

ESTRUCTURA GALÁCTICA Y DINÁMICA ESTELAR

La Evolución de la Vía-Láctea

escenarios de formación

El Colapso monolítico

- **Observaciones:** estrellas en la vecindad solar con velocidades espaciales conocidas
- **Metodología:** modelaje de las orbitas
- **Análisis:** ϵ (excentricidad), w (energía de oscilación vertical, E_z) y h (momento angular, L_z) se correlacionan con la Z (metalicidad, medida por el exceso UV)

EVIDENCE FROM THE MOTIONS OF OLD STARS THAT THE GALAXY COLLAPSED

O. J. EGGEN, D. LYNDEN-BELL,* AND A. R. SANDAGE
Mount Wilson and Palomar Observatories
Carnegie Institution of Washington, California Institute of Technology

(1962) ApJ 136, 748 🍌

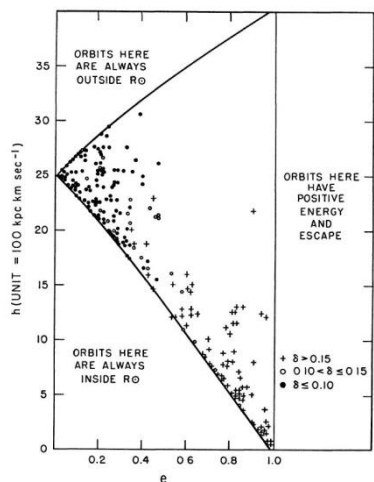


FIG. 9.—The correlation between eccentricity and angular momentum. Regions expected to be free of stars represented by our sample are marked.

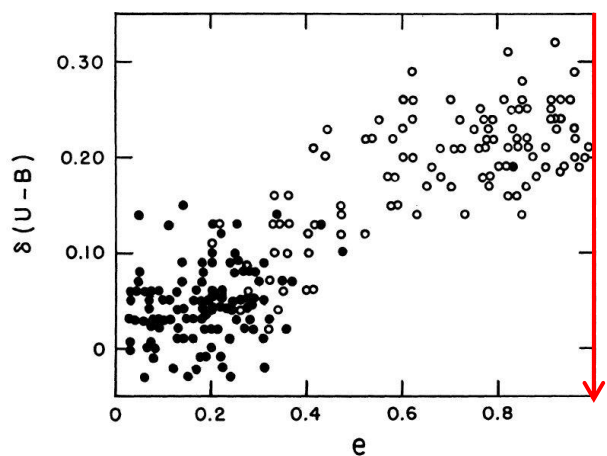
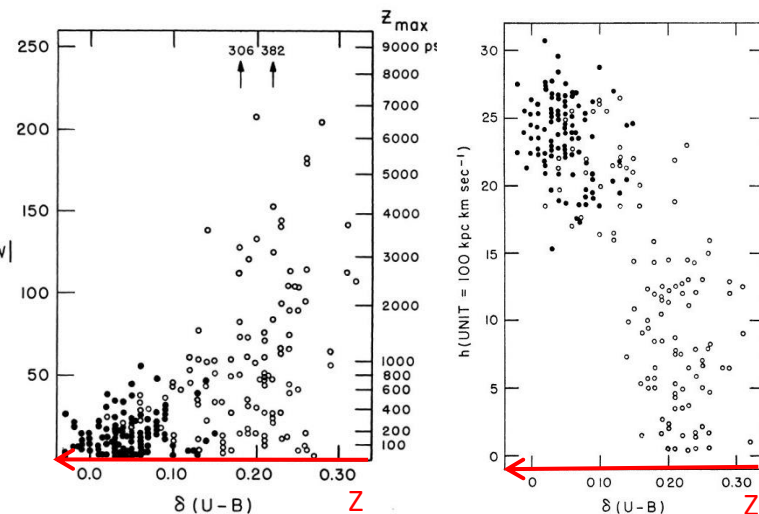


FIG. 4.—The correlation between the ultraviolet excess, $\delta(U-B)$, and the orbital eccentricity, e , for our sample of 221 stars. The filled and open circles represent stars from our first and second catalogues, respectively.



- **Conclusiones:** la mayor parte de las estrellas de baja metalicidad no se formó en el disco (porque tienen alta excentricidad) o la Vía-Láctea tuvo una historia de formación violenta (el potencial de la Galaxia se cambio rápidamente en algún momento de su formación)

El Colapso monolítico

- Propuesta (Modelo ELS):

- nube proto galáctica aprox. **esférica**, con un **pequeño L** inicial y muy **pobre en metales**
- el colapso inicial fue en **caída libre**
- al colapsar, el **spin aumentó** para conservar el L
- la mayor parte de las **estrellas pobres en metales** y **Cúmulos Globulares** se formó durante el colapso (órbitas excéntricas)
- el colapso fue **rápido** (los CGlob. son coevos)
- después de reducir el radio por un factor de aprox. 10, la nube se “se cambió” a rica en metales y se acható en un **disco** soportado centrífugamente
- el disco siguió evolucionando hasta su forma actual

COMPOSITIONS OF HALO CLUSTERS AND THE FORMATION OF THE GALACTIC HALO

LEONARD SEARLE AND ROBERT ZINN

Hale Observatories, Carnegie Institution of Washington, California Institute of Technology

Aglomeración jerárquica

- **Observaciones:** distribución de **Z** de **CGlob.** del halo es ancha y aprox. independiente de la distancia Galactocéntrica
- **Propuesta:** el halo se formó por la **fusión de fragmentos** (proto galaxias) de de masa aprox. $10^8 M_{\odot}$, las cuales habían evolucionado de forma independiente (es decir, cada una tenía su metalicidad distinta)

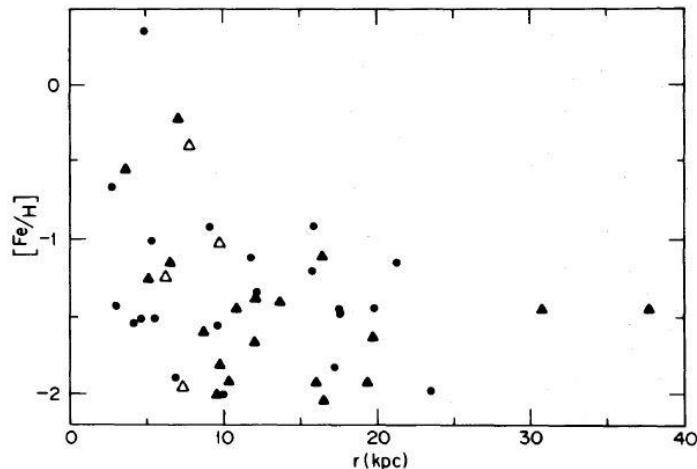
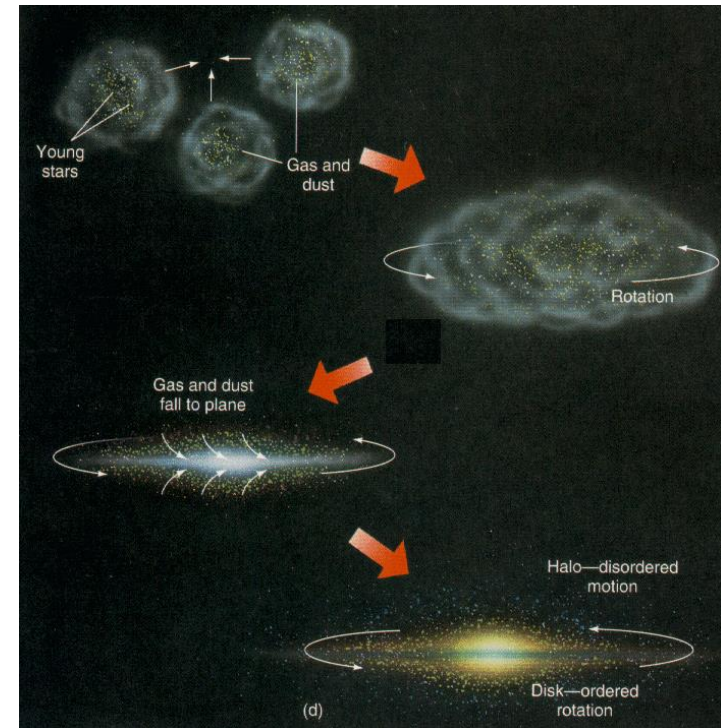


FIG. 9.—Abundances plotted against galactocentric distance for all clusters with tolerable estimates of both quantities. The solid triangles are the clusters studied in this paper. Open triangles are other clusters with first-rate abundance determinations. The circles represent clusters for which the abundance estimates were taken from Kukarkin (1974). Outside $r = 8$ kpc, the distribution over abundance does not change significantly with galactocentric distance.



Colapso monolítico

×

Aglomeración jerárquica

- **Bulbo:** tiene metalicidad relativamente alta (estrellas se formaron de gas que probablemente ya estaba en la Galaxia, enriquecido por metales del halo y/o de los discos)

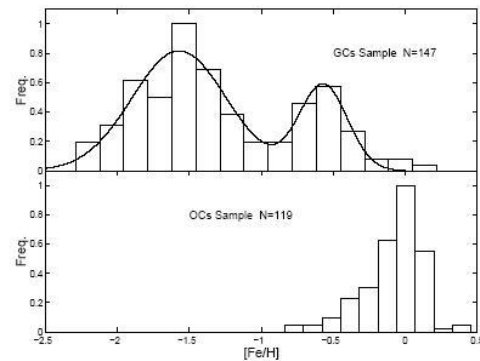
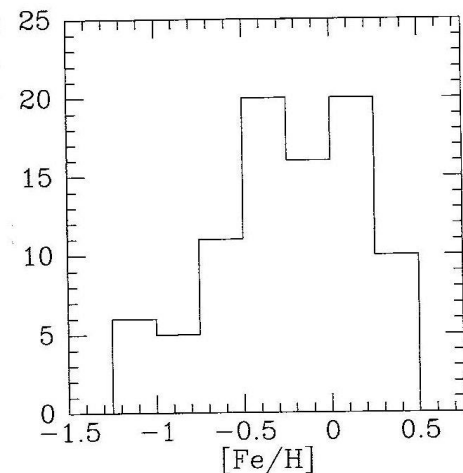


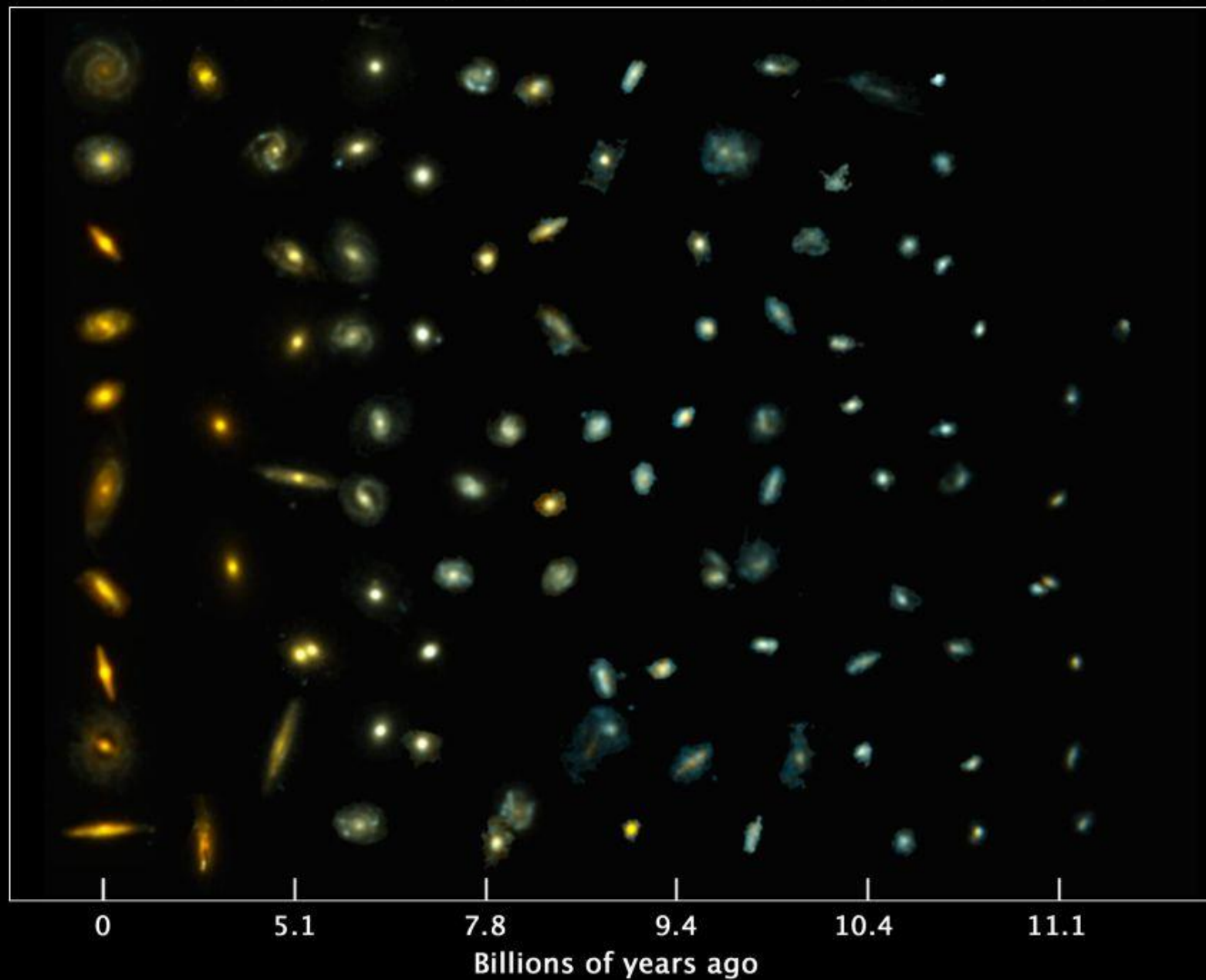
FIG. 6.—Comparison of the metallicity distributions for Galactic globular and open clusters.

- **Disco:** probablemente tiene fuerte componente de transferencia de momento angular (cualquiera que sea el origen, gas con $T \leq 10^4$ K va caer en el potencial de la Galaxia hasta formar un disco)

- **Simulaciones de N-cuerpos:** aglomeración jerárquica es muy común
- **Mergers:** son frecuentemente observados
- **Galaxias en altos-z:** la mayoría se asemeja a irregulares enanas (¿proto galaxias?)
- **Acresión de galaxias satélites:** observada incluso actualmente en la Vía-Láctea
- **CGlob.** están en formación todavía hoy en galaxias como la LMC
- **Disco grueso:** las mejores estimaciones sugieren que los mecanismos internos de calentamiento (dispersión por nubes moleculares o por brazos espirales, etc) no son suficientes (¿acresión?)
- **CGlob. del disco:** tienen propiedades similares a las estrellas del disco grueso (¿formados por perturbaciones consecuentes de acresión?)

Jenkins (1992) MNRAS 257, 620

Walker, Mihos & Hernquist (1996) ApJ 460, 121

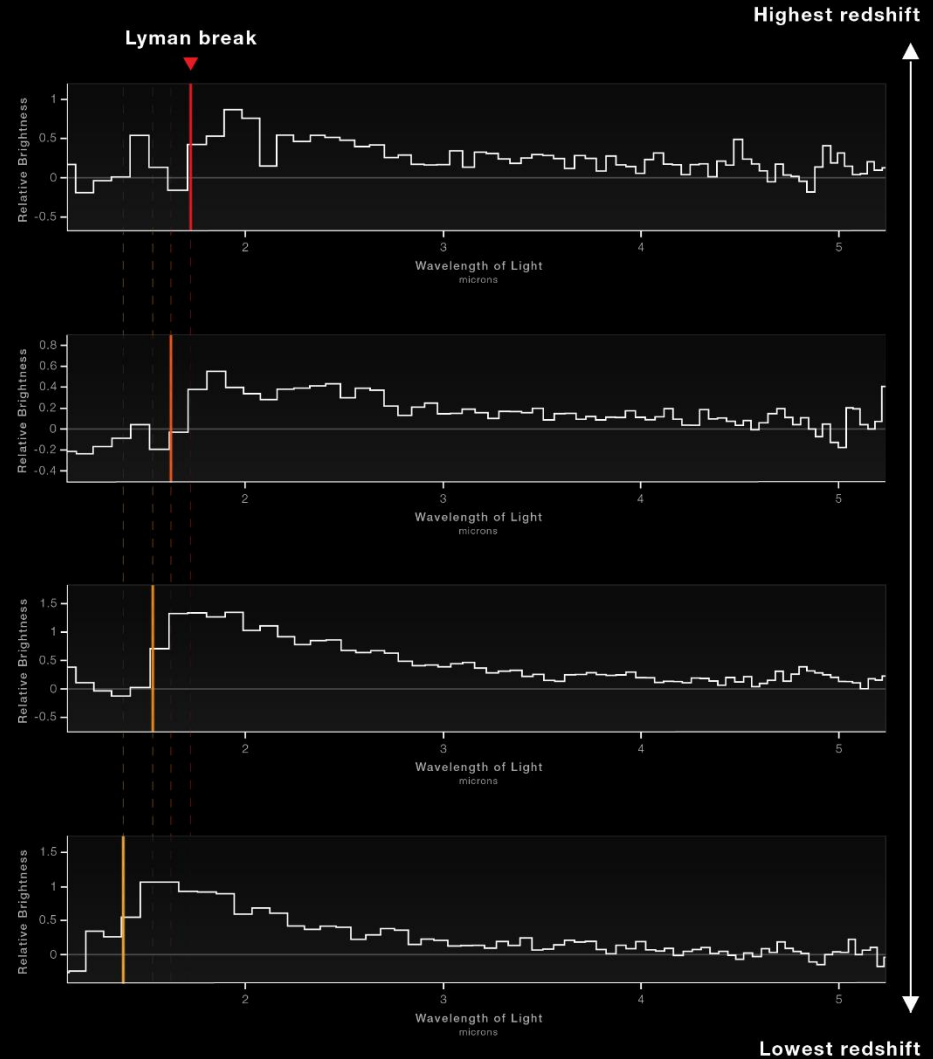
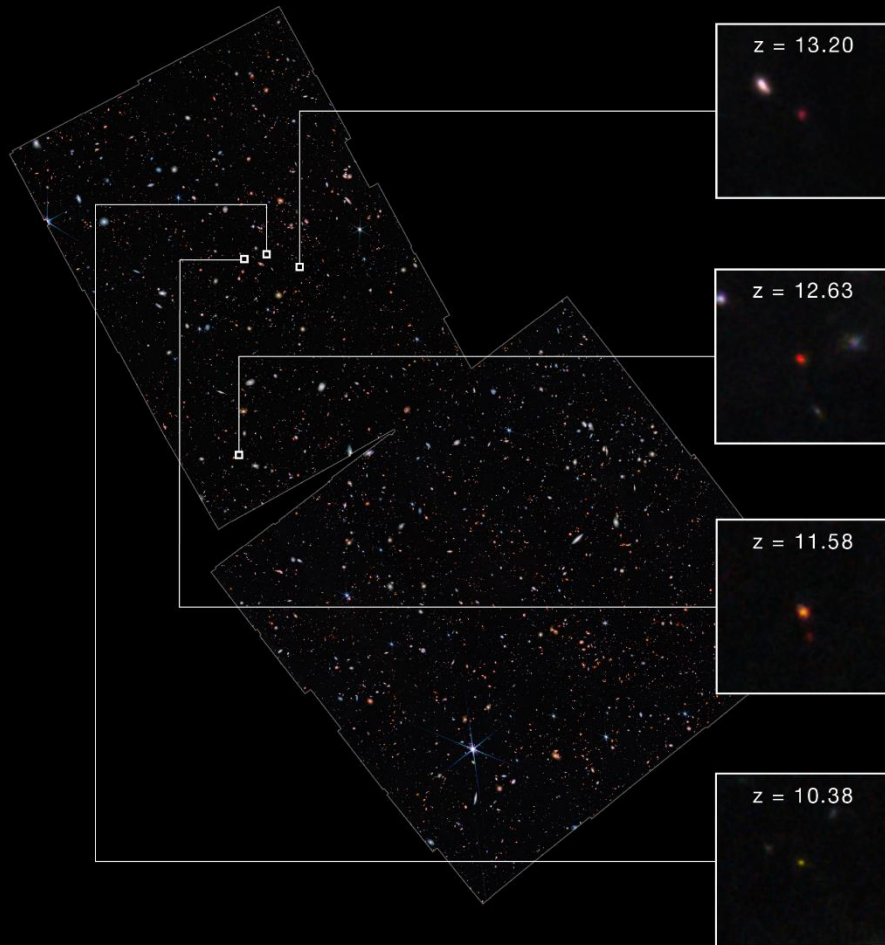


JWST ADVANCED DEEP EXTRAGALACTIC SURVEY (JADES)

WEBB SPECTRA REACH NEW MILESTONE IN REDSHIFT FRONTIER

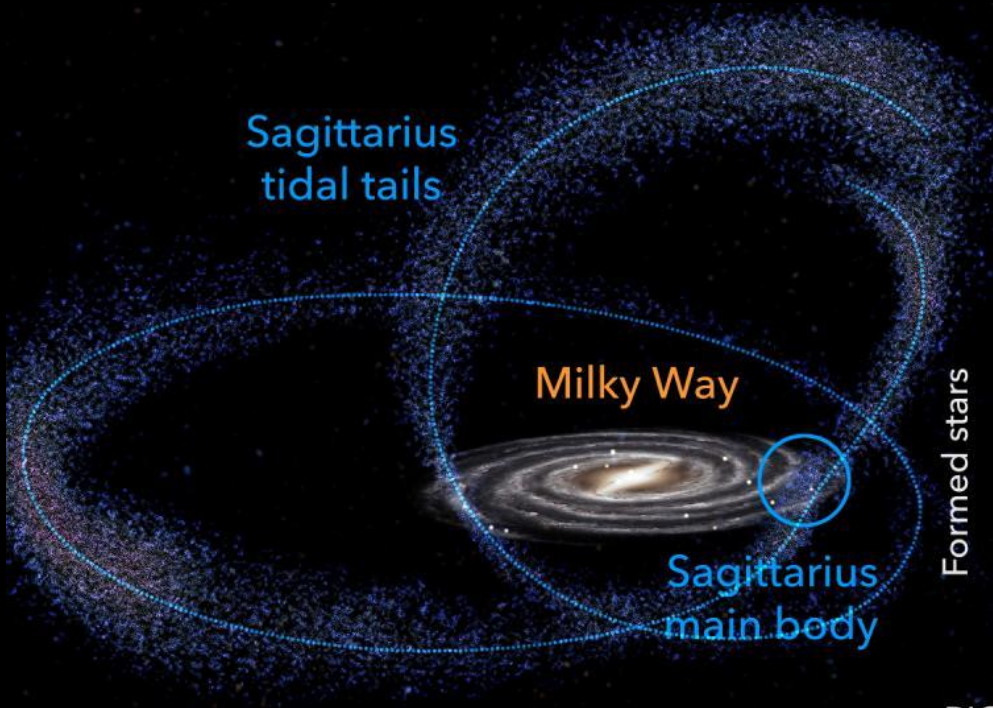
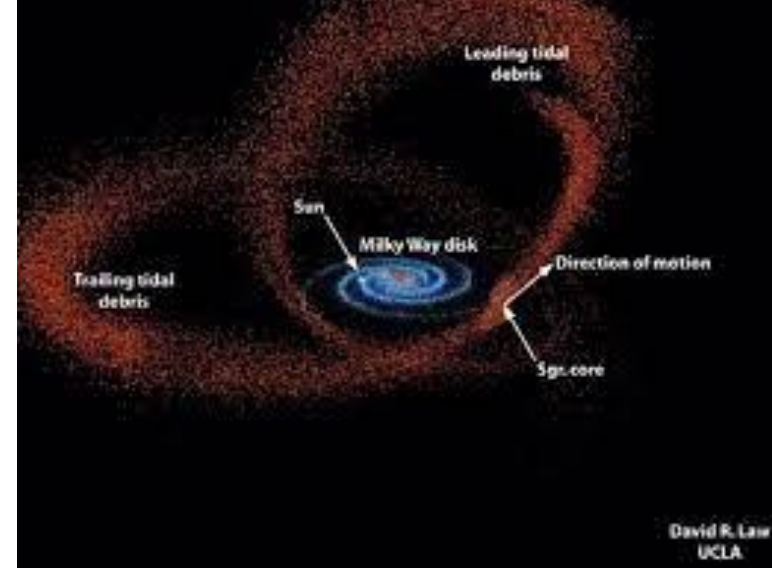
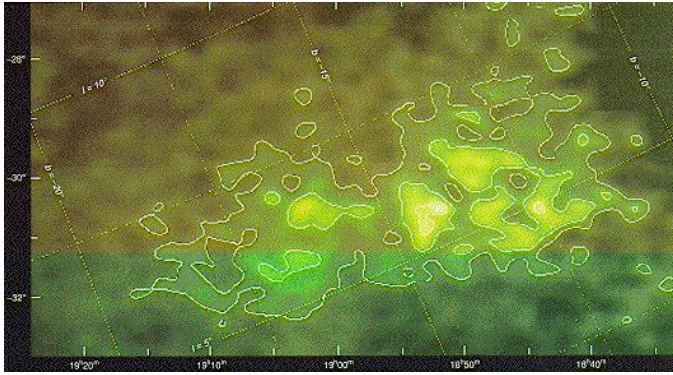
NIRCam Imaging

NIRSpec Microshutter Array Spectroscopy

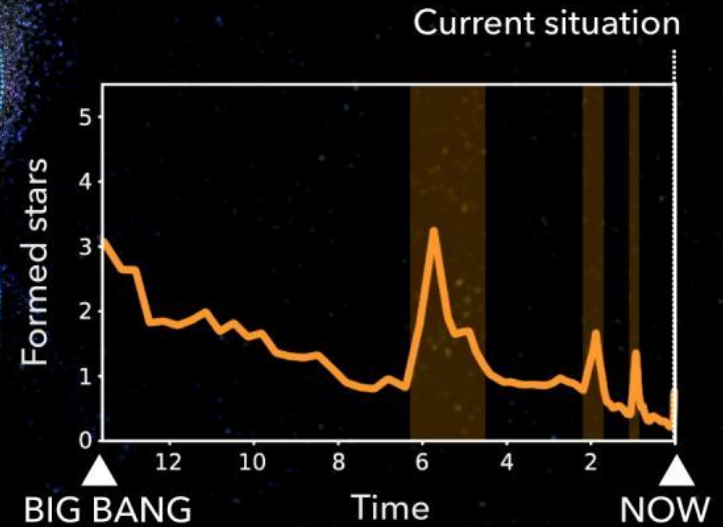


Historia dinámica de la Vía Láctea

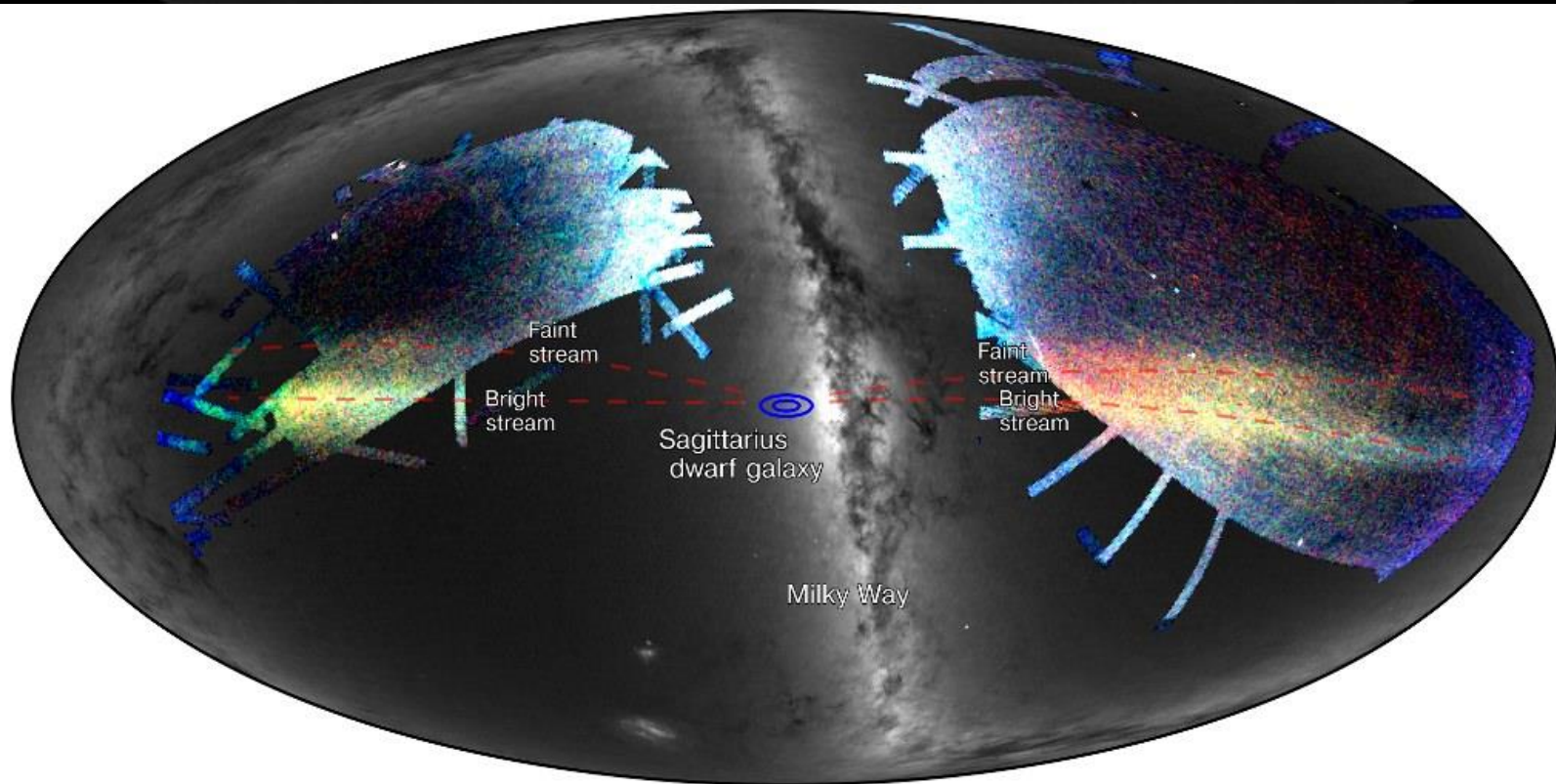
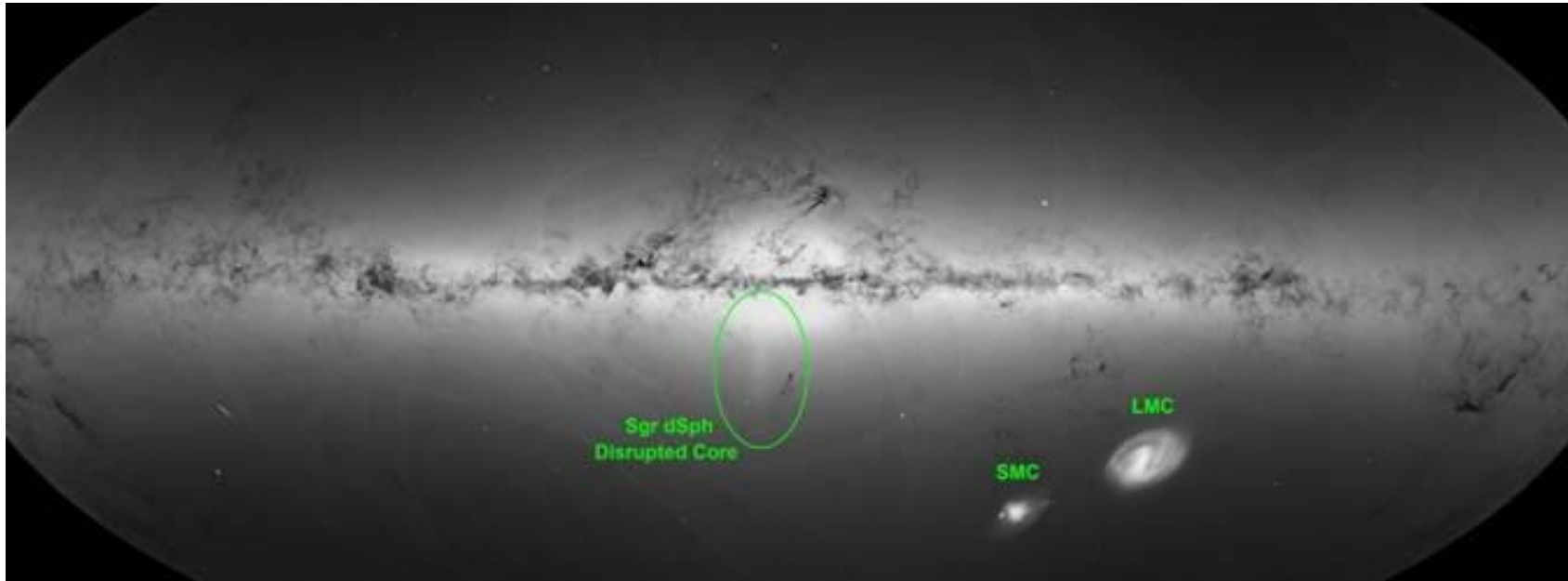
Enana de Sagitario



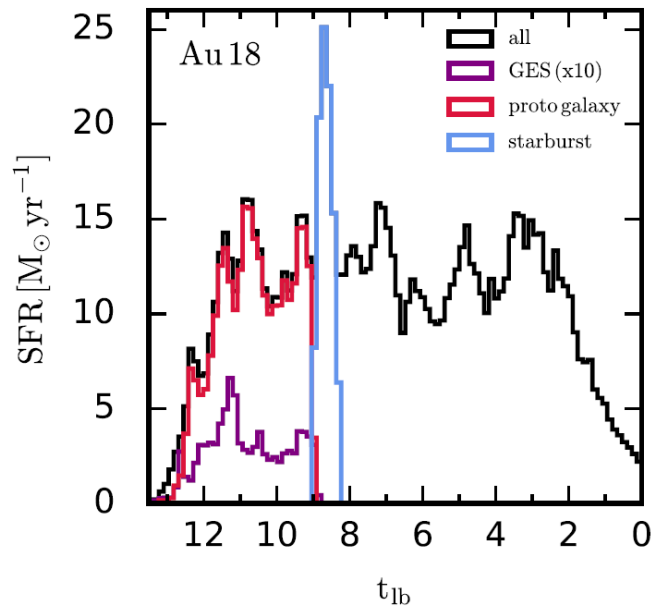
SF History: Milky Way, inside 2 kpc radius (GAIA)



Ruiz-Lara *et al.* (2020), *Nature Astronomy* 4, 965

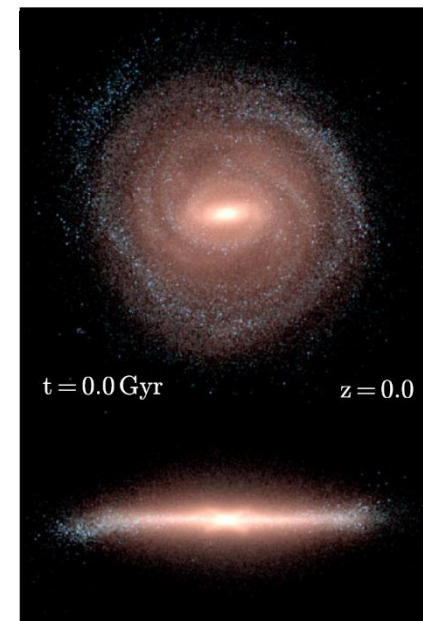
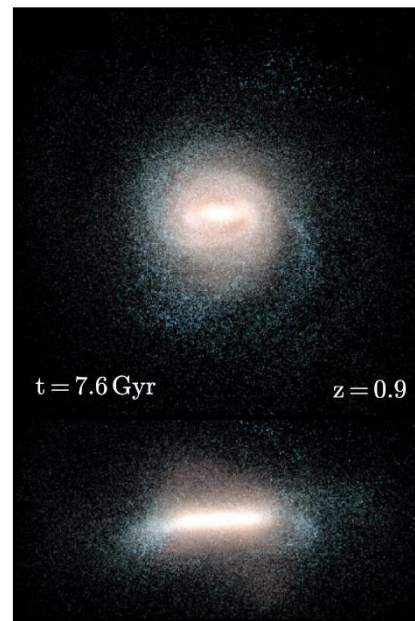
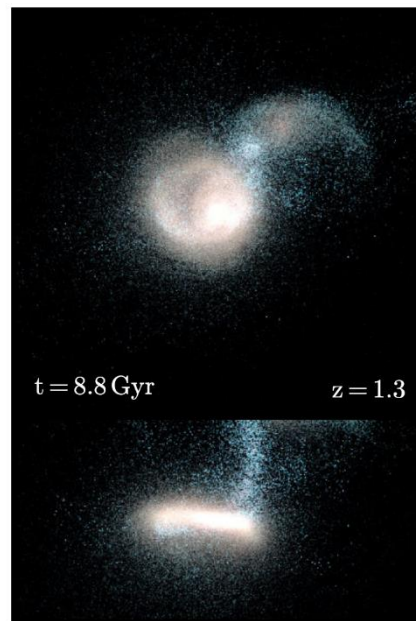
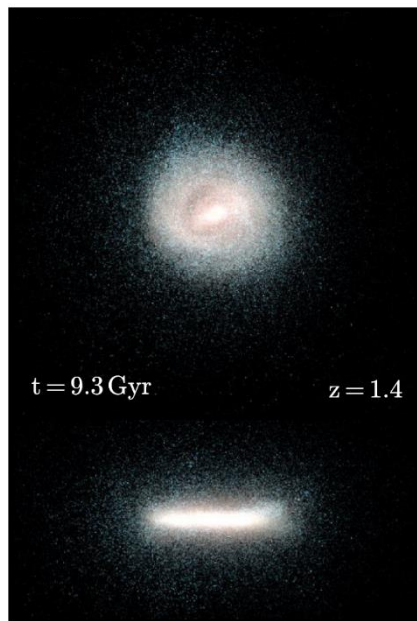
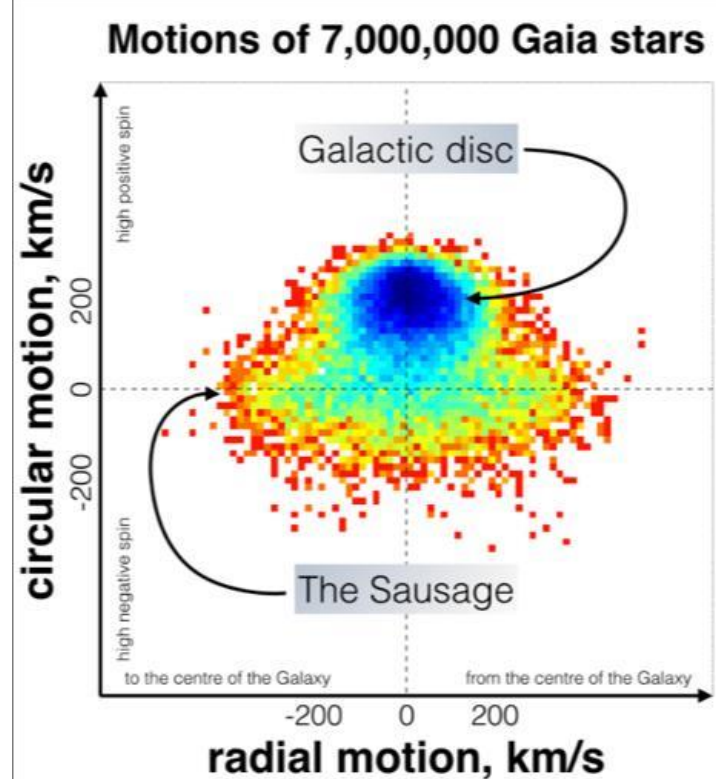


Sausage – Gaia-Enceladus



Belokurov et al. (2018)
MNRAS 478, 611

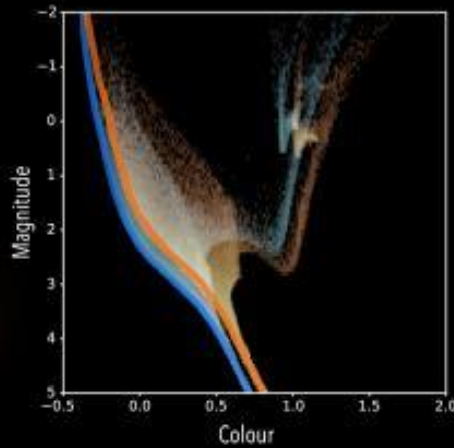
Grand et al. (2020)
MNRAS 497, 1603



Hace ~10.000 millones de años

Gaia-Enceladus

Vía Láctea primitiva

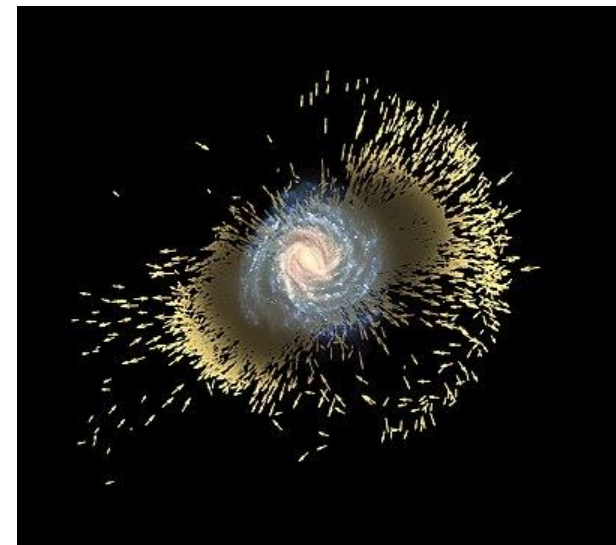
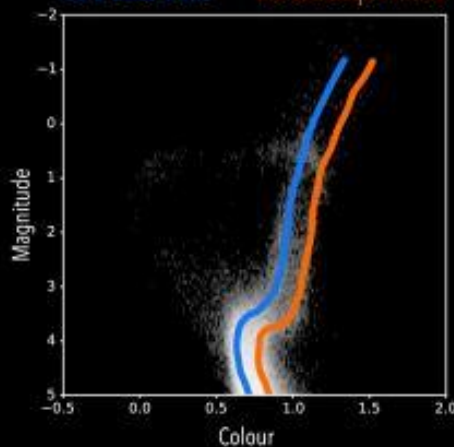


En la actualidad

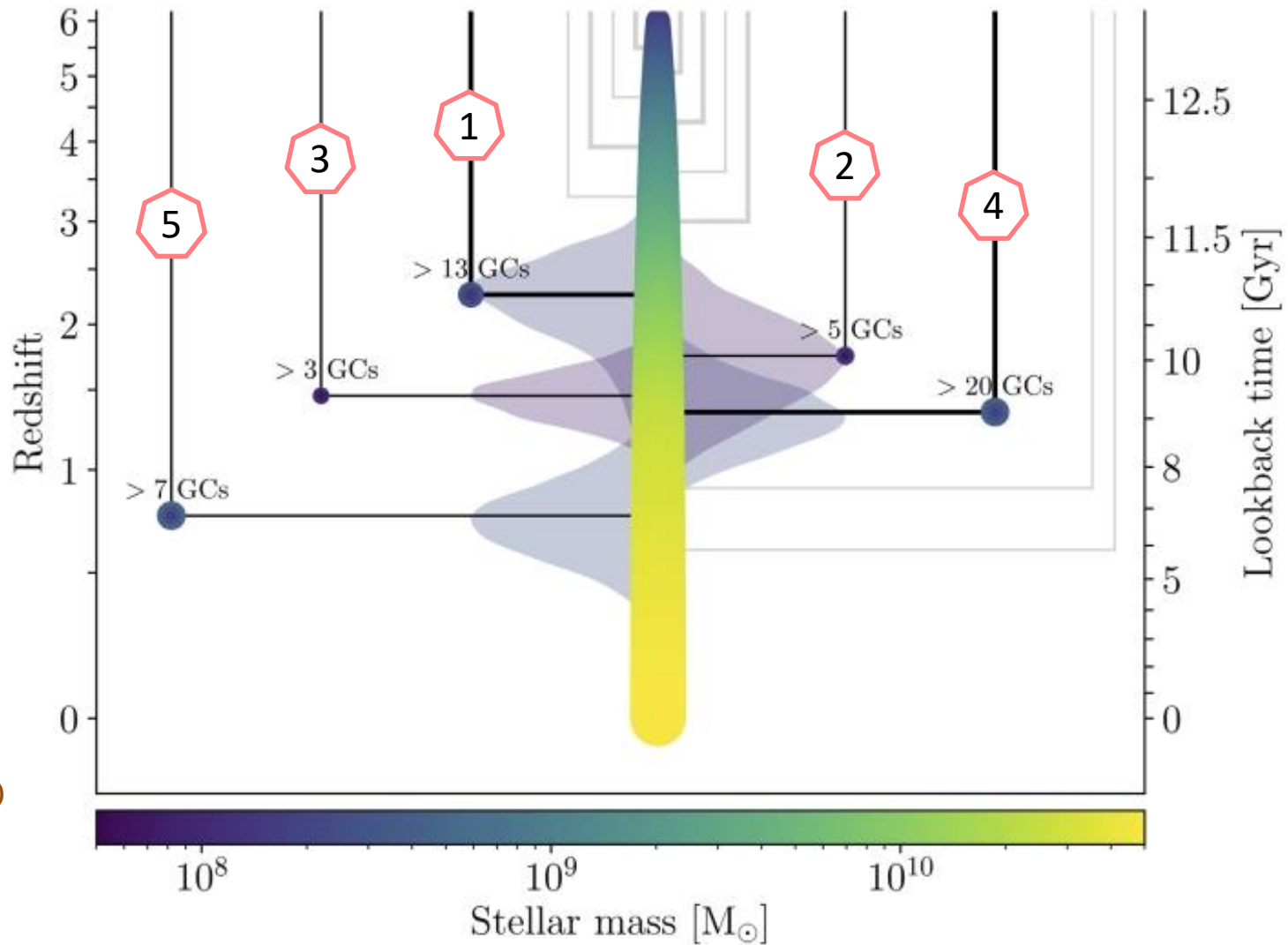
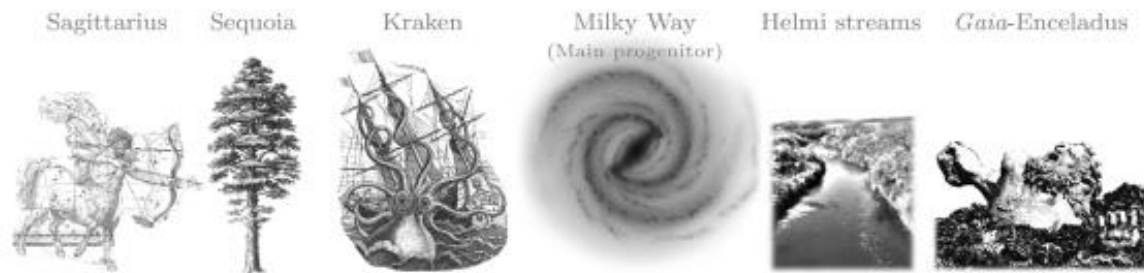
Vía Láctea actual

Estrellas de Gaia-Enceladus

Estrellas de la Vía Láctea primitiva

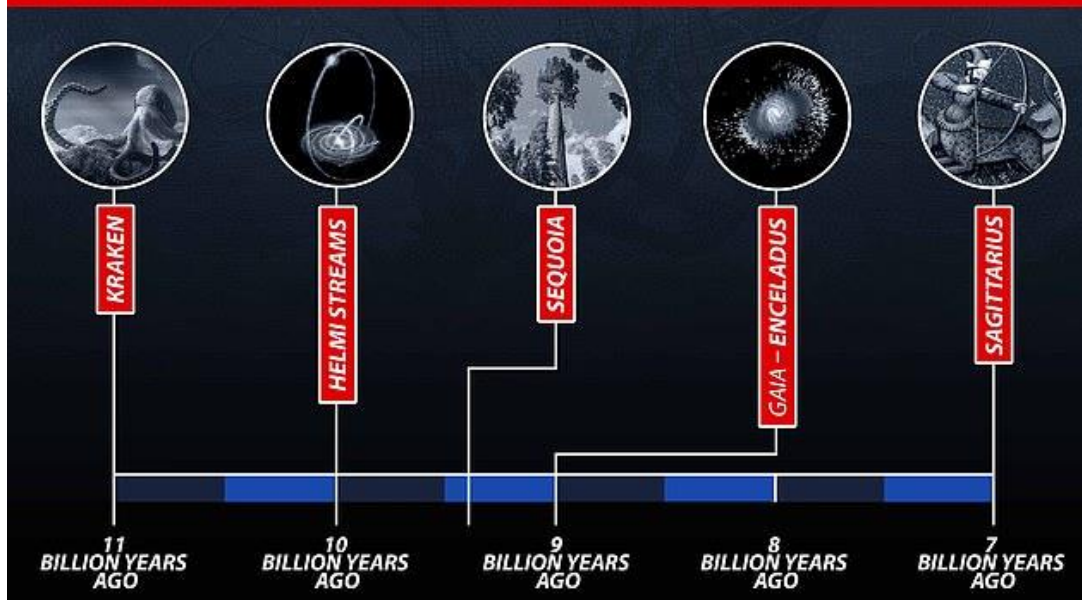


Historia turbulenta de la Vía-Láctea



Kruijssen et al. (2020)
MNRAS 498, 2472

FAMILY TREE OF THE MILKY WAY



Kruijssen et al. (2020)
MNRAS 498, 2472

Table 1. GC membership adopted in this work. For each satellite progenitor, we consider all possible membership permutations throughout our analysis. The ‘Abbreviation’ column lists the shorthand used to refer to these subsets of GCs in the figure legends.

Possible progenitors	Abbreviation	GCs
Kraken	–	NGC 5946, NGC 5986, NGC 6093, NGC 6121, NGC 6144, NGC 6254, NGC 6273, NGC 6287, NGC 6541, NGC 6544, NGC 6681, NGC 6712, NGC 6809
Kraken/Main progenitor	Kraken/Main	NGC 6441
Kraken/Sequoia	Kraken/Seq	NGC 6535
<i>Gaia</i> -Enceladus	G-E	NGC 288, NGC 362, NGC 1261, NGC 1851, NGC 1904, NGC 2298, NGC 2808, NGC 4147, NGC 4833, NGC 5286, NGC 5897, NGC 6205, NGC 6235, NGC 6284, NGC 6341, NGC 6779, NGC 6864, NGC 7089, NGC 7099, NGC 7492
<i>Gaia</i> -Enceladus/Sequoia	G-E/Seq	NGC 5139
Helmi streams	H99	NGC 4590, NGC 5024, NGC 5053, NGC 5272, NGC 6981
Helmi streams/ <i>Gaia</i> -Enceladus	H99/G-E	NGC 5634, NGC 5904
Sequoia	Seq	NGC 5466, NGC 7006, IC4499
Sequoia/ <i>Gaia</i> -Enceladus	Seq/G-E	NGC 3201, NGC 6101
Sagittarius	–	NGC 2419, NGC 5824, NGC 6715, Pal 12, Terzan 7, Terzan 8, Arp 2, Whiting 1

modelos homogéneos de evolución química

Modelo de la caja cerrada (*closed box*)

- el modelo mas sencillo para la evolución química de una galaxia (o una porción de una galaxia):
 - **ningún material entra o sale** del volumen considerado durante el periodo en estudio
 - inicialmente todo el material es **gas** y con **metalicidad cero**
 - el gas es consumido por la formación estelar y parte retorna enriquecido por metales producidos en estrellas (el **reciclaje** es considerado **instantáneo**, una vez que el tiempo de vida de estrellas masivas es muy corto)
- ⇒ Enriquecimiento depende solamente de la **IMF** y de la **SFR**

1. $\mathcal{M}_g \rightarrow$ masa del gas [$\mathcal{M}_g(0) = \mathcal{M}_b$, masa bariónica de la galaxia]

2. $\mathcal{M}_s \rightarrow$ masa en estrellas [$\mathcal{M}_s(t) = \mathcal{M}_b - \mathcal{M}_g(t)$]

3. $\mathcal{M}_z \rightarrow$ masa de metales en el gas [$\mathcal{M}_z(0) = 0$]

4. $Z \equiv \mathcal{M}_z / \mathcal{M}_g \rightarrow$ metalicidad del gas [$Z_\odot \approx 0.02$]

5. $\delta Z \equiv y \delta \mathcal{M}_s / \mathcal{M}_g$

$y \rightarrow$ *yield*: fracción de masa en metales que retorna al ISM respecto a la masa que queda en estrellas

$$2 \rightarrow \mathcal{M}_g + \mathcal{M}_s = \mathcal{M}_b = \text{cte}$$

$$\delta \mathcal{M}_g + \delta \mathcal{M}_s = 0 \Rightarrow \delta \mathcal{M}_g = -\delta \mathcal{M}_s$$

$$4 \rightarrow \delta \mathcal{M}_z = \delta(Z \mathcal{M}_g)$$

$$= \delta Z \mathcal{M}_g + Z \delta \mathcal{M}_g$$

$$5 \rightarrow = y \delta \mathcal{M}_s + Z \delta \mathcal{M}_g$$

$$= y \delta \mathcal{M}_s + Z (-\delta \mathcal{M}_s)$$

$$= \delta \mathcal{M}_s (y - Z)$$

$$\therefore \delta \mathcal{M}_z / \delta \mathcal{M}_s = y - Z$$

$$4 \rightarrow$$

$$\delta Z = \delta(\mathcal{M}_z / \mathcal{M}_g) = (\delta \mathcal{M}_z / \mathcal{M}_g) + \mathcal{M}_z (-\delta \mathcal{M}_g / \mathcal{M}_g^2)$$

$$= (\delta \mathcal{M}_z / \mathcal{M}_g) - (\mathcal{M}_z / \mathcal{M}_g^2) \delta \mathcal{M}_g$$

$$= (1 / \mathcal{M}_g) (\delta \mathcal{M}_z - Z \delta \mathcal{M}_g)$$

$$= (1 / \mathcal{M}_g) [(y - Z) \delta \mathcal{M}_s - Z \delta \mathcal{M}_g]$$

$$= (1 / \mathcal{M}_g) [(Z - y) \delta \mathcal{M}_g - Z \delta \mathcal{M}_g]$$

$$= (\delta \mathcal{M}_g / \mathcal{M}_g) [Z - y - Z]$$

$$\therefore \delta Z = -y (\delta \mathcal{M}_g / \mathcal{M}_g) = -y \delta \ln(\mathcal{M}_g)$$

$$Z = -y \ln [\mathcal{M}_g(t) / \mathcal{M}_g(0)]$$

$$Z = -y \ln [\mathcal{M}_g(t) / \mathcal{M}_b]$$

- si graficamos la Z observada en distintos puntos del disco galáctico contra el \ln de la fracción de masa en gas actualmente, obtendremos una línea recta cuya inclinación es el *yield*.
- también podemos obtener la distribución de metalicidad de las estrellas...

$$-Z / y = \ln [\mathcal{M}_g(t) / \mathcal{M}_b]$$

$$\Rightarrow \mathcal{M}_g(t) / \mathcal{M}_b = e^{-Z / y}$$

Fracción de estrellas formadas con $Z < \alpha$:

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_s[Z < \alpha] &= \mathcal{M}_s(t) = \mathcal{M}_g(0) - \mathcal{M}_g(t) \\ &= \mathcal{M}_b \{1 - [\mathcal{M}_g(t) / \mathcal{M}_b]\} \\ &= \mathcal{M}_b (1 - e^{-\alpha Z / y}) \end{aligned}$$

$$\mathcal{M}_s[Z < \alpha] / \mathcal{M}_s[Z] = (1 - e^{-\alpha Z / y}) / (1 - e^{-Z / y}) = (1 - x^\alpha) / (1 - x)$$

- una estimación razonable de x en la vecindad solar es $x \approx 0.1$, lo que reemplazando en la ecuación para $\alpha = 1/3 Z_\odot$, por ejemplo, nos da $0.51 M_s$. Eso significa que, si la vecindad solar fuera una “caja cerrada” que empezara con metalicidad cero, mitad de las estrellas ahora deberían tener menos de $1/3 Z_\odot$. En realidad, las observaciones indican que solamente $\sim 2\%$ de las estrellas F y G en la vecindad tienen $Z < 0.25 Z_\odot$ (Sommer-Larsen 1991, MNRAS 249, 368). Esa contradicción es conocida como el “**problema de las enanas G**”.

Modelos más complejos

- El modelo de “caja cerrada” no es, por supuesto, el modelo ideal. La cuestión es: ¿qué suposiciones están mal?
 - el *yield* no es independiente de $Z \Rightarrow$ ¿**IMF** es dependiente de la metalicidad?
 - reciclaje instantáneo (parece razonable)
 - ¿caja cerrada? → sabemos que hay eyección de material por SNe y vientos estelares (***leaky-box models***), especialmente en galaxias de baja masa (*outflows*); además, las galaxias (o porciones de ellas) no son sistemas aislados: frecuentemente hay acreciones y fusiones (***accreting-box models***)
 - ¿el gas empieza con metalicidad cero? → especialmente en el caso del disco delgado, es probable que recibe metales del halo y del disco grueso. Así, es probable que haya un **pre-enriquecimiento** de los discos por la componente esferoidal:

$$Z = Z_i + y \ln [\mathcal{M}_g(0) / \mathcal{M}_g(t)]$$

Larson (1972) Nature Phys. Sci. 236, 7

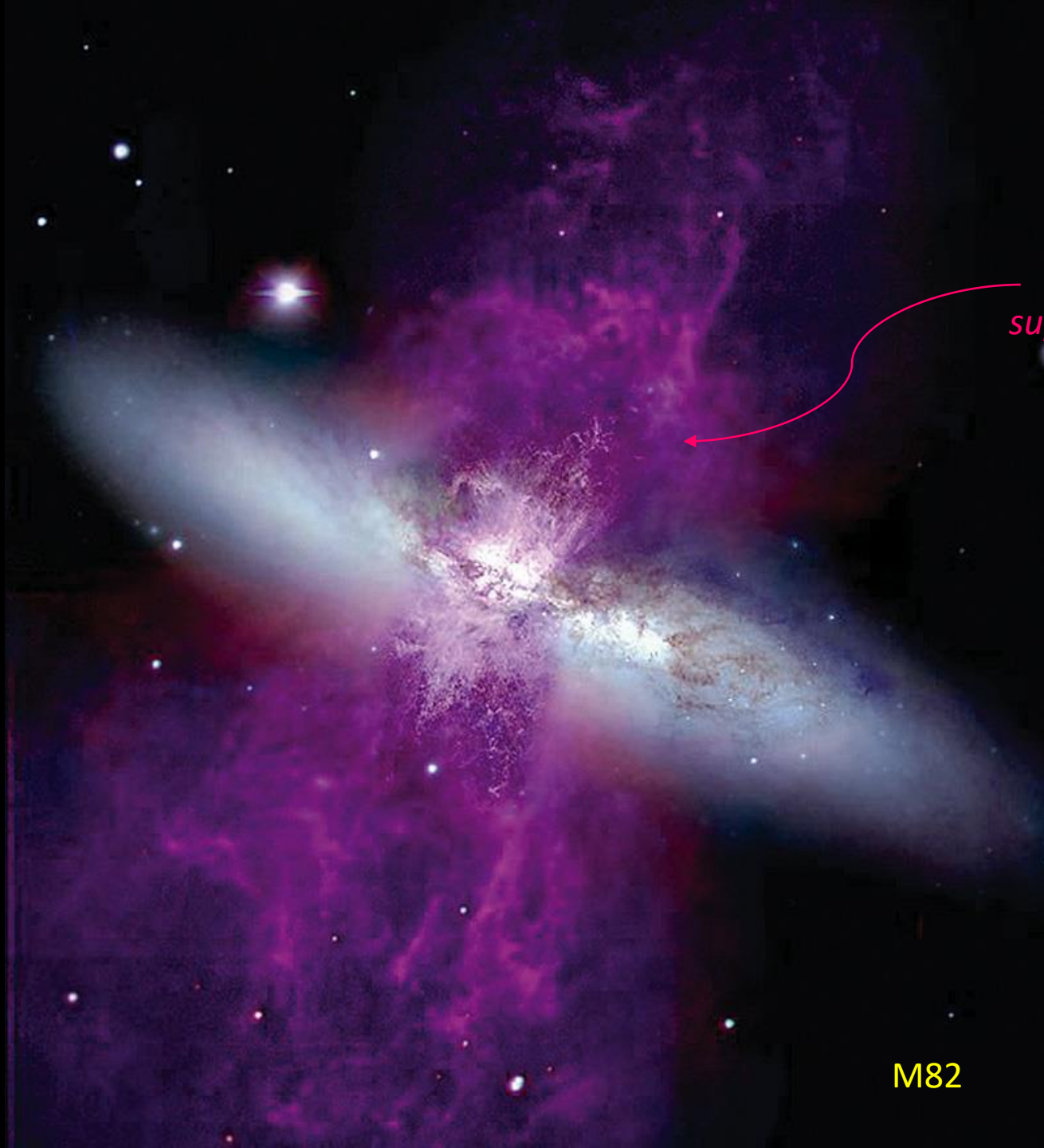
Matteucci & François (1989) MNRAS 239, 885

Pardi et al. (1995) ApJ 444, 207

Chiappini et al. (1997) ApJ 477, 765

Henry & Worthey (1999) PASP 111, 919 👍

Gibson et al. (2003) PASA 20, 1 (review) 👍



H α
superwinds

M82

Tarea 8:

Hacer un resumen (máximo 2 cuartillas, en español) de uno de los artículos:

- *Henry & Worthey 1999 (PASP 111, 919)*
- *Gibson et al. 2003 (PASA 20, 401)*
- *Matteucci 2008 (arXiv_0804.1492)*
- *Micali et al. 2013 (MNRAS 436, 1648)*
- *Chiappini 2001 (American Sc., december, 506-515)*

- *Belokurov et al. 2018 (MNRAS 478, 611)*
- *Grand et al. 2020 (MNRAS 497, 1603)*
- *Kruijssen et al. 2020 (MNRAS 498, 2472)*