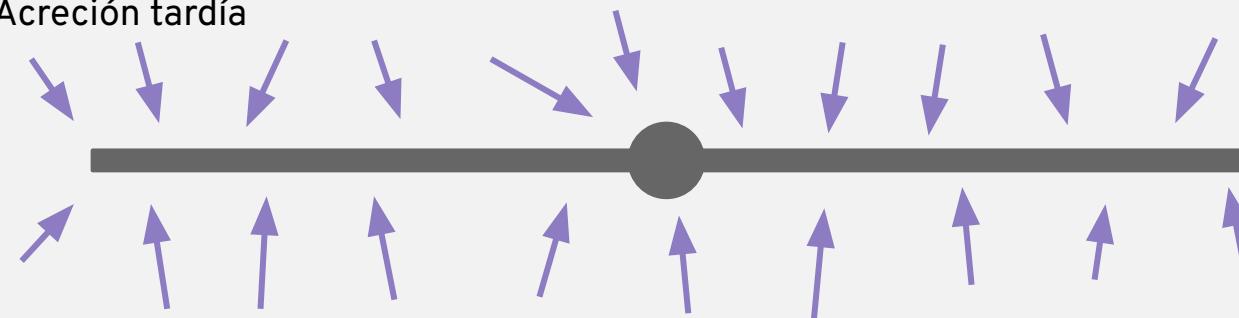
SFR

Acreción temprana



Acreción abrupta a tiempos tempranos provee material para formar estrellas en el bulbo, mientras que...

Acreción tardía



...acreción regulada y sostenida a lo largo del tiempo provee material para la formación estelar en el disco.

# PROCESO DE FORMACIÓN GALÁCTICA

## INFLOWS

Las estrellas se forman a partir del gas denso y frío que acreta a la galaxia.

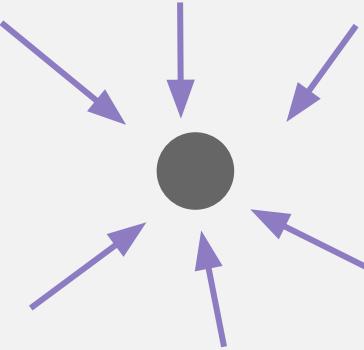
## SFR

## ACRECIÓN

La escala temporal en la cual se da la acreción de gas a la galaxia puede afectar la morfología.

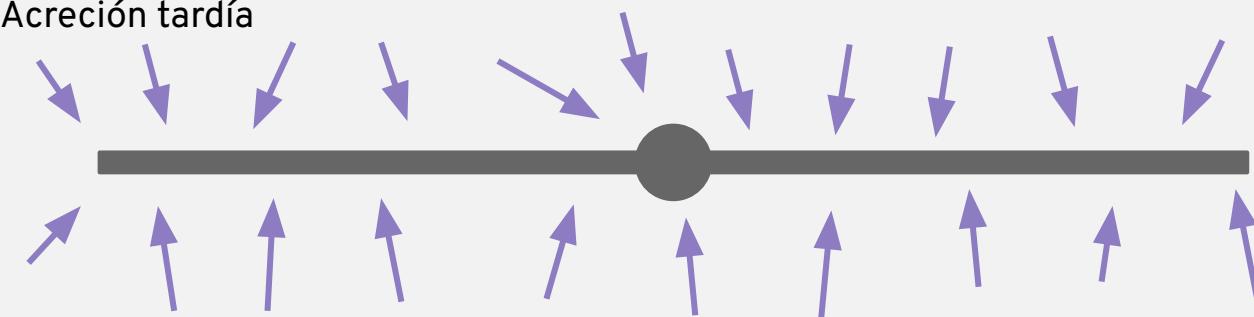
## MORFOLOGÍA

### Acreción temprana



Acreción abrupta a tiempos tempranos provee material para formar estrellas en el bulbo, mientras que...

### Acreción tardía



...acreción regulada y sostenida a lo largo del tiempo provee material para la formación estelar en el disco.

# **SIMULACIONES**

## El proyecto Auriga

## EL PROYECTO AURIGA

- El [proyecto Auriga](#) (Grand et al. 2017) consta de treinta halos simulados en [alta resolución](#) ( $m_{dm} = 3 \times 10^5 M_\odot$ ,  $m_b = 5 \times 10^4 M_\odot$ ) con un [contexto cosmológico](#) mediante la [técnica zoom-in](#) con el código AREPO.

## EL PROYECTO AURIGA

- El [proyecto Auriga](#) (Grand et al. 2017) consta de treinta halos simulados en [alta resolución](#) ( $m_{dm} = 3 \times 10^5 M_\odot$ ,  $m_b = 5 \times 10^4 M_\odot$ ) con un [contexto cosmológico](#) mediante la [técnica zoom-in](#) con el código AREPO.
- AREPO (Springel 2010) es un código [quasi-lagrangiano](#) y tipo [moving-mesh](#) que sigue la evolución tanto de la [magnetohidrodinámica](#) como de la dinámica no-colisional.

## EL PROYECTO AURIGA

- El [proyecto Auriga](#) (Grand et al. 2017) consta de treinta halos simulados en [alta resolución](#) ( $m_{dm} = 3 \times 10^5 M_\odot$ ,  $m_b = 5 \times 10^4 M_\odot$ ) con un [contexto cosmológico](#) mediante la [técnica zoom-in](#) con el código AREPO.
- AREPO (Springel 2010) es un código [quasi-lagrangiano](#) y tipo [moving-mesh](#) que sigue la evolución tanto de la [magnetohidrodinámica](#) como de la [dinámica no-colisional](#).
- Los halos principales fueron seleccionados en el presente de una simulación que considera sólo la evolución de la materia oscura (Schaye et al. 2015) bajo dos condiciones:
  - El halo debe poseer una masa virial en el rango  $1-2 \times 10^{12} M_\odot$  ([galaxias tipo Vía Láctea](#)).
  - El centro del halo no puede estar a menos de nueve veces el radio virial de cualquier otro halo que posea una masa mayor que el 3% de la masa virial del halo principal ([galaxias aisladas](#)).

## EL PROYECTO AURIGA

- El [proyecto Auriga](#) (Grand et al. 2017) consta de treinta halos simulados en [alta resolución](#) ( $m_{dm} = 3 \times 10^5 M_\odot$ ,  $m_b = 5 \times 10^4 M_\odot$ ) con un [contexto cosmológico](#) mediante la [técnica zoom-in](#) con el código AREPO.
- AREPO (Springel 2010) es un código [quasi-lagrangiano](#) y tipo [moving-mesh](#) que sigue la evolución tanto de la [magnetohidrodinámica](#) como de la [dinámica no-colisional](#).
- Los halos principales fueron seleccionados en el presente de una simulación que considera sólo la evolución de la materia oscura (Schaye et al. 2015) bajo dos condiciones:
  - El halo debe poseer una masa virial en el rango  $1-2 \times 10^{12} M_\odot$  ([galaxias tipo Vía Láctea](#)).
  - El centro del halo no puede estar a menos de nueve veces el radio virial de cualquier otro halo que posea una masa mayor que el 3% de la masa virial del halo principal ([galaxias aisladas](#)).

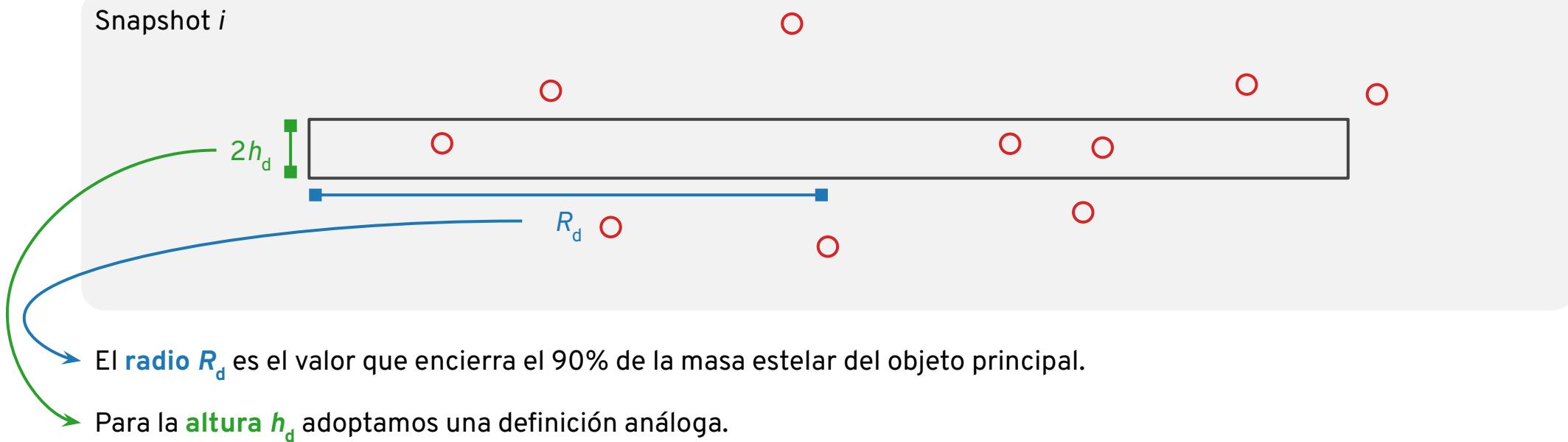
El disco estelar y el disco gaseoso están alineados durante la mayor parte de la evolución.

Las galaxias poseen –típicamente– discos bien formados en el presente y a lo largo de su evolución.

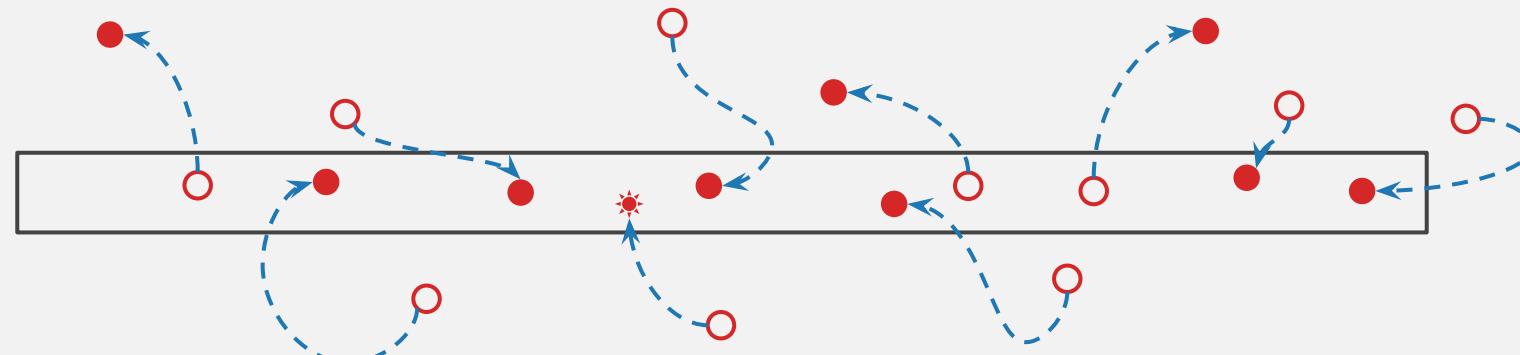
## MÉTODOS Y RESULTADOS

Tasas de acreción en galaxias simuladas

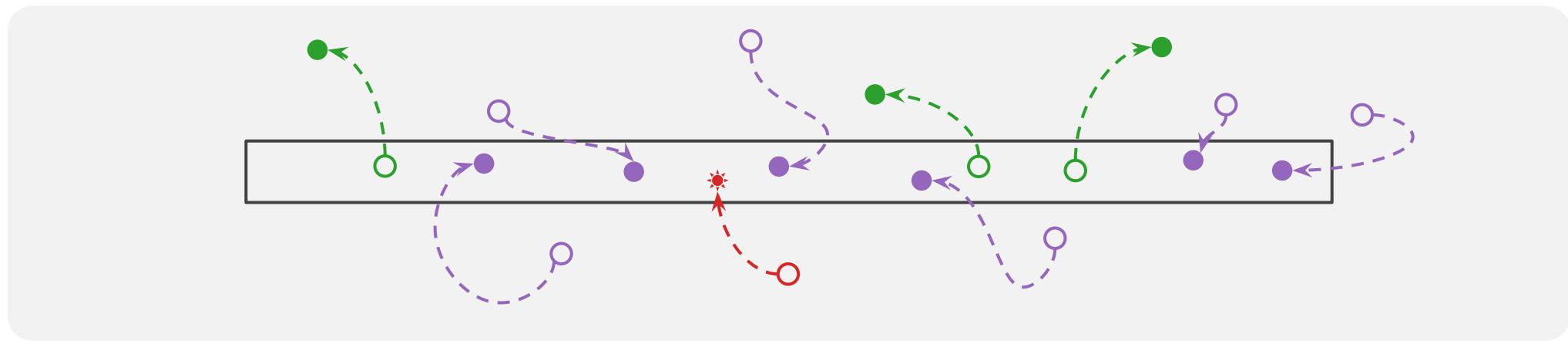
## CUANTIFICACIÓN DE LAS TASAS DE ACRECIÓN



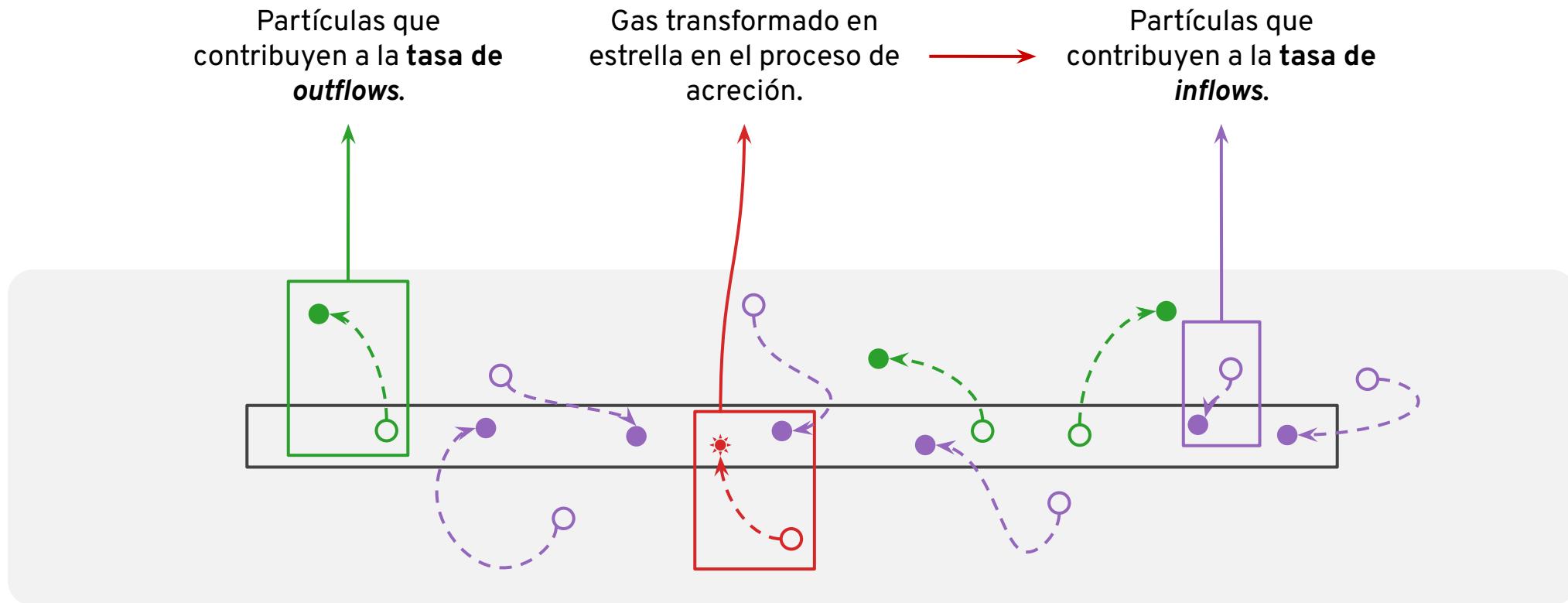
# CUANTIFICACIÓN DE LAS TASAS DE ACRECIÓN

Snapshot  $i$ Snapshot  $i+1$ 

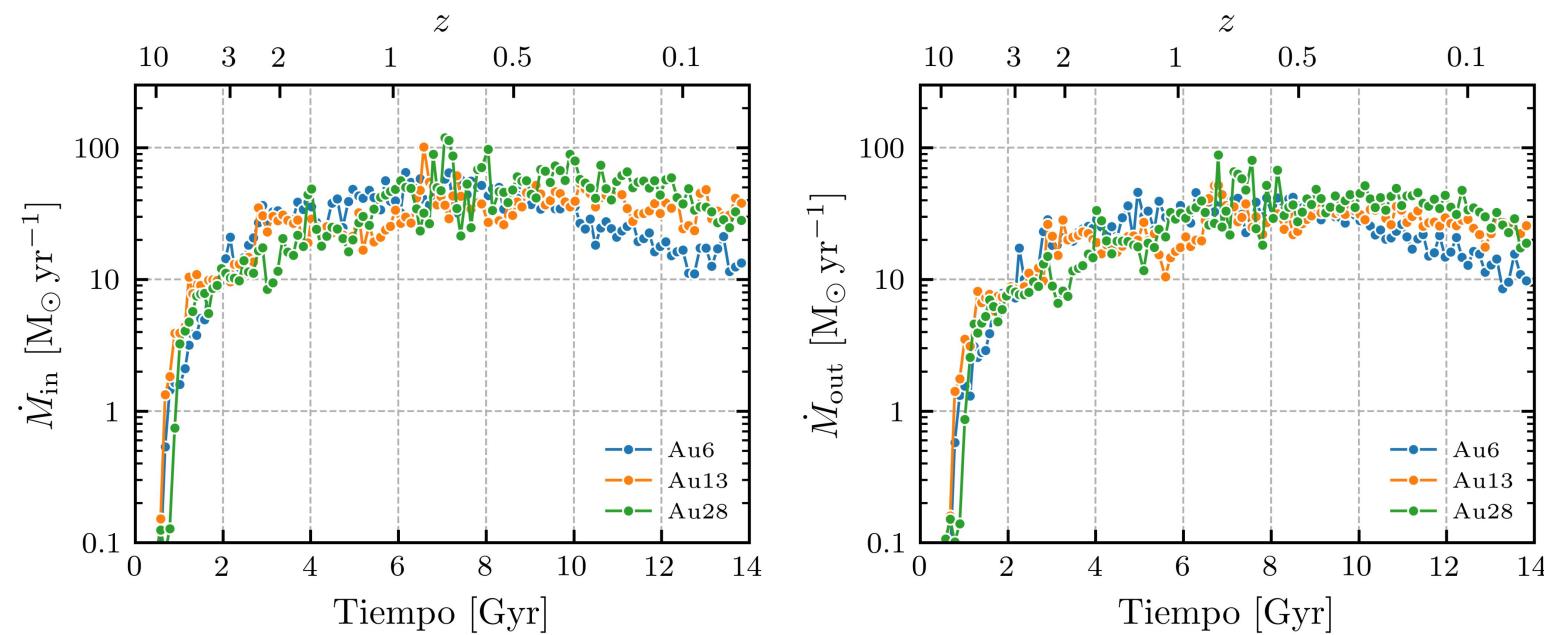
## CUANTIFICACIÓN DE LAS TASAS DE ACRECIÓN



# CUANTIFICACIÓN DE LAS TASAS DE ACRECIÓN

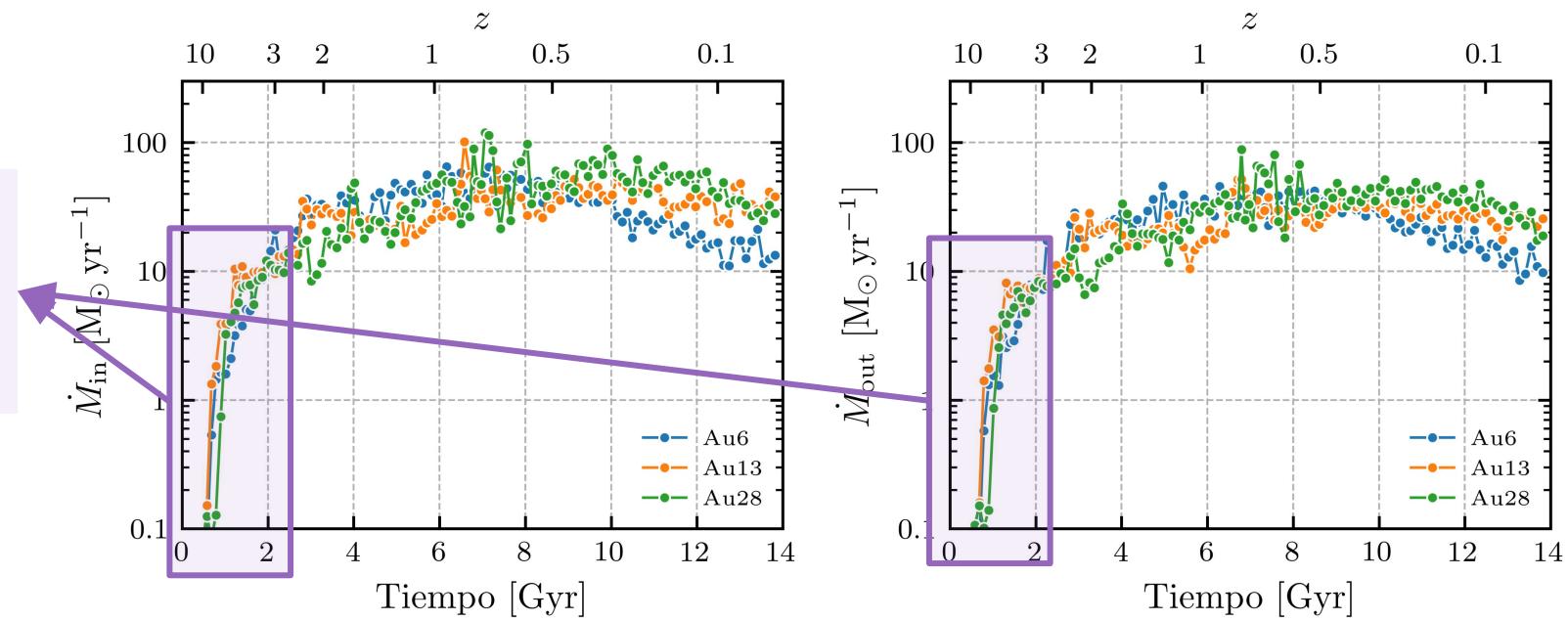


# EVOLUCIÓN DE INFLOWS Y OUTFLOWS



# EVOLUCIÓN DE INFLOWS Y OUTFLOWS

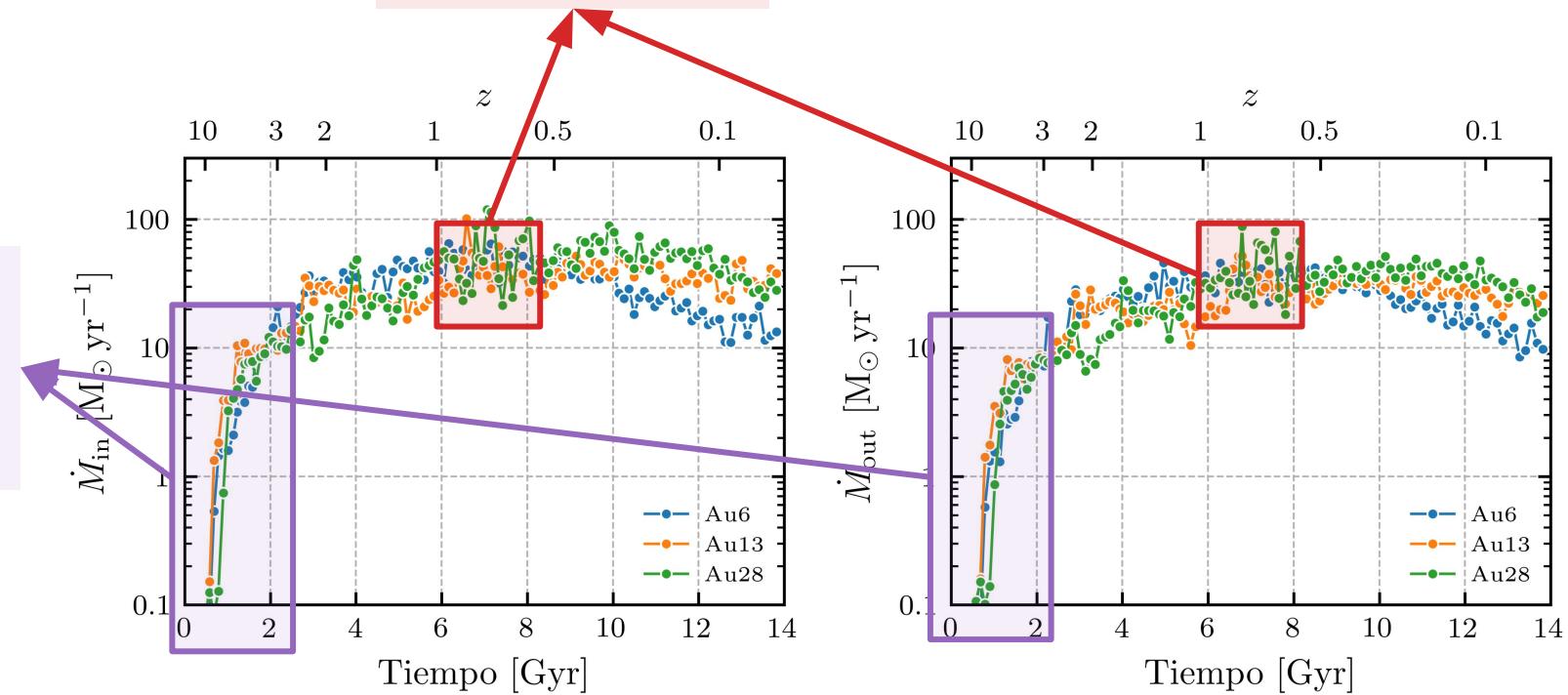
La acreción crece en  $\sim 2$  órdenes de magnitud en tiempos característicos del colapso de los halos ( $\lesssim 2$  Gyr).



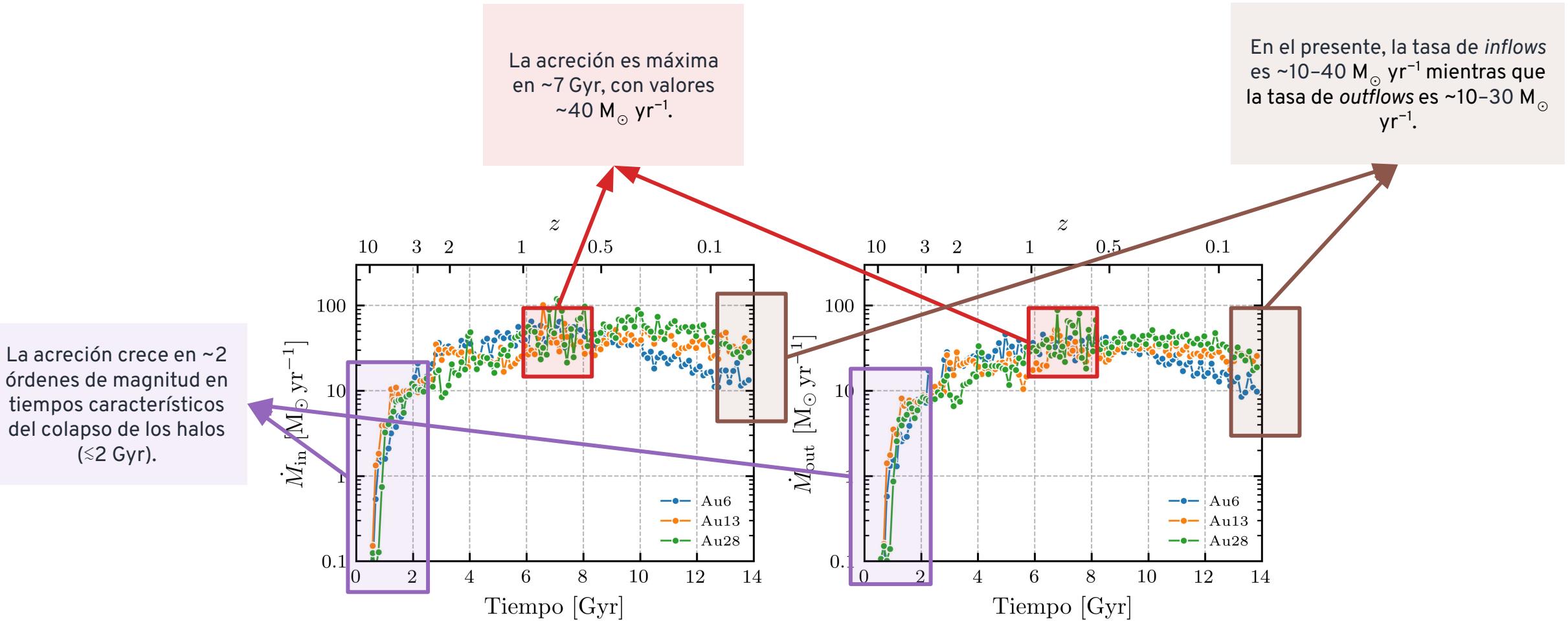
# EVOLUCIÓN DE INFLOWS Y OUTFLOWS

La acreción crece en  $\sim 2$  órdenes de magnitud en tiempos característicos del colapso de los halos ( $\lesssim 2$  Gyr).

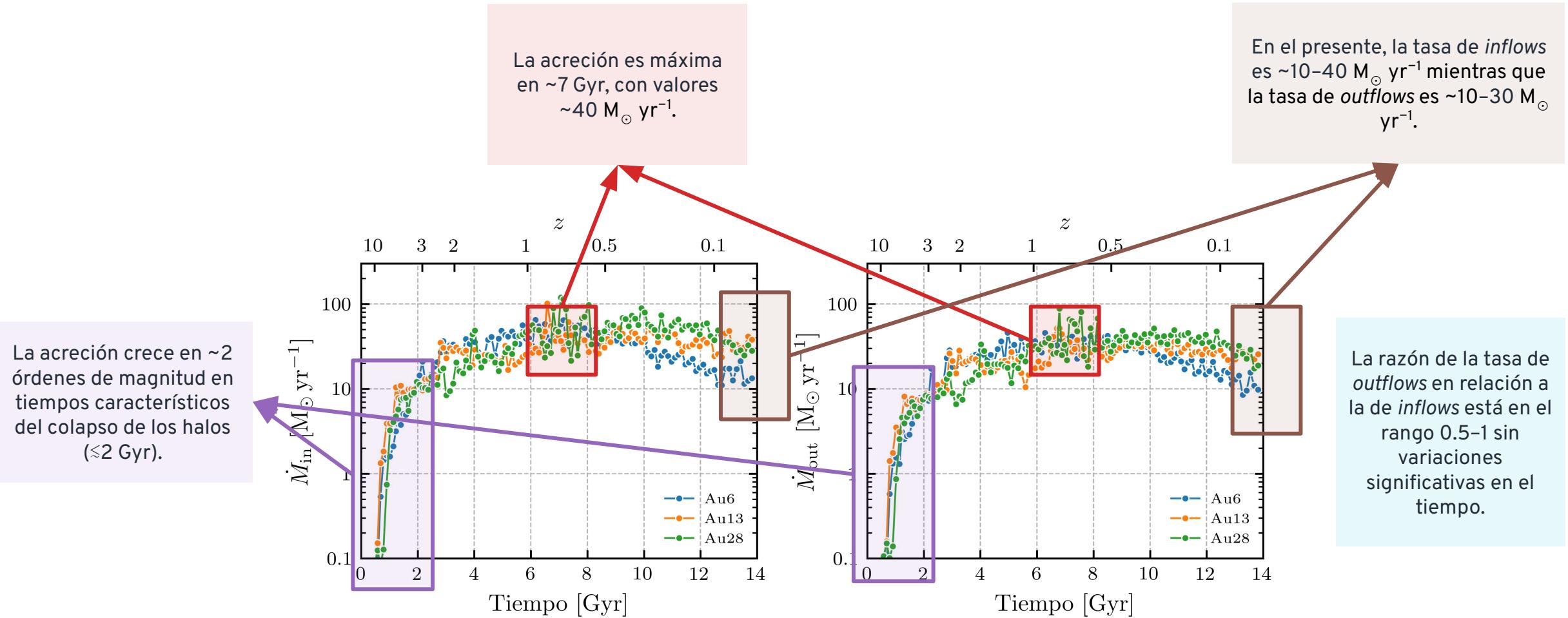
La acreción es máxima en  $\sim 7$  Gyr, con valores  $\sim 40 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ .



# EVOLUCIÓN DE INFLOWS Y OUTFLOWS



# EVOLUCIÓN DE INFLOWS Y OUTFLOWS



## ACRECIÓN NETA

La acreción *neta* puede ser estimada para toda la muestra usando información de las celdas de gas.

$$\dot{M}_{\text{net}}(i) = \frac{M_{\text{gas}}(i) - M_{\text{gas}}(i-1) + M_{\star}}{t(i) - t(i-1)}$$

Acreción *neta positiva* → Tiempos **dominados por inflows**.

Acreción *neta negativa* → Tiempos **dominados por outflows**.

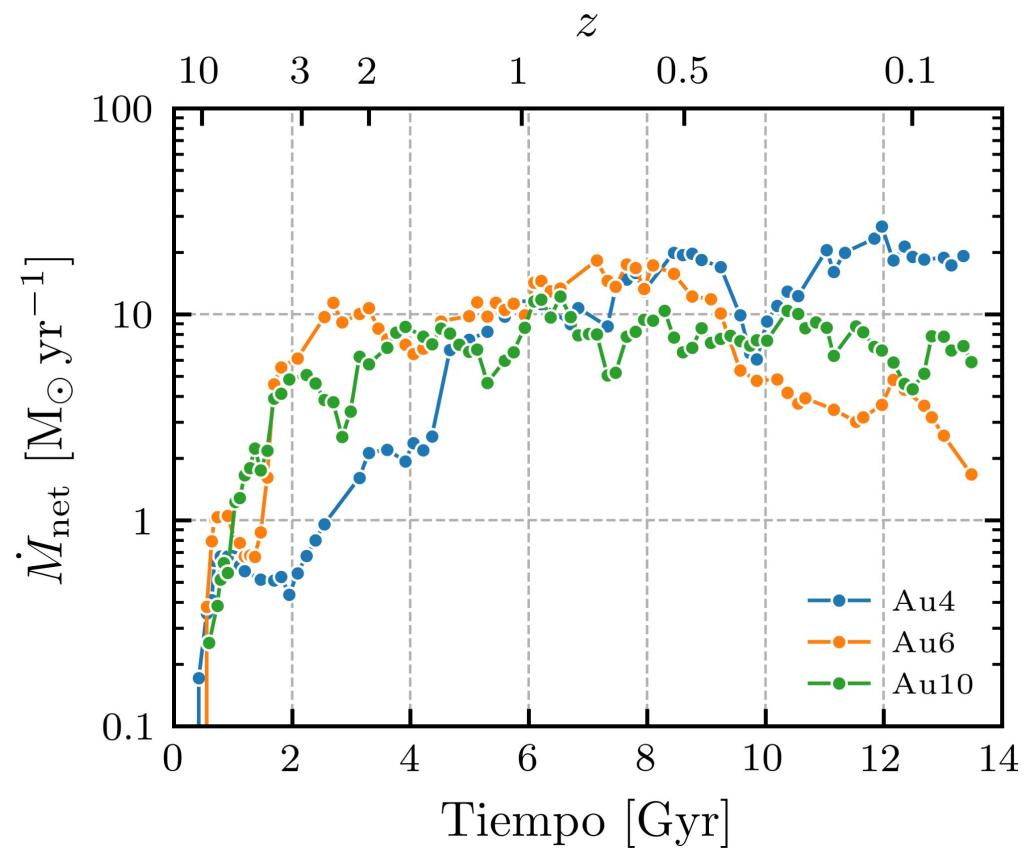
# ACRECIÓN NETA

La acreción *neta* puede ser estimada para toda la muestra usando información de las celdas de gas.

$$\dot{M}_{\text{net}}(i) = \frac{M_{\text{gas}}(i) - M_{\text{gas}}(i-1) + M_{\star}}{t(i) - t(i-1)}$$

Acreción *neta positiva* → Tiempos dominados por *inflows*.

Acreción *neta negativa* → Tiempos dominados por *outflows*.



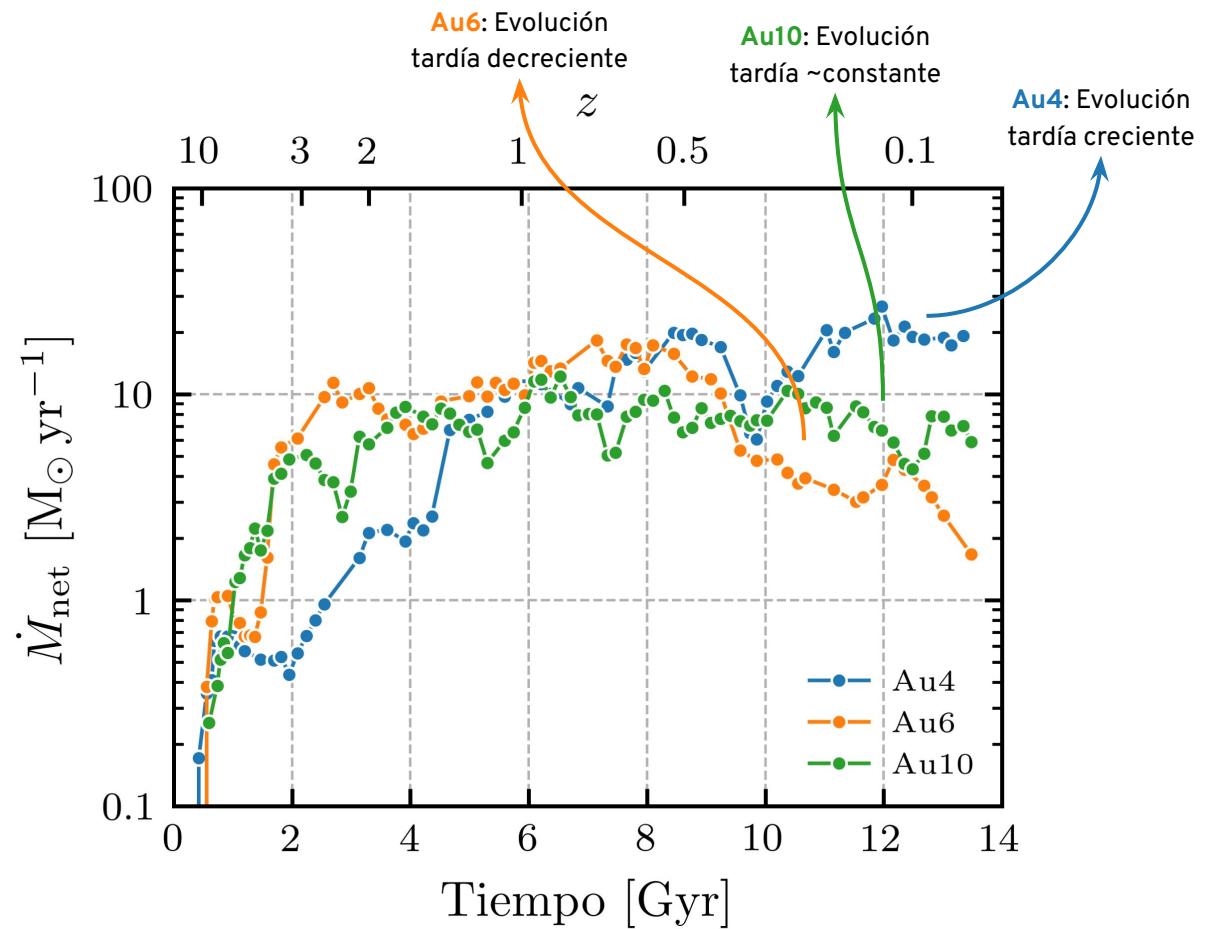
# ACRECIÓN NETA

La acreción *neta* puede ser estimada para toda la muestra usando información de las celdas de gas.

$$\dot{M}_{\text{net}}(i) = \frac{M_{\text{gas}}(i) - M_{\text{gas}}(i-1) + M_{\star}}{t(i) - t(i-1)}$$

Acreción *neta positiva* → Tiempos dominados por *inflows*.

Acreción *neta negativa* → Tiempos dominados por *outflows*.



# ACRECIÓN NETA

La acreción *neta* puede ser estimada para toda la muestra usando información de las celdas de gas.

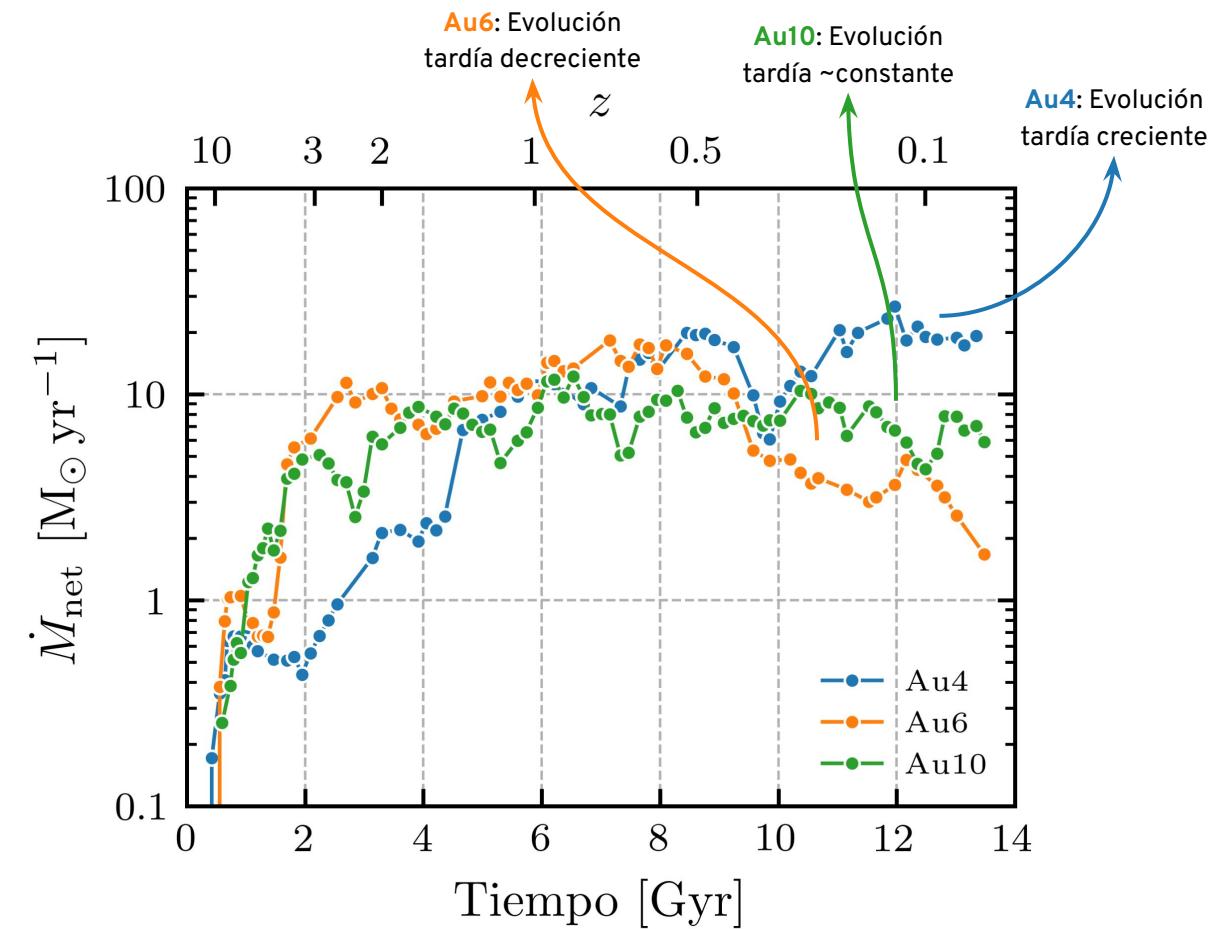
$$\dot{M}_{\text{net}}(i) = \frac{M_{\text{gas}}(i) - M_{\text{gas}}(i-1) + M_{\star}}{t(i) - t(i-1)}$$

Acreción *neta positiva* → Tiempos dominados por *inflows*.

Acreción *neta negativa* → Tiempos dominados por *outflows*.

Los tiempos dominados por *inflows* dominan frente a los dominados por *outflows*.

Los valores máximos de la acreción neta se encuentran en ~6–8 Gyr, con valores en el orden ~10–20  $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ .



## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA

En base al comportamiento observado en la evolución de la acreción neta, asignamos las galaxias a tres grupos.

## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA

En base al comportamiento observado en la evolución de la acreción neta, asignamos las galaxias a tres grupos.

### G1: Au6, Au9...

- Galaxias con acreción neta tardía decreciente.
- Crecimiento suave del disco durante los últimos ~8 Gyr de evolución.
- Consideradas **galaxias tipo Vía Láctea.**

## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA

En base al comportamiento observado en la evolución de la acreción neta, asignamos las galaxias a tres grupos.

### G1: Au6, Au9...

- Galaxias con acreción neta tardía decreciente.
- Crecimiento suave del disco durante los últimos ~8 Gyr de evolución.
- Consideradas **galaxias tipo Vía Láctea**.

### G2: Au7, Au20...

- Galaxias con acreción neta tardía creciente o ~constante.
- Episodios de destrucción parcial/total del disco luego de 4 Gyr.

## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA

En base al comportamiento observado en la evolución de la acreción neta, asignamos las galaxias a tres grupos.

### G1: Au6, Au9...

- Galaxias con acreción neta tardía decreciente.
- Crecimiento suave del disco durante los últimos ~8 Gyr de evolución.
- Consideradas **galaxias tipo Vía Láctea**.

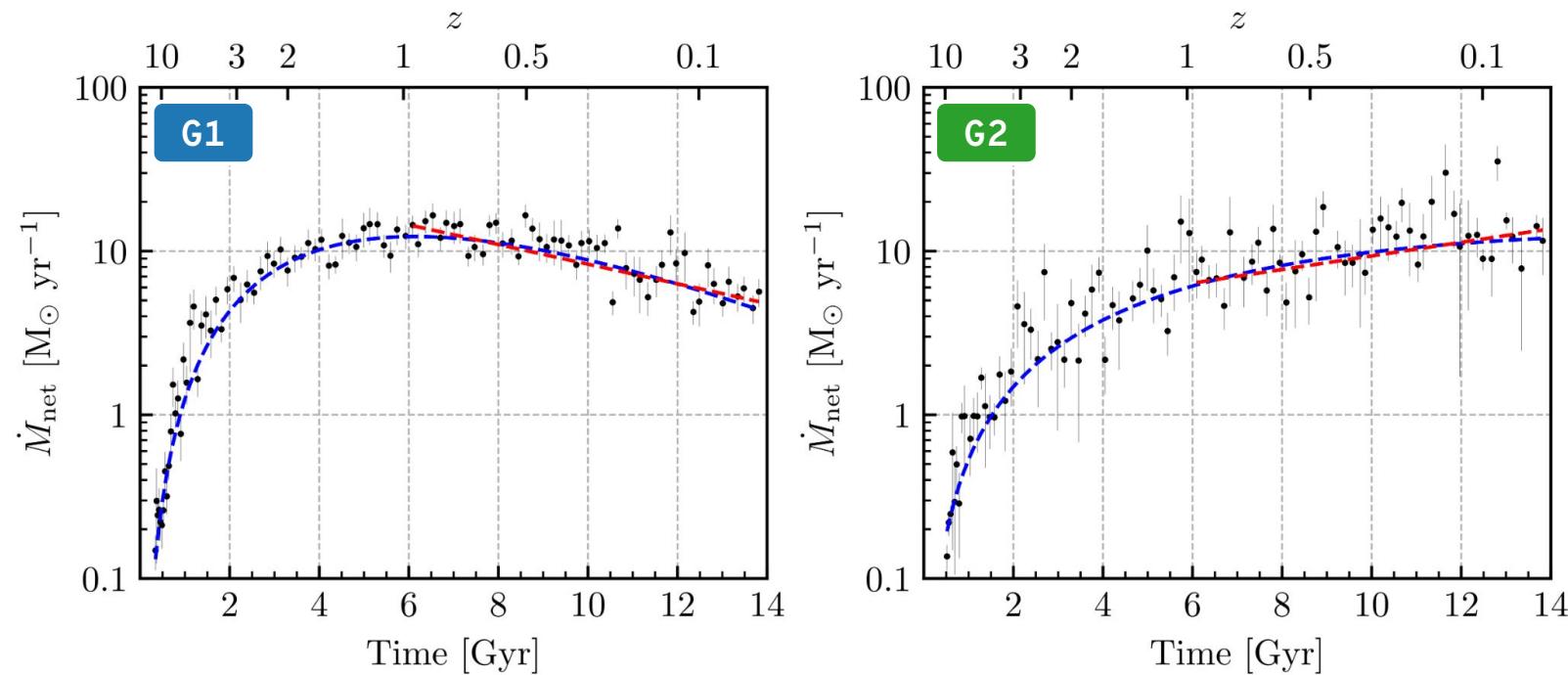
### G2: Au7, Au20...

- Galaxias con acreción neta tardía creciente o ~constante.
- Episodios de destrucción parcial/total del disco luego de 4 Gyr.

### E: Au1, Au30...

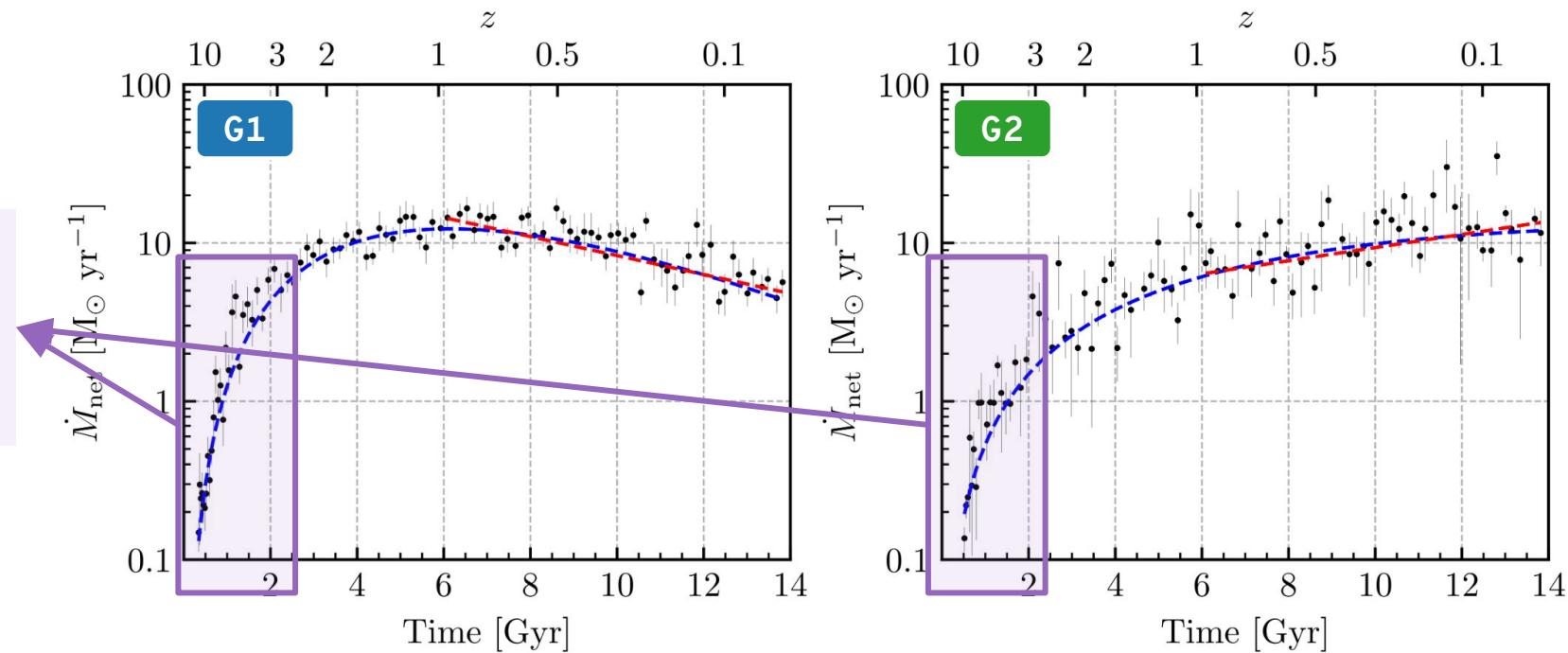
- Galaxias con acreción neta altamente irregular.
- Perturbaciones fuertes en la evolución galáctica.

## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA



## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA

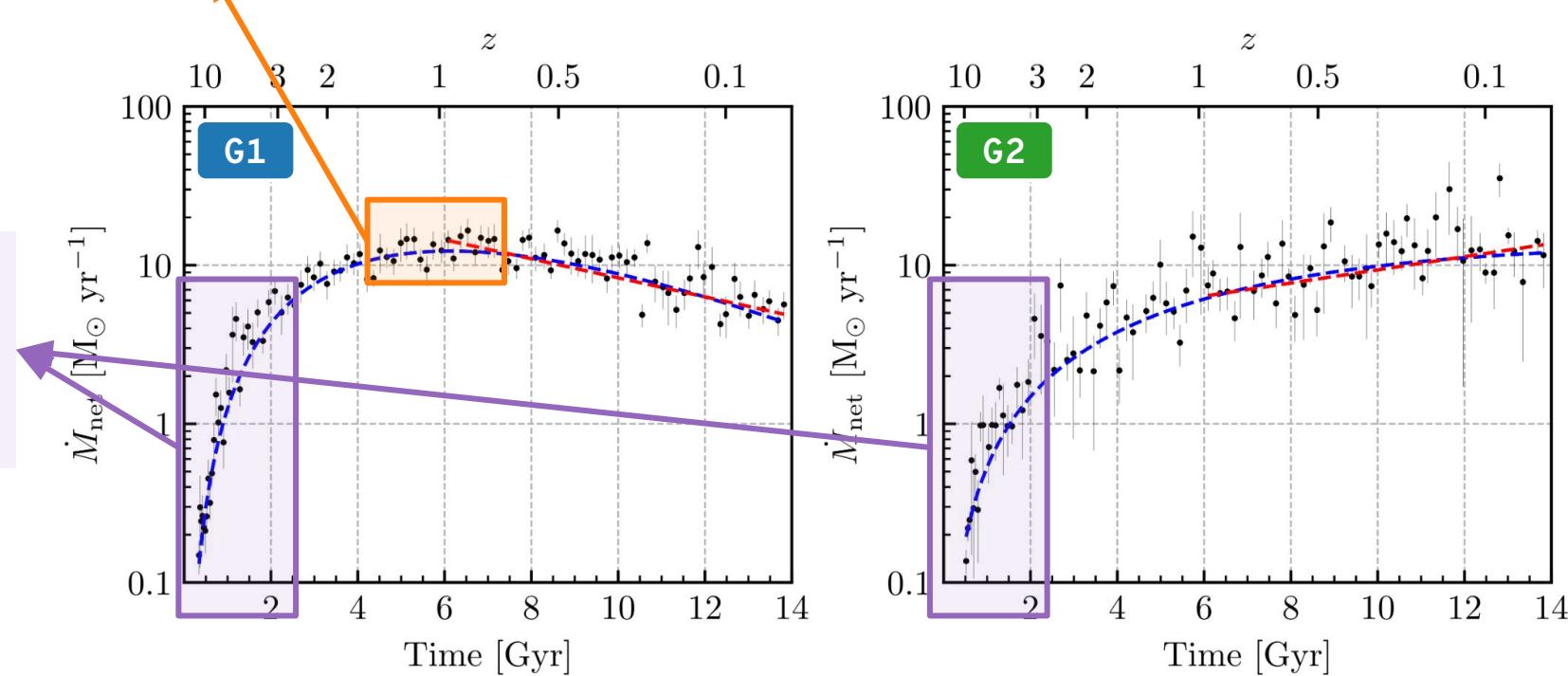
Ambos grupos muestran un incremento rápido de la acreción neta a tiempos tempranos ( $\leq 2$  Gyr).



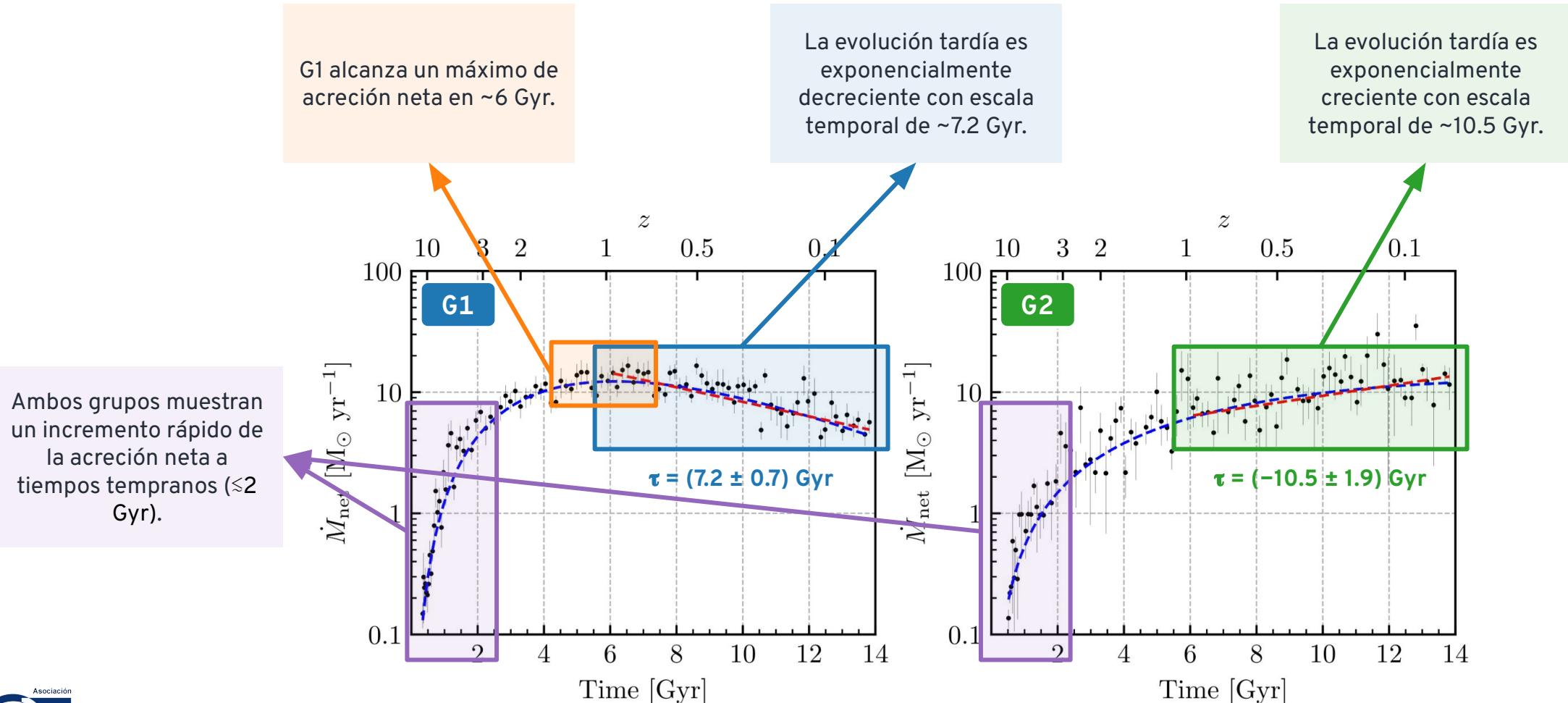
## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA

Ambos grupos muestran un incremento rápido de la acreción neta a tiempos tempranos ( $\leq 2$  Gyr).

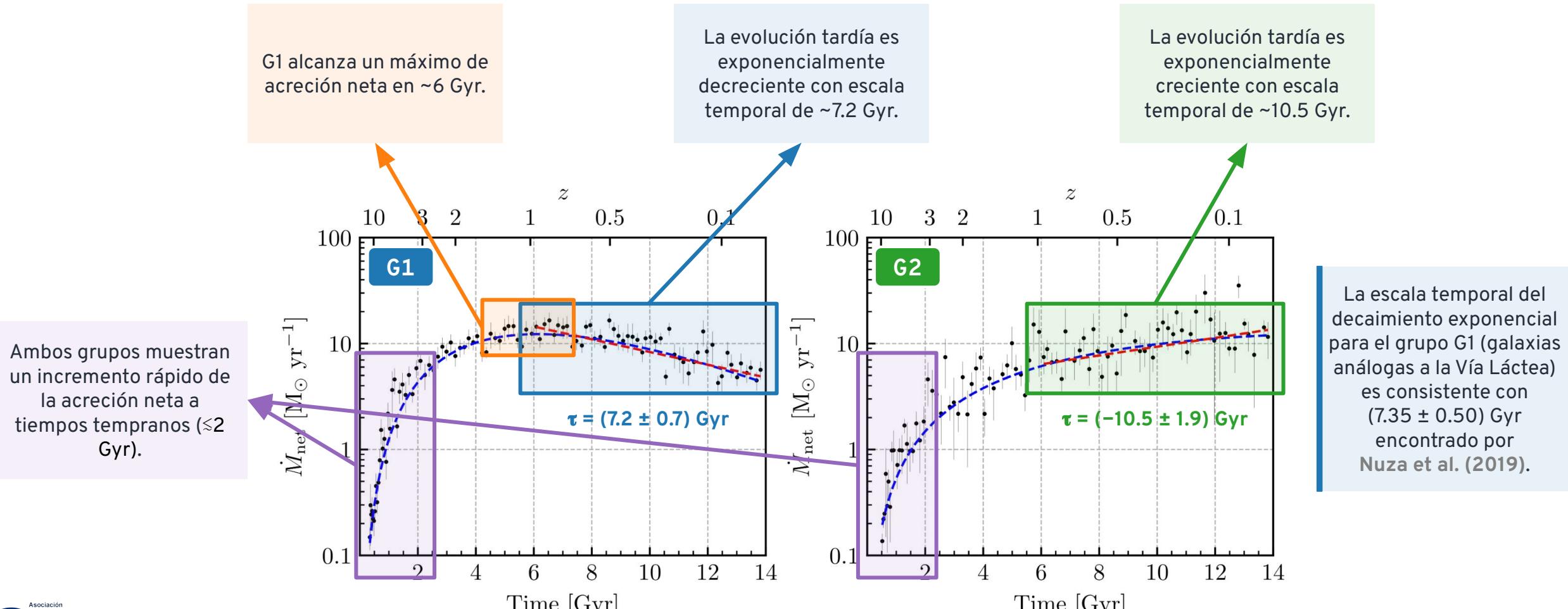
G1 alcanza un máximo de acreción neta en  $\sim 6$  Gyr.



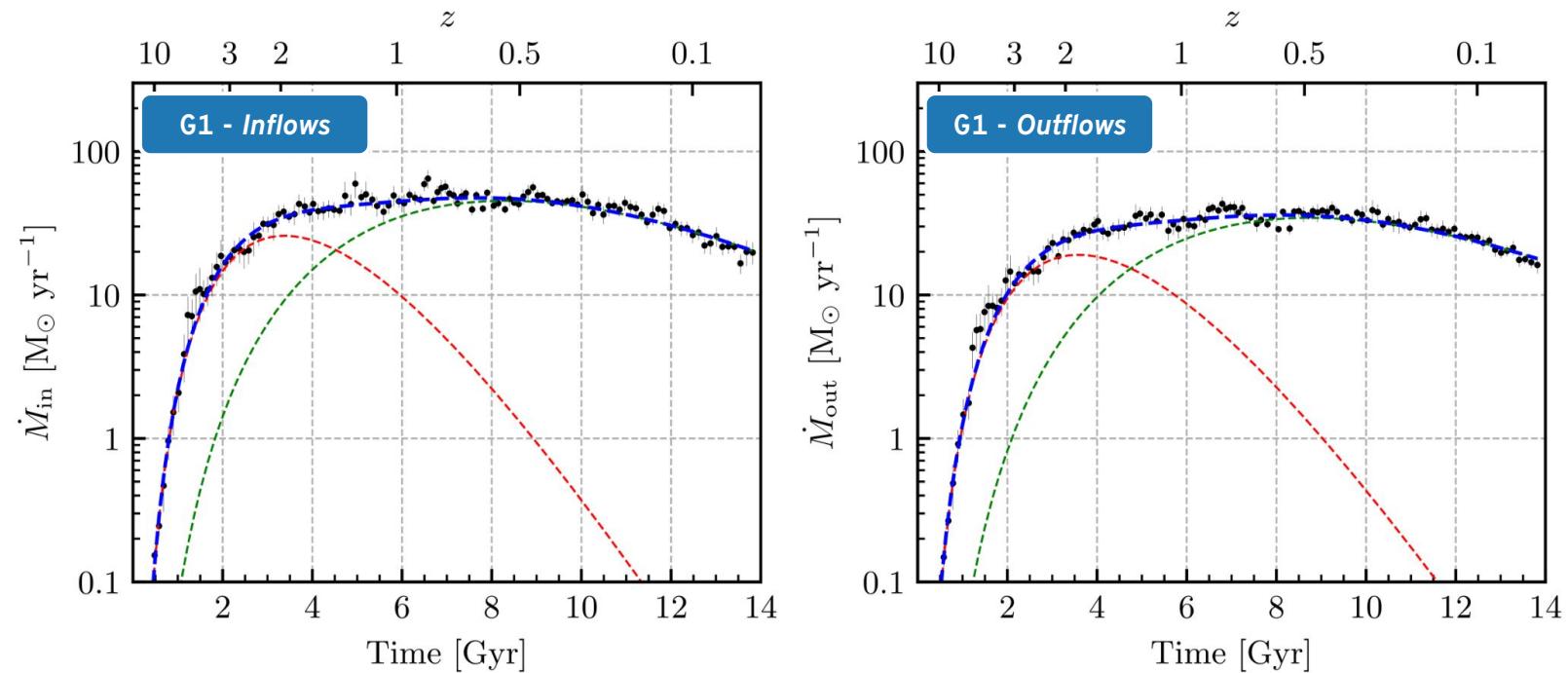
## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA



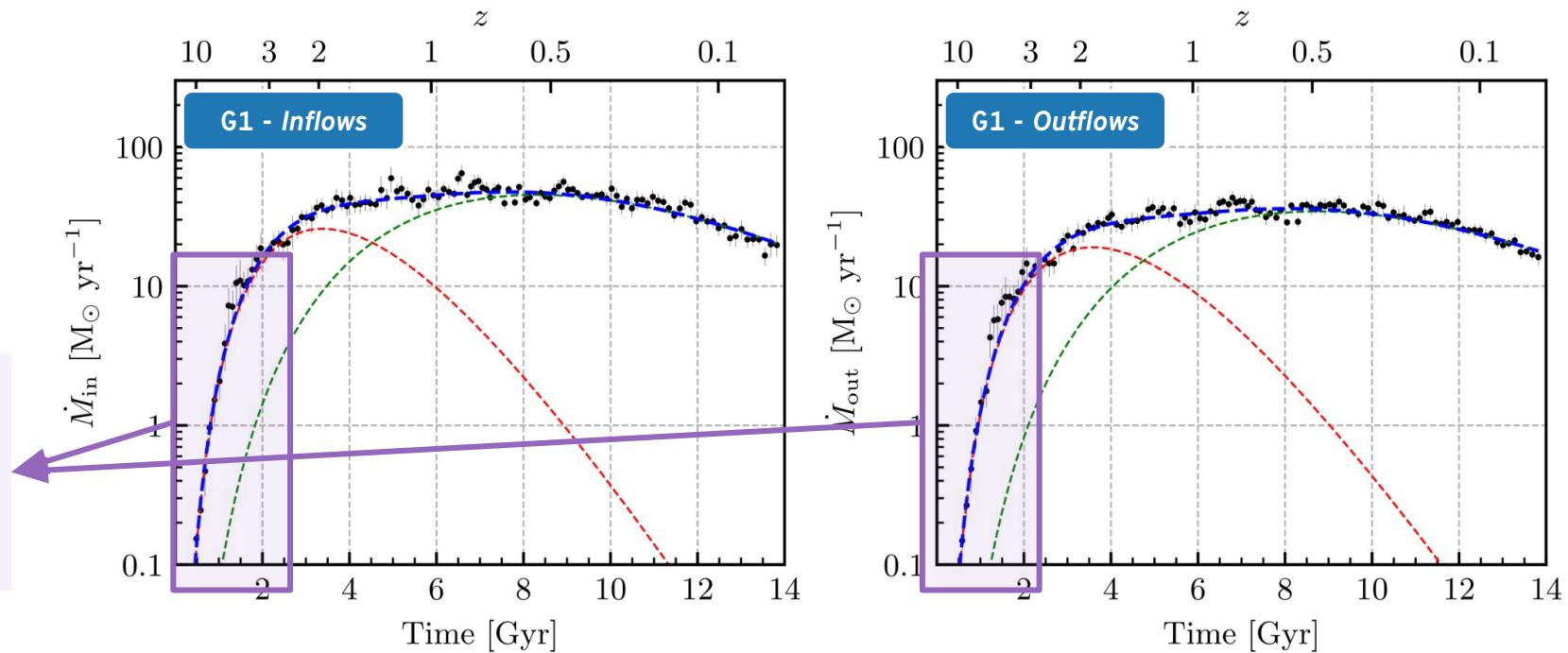
## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA



## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA



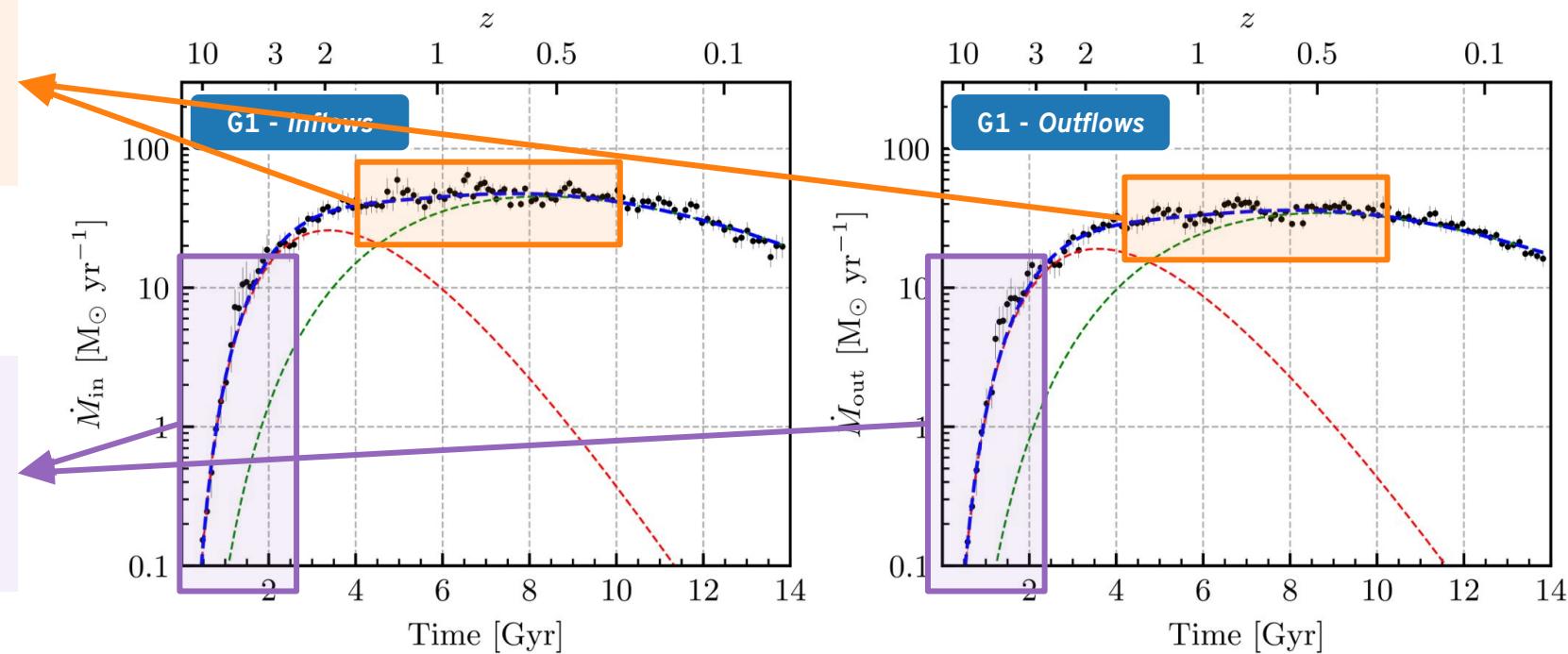
## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA



## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA

Entre  $\sim 4$  Gyr y  $\sim 10$  Gyr,  
tanto *inflows* como  
*outflows* permanecen  
aproximadamente  
constante.

Los *inflows* alcanzan  
tasas de  $\sim 15 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  en  
 $\sim 2$  Gyr mientras que los  
*outflows* llegan a  $\sim 10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$   
en ese tiempo.

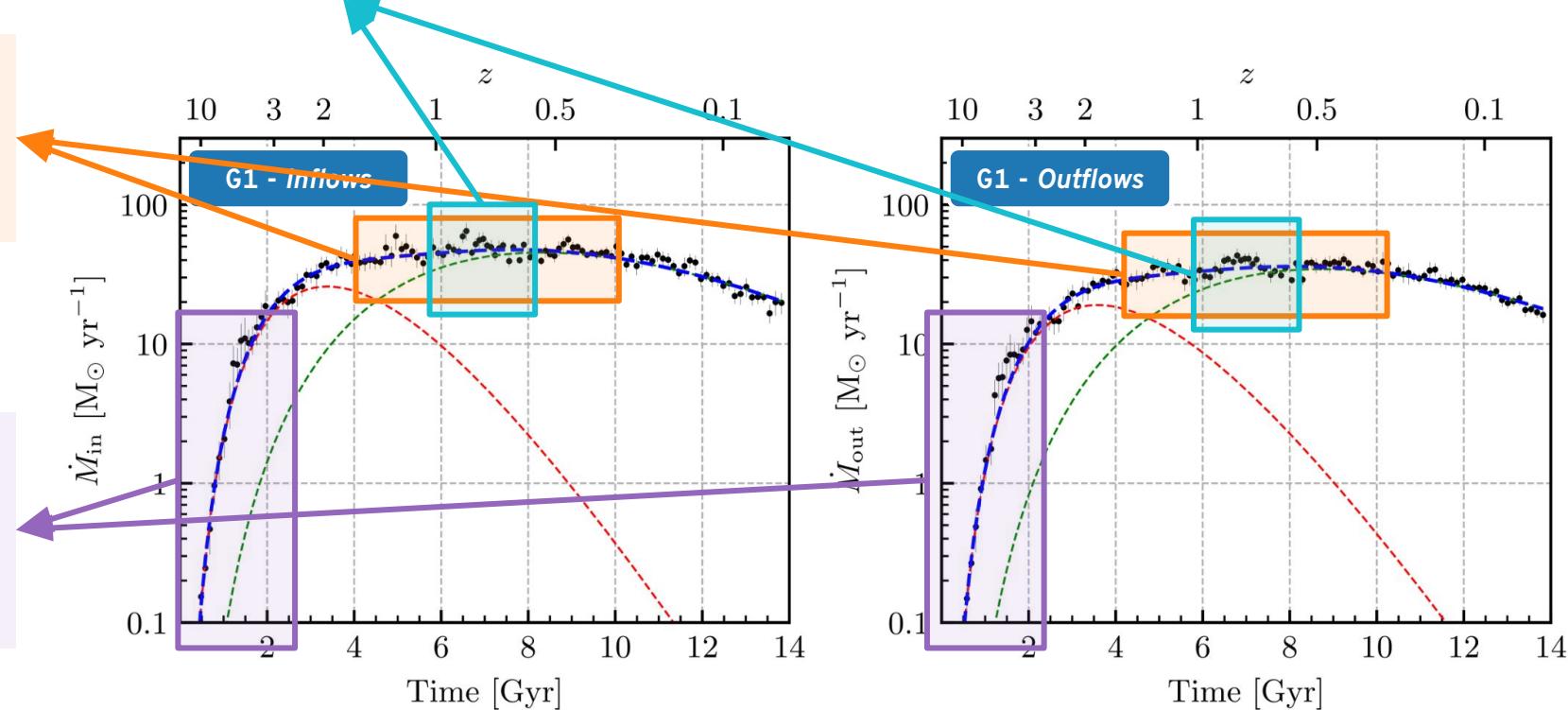


## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA

Entre  $\sim 4$  Gyr y  $\sim 10$  Gyr, tanto *inflows* como *outflows* permanecen aproximadamente constantes.

Los *inflows* alcanzan tasas de  $\sim 15 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  en  $\sim 2$  Gyr mientras que los *outflows* llegan a  $\sim 10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  en ese tiempo.

Se alcanzan valores máximos de  $\sim 50 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  en  $\sim 6.5$  Gyr (*inflows*) y de  $\sim 40 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  en  $\sim 7.0$  Gyr (*outflows*).



## COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LA MUESTRA

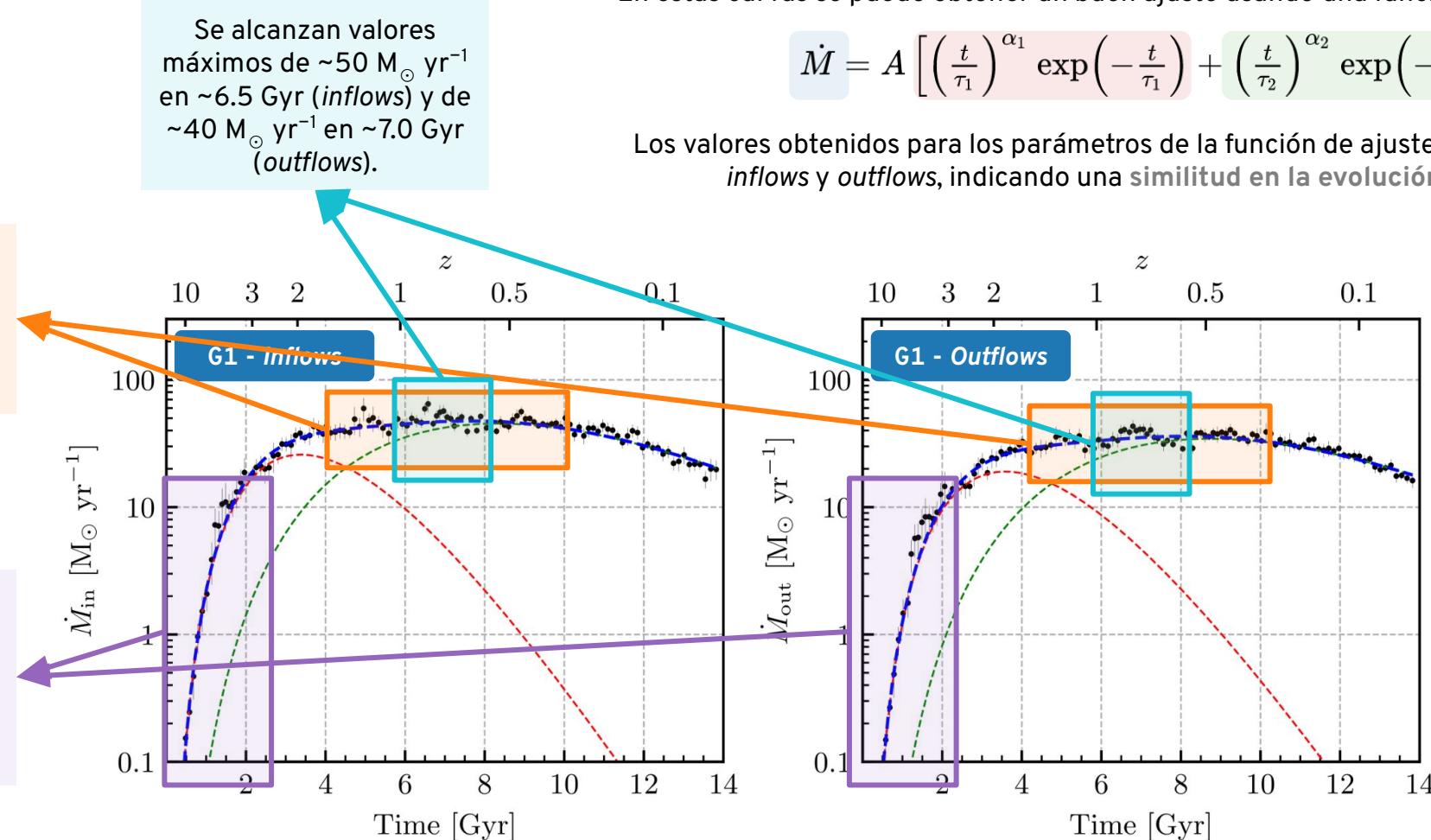
En estas curvas se puede obtener un buen ajuste usando una función doble Schechter:

$$\dot{M} = A \left[ \left( \frac{t}{\tau_1} \right)^{\alpha_1} \exp \left( -\frac{t}{\tau_1} \right) + \left( \frac{t}{\tau_2} \right)^{\alpha_2} \exp \left( -\frac{t}{\tau_2} \right) \right]$$

Los valores obtenidos para los parámetros de la función de ajuste son similares para *inflows* y *outflows*, indicando una similitud en la evolución temporal.

Entre ~4 Gyr y ~10 Gyr, tanto *inflows* como *outflows* permanecen aproximadamente constantes.

Los *inflows* alcanzan tasas de  $\sim 15 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  en  $\sim 2$  Gyr mientras que los *outflows* llegan a  $\sim 10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  en ese tiempo.



## RESUMEN Y CONCLUSIONES

La tasa de acreción neta para las galaxias análogas a la Vía Láctea alcanza un máximo de  $\sim 10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ; luego muestra un decrecimiento exponencial con una escala temporal de 7.2 Gyr.

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

La tasa de acreción neta para las galaxias análogas a la Vía Láctea alcanza un máximo de  $\sim 10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ; luego muestra un decrecimiento exponencial con una escala temporal de 7.2 Gyr.

La evolución de la tasa de *inflows* y *outflows* está dominada por dos etapas características de la formación del bulbo y del disco.

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

La tasa de acreción neta para las galaxias análogas a la Vía Láctea alcanza un máximo de  $\sim 10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ; luego muestra un decrecimiento exponencial con una escala temporal de 7.2 Gyr.

La evolución de la tasa de *inflows* y *outflows* está dominada por dos etapas características de la formación del bulbo y del disco.

Los *inflows* son dominantes frente a los *outflows*, comportamiento que se mantiene para todas las galaxias y a lo largo del tiempo.

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

La tasa de acreción neta para las galaxias análogas a la Vía Láctea alcanza un máximo de  $\sim 10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ; luego muestra un decrecimiento exponencial con una escala temporal de 7.2 Gyr.

La evolución de la tasa de *inflows* y *outflows* está dominada por dos etapas características de la formación del bulbo y del disco.

Los *inflows* son dominantes frente a los *outflows*, comportamiento que se mantiene para todas las galaxias y a lo largo del tiempo.

A cada tiempo, entre 10% y 30% del gas acretado se transforma en estrellas.

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

La tasa de acreción neta para las galaxias análogas a la Vía Láctea alcanza un máximo de  $\sim 10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ; luego muestra un decrecimiento exponencial con una escala temporal de 7.2 Gyr.

La evolución de la tasa de *inflows* y *outflows* está dominada por dos etapas características de la formación del bulbo y del disco.

Los *inflows* son dominantes frente a los *outflows*, comportamiento que se mantiene para todas las galaxias y a lo largo del tiempo.

A cada tiempo, entre 10% y 30% del gas acretado se transforma en estrellas.

El *feedback* producido por la formación de estrellas genera vientos en la región del disco que producen *outflows* que remueven material del mismo.

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

La tasa de acreción neta para las galaxias análogas a la Vía Láctea alcanza un máximo de  $\sim 10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ; luego muestra un decrecimiento exponencial con una escala temporal de 7.2 Gyr.

La evolución de la tasa de *inflows* y *outflows* está dominada por dos etapas características de la formación del bulbo y del disco.

Los *inflows* son dominantes frente a los *outflows*, comportamiento que se mantiene para todas las galaxias y a lo largo del tiempo.

A cada tiempo, entre 10% y 30% del gas acretado se transforma en estrellas.

El *feedback* producido por la formación de estrellas genera vientos en la región del disco que producen *outflows* que remueven material del mismo.

La correlación entre *inflows*, *outflows* y formación estelar (SFR) en el disco indica la importancia que poseen los flujos de gas en la determinación de la componente estelar de las galaxias.

# **SLIDES ADICIONALES**

# MÓDULOS FÍSICOS INCLUIDOS EN LAS SIMULACIONES

## ENFRIAMIENTO DEL GAS

El gas se enfriá en base a su función de enfriamiento  $\Lambda(z, T)$ , que depende tanto de la metalicidad  $z$  como de la temperatura  $T$ .

## FORMACIÓN ESTELAR

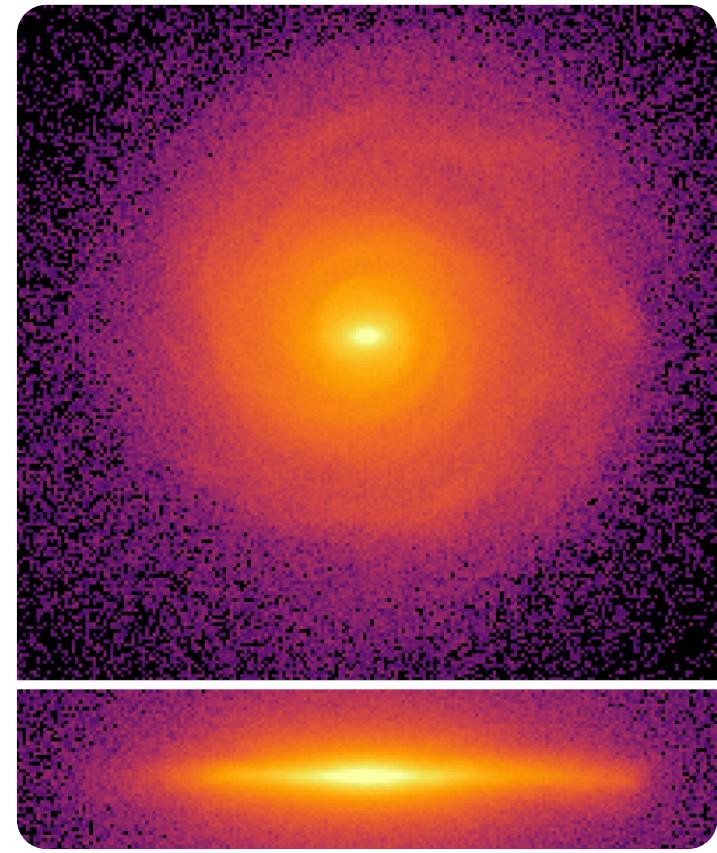
El gas puede formar estrellas cuando su densidad supera un umbral de  $0.13 \text{ cm}^{-3}$ . Las mismas se forman de manera estocástica con escala  $\tau = 2.2 \text{ Gyr}$ .

## FEEDBACK ESTELAR

Cada partícula estelar representa una población de estrellas con una dada edad y metalicidad. La implementación de *feedback* de SNIa, SNII y AGB posibilita la creación de vientos y la redistribución de masa y metales en la galaxia.

## OTROS PROCESOS SUBGRILLA

- Creación y acreción de gas a agujeros negros.
- Dinámica de campos magnéticos.
- Fondo UV espacialmente uniforme.
- Tratamiento de nueve elementos químicos. H, He, C, O, N, Ne, Mg, Si, Fe.

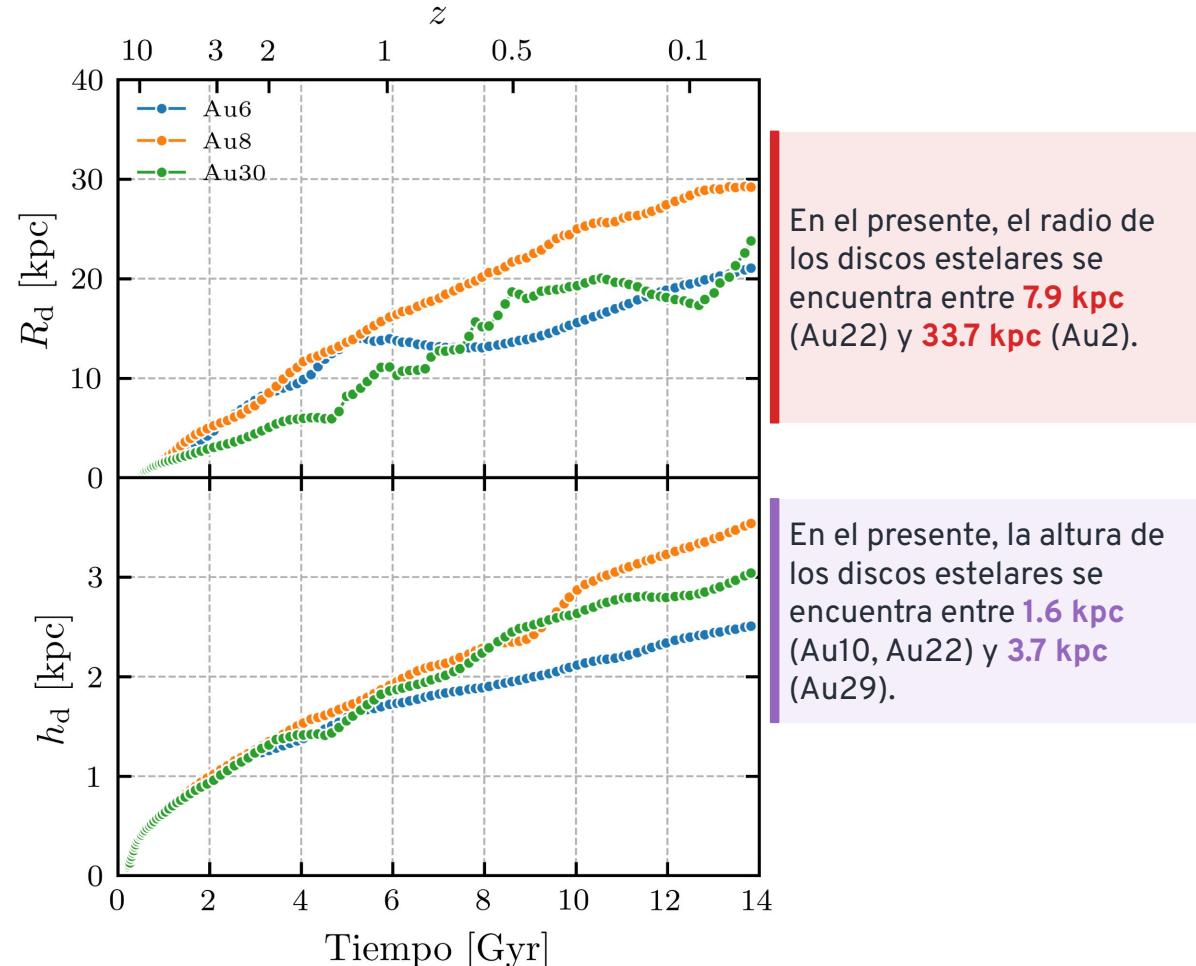


Au6

# DEFINICIÓN DEL DISCO ESTELAR

Para definir el disco estelar se utilizan dos parámetros: **radio** y **altura** sobre el plano.

- El radio  $R_d$  es el valor que encierra el 90% de la masa estelar del objeto principal.
- La altura  $h_d$  es el promedio de la altura sobre el disco del plano que encierra el 90% de la masa estelar y la análoga debajo del disco del plano.
- Se incluyen, además, correcciones menores a tiempos tempranos ( $< 4$  Gyr).

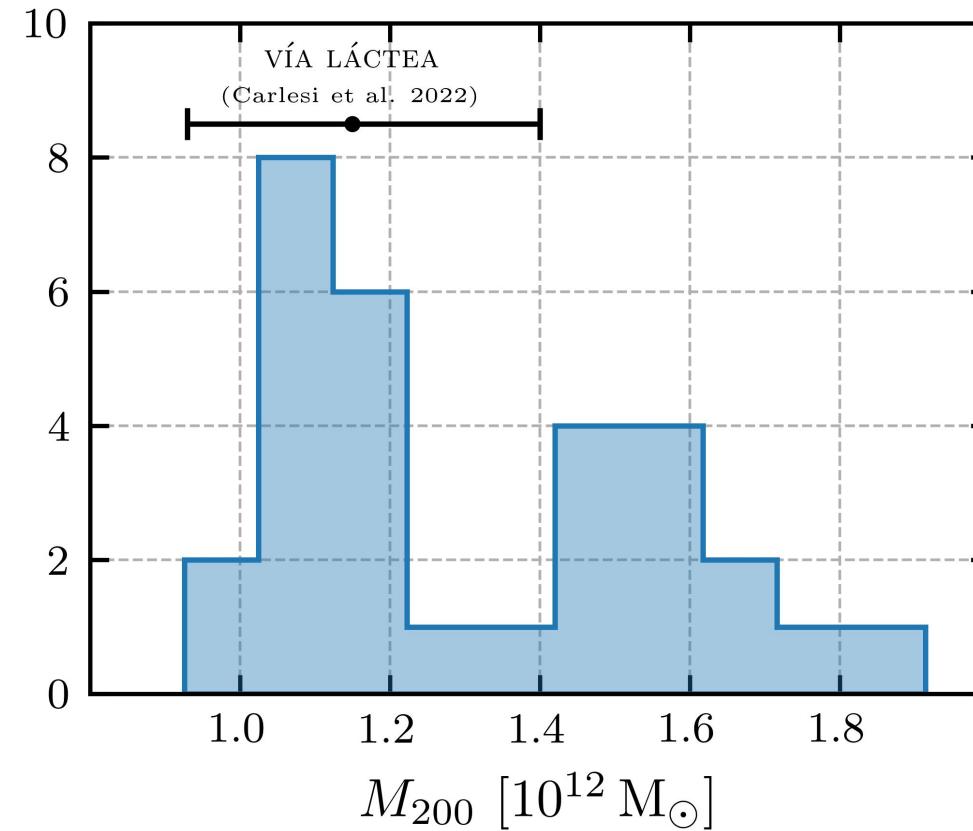


En el presente, el radio de los discos estelares se encuentra entre **7.9 kpc** (Au22) y **33.7 kpc** (Au2).

En el presente, la altura de los discos estelares se encuentra entre **1.6 kpc** (Au10, Au22) y **3.7 kpc** (Au29).

# PROPIEDADES DE LAS GALAXIAS SIMULADAS

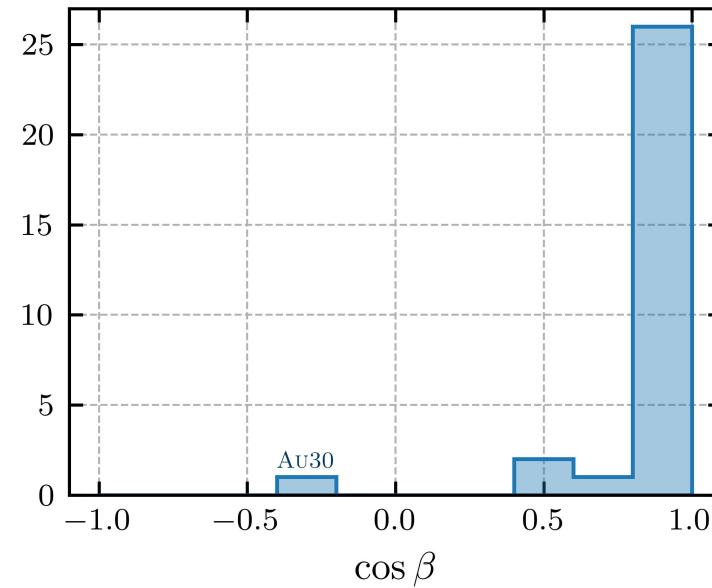
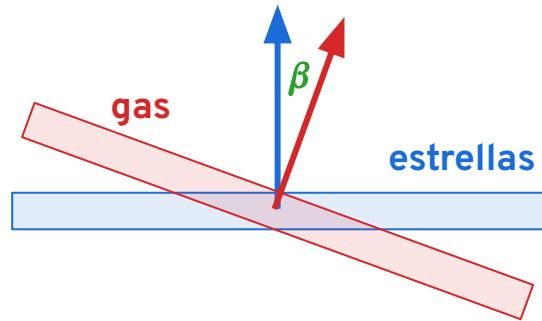
Masas típicas en el orden de magnitud de la masa de la Vía Láctea.



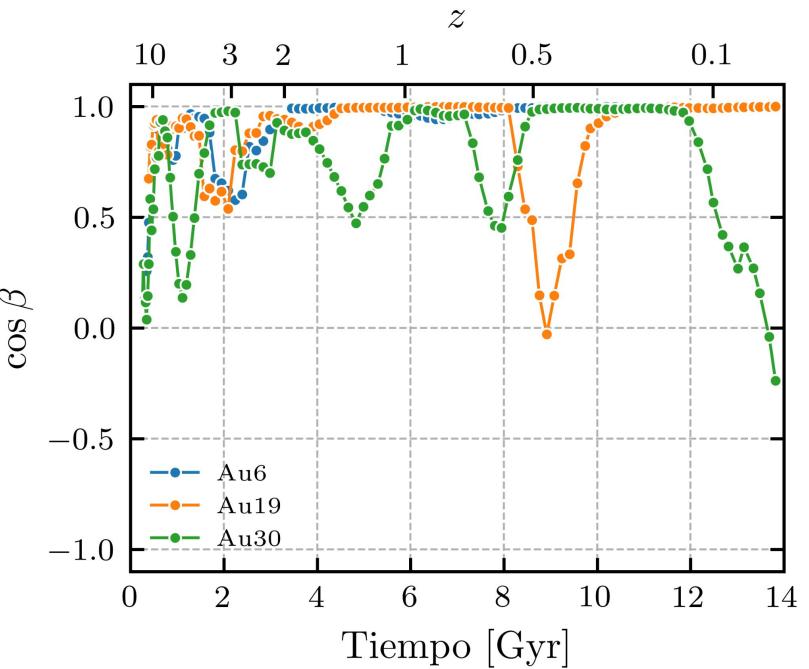
# PROPIEDADES DE LAS GALAXIAS SIMULADAS

Masas típicas en el orden de magnitud de la masa de la Vía Láctea.

El disco estelar y el disco gaseoso están alineados durante la mayor parte de la evolución.



Definimos  $\beta$  como el ángulo entre el momento angular específico de la componente estelar y el análogo correspondiente a la componente gaseosa.



# PROPIEDADES DE LAS GALAXIAS SIMULADAS

Masas típicas en el orden de magnitud de la masa de la Vía Láctea.

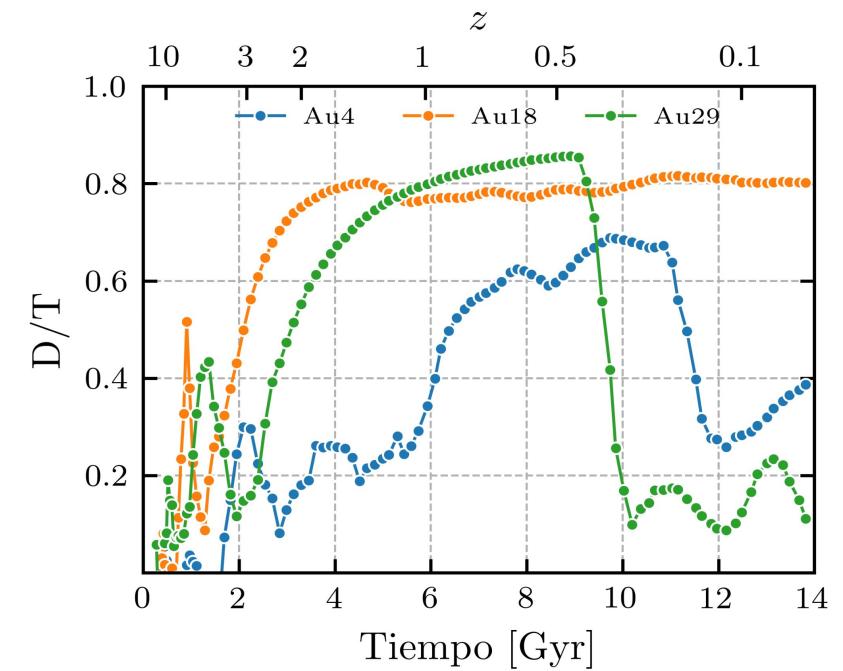
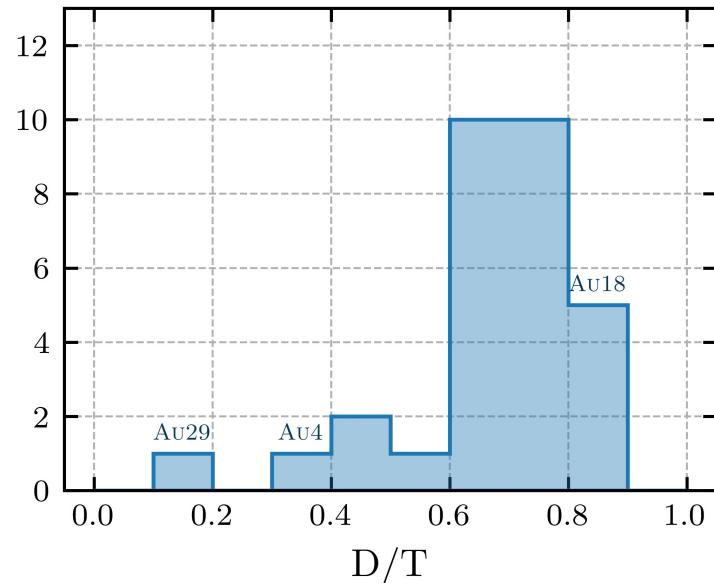
El disco estelar y el disco gaseoso están alineados durante la mayor parte de la evolución.

Las galaxias poseen –típicamente– discos bien formados en el presente y a lo largo de su evolución.

$$\epsilon = \frac{j_z}{j_{\text{circ}}}$$

$$j_{\text{circ}}(r) = r \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

$$D/T = \frac{M_{\epsilon>0}^* - M_{\epsilon<0}^*}{M^*}$$



# RELACIÓN ENTRE INFLOWS, OUTFLOWS Y SFR

