

# Formación y Evolución de Galaxias

Antonio Hernán Caballero

Astrofísica Extragaláctica

Máster Universitario en Física, Instrumentación y Medio Ambiente

Universidad de Cantabria

# Contenidos

## Primera sesión

- Introducción
- Clasificación morfológica de galaxias
- Componentes estructurales
- Curvas de rotación
- Distribución espacial de galaxias

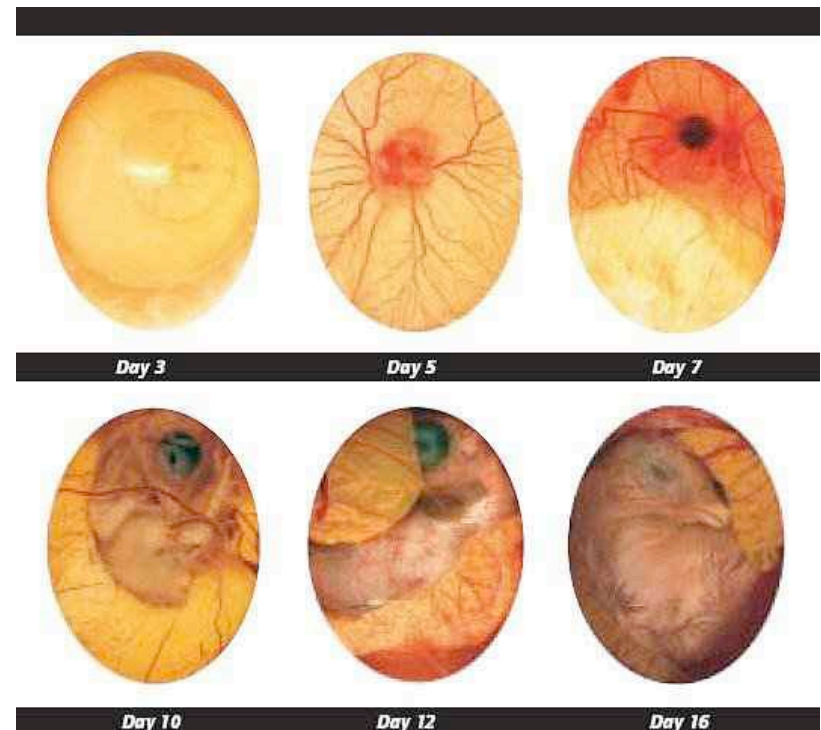
## Segunda sesión

- Modelos de formación de galaxias
- Interacciones entre galaxias
- Evolución química de galaxias
- La formación y evolución de la Vía Láctea
- Historia de formación estelar cósmica

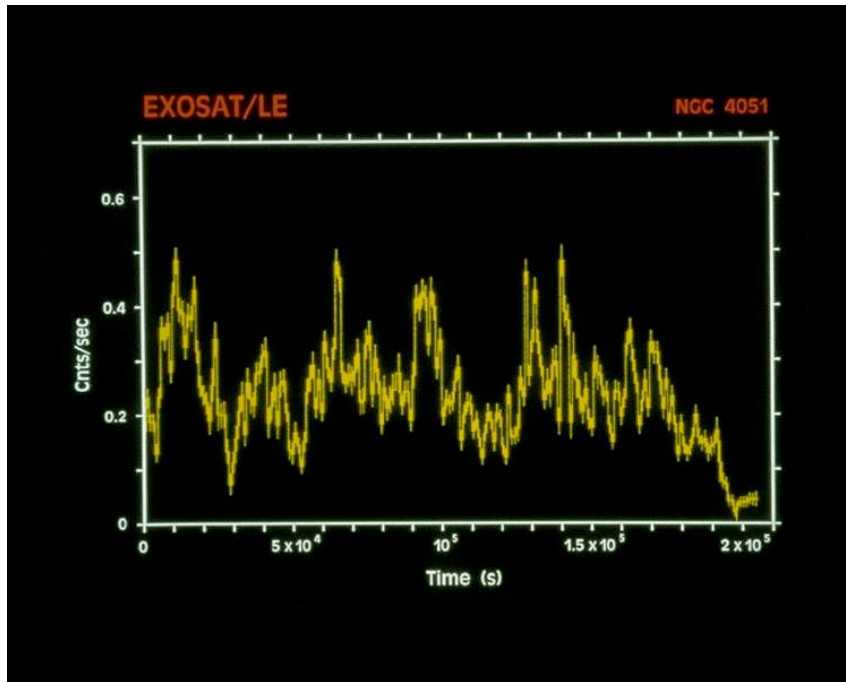
# ¿Es observable la evolución de las galaxias?

- Edad del Universo:  $13.798 \pm 0.037$  Gyr (Planck)
- Edad de la Vía Láctea:  $> 13$  Gyr
- Edad del Sol: 4.57 Gyr
- Período de revolución de la galaxia (radio solar):  $\sim 225$  Myr
- Duración brote de formación estelar:  $\sim 100$ -300 Myr
- Duración vida humana: 82 yr (E. V. al nacer, España, 2013)

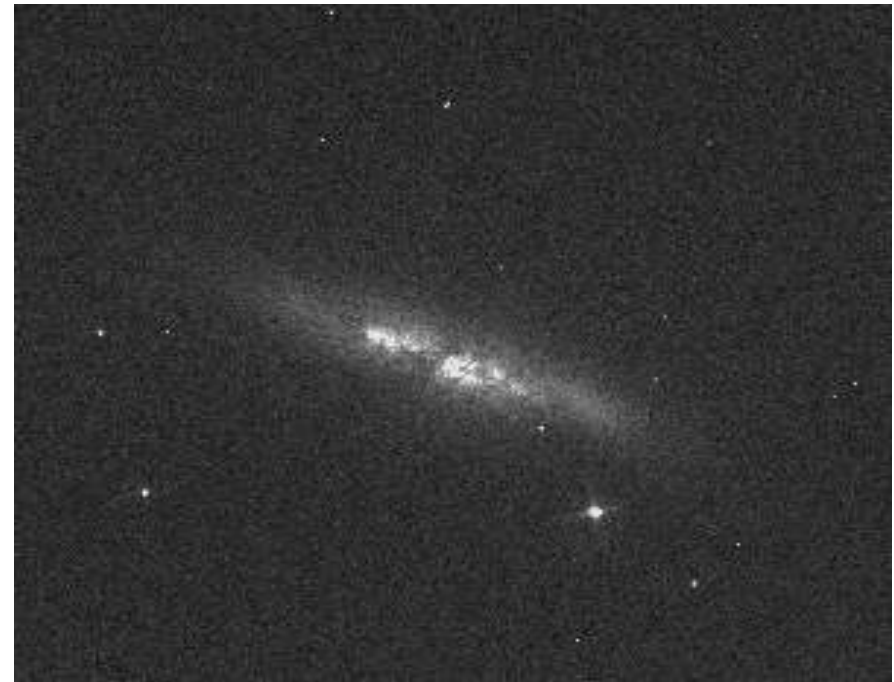
En escalas de tiempo humanas,  
las galaxias son **inmutables**



# O casi...



Curva de luz en rayos X de NGC 4051



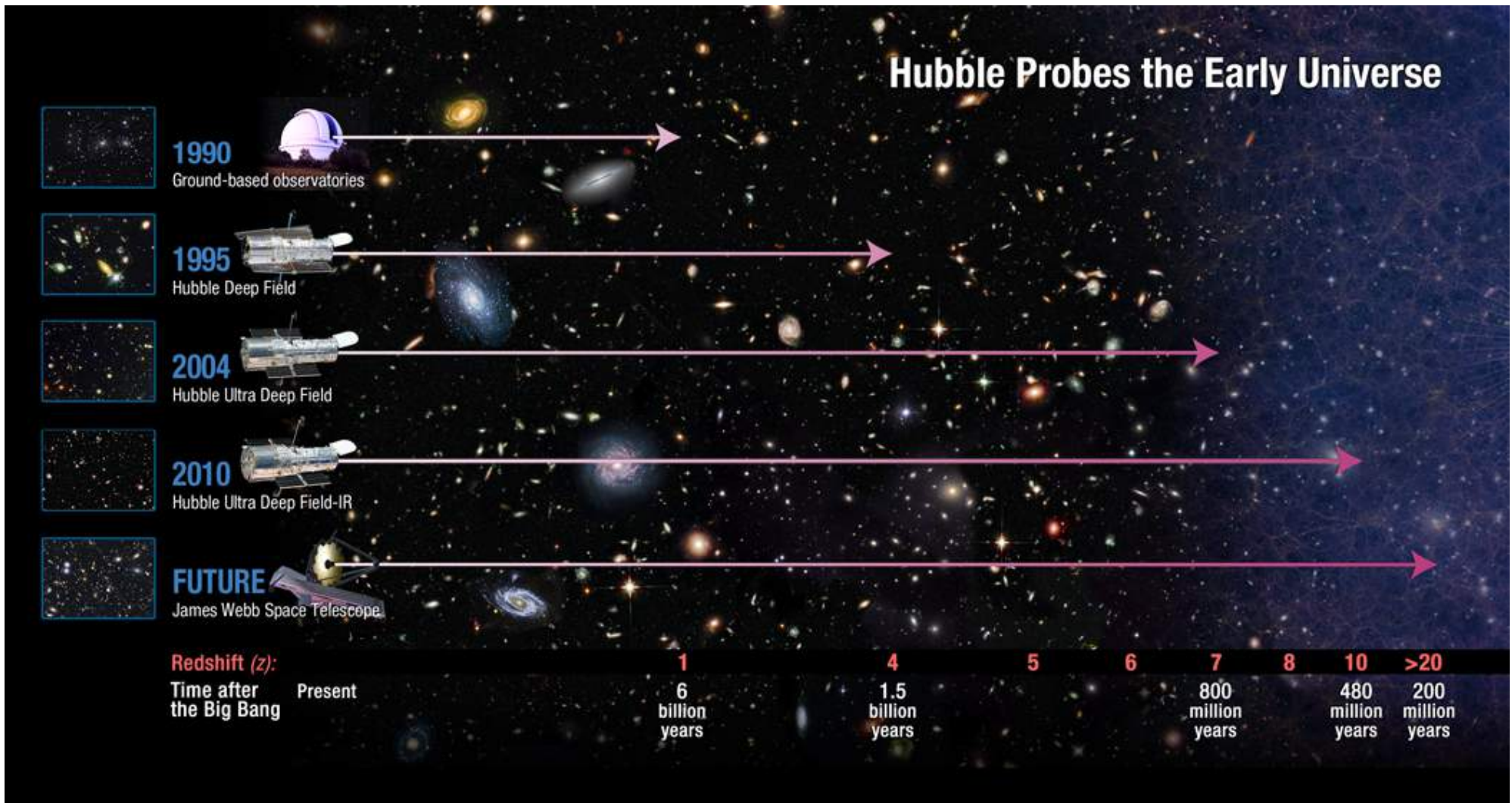
Supernova SN2004J en galaxia M82  
(constelación Osa Mayor)

La supernova tipo Ia más cercana y  
Brillante en décadas.

Descubierta el 21 de enero de 2014 por  
estudiantes de Londres.

Brillo máximo alcanzado el 3-4 febrero

# Telescopios: máquinas del tiempo



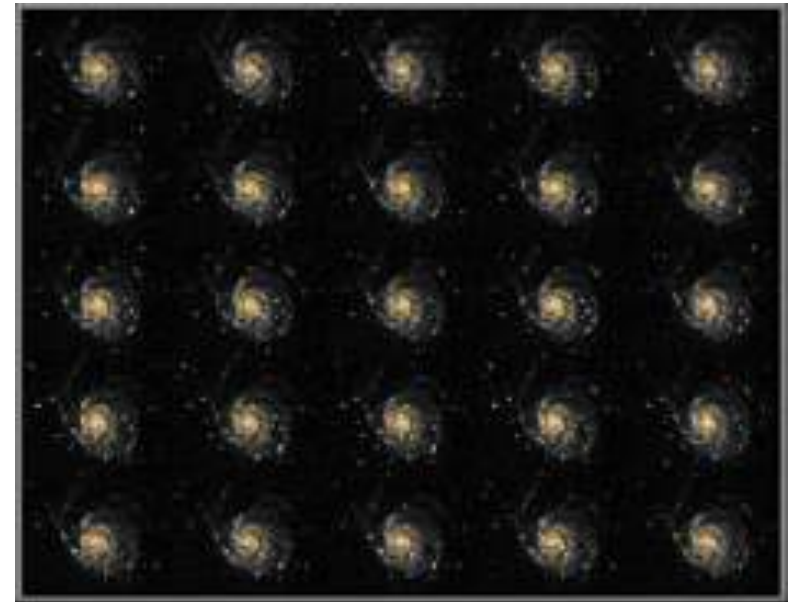
# Principio cosmológico

- No observador privilegiado
- Las leyes de la Física son las mismas en todas partes
- Todas las posiciones y direcciones son equivalentes

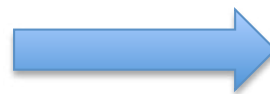
**El Universo es homogéneo e isótropo\***

*\*en escalas lo suficientemente grandes*

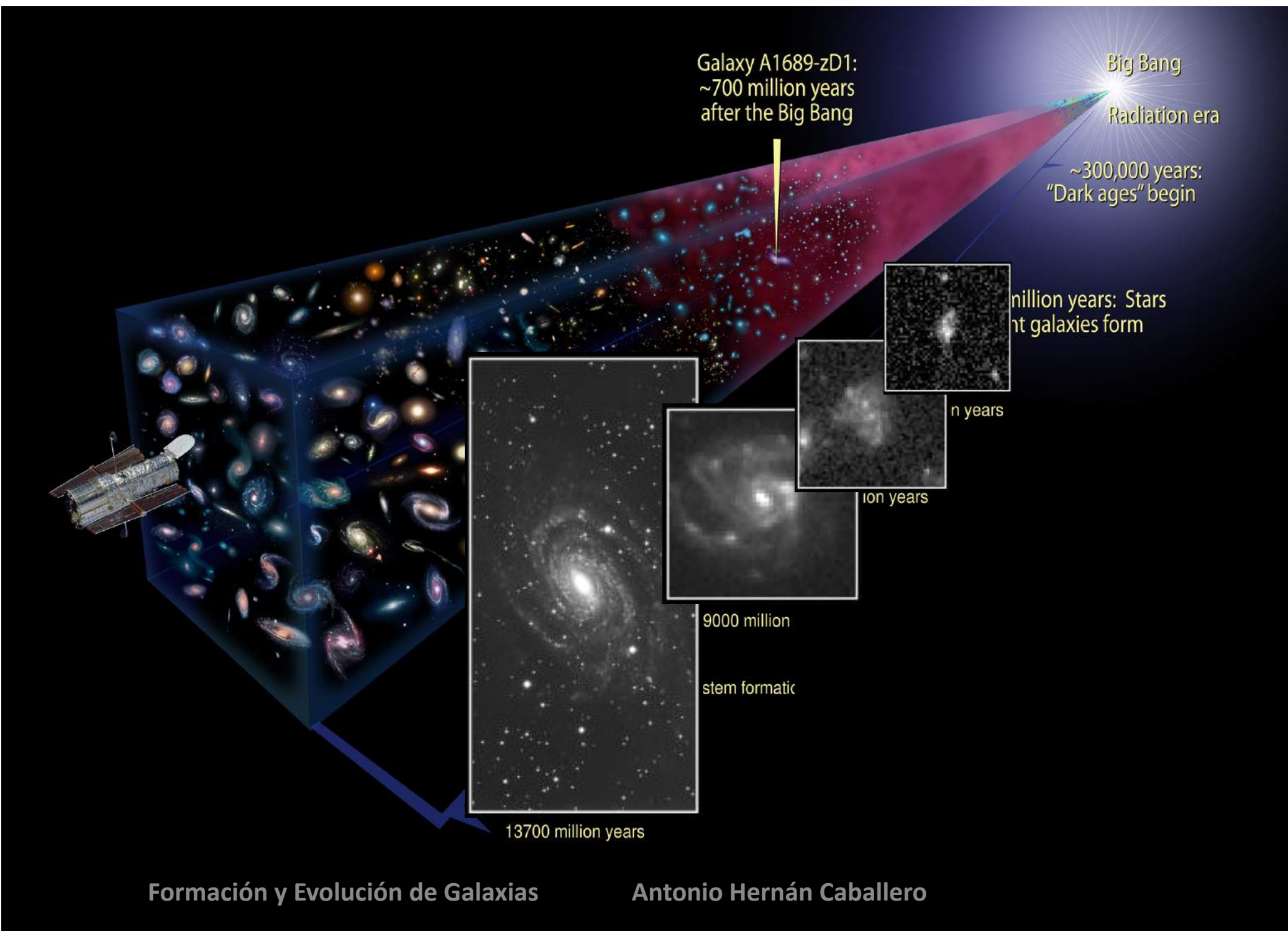
*Universo homogéneo pero anisótropo →*



Velocidad  $c$  finita  
+  
Principio cosmológico



Imágenes de galaxias lejanas representan el pasado remoto de las galaxias locales



# Age of the Universe

Today: 14 Billion Years

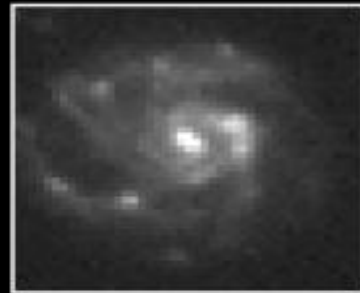
9 Billion Years

5 Billion Years

2 Billion Years



Elliptical



Spiral

## Galaxies: Snapshots in Time

HST · WFPC2



PR94-52c · Office of Public Outreach · December 6, 1994 · ZGL



# Age of the Universe

Today: 14 Billion Years

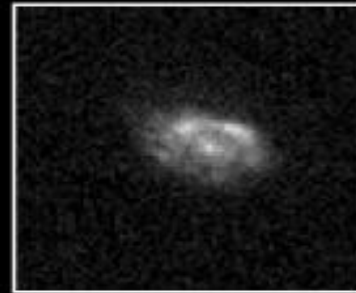
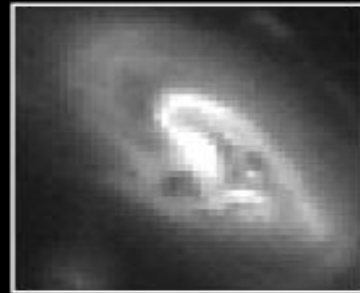
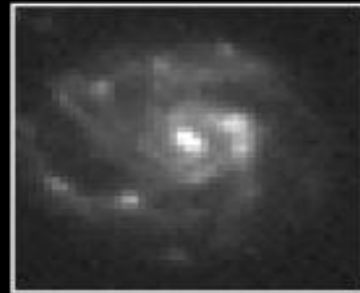
9 Billion Years

5 Billion Years

2 Billion Years



Elliptical



Spiral

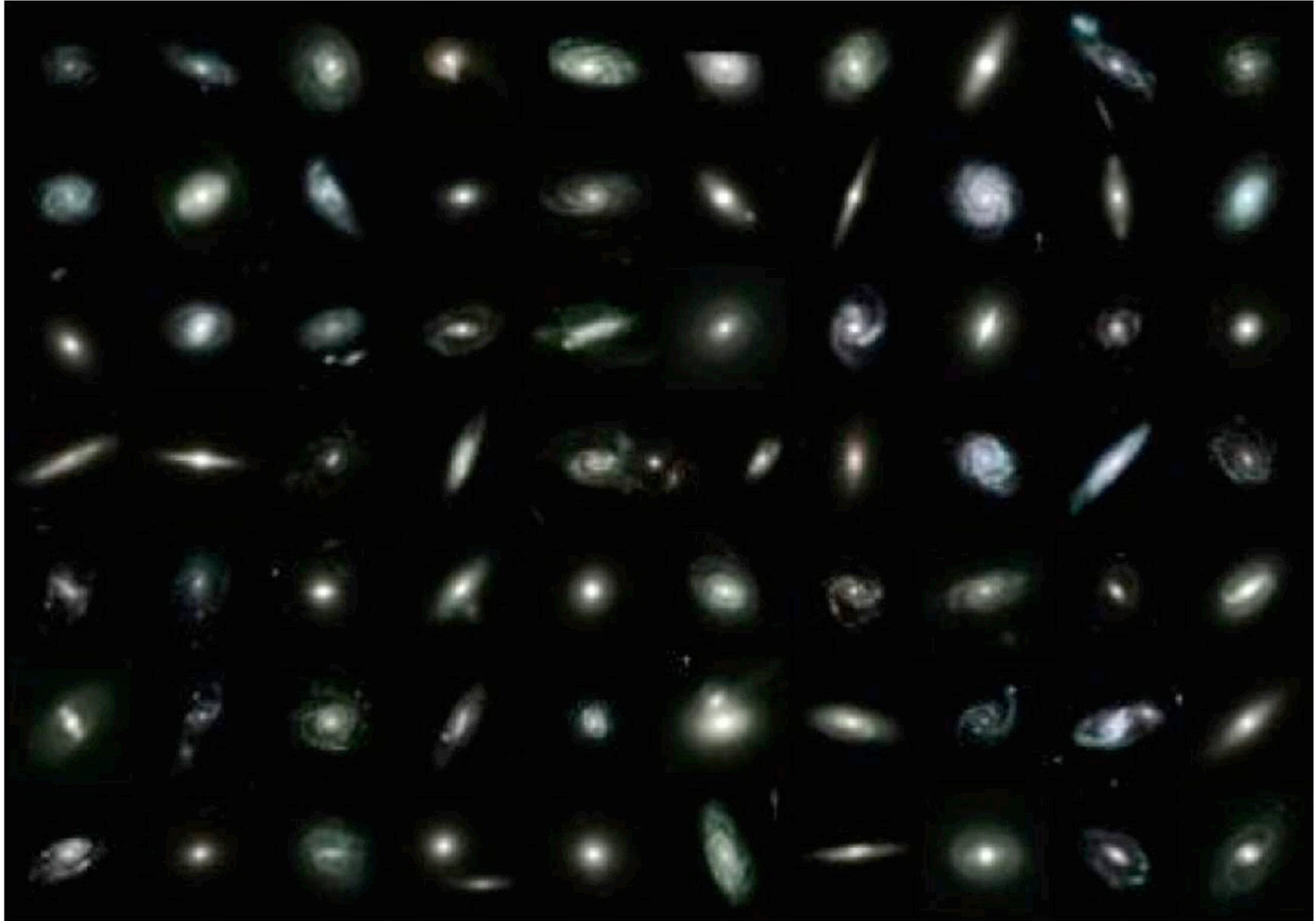
## Galaxies: Snapshots in Time

HST · WFPC2



PR94-52c · Office of Public Outreach · December 6, 1994 · ZGL

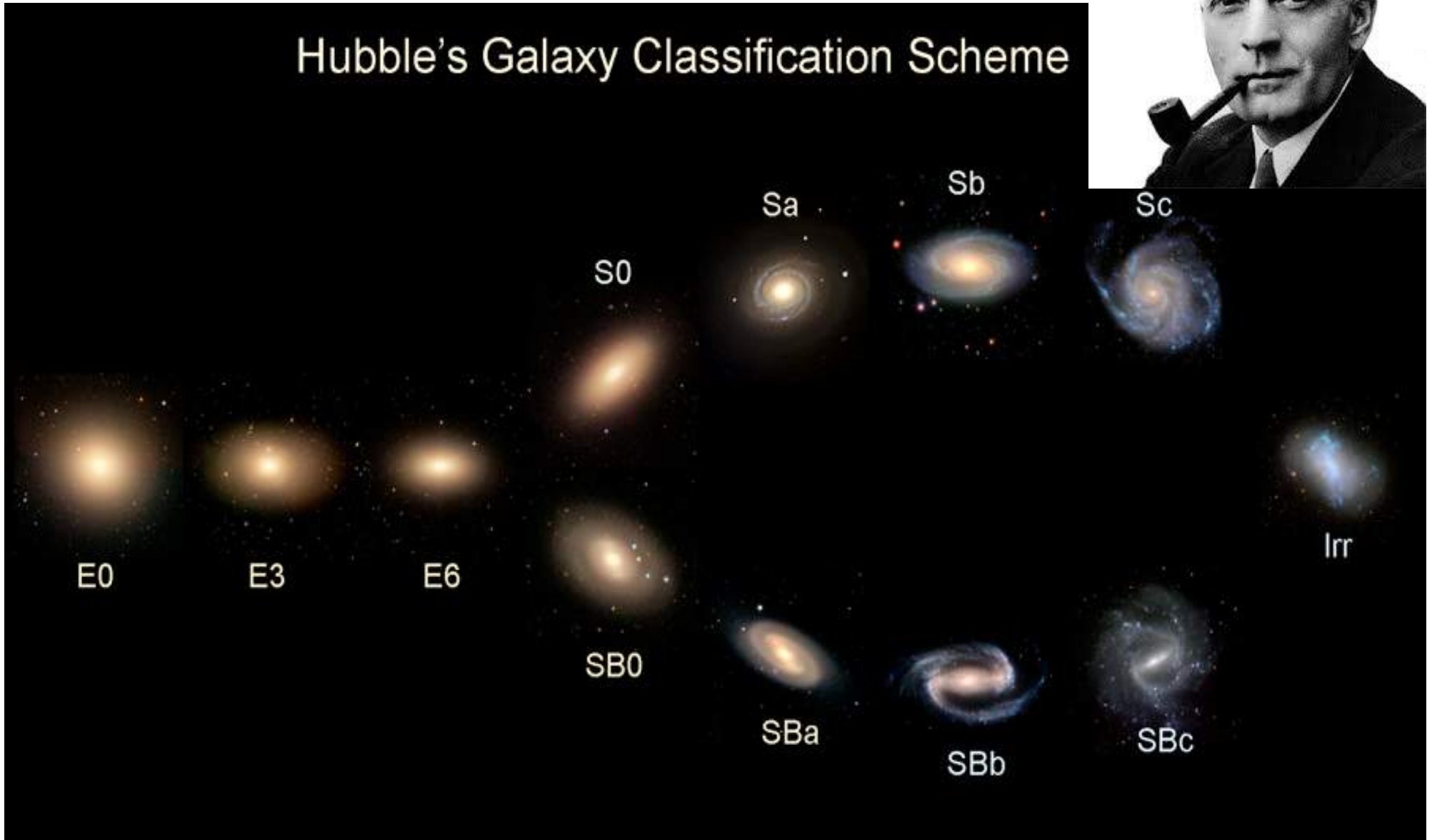
# Gran variedad de formas



# El diapasón de Hubble



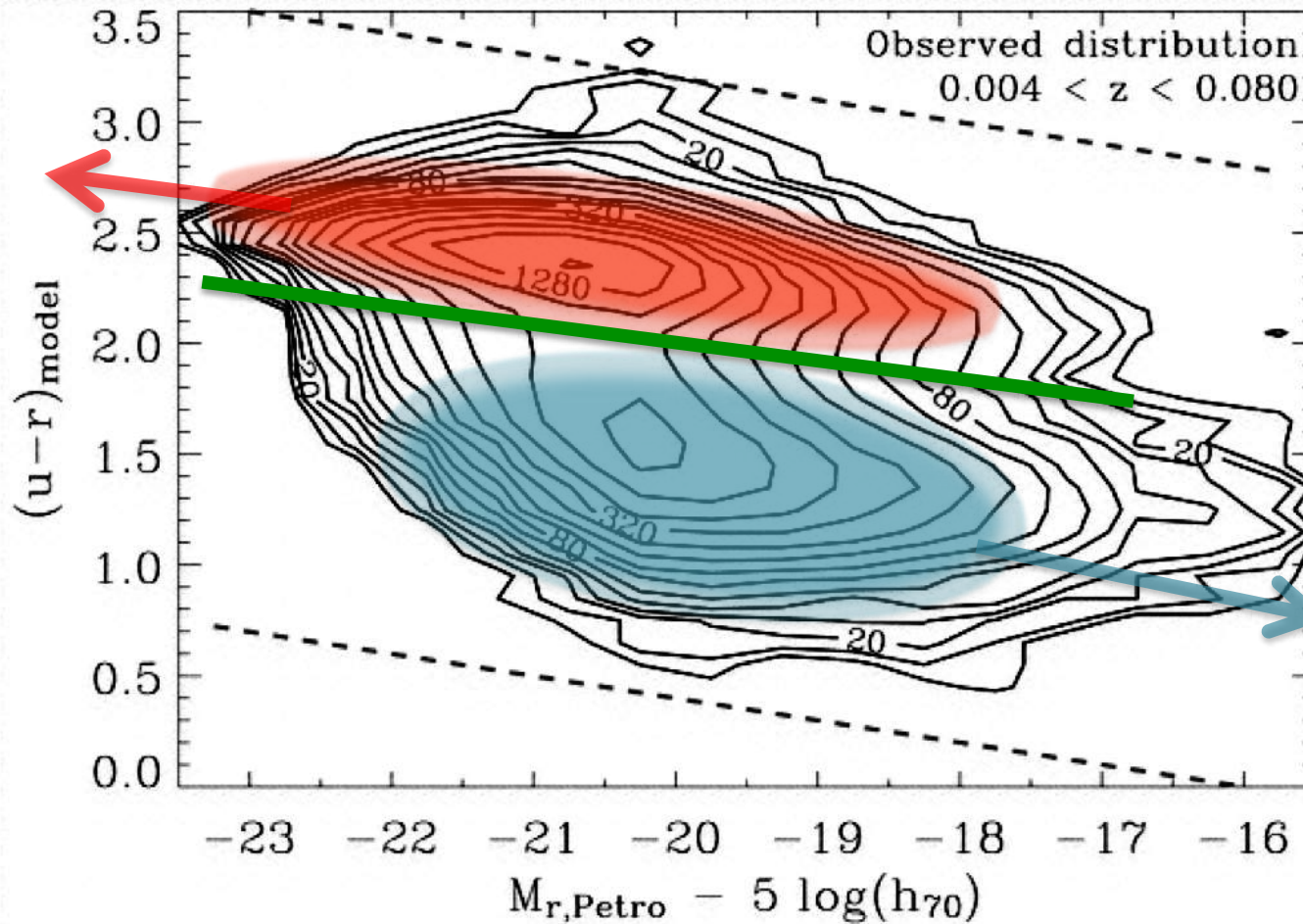
## Hubble's Galaxy Classification Scheme



# Distribución bimodal de galaxias



**Red colors**  
**Early type**  
**Old stars**  
**Gas-poor**  
**Passive evolution**  
**Strongly clustered**

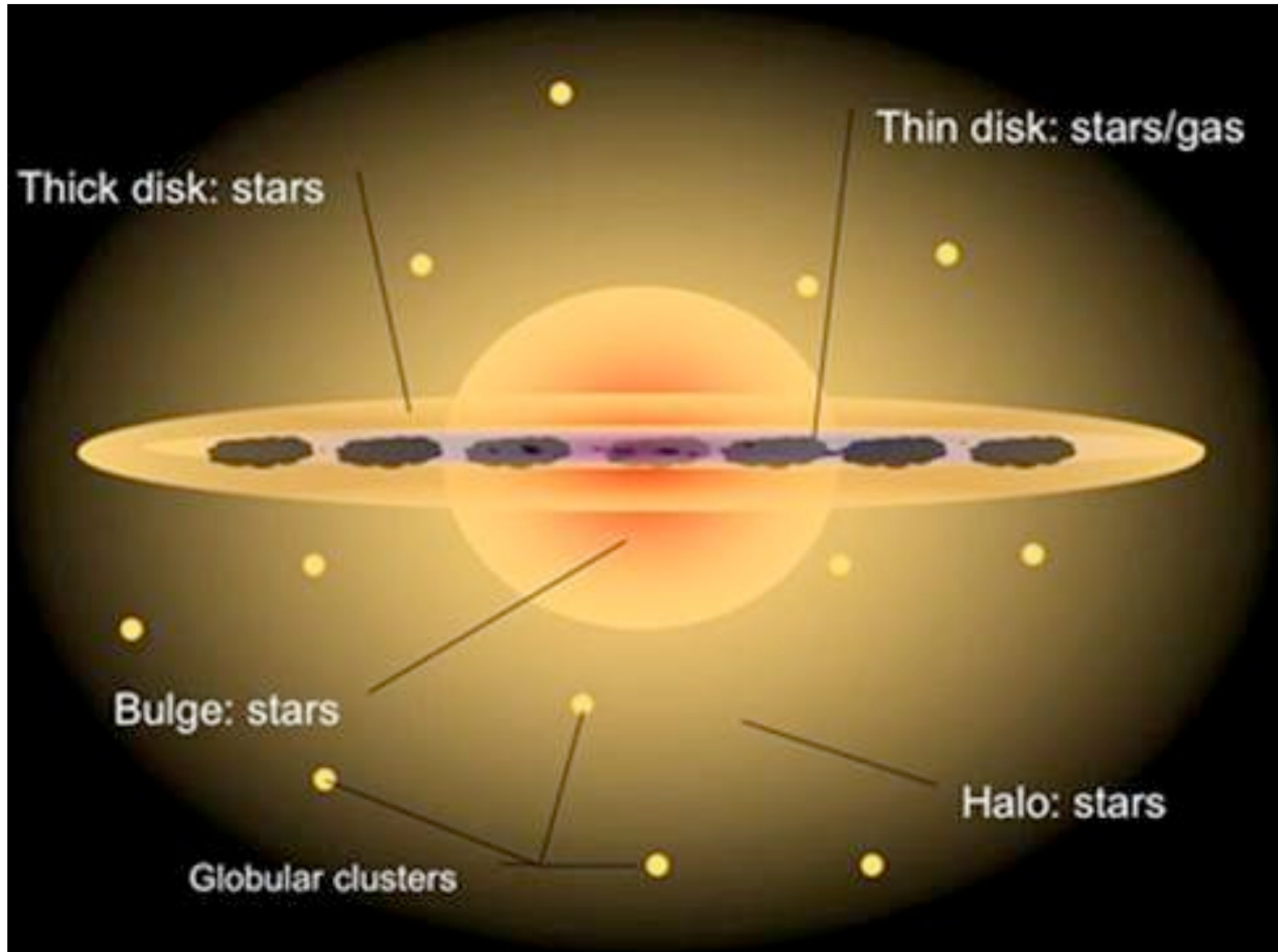


**Blue colors**  
**Late type**  
**Young stars**  
**Gas-rich**  
**Actively starforming**  
**Not clustered**



Baldry et al. 2004

# Estructura de galaxia espiral



# Perfiles de brillo superficial

Permiten estimar perfil de densidad asumiendo una relación M/L

**Bulbo / elípticas: Ley  $R^{1/4}$  (de Vaucouleurs)**

$$\begin{aligned} I(R) &= I(0) \exp\left(-7.67 (R/R_e)^{1/4}\right) \\ &= I(R_e) \exp\left(-7.67 \left[ (R/R_e)^{1/4} - 1 \right]\right) \end{aligned}$$

Bulbos:  $R_e \sim 0.5 - 4$  kpc

**Disco espiral: Ley exponencial**

$$I(R) = I(0) \exp(-R/R_d)$$

$R_d \sim 2-5$  kpc disco espiral truncado para  $R > 3 - 5 R_d$

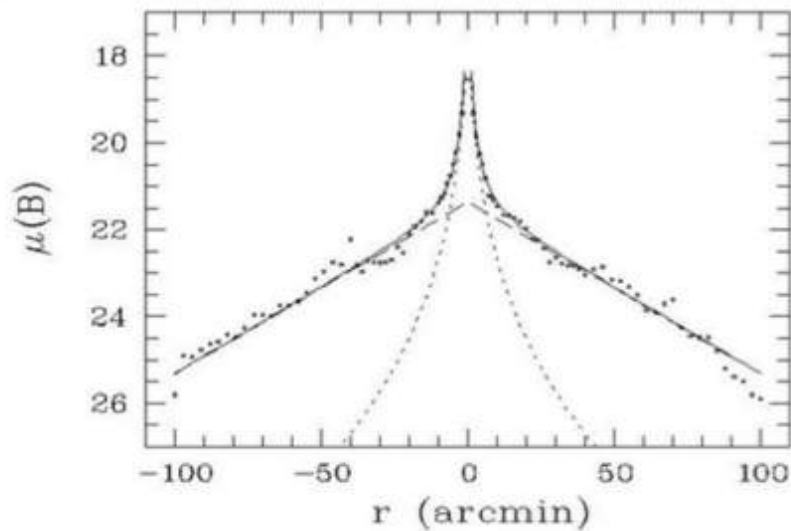
**Halo estelar (cúmulos globulares y estrellas Población II):**

$$\rho(r) \propto r^{-\alpha}, \alpha \sim 3 \quad \text{Difícil de medir excepto Via Láctea y M31 !!}$$

Relación M/L secuencia principal:

$$\begin{aligned} \frac{L}{L_\odot} &\approx .23 \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{2.3} && (M < .43M_\odot) \\ \frac{L}{L_\odot} &= \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^4 && (.43M_\odot < M < 2M_\odot) \\ \frac{L}{L_\odot} &\approx 1.5 \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{3.5} && (2M_\odot < M < 20M_\odot) \\ \frac{L}{L_\odot} &\approx 3200 \frac{M}{M_\odot} && (M > 20M_\odot) \end{aligned}$$

# Descomposición bulbo-disco



Formación y Evolución de Galaxias

## Métodos directos:

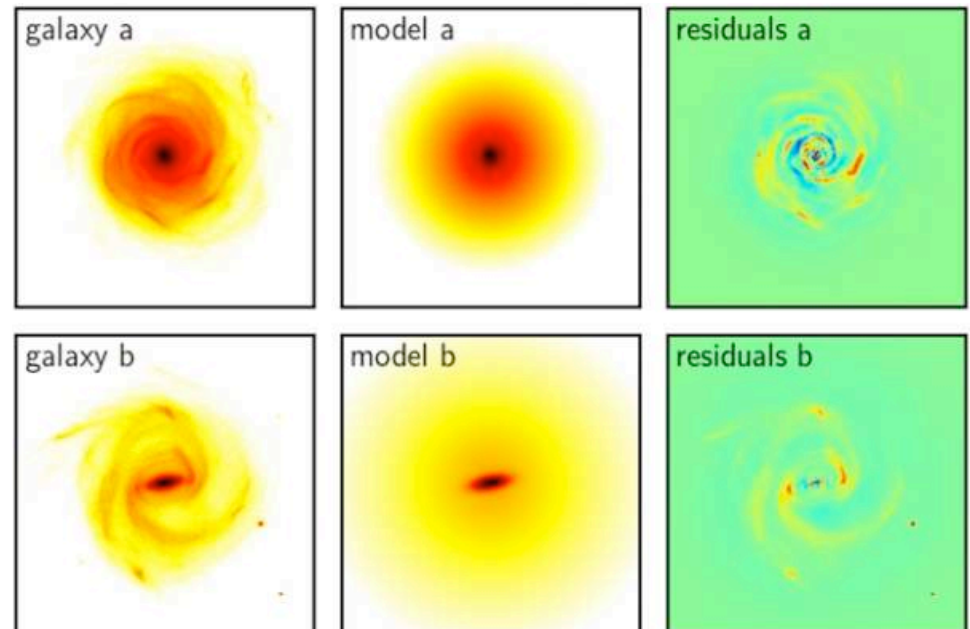
- Descomposición de cortes 1D
- Descomposición de imagen 2D

## Software:

GIM2D (Simard 1998)

GALFIT (Peng et al. 2002)

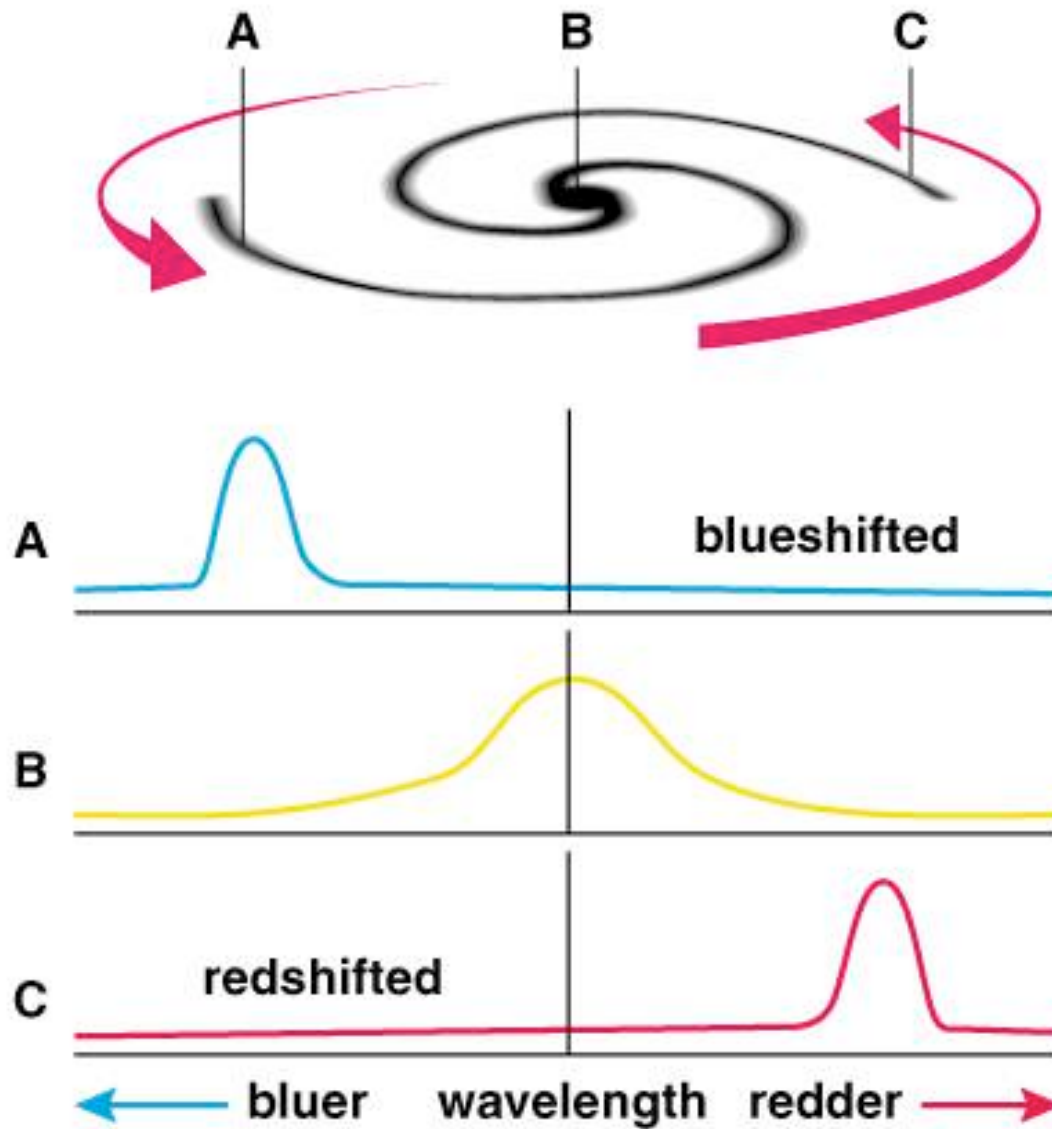
BUDDA (de Souza et al. 2004)



Antonio Hernán Caballero

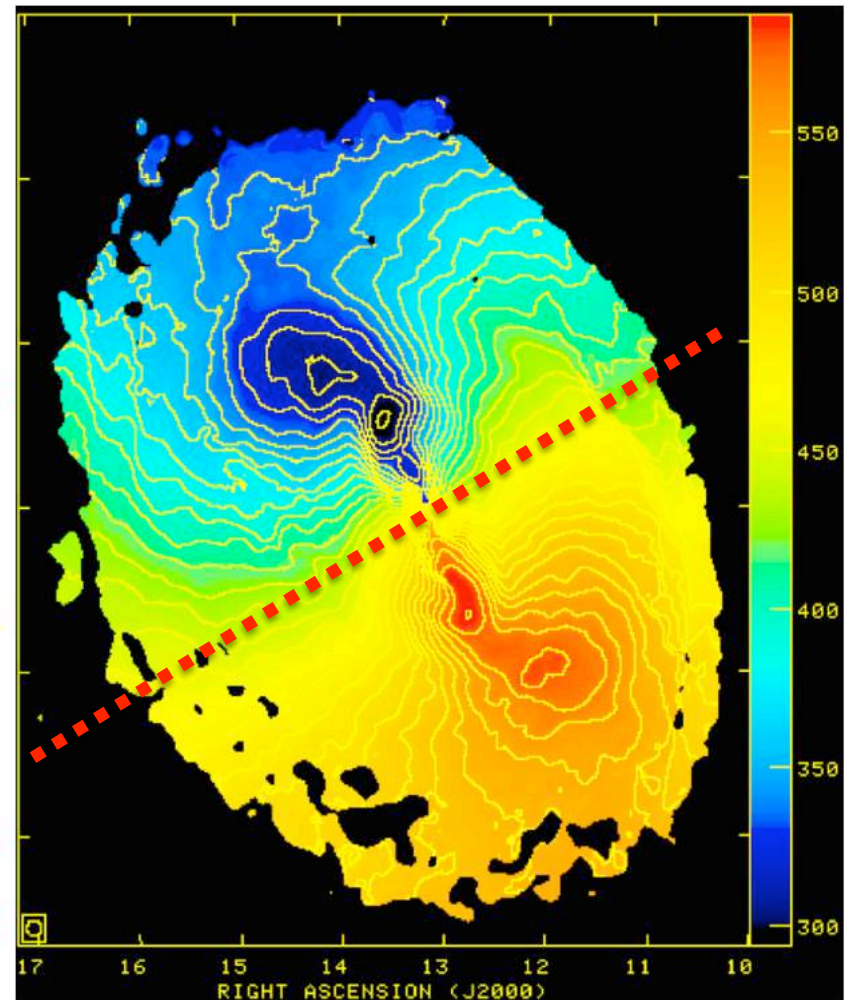
15

# Rotación de la galaxia



Copyright © Addison Wesley.

El desplazamiento Doppler permite calcular la componente radial de la velocidad





# Curva de rotación

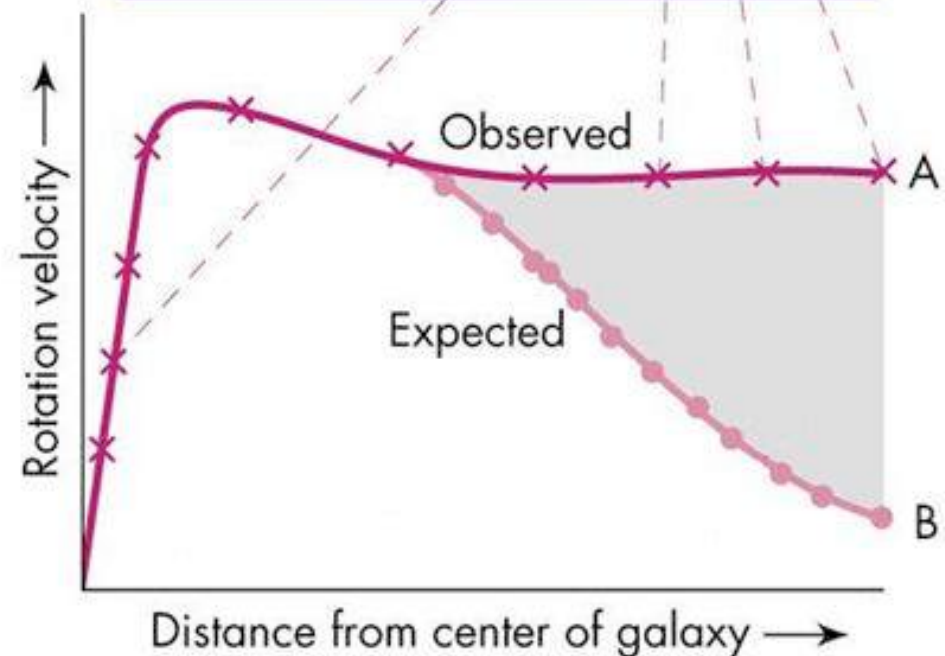
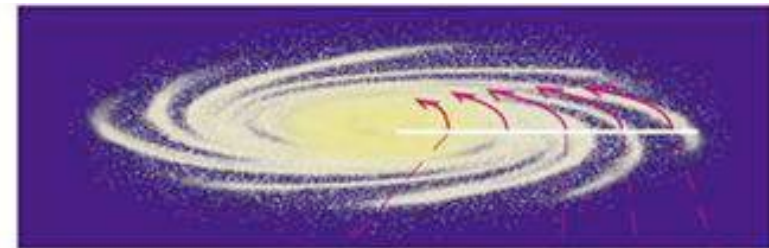
Deducción asume componentes del disco tienen órbitas circulares:

$$a = \frac{GM(r)}{r^2} = \frac{v^2}{r} \quad \longrightarrow \quad v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} \quad v_{rad} = v \sin i$$

$M(r)$  = masa en esfera interior a radio  $r$ .

$M(r)$  se obtiene integrando perfil brillo + relación  $M/L$ .

**$v(r)$  Doppler no concuerda con lo esperado a partir del perfil de brillo superficial**



# Curvas de rotación WTF?

**1939** Horace Babcock mide curva de rotación de M31: **M/L aumenta con r**

**1959** Louse Volders demuestra M33 no rota según esperado

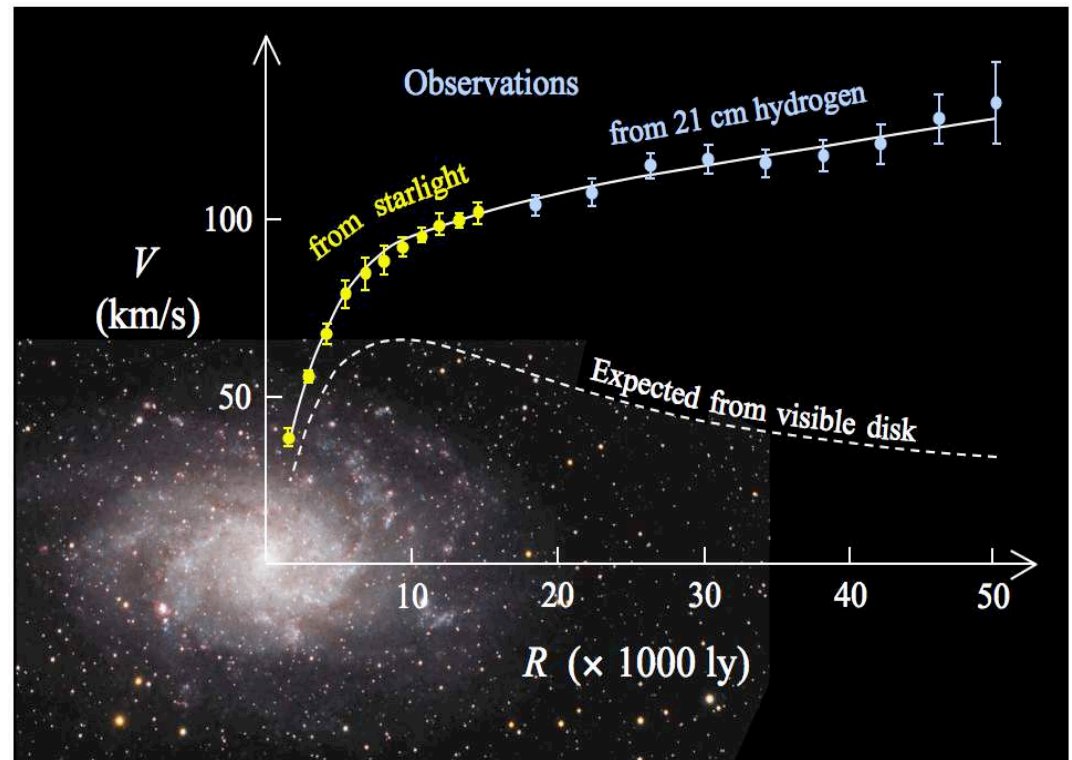
**1975** Vera Rubin mide  $v \sim r^{\text{cte}}$  en el disco exterior de múltiples galaxias

## Observaciones radio: línea HI 21cm

- El disco se extiende hasta  $r \gg R_d$
- La curva de rotación no decrece

## Interpretaciones de curvas de rotación:

- a) Dinámica Newtoniana Modificada (MOND)
- b) **Materia oscura**



# La materia oscura

Partículas **exóticas** (**no** incluidas en el **modelo estándar**) insensibles a campos EM (axiones, neutralinos, neutrinos estériles...)

Nuestra ÚNICA fuente de información sobre las galaxias es la luz que nos llega de ellas

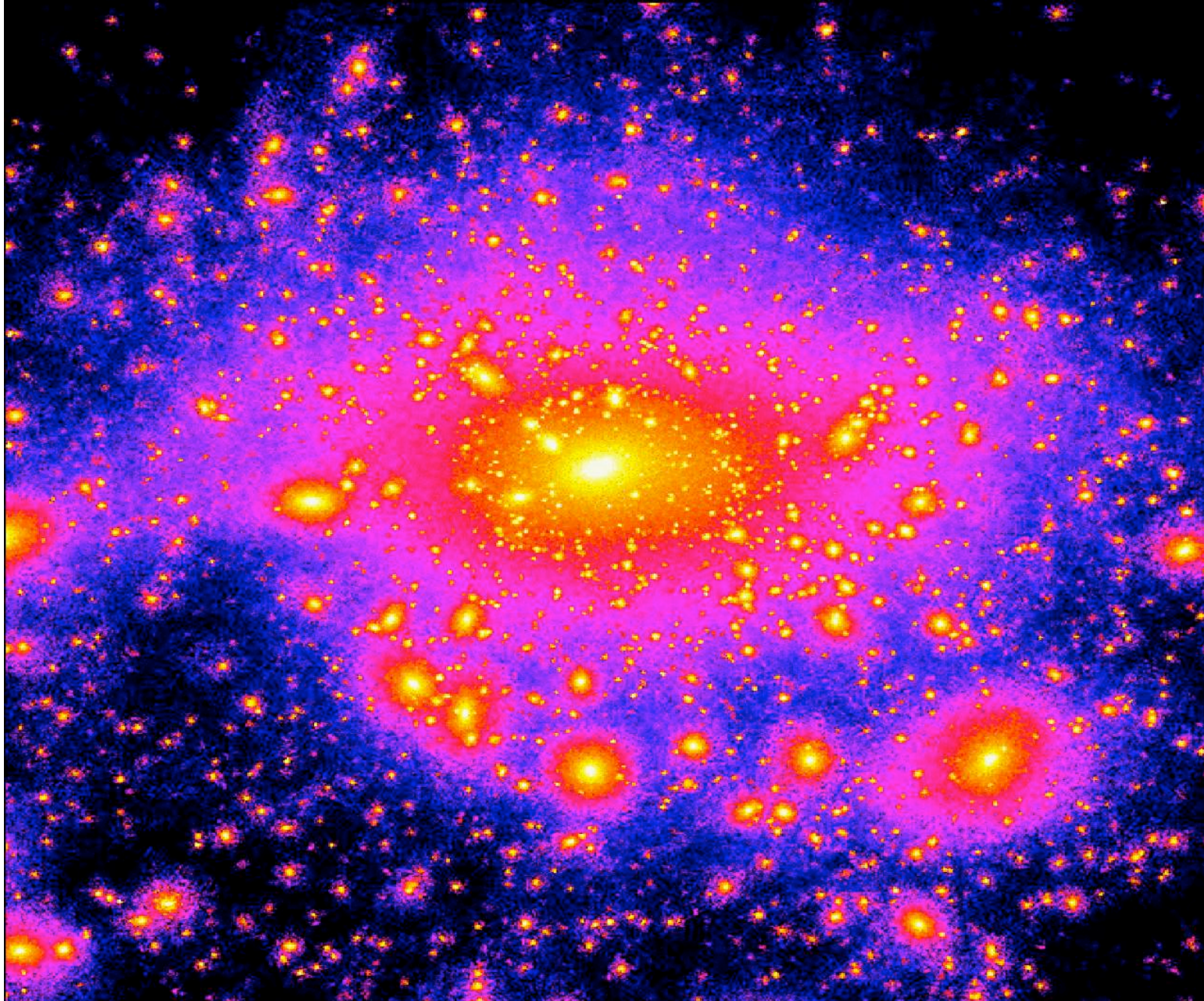
Si algo no emite, dispersa, o absorbe luz → imposible (o casi) detección directa

Existencia de materia oscura inferida a partir **de su influencia gravitatoria**:

- Curvas de rotación galaxias
- Distribución velocidades de galaxias en cúmulos
- Lentes gravitatorias
- Fondo Cósmico de Microondas

**La materia oscura no bariónica constituye ~85%  
de la masa total del Universo**

# Halos de materia oscura



# Distribución espacial de galaxias

**Principio cosmológico: el universo es homogéneo e isótropo**

**Zwicky et al., galaxy overdensities map**

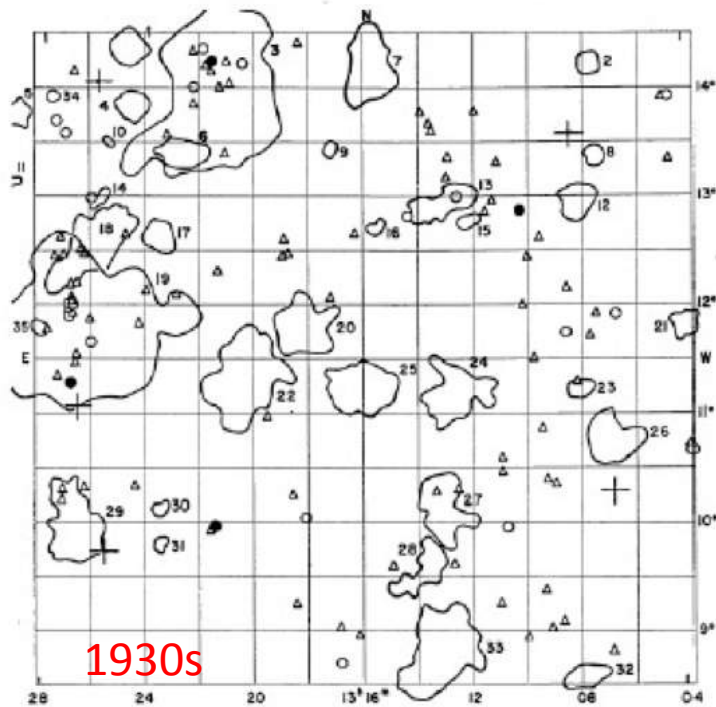
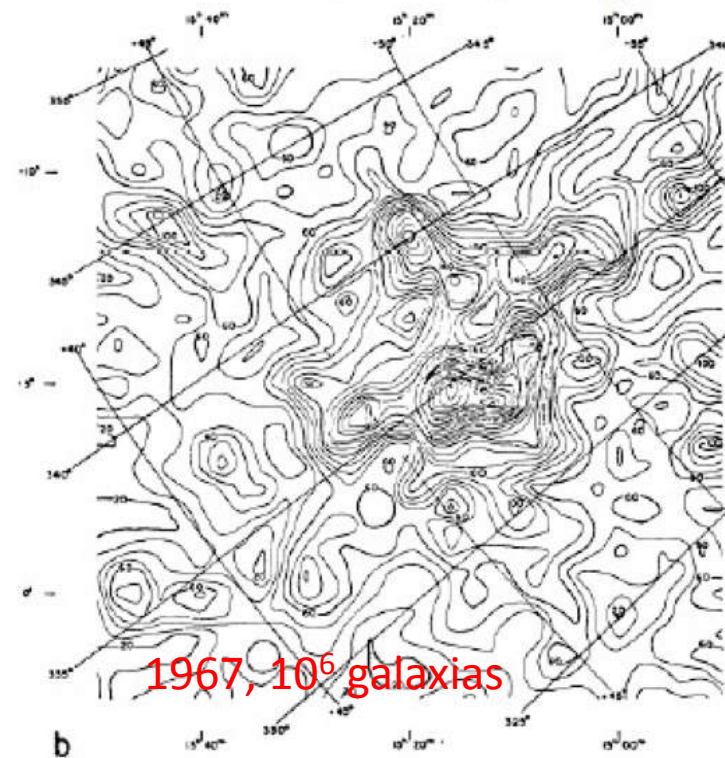
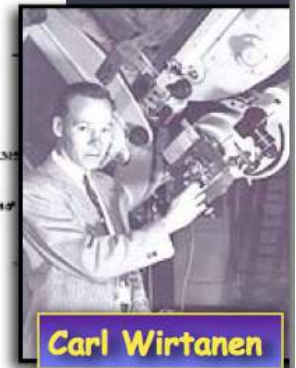


FIGURE 4

**Shane-Wirtanen galaxy counts, density map**

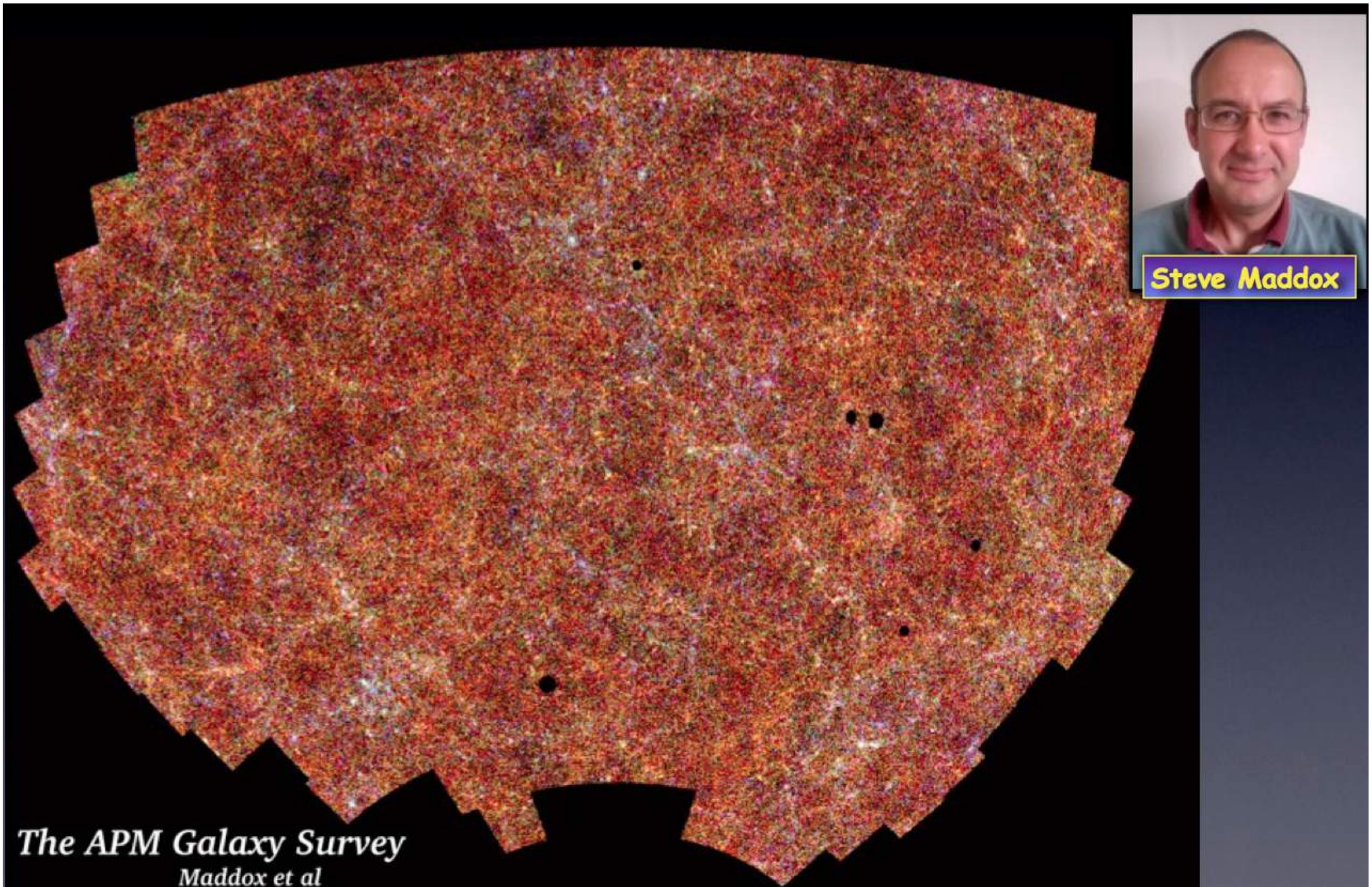


**Donald Shane**



**Carl Wirtanen**

1990: escáneres de placas fotográficas



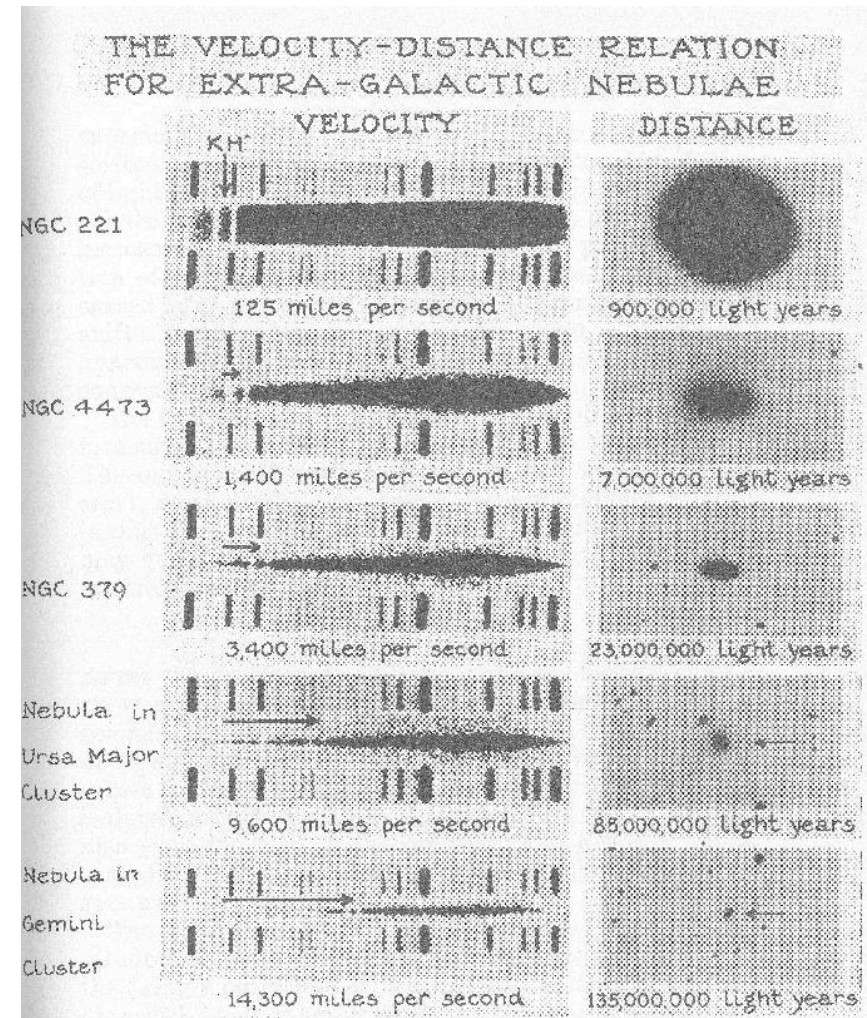
Steve Maddox

# Cartografiados de redshift

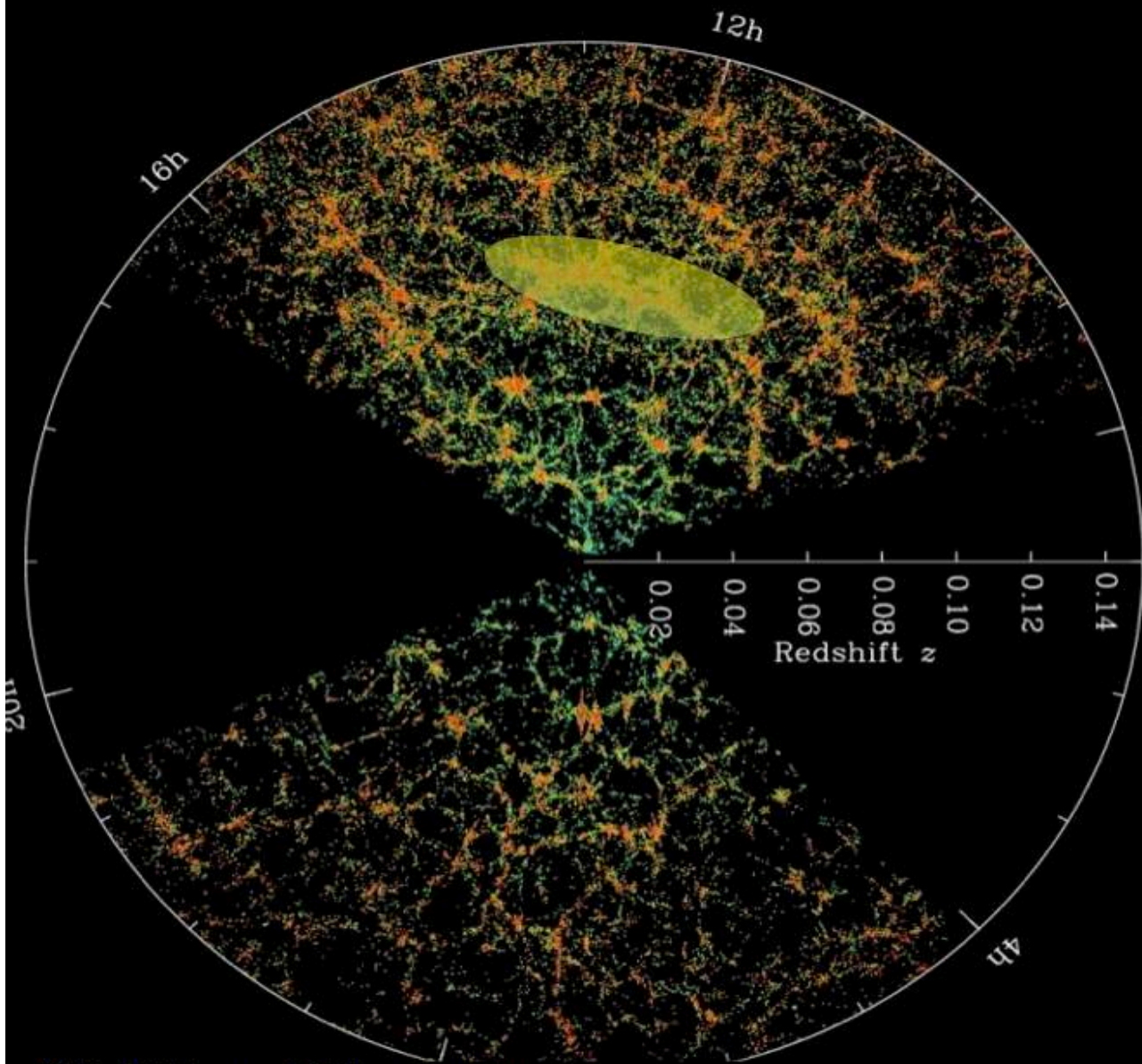
Ley de Hubble (1929):  $v = H_0 d$   
(propuesta por Lemaître en 1927)

1950s: de Vaucouleurs,  
primeros cartografiados de redshift

Representative Redshift Surveys		
1985	CfA	~2,500
1992	IRAS	~9,000
1995	CfA2	~20,000
1996	LCRS	~23,000
2003	2dFGRS	~250,000
2009	SDSS	~930,000



# The Sloan Digital Sky Survey



At present, the largest galaxy redshift survey is the **Sloan Digital Sky Survey (SDSS)**.

Using the dedicated 2.5m telescope at **Apache Point Observatory**, it imaged more than 8000 sq. deg. of sky in five passbands (**ugriz**), and obtained spectra for **930,000** galaxies and **120,000** quasars.

For more info: [www.sdss.org](http://www.sdss.org)

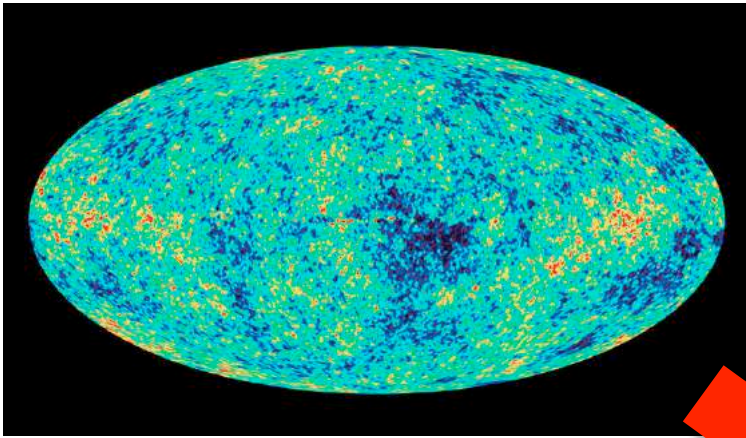


ASTR 610: Theory of Galaxy Formation

© Frank van den Bosch: Yale 2012



# Formación de galaxias: modelo CDM



## Fondo cósmico de microondas

380 000 años tras Big Bang

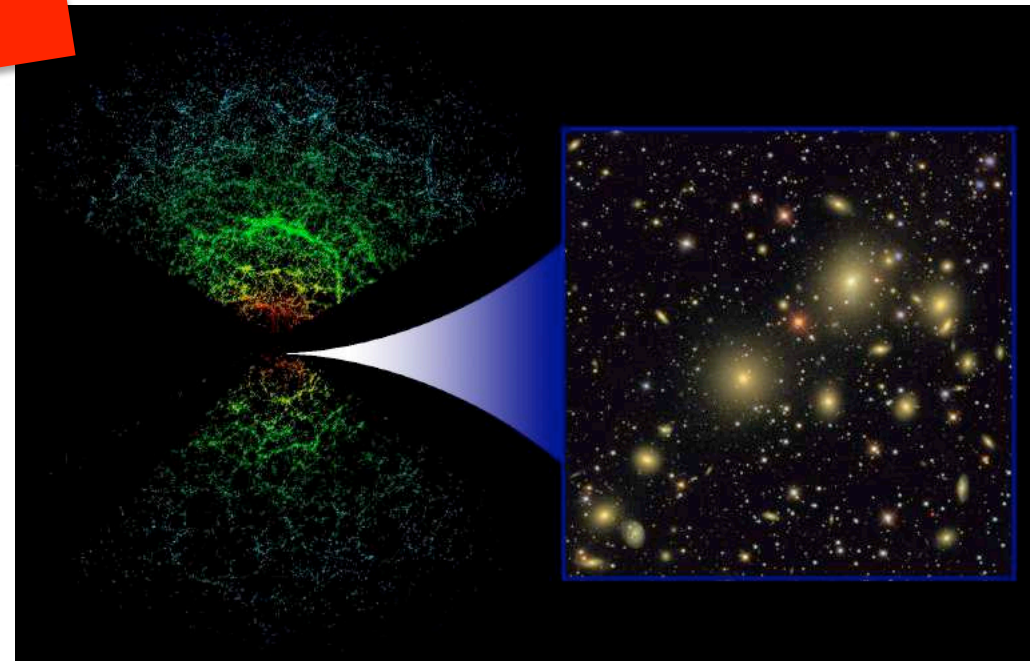
Temperatura actual:  $2.72548 \pm 0.00057$  K

Fluctuaciones densidad:  $\Delta\rho/\rho \sim \Delta T/T \sim 10^{-5}$



## Universo actual

Distribución fractal de galaxias  
Altas concentraciones de materia  
(galaxias, estrellas) rodeadas por  
enormes vacíos.



# Formalismo de Press-Schechter

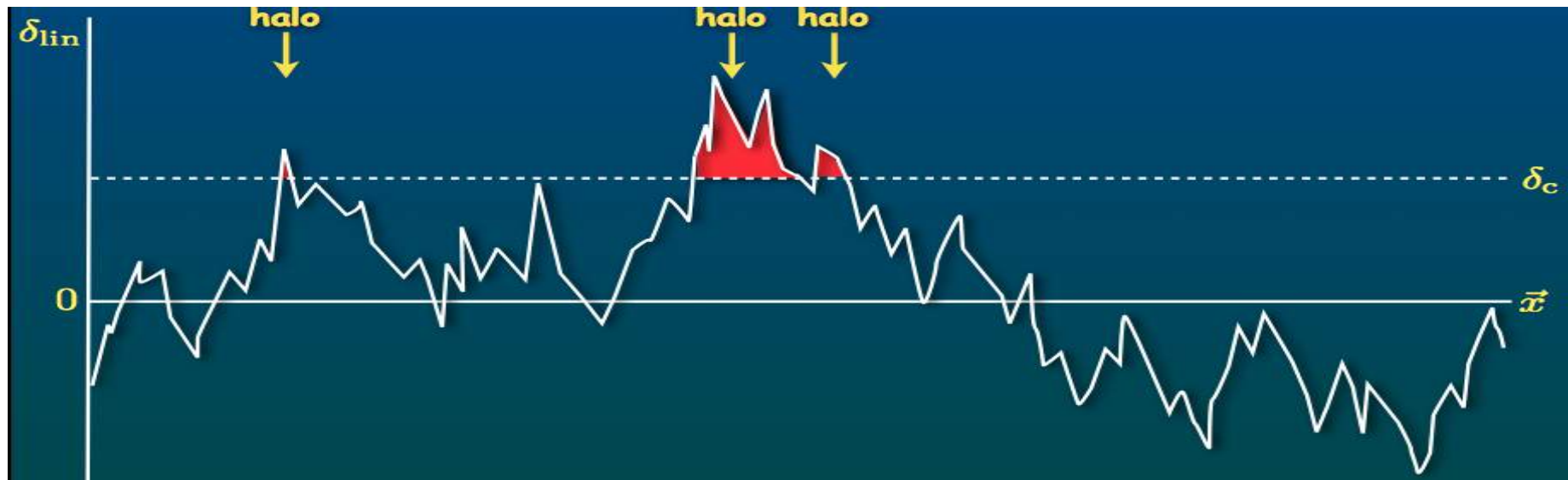
Modelo matemático que predice nº de objetos entre  $M$  y  $M+dM$  por unidad de volumen (función de masas de los halos de materia oscura)

$$N(M)dM = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(1 + \frac{n}{3}\right) \frac{\bar{\rho}}{M^2} \left(\frac{M}{M^*}\right)^{(3+n)/6} \exp\left(-\left(\frac{M}{M^*}\right)^{(3+n)/3}\right) dM$$

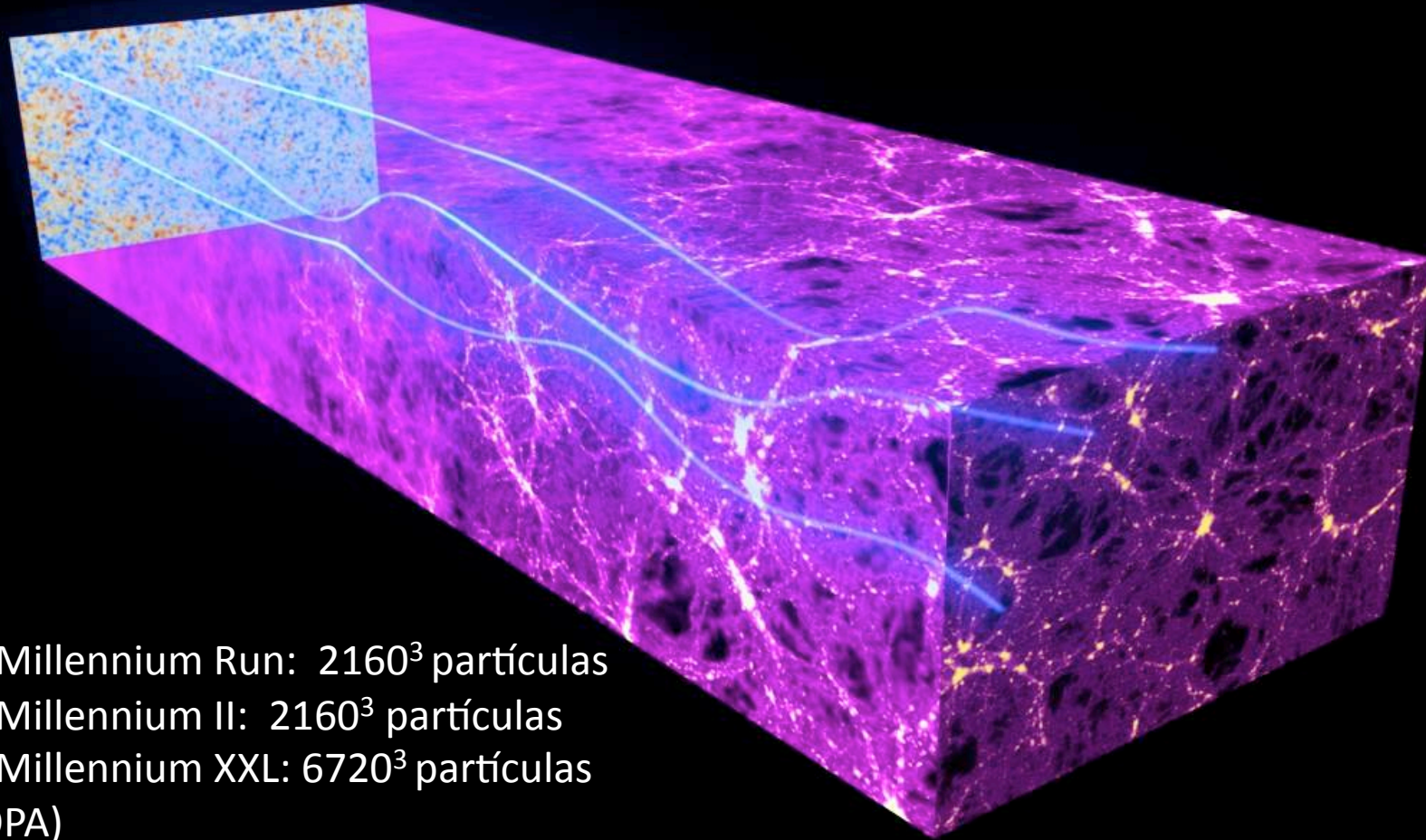
Origen perturbaciones iniciales: fluctuaciones cuánticas (era de inflación)

Perturbaciones campo radiación  $\rightarrow$  perturbaciones densidad de masa

crecimiento lineal (pre-CMB)  $\rightarrow$  colapso gravitatorio (post-CMB)



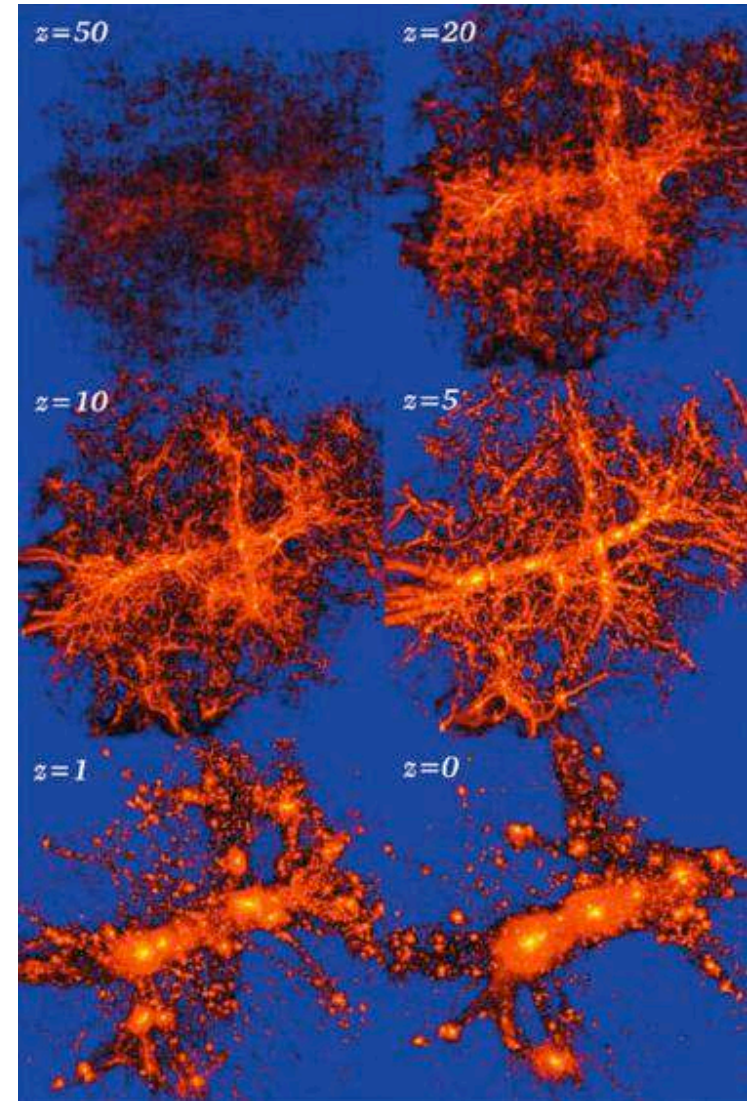
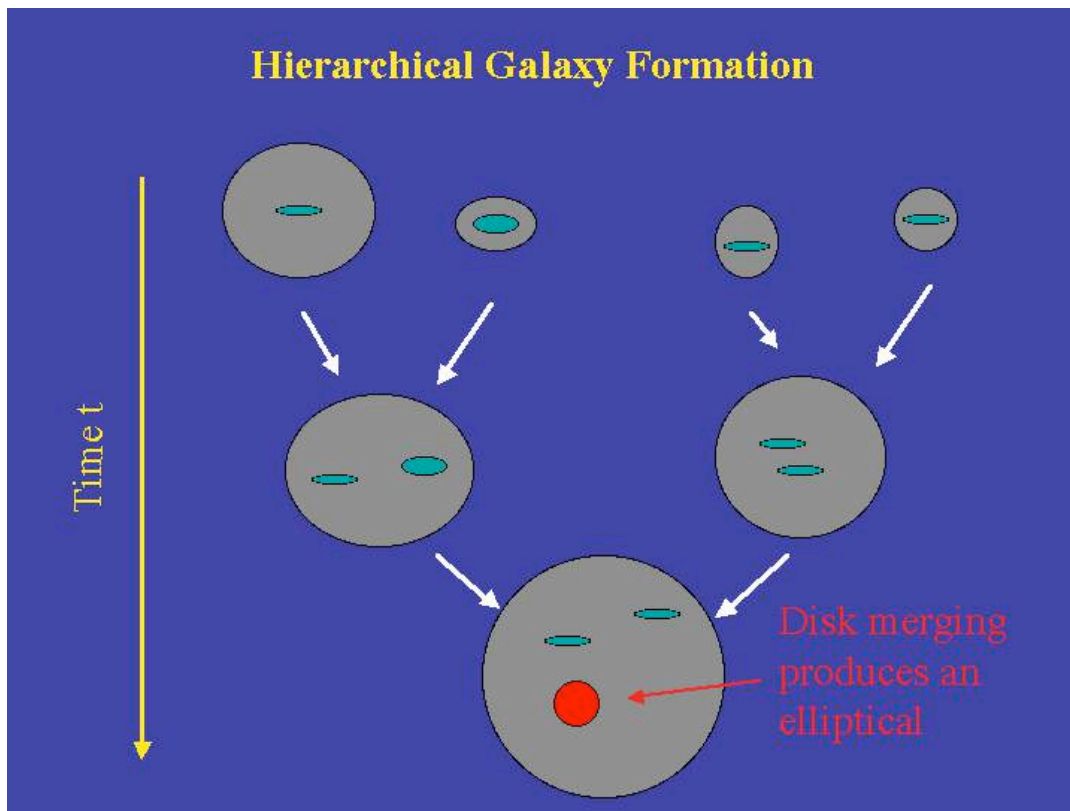
# Simulaciones cosmológicas: the Millennium Simulation(s)



2005 Millennium Run:  $2160^3$  partículas  
2009 Millennium II:  $2160^3$  partículas  
2010 Millennium XXL:  $6720^3$  partículas  
(JUROPA)

# Formación jerárquica de estructuras

Los picos en la distribución de densidad que vemos en el CMB son las semillas de las futuras galaxias y cúmulos.



# Relajación de halos (virialización)

- Partículas de DM interactúan sólo por gravedad → no choques, no disipación

$$E = K + U = cte$$

- Estado inicial:  $K \sim 0$ ,  $U = E$
- Evolución del sistema:  $dK/dt > 0$ ,  $dU/dt < 0$  (contracción adiabática)
- Estado final (virializado):  $K = -U/2$

- Los halos de materia oscura se estabilizan en forma esférica

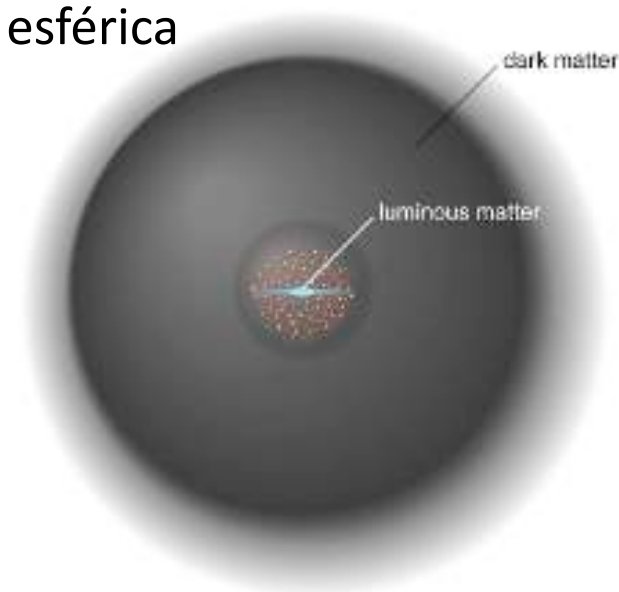
- Halos tienen **perfil de densidad** característico:

$$\rho(r) = \frac{\text{constant}}{(r/a)(1+r/a)^2}$$

*Perfil de Navarro, Frenk & White*

$$\rho(r) = \rho_0 e^{-\alpha r^m}$$

*Perfil de Einasto*



# Relajación de la materia ordinaria

Gas → viscosidad → fricción

Energía cinética → Energía térmica (calor)

Nubes de gas sostenidas por presión interna

$$P = k\rho T$$

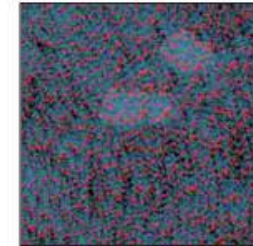
Radiación → enfriamiento → colapso

Conservación L → formación de disco.

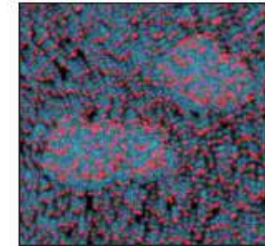
## COOKING UP A GALAXY

THREE BASIC PROCESSES dictated how the primordial soup congealed into galaxies: the overall expansion of the universe in the big bang, the force of gravity, and the motion of particles and larger constituents. The shifting balance among these processes can explain why galaxies became discrete, coherent bodies rather than a uniform gas or a horde of black holes. In this theory, small bodies coalesce first and thenglom together to form larger objects. A crucial ingredient is dark matter, which reaches a different equilibrium than ordinary matter.

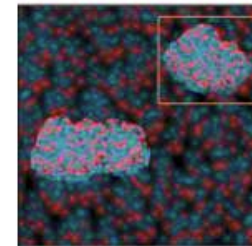
—G.K. and F.v.d.B.



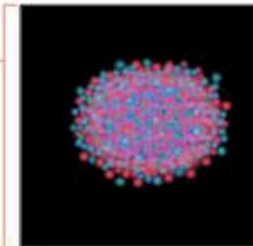
**1** In the beginning, a primordial fluid—a mixture of ordinary matter (blue) and dark matter (red)—fills the universe. Its density varies subtly from place to place.



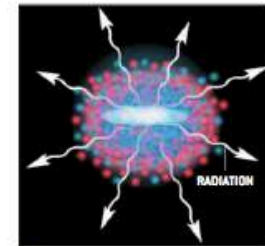
**2** At first, cosmic expansion overpowers gravity. The fluid thins out. But patches of higher density thin out more slowly than other regions do.



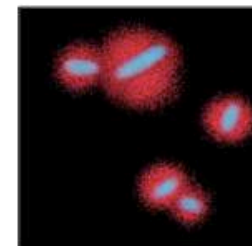
**3** Eventually these patches become so dense, relative to their surroundings, that gravity takes over from expansion. The patches start to collapse.



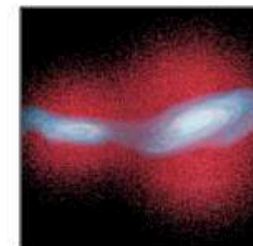
**4** As each patch collapses, it attains equilibrium. The density, both of ordinary and of dark matter, peaks at the center and decreases toward the edge.



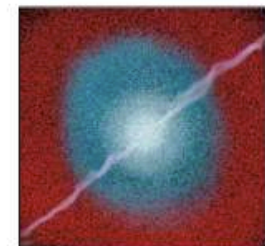
**5** Dark matter, being unable to radiate, retains this shape. But ordinary matter emits radiation, collapses into a rotating disk and begins to condense into stars.



**6** Protogalaxies interact, exerting torques on one another and merging to form larger and larger bodies. [This step overlaps with steps 4 and 5.]



**7** When two disks of similar size merge, the stellar orbits become scrambled. An elliptical galaxy results. Later a disk may develop around the elliptical.



**8** The merger triggers new star formation and feeds material into the central black hole, generating an active galactic nucleus, which can spew plasma jets.

DEAN IXER

www.sciam.com

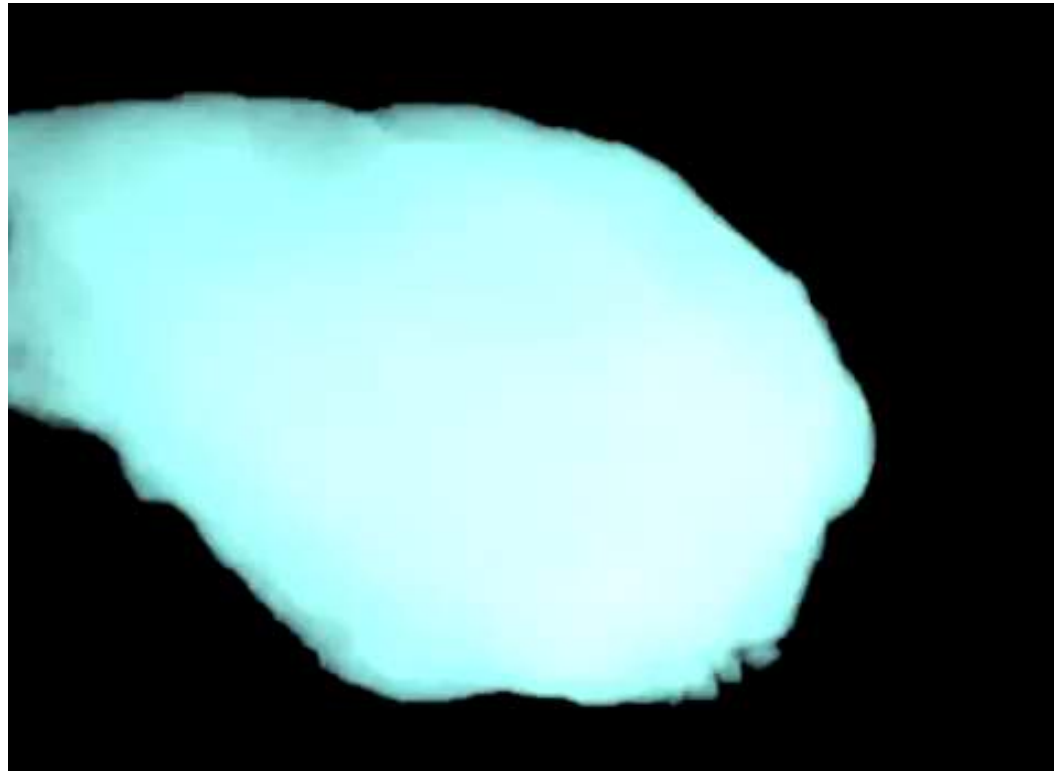
COPYRIGHT 2002 SCIENTIFIC AMERICAN, INC.

SCIENTIFIC AMERICAN 51

# Simulaciones de formación de discos

Los **modelos** sobre formación de discos galácticos **no incluyen** (o simplifican):

- Campos magnéticos
- Calentamiento del gas por estrellas, supernovas, AGN
- Cambios en las propiedades radiativas del gas por enriquecimiento en metales
- Cambios de fase ( $H_2$  /  $H$  /  $H^+$ )



# Interacciones entre galaxias



- Dist. Galaxias  $\sim 20x \odot \rightarrow$  interacciones frecuentes
- Interacciones gobiernan evolución
- Expansión + mergers  $\rightarrow$  más interacciones en el pasado
- Variables interacción:  $M_1/M_2, v_{rel}, d$

NGC 5257 & NGC 5258 (HST)



# Tipos de interacciones

- *Major merger*

$M_1 \sim M_2$ ;  $v_{\text{rel}}$ ,  $d$  pequeños  $\rightarrow$  fusión completa

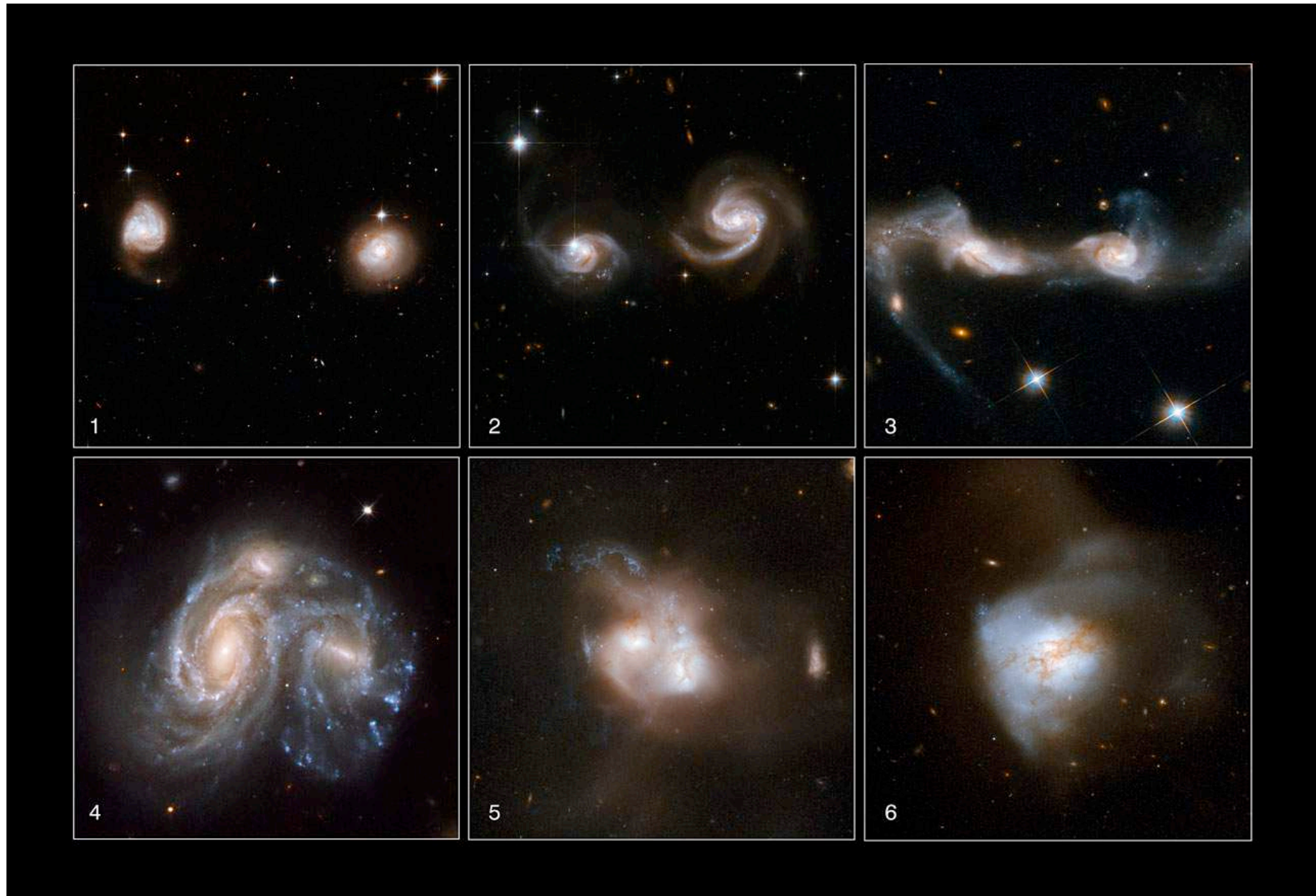
- *Minor merger*

$M_1 \gg M_2$  (canibalismo de satélites)

- *Galaxy harassment*

$V_{\text{rel}}$ ,  $d$  grandes  $\rightarrow$  pérdida de gas y regiones externas  
(cúmulos de galaxias)

# Fases de un merger



# Tipos de merger por contenido en gas

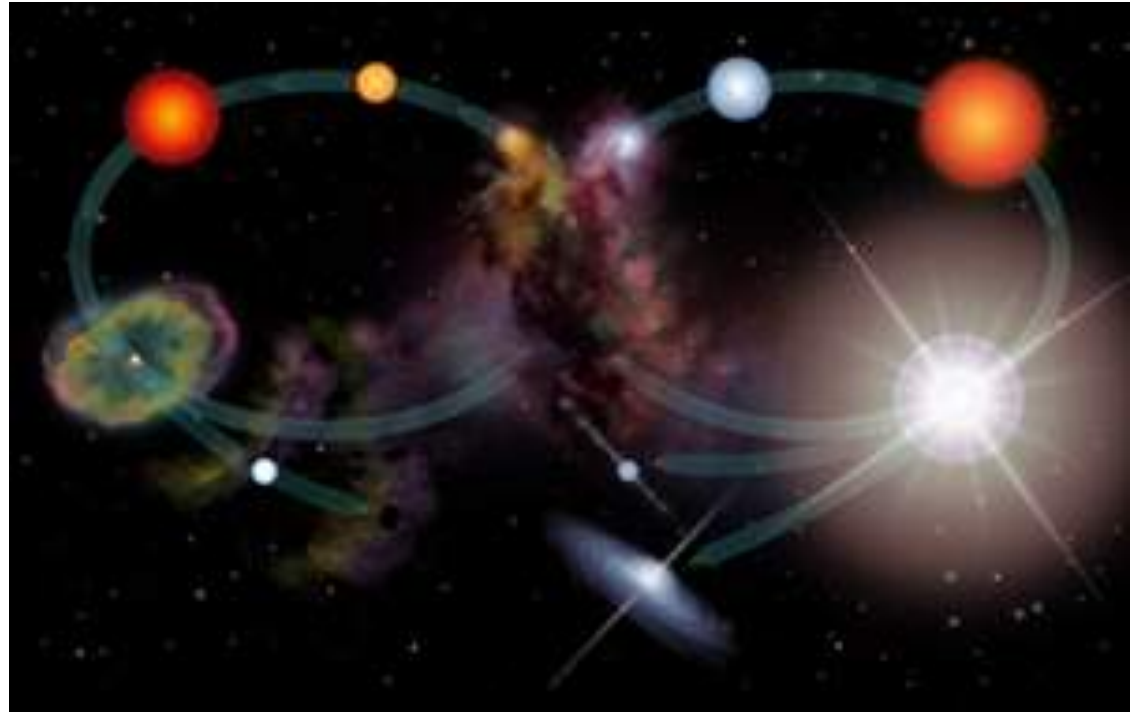
- ***Wet merger***: espiral + espiral
  - Starburst
  - QSO
  - Agotamiento gas + feedback = formación elípticas?
- ***Dry merger***: elíptica + elíptica
  - Canal de crecimiento elípticas masivas
- ***Mixed merger***: elíptica + espiral

# Evolución química de la galaxia

- Espectros estelares → composición estelar →  $H^{\alpha}$  de formación
- Nucleosíntesis primordial:  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  (trazas:  $^7\text{Li}$ ,  $^9\text{Be}$ )
- Elementos más pesados que  $^9\text{Be}$  sintetizados en estrellas
- Estrellas devuelven material al medio:
  - Vientos estelares
  - **Supernovas**

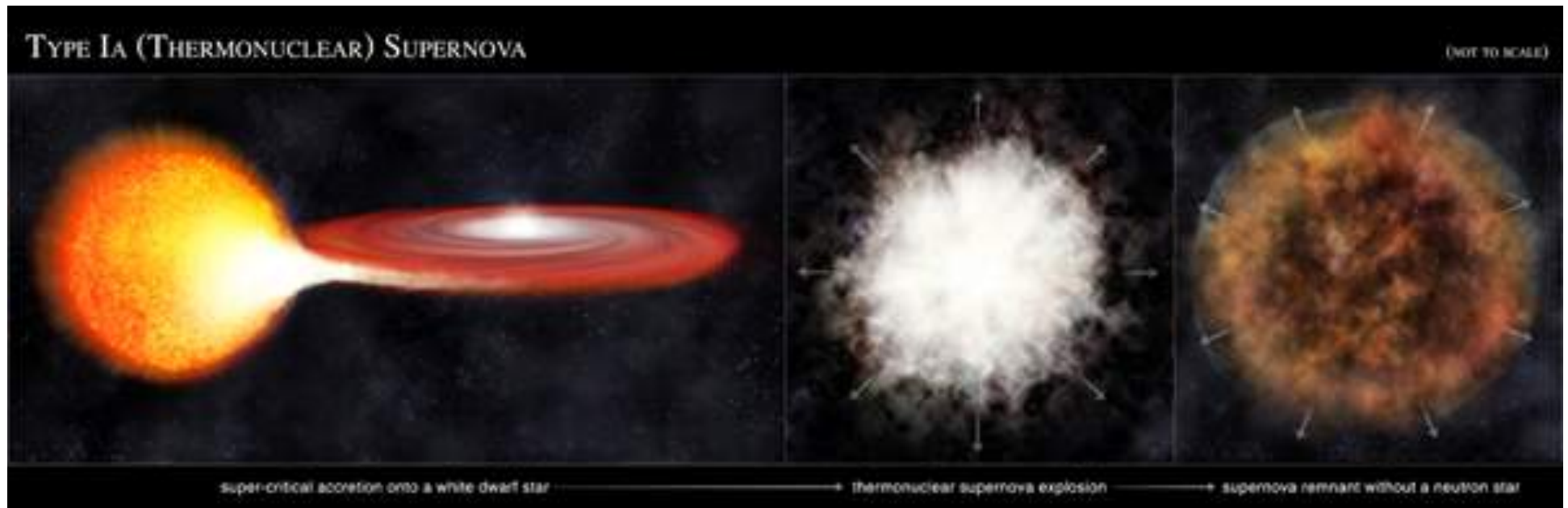


**Cada generación de estrellas está más enriquecida que la anterior en *elementos pesados***



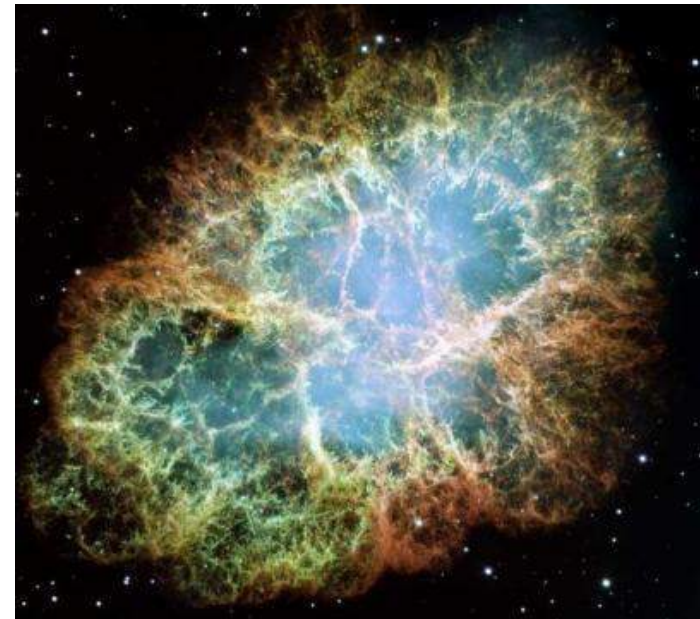
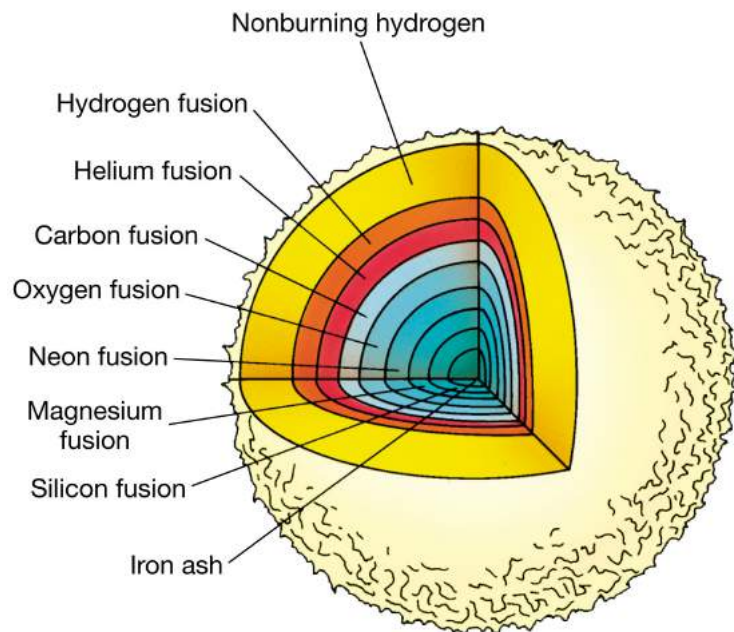
# Supernovas tipo Ia

- Enana blanca en sistema binario, núcleo degenerado de C y O
- $M > 1.44 M_{\odot}$  (Límite de Chandrasekhar)  $\rightarrow$  fusión C  $\rightarrow$  detonación
- Todo el material estelar devuelto al medio,  $v \sim 5000-20000\text{km/s}$
- Enriquecimiento del medio interestelar en Fe, Ni, Co
- Ocorre sólo en estrellas evolucionadas ( $> 1\text{Gyr}$ )

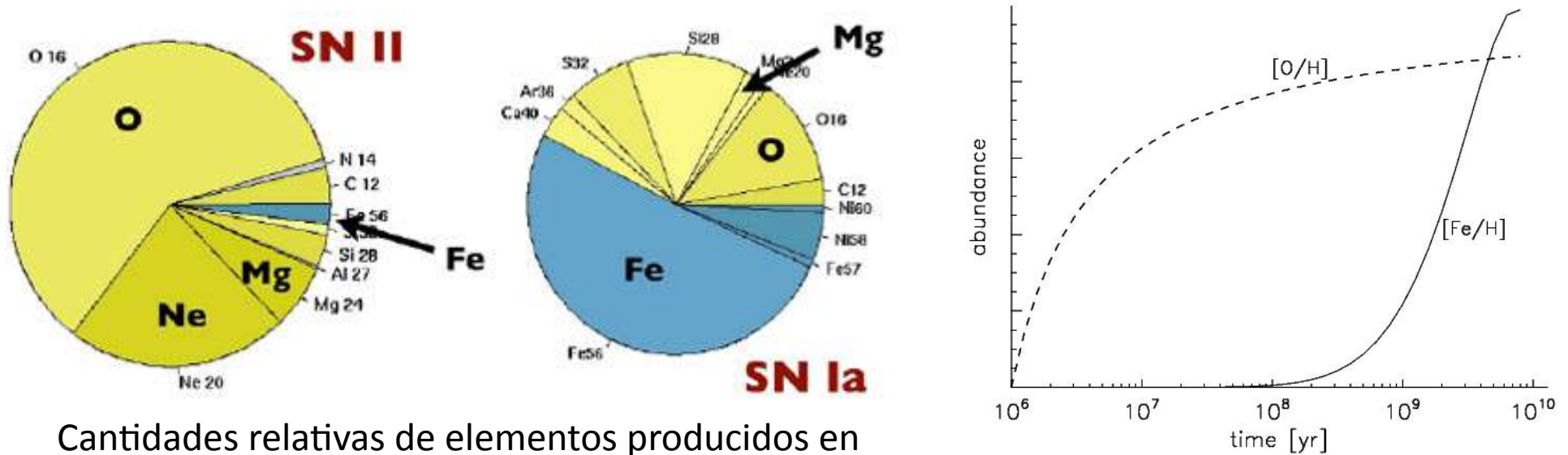


# Supernovas tipo II

- Estrella masiva ( $M > 8 M_{\odot}$ ) agota reacciones exotérmicas
- Estructura en capas de cebolla
- Fotodesintegración de núcleo de hierro ( $\text{Fe} + \gamma \rightarrow \alpha + \dots + \alpha + n + \dots + n$ )
- Implosión capas externas  $\rightarrow$  Rebote en núcleo degenerado  $\rightarrow$  SN
- Remanente: estrella de neutrones o agujero negro
- Enriquecimiento del medio en elementos  $\alpha$  (C, O, Mg)



# Evolución de la metalicidad



Cantidades relativas de elementos producidos en supernovas de tipo Ia y II.

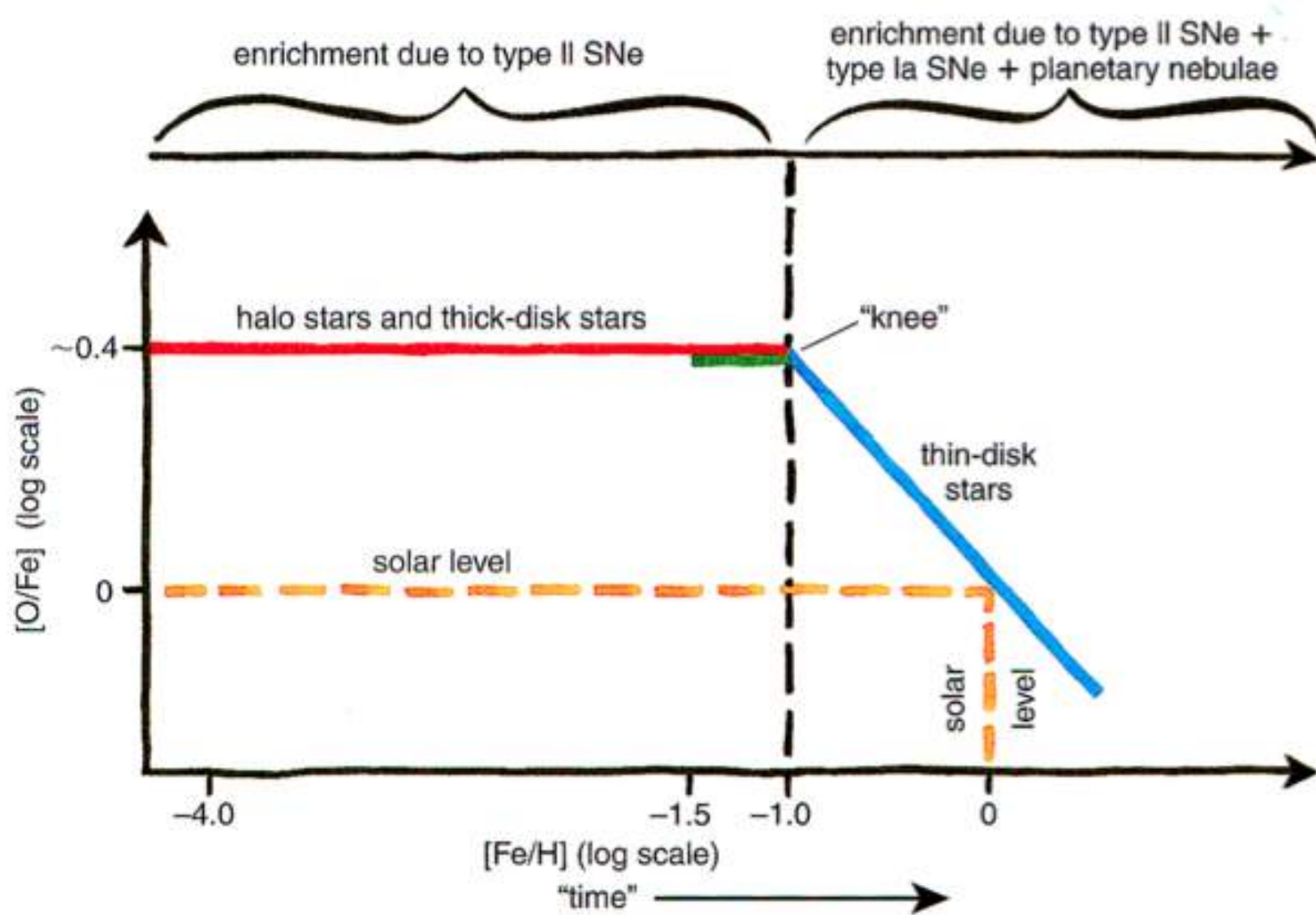
## Definiciones de metalicidad:

$$Z = \sum m_i / M$$

$$[X/H] = \log(n_X/n_H) - \log(n_X/n_H)_{\text{sol}}$$

- En los primeros  $\sim 10^8$  años aumenta [O/H] con [Fe/H]  $\sim$  cte (SN II)
- A partir de  $>10^9$  años aumenta [Fe/H] más deprisa que [O/H] (SN Ia)
- Espectros estelares muestran la metalicidad del medio **en que se formaron**

# Curva de metalicidad en la Via Láctea





# Estrellas de población III

- Nucleosíntesis primordial:  $Z = 10^{-12} - 10^{-10}$
- Población II:  $Z > 10^{-7}$



Generación previa de  
estrellas masivas

No detectamos estrellas Pob. III

Modelos teóricos:

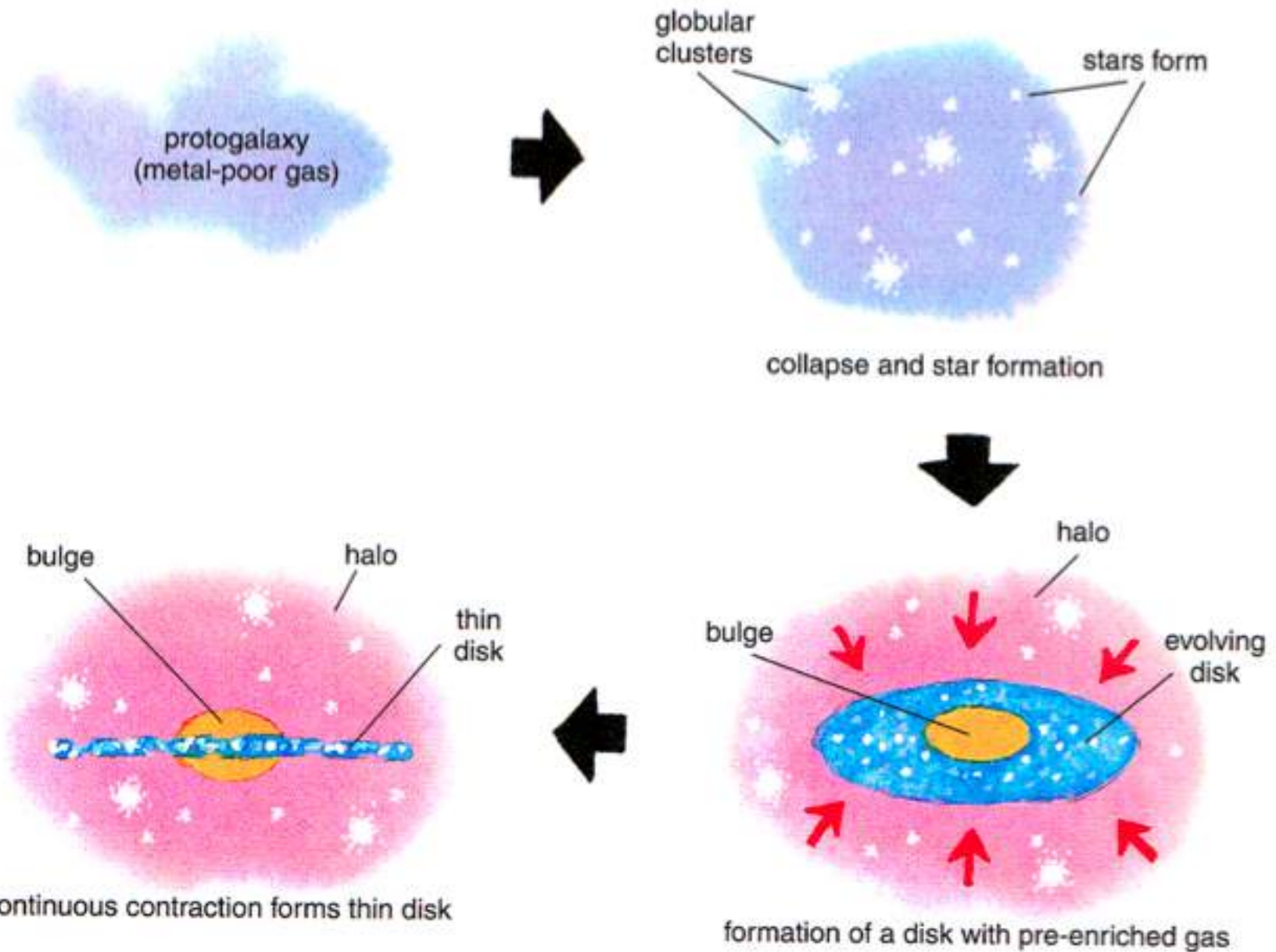
Gas primordial  $\rightarrow$  estrellas masivas

Pob. III inicia reionización del  
Universo ( $6 < z < 20$ )



SDSS J102915+172927 ( $Z=6.9 \times 10^{-7}$ ) es la  
estrella con metalicidad más baja conocida

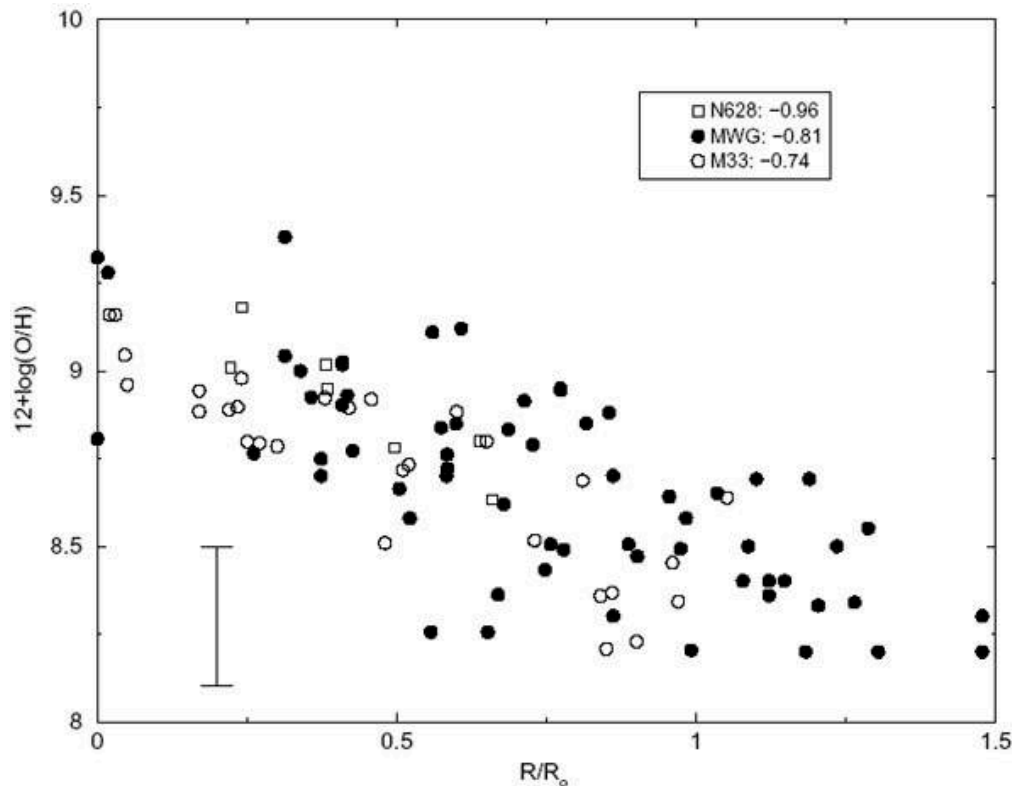
# Formación de la Vía Láctea (modelo ELS)



# Problemas del modelo ELS

- Diferencias en edades y  $Z$  de cúmulos globulares
- Gradiente de metalicidad en el disco (crecimiento dentro  $\rightarrow$  fuera)
- Colapso monolítico incompatible con simulaciones numéricas

Gradiente de metalicidad en el disco

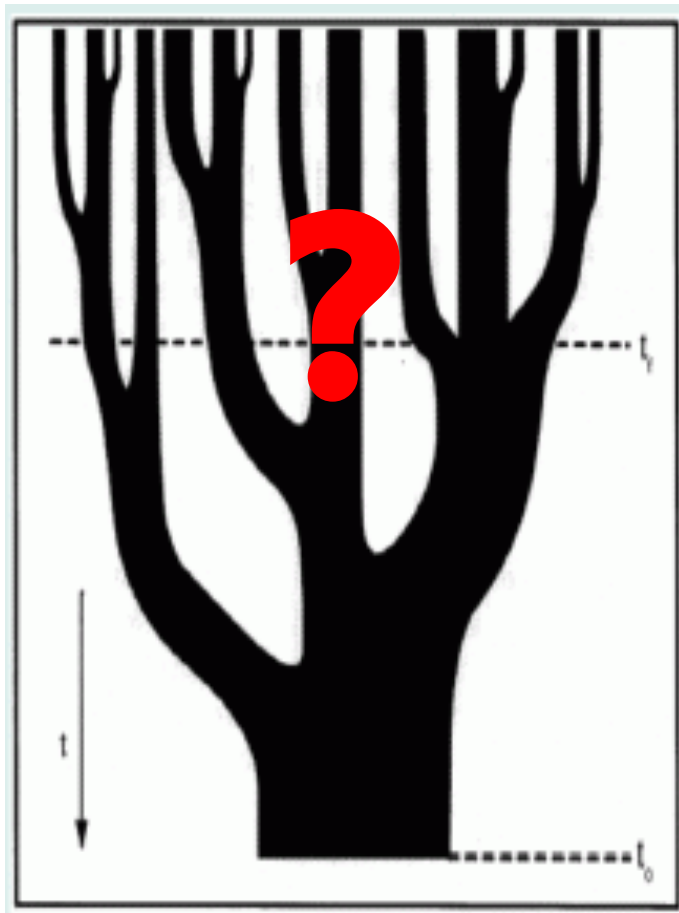


Cúmulo globular Terzan 5

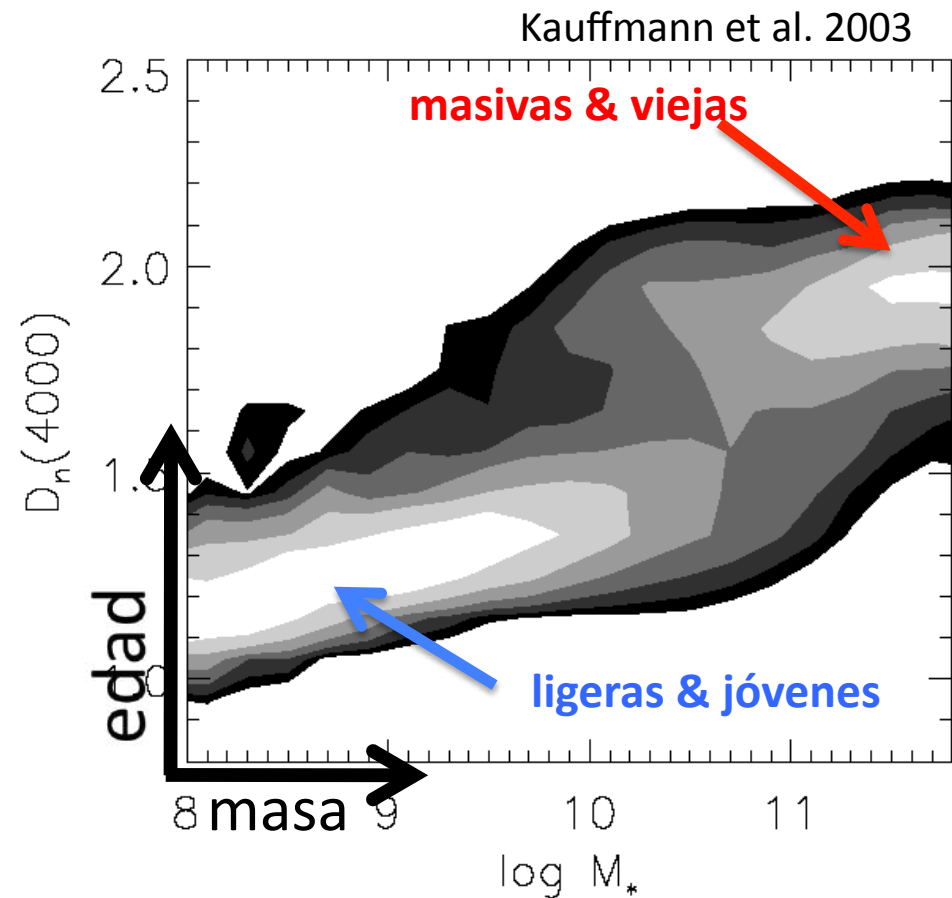


# La relación masa-edad de las galaxias

- Fuerte correlación en la relación masa-edad de las galaxias
- Conflicto con modelos jerárquicos
- Las galaxias muy masivas a alto  $z$  (se forman pronto, eficientemente)



Formación y Evolución de Galaxias



Antonio Hernán Caballero

# ¿Modelo mixto?

Ni colapso monolítico ni agregación jerárquica reproducen todos los observables en Via Láctea

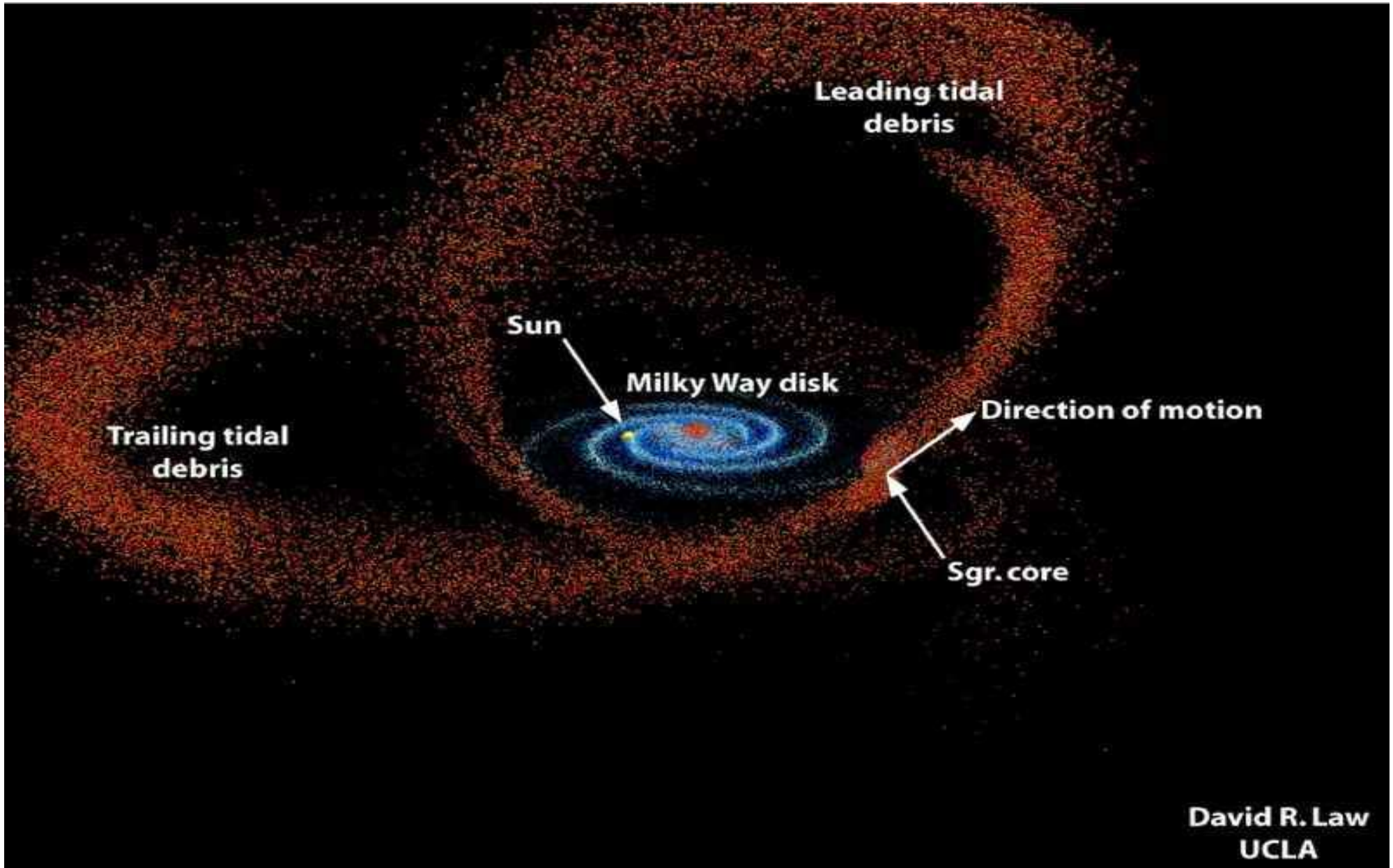
Posible alternativa:

- Colapso monolítico inicial → crea bulbo, parte del halo
- Major merger → formación del disco
- Agregación de satélites → crecimiento del disco (gas) y halo (estrellas)

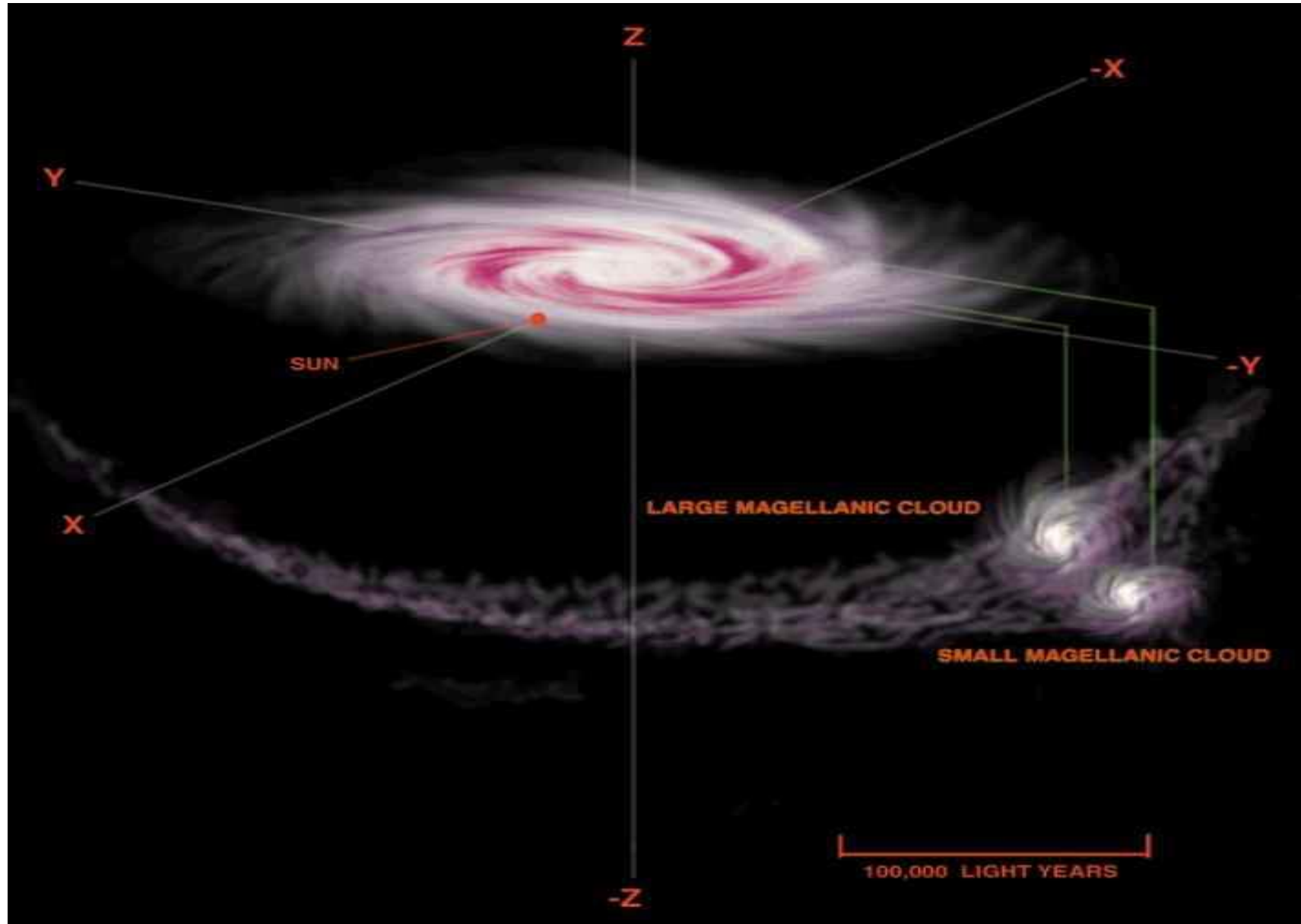
Evidencias:

- Estrellas del bulbo son viejas, ricas en elementos  $\alpha$
- Observación de interrupción y absorción de galaxias enanas

# Galaxia enana de Sagitario



# Corriente Magallánica



# Historia de formación estelar del Universo

**H.F.E. Cósmica:** evolución con  $t$  de la densidad de formación estelar  
Densidad de formación estelar: Núm estrellas nuevas / volumen / tiempo

## Métodos de medida:

- **directo:** tasas de formación estelar de galaxias representativas a cada  $z$
- **arqueológico:** distribución edades en estrellas de galaxias locales

## Resultados:

- Fuerte incremento primeros  $\sim 2$  Gyr
- Descenso 1/20 desde  $z \sim 2$  hasta  $z \sim 0$

**El 95% de las estrellas que habrán existido en toda la historia del Universo, ya han nacido**

