

# ***Simulando el Unvierso***

***Vicent Quilis***

***Departament de Astronomia i Astrofísica***

***Observatori Astronòmic***

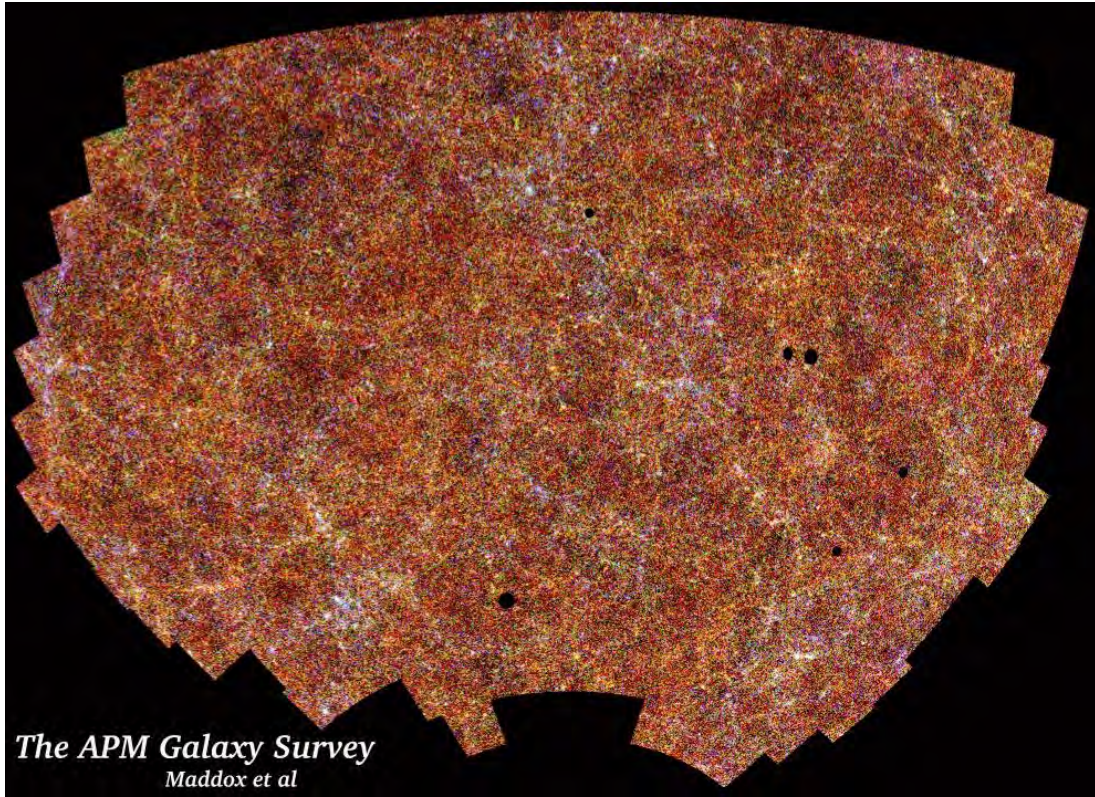
***Universitat de València***







# El principio cosmológico



El Universo es:

- homogéneo, distribución uniforme de materia
- isótropo, ausencia de direcciones privilegiadas

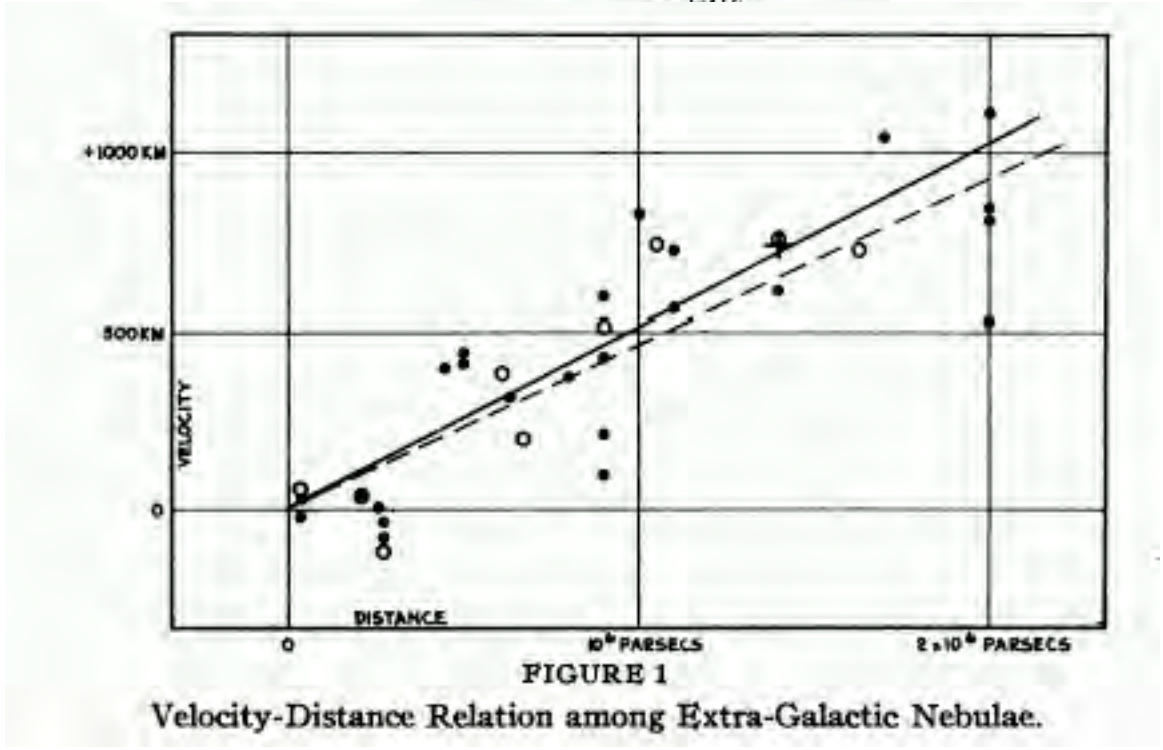
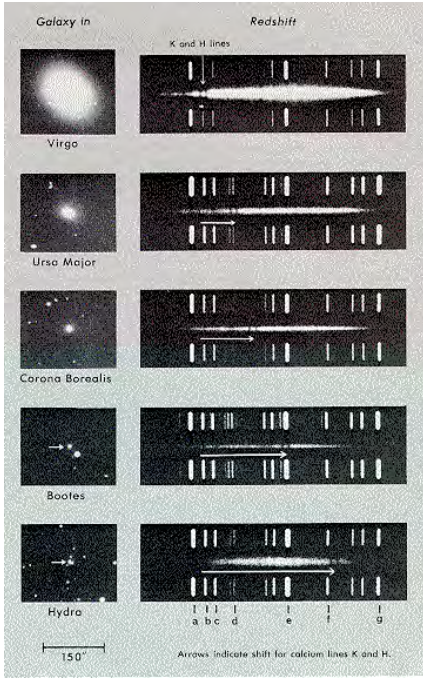


no hay un centro

# Evidencias observacionales: la ley de Hubble

Las galaxias muestran un espectro corrido al rojo.

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}}$$



## Postulado de Weyl:

Existe un tiempo cosmológico que es el medido por los observadores en caída libre

## Métrica de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 \left( \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right)$$

**K=1 (close) k=0 (flat) k=-1 (open)**

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

← Ecuaciones de Einstein

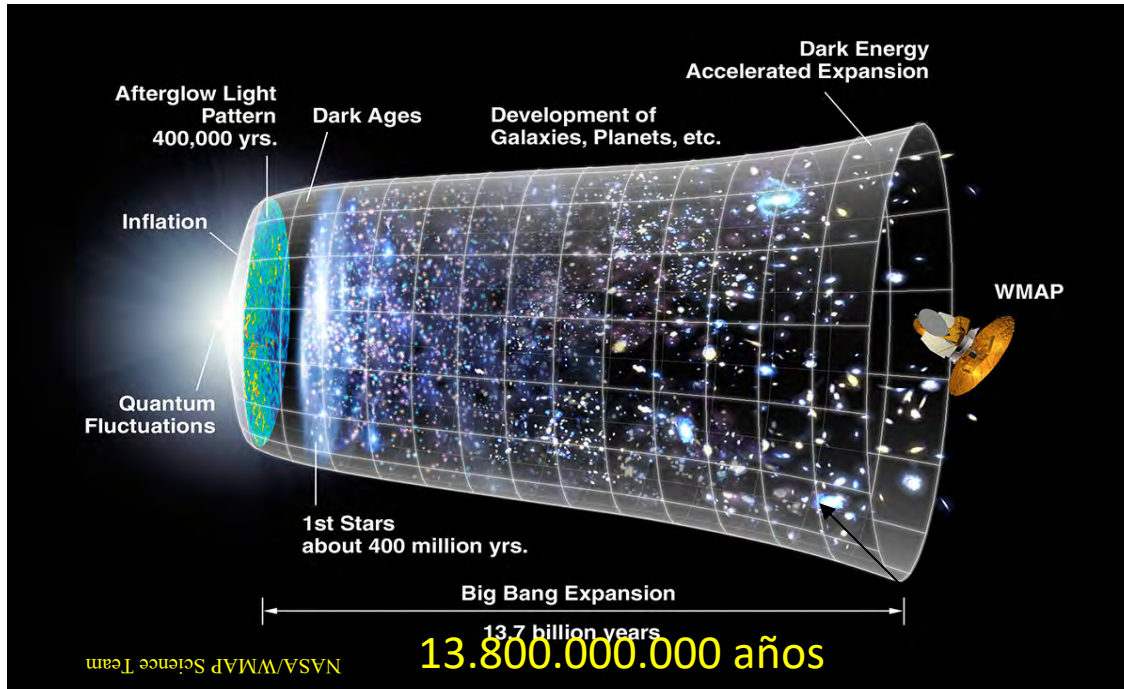
$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = -\frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} + \frac{8\pi G}{3} \rho \quad \Omega_o = \frac{8\pi G}{3H_o^2} \rho \quad \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H_o^2} \quad \Omega_k = \frac{-k}{a_o^2 H_o^2}$$

$$\Omega_\Lambda + \Omega_o + \Omega_k = 1$$

**Modelo Cosmológico**

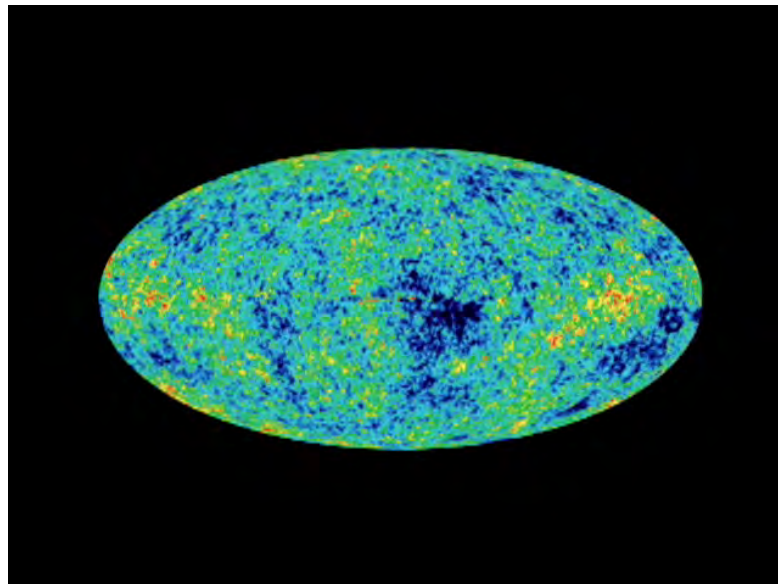


# El paradigma:



## $\Lambda$ CDM

- Todo empieza con el Big Bang
- Inflación
- Perturbaciones
- Formación de estructuras y agrupación jerárquica



Átomos  
(bariones)  
4,8 %

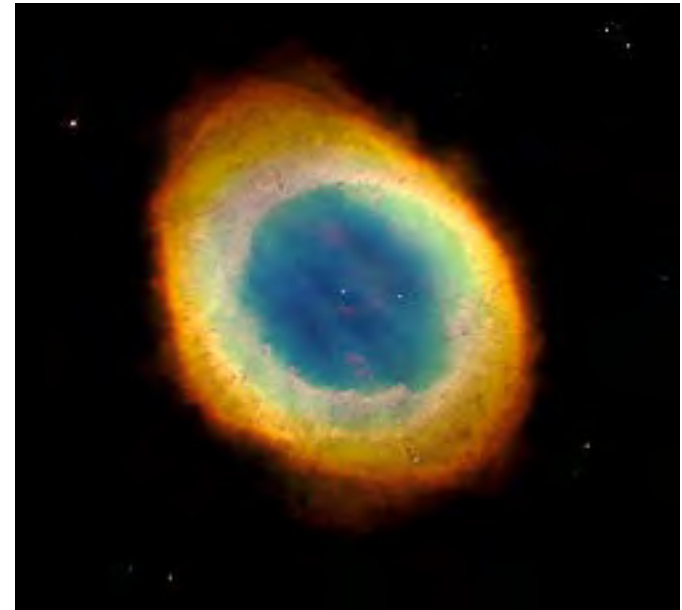
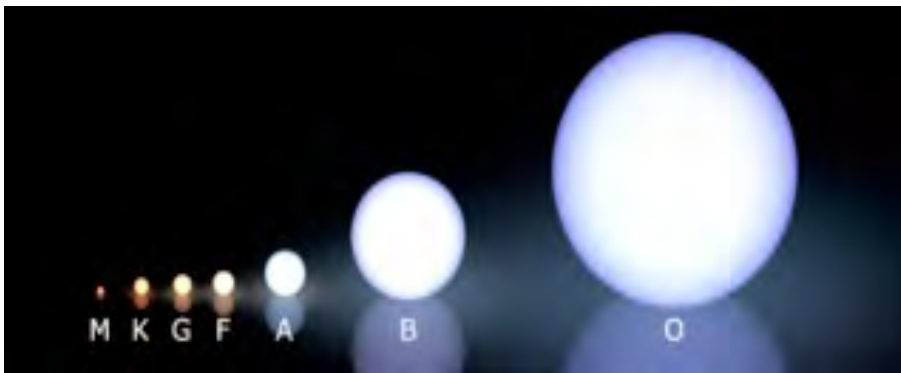
Materia  
Oscura  
26,2 %

Energía  
Oscura  
69 %



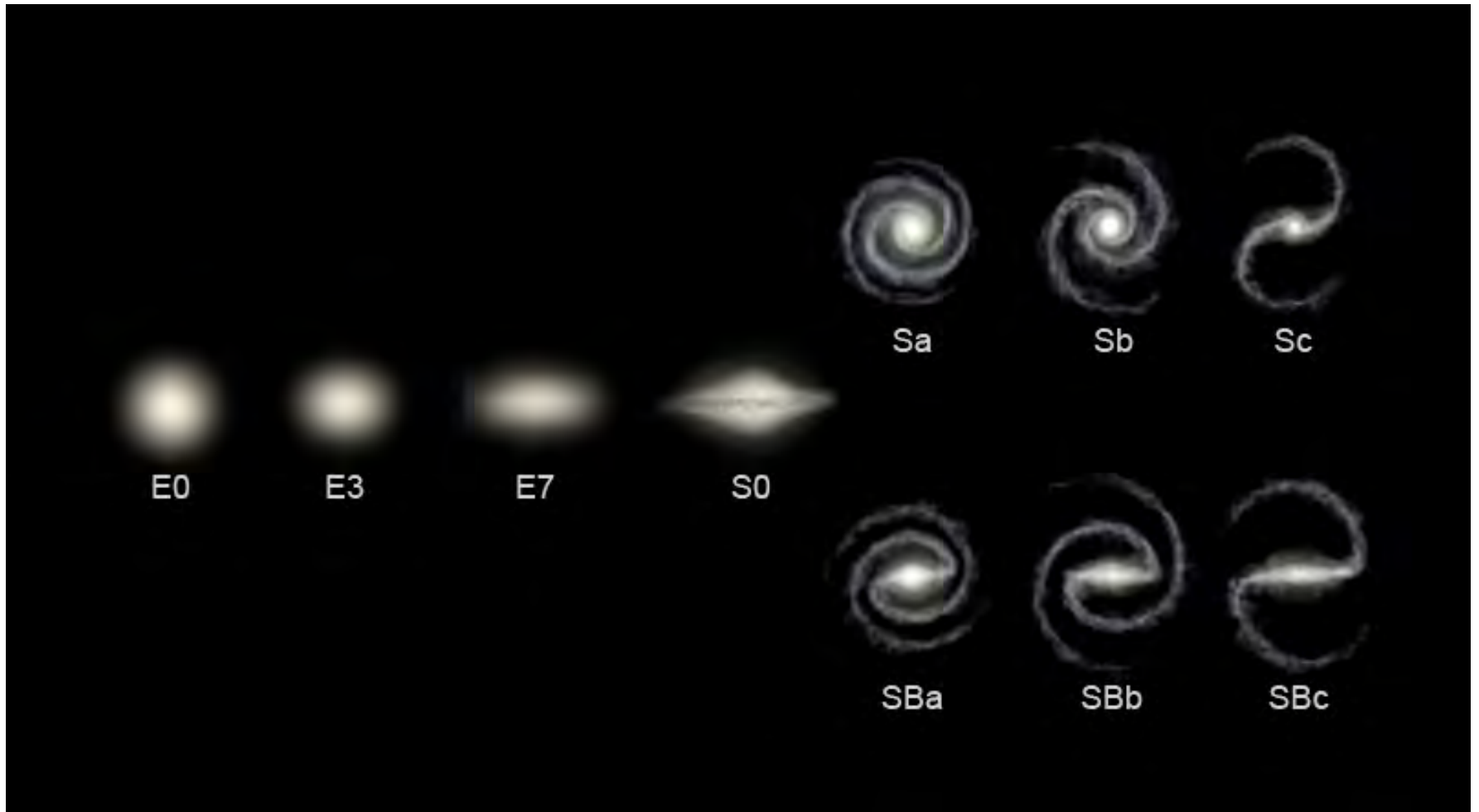


# Estrellas





# Galaxias



Secuencia de Hubble

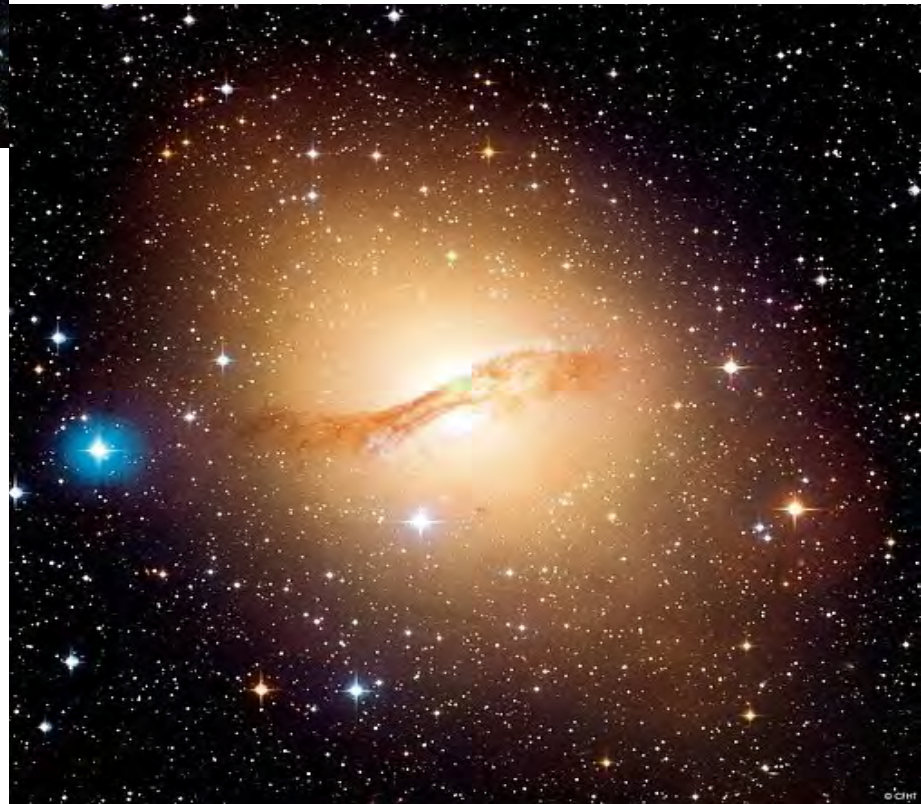
## Galaxia espiral

- ~80% de las galaxias observadas
- masa: entre  $10^9$  y  $10^{11}$  masas solares
- luminosidad:  $10^8$  y  $10^{10}$  luminosidades solares
- formadas por estrellas jóvenes
- soportadas por rotación



## Galaxia elíptica

- ~20% de las galaxias observadas
- masa:  $10^5$  y  $10^{13}$  masas solares
- luminosidad:  $10^5$  y  $10^{11}$  luminosidades solares
- formadas por estrellas viejas
- soportadas por presión





y r

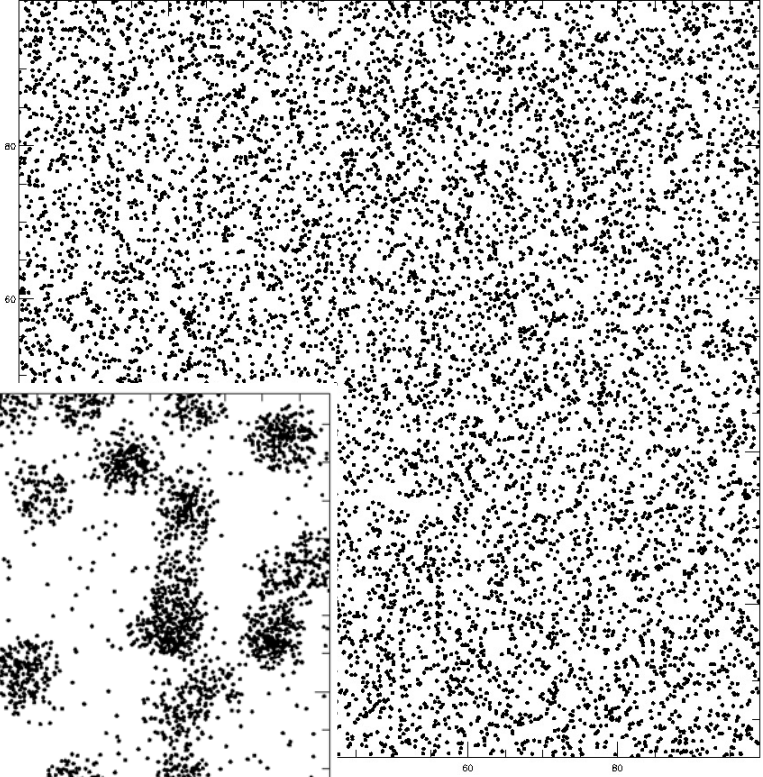
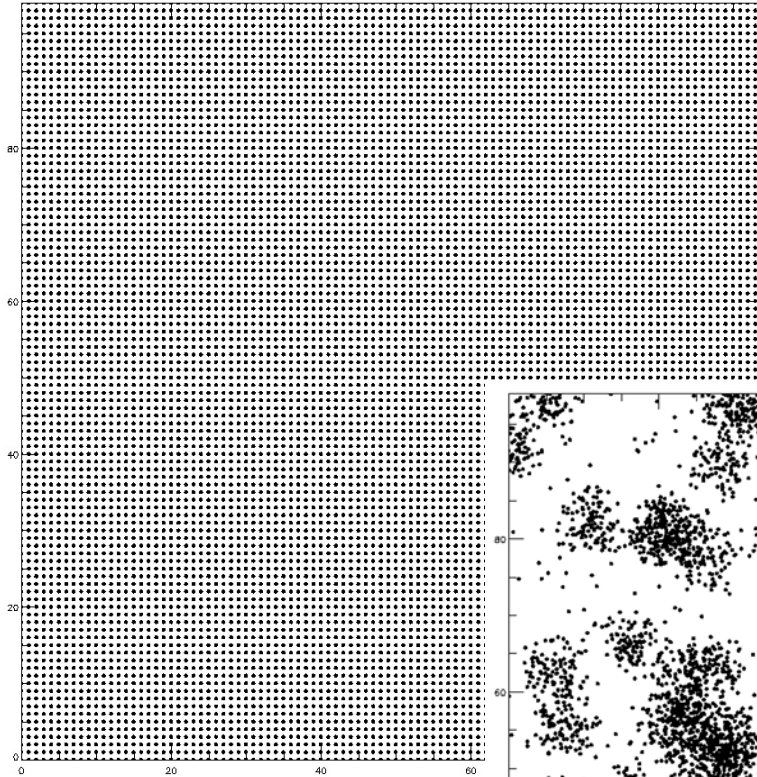


axias

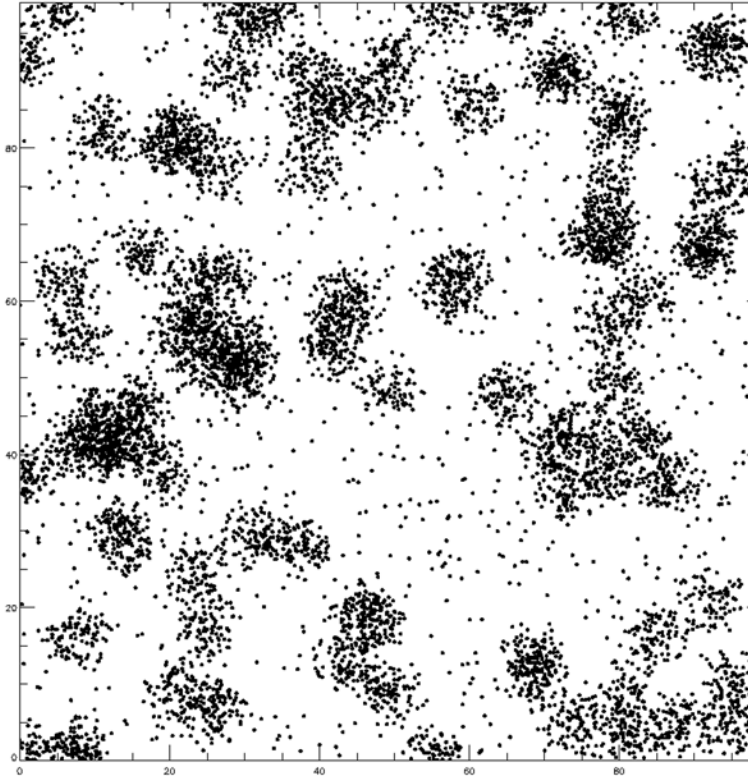


# Distribuciones de puntos en el espacio

ordenada

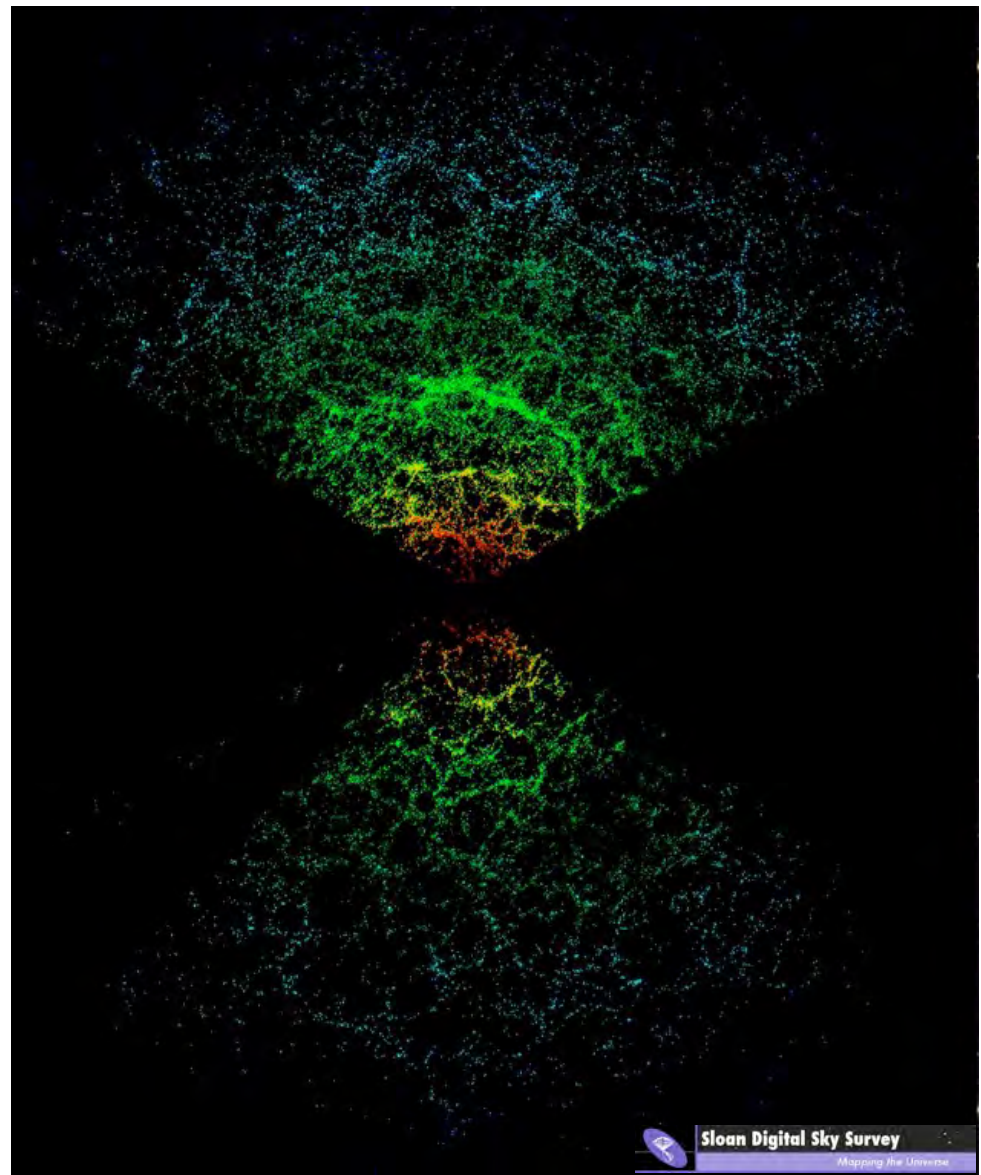
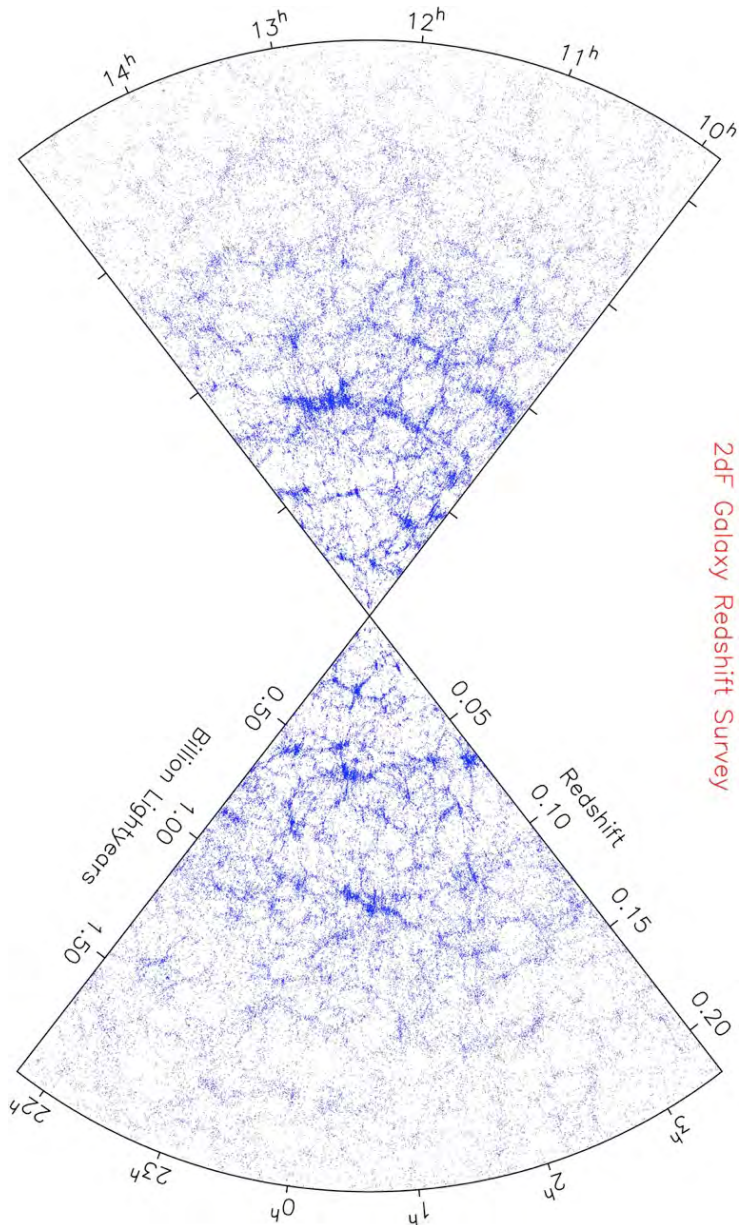


aleatorio

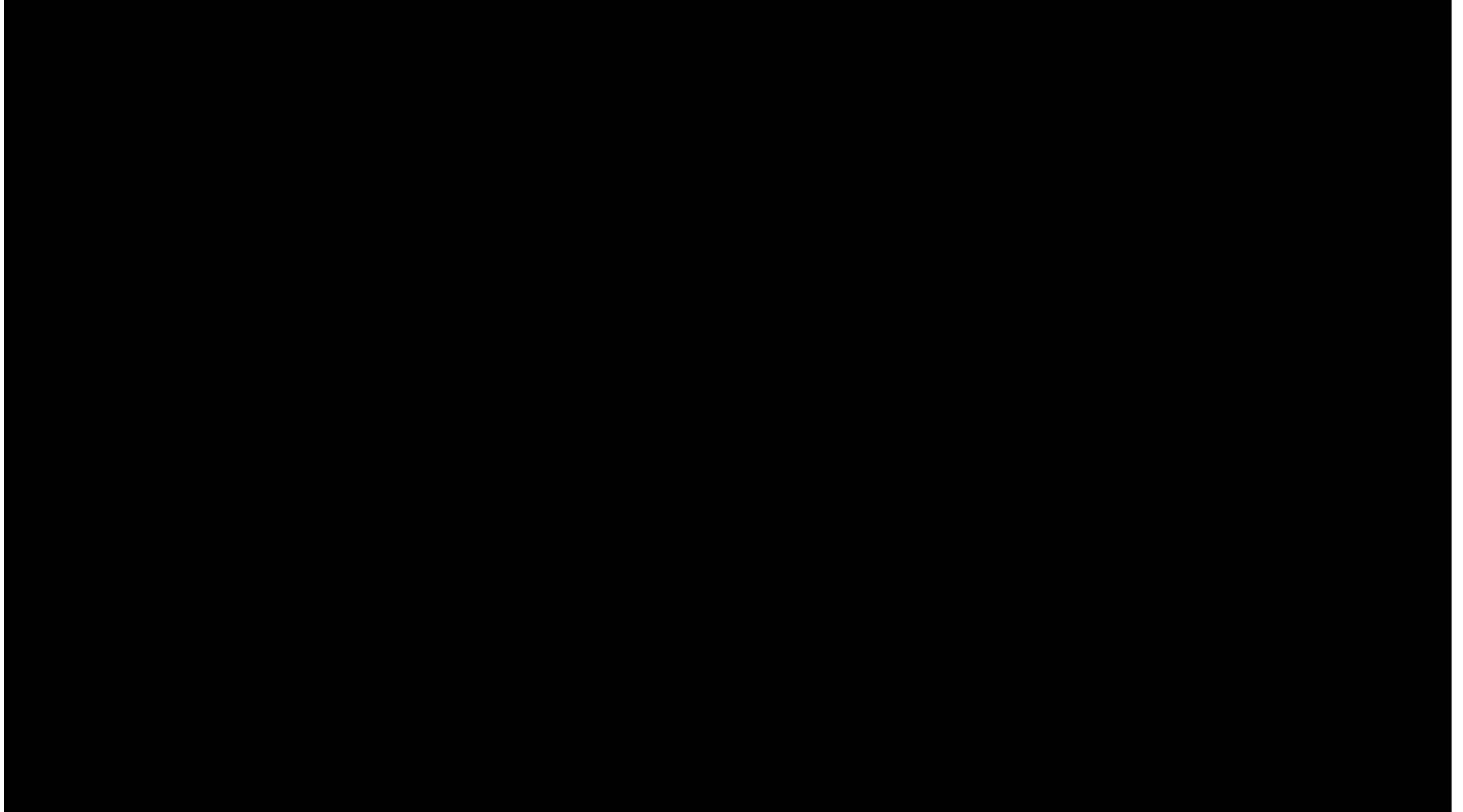


agrupada

# Estructura a Gran Escala del Universu (LSS)



# Estructura a Gran Escala del Universo (LSS)



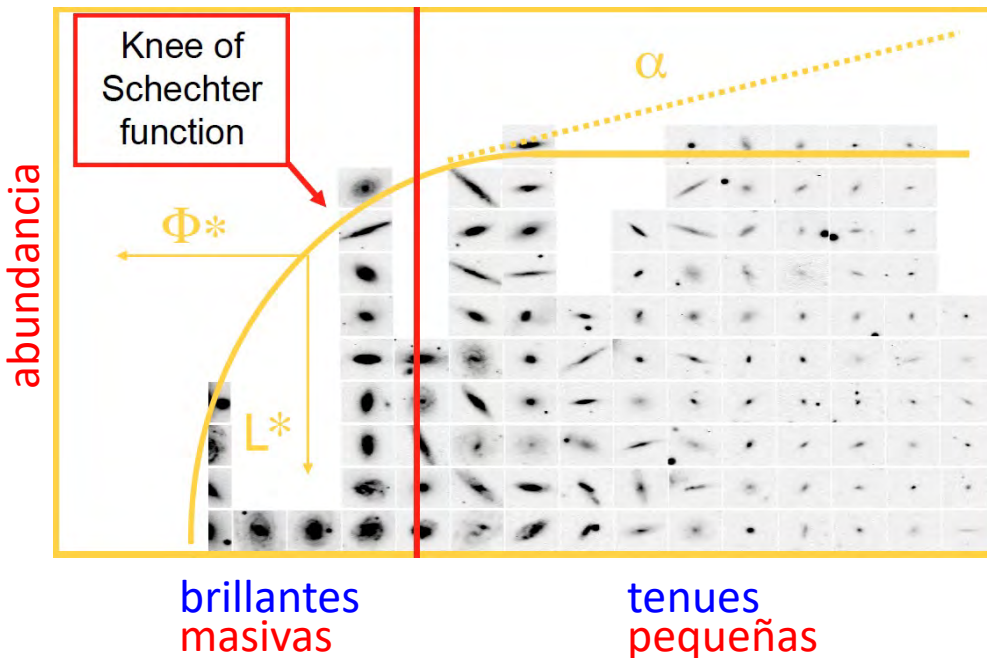


# Estructura a Gran Escala del Universo (LSS)

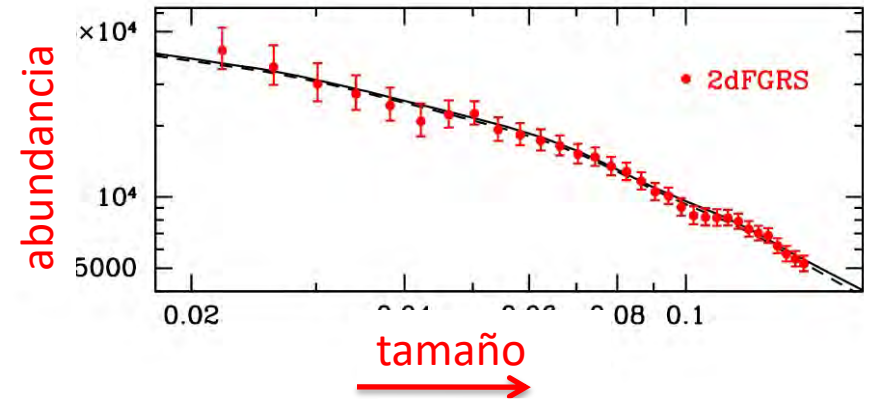
¿Hay algún tipo de patrón en esta distribución de las galaxias en el universo?:

- 1) ¿ Están las galaxias distribuidas de materia aleatoria y homogénea?
- 2) ¿ Tienden las galaxias a agruparse?
- 3) ¿ Son distintas las propiedades de las galaxias en grupos que las de aquellas que viven en solitario?
- 4) .....
- 5) **¿ por qué?**

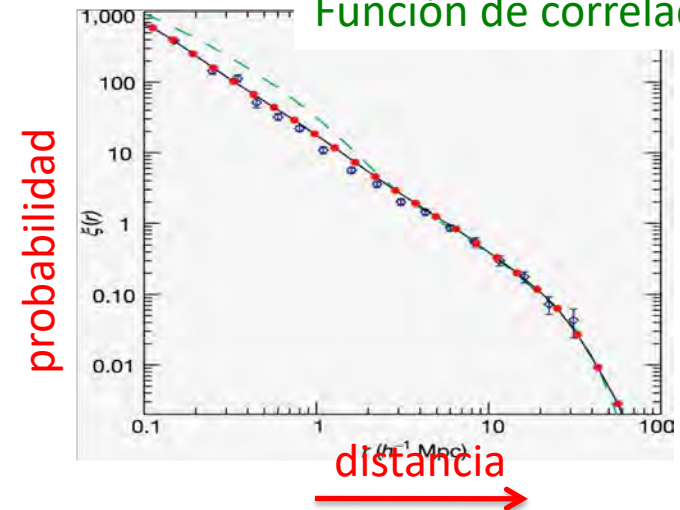
## Función de luminosidad de galaxias



## Espectro de fluctuaciones



## Función de correlación



# Propiedades de las galaxias (LSS)

¿Cómo se explican las propiedades de las galaxias?:

- 1) ¿Cuál es el origen de su morfología?
- 2) ¿Cómo es su luz?
- 3) ¿Cómo se forman las estrellas en las galaxias?
- 4) .....

## Morfologías

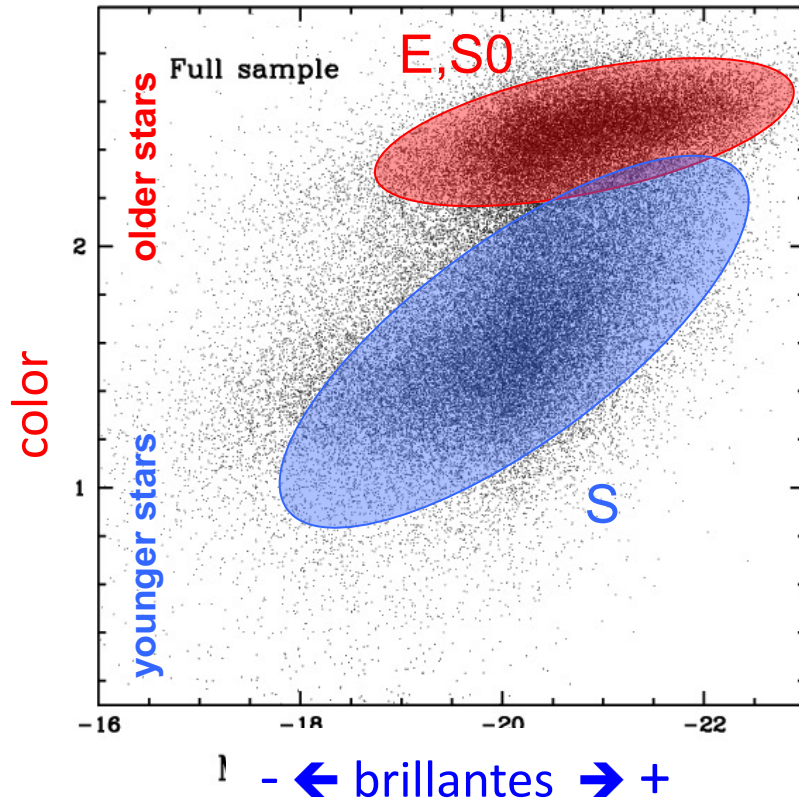


Espirales

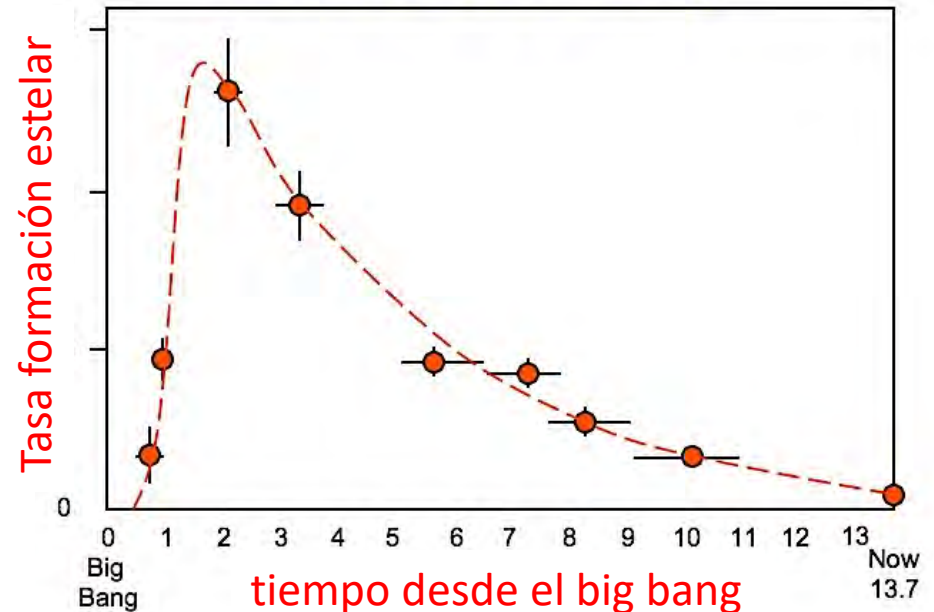


Elípticas

## Diagrama Color-Magnitud



## Historia de formación estelar



!!! Queremos entender como se crearon las estructuras que forman el Universo,  
porque son de una determinada manera y porque se agrupan siguiendo  
determinados patrones !!!!

Otras disciplinas de la Física

Modelo teórico



Laboratorios reales



Astrofísica y Cosmología

Modelo teórico



Laboratorios virtuales





## Simulaciones:

Las simulaciones numéricas, en Cosmología, son las herramientas para validar los modelos teóricos cuando sus predicciones se comparan con las observaciones.

### ¿Qué incluimos?

- espectro de fluctuaciones iniciales
- fondo cosmológico
- algo de Física: gravedad, hidrodinámica, procesos de calentamiento y enfriamiento, ...

complejo problema matemático

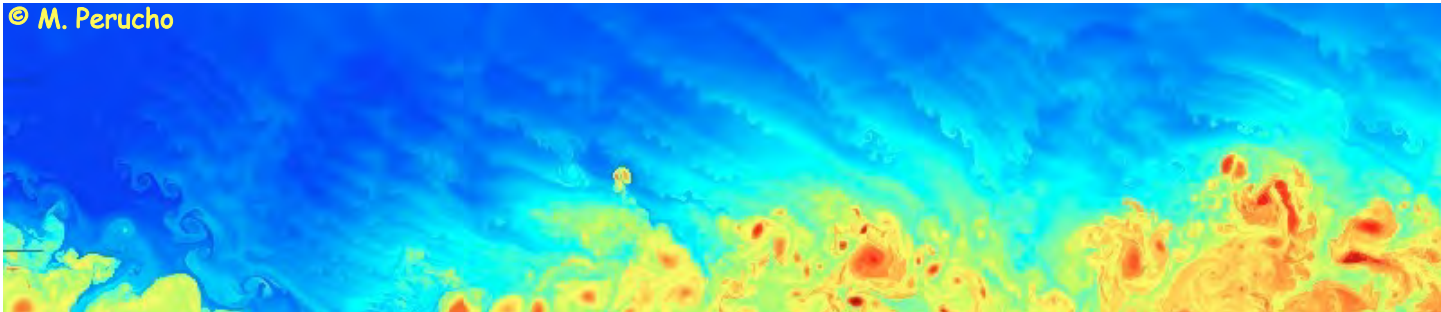


evolución altamente no lineal

### ¿Qué obtenemos a cambio?

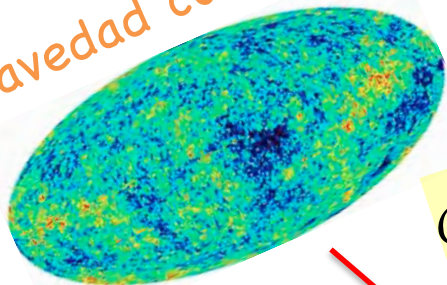
➤ un laboratorio virtual para estudiar la formación y evolución de las estructuras cosmológicas.

© M. Perucho



# ¿Cómo simular un Universo?

Gravedad cuántica?



$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Dinámica de fluidos

Electromagnetismo

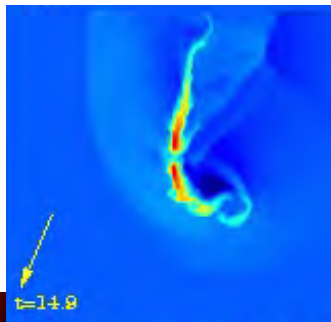
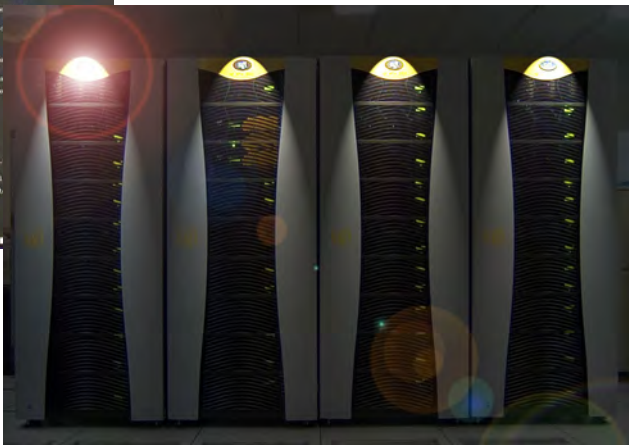
$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Física de partículas

```
PROGRAM MAIN
  IMPLICIT NONE
  INCLUDE 'PARAMS.H'
  INCLUDE 'CONSTANTS.H'
  INCLUDE 'TYPES.H'
  INCLUDE 'FUNCTIONS.H'
  INCLUDE 'INITIALIZATION.H'
  INCLUDE 'EQUATIONS.H'
  INCLUDE 'OUTPUT.H'

  ! Main program logic
  CALL INITIALIZATION
  CALL EQUATIONS
  CALL OUTPUT

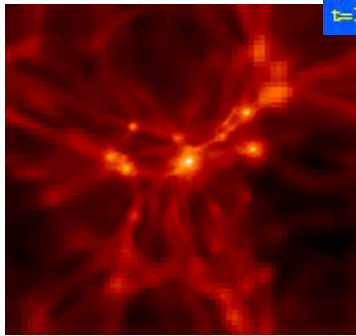
END PROGRAM MAIN
```



Termodinámica

$$\Delta U = Q - W$$

Química



# La materia en el Universo:

## Materia oscura:

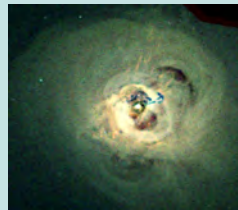
Las partes externas de las galaxias espirales giran más rápido de lo esperado.



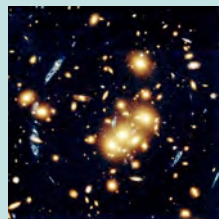
Las galaxias elípticas requieren más masa para no disgregarse



Las observaciones en Rayos-X en cúmulos de galaxias revelan gran cantidad de gas que implican la existencia de gravedad extra.

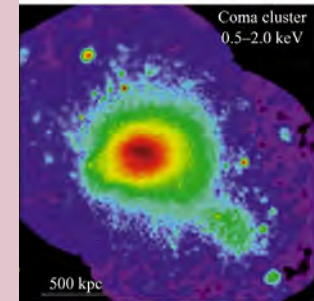


Lentes gravitatorias



## Gas:

cúmulos de galaxias



galaxias



estrellas



nubes, gas difuso, ....





## Materia oscura:

Materia oscura (DM) se describe como un conjunto de partículas sin colisiones que sólo interaccionan entre sí gravitatoriamente.

La técnica numérica utilizada se conoce como N-body (N-cuerpos) (Hockney & Eastwood 1988).

### Idea básica:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\vec{x}}{dt} &= \frac{\vec{v}}{a} \\ \frac{d\vec{v}}{dt} &= -\frac{\overline{\nabla\phi}}{a} - H\vec{v} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \begin{aligned} \vec{x}^{n+1} &= \vec{x}^n + \Delta t \cdot \frac{\vec{v}^n}{a^n} \\ \vec{v}^{n+1} &= \vec{v}^n - \Delta t \cdot \frac{\overline{\nabla\phi}^n}{a^n} \end{aligned}$$

$$\nabla^2\phi = \frac{3}{2}H^2a^2\delta \longrightarrow$$

- $\phi$  ¿Cómo se calcula el potencial gravitatorio creado por todas las partículas?
- 1 Suma directa,  $\phi_i = G \sum_j \frac{m_j}{r_{ij}}$
  1. Fourier  $\phi_k = -\vec{k}^{-2} \delta_k$

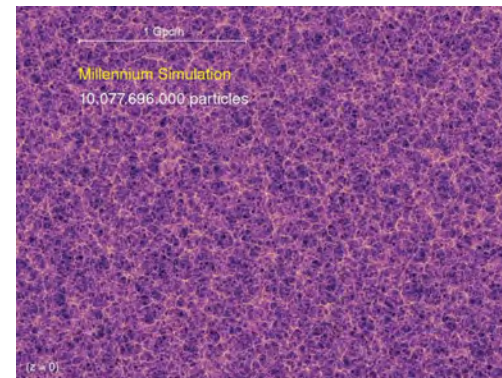
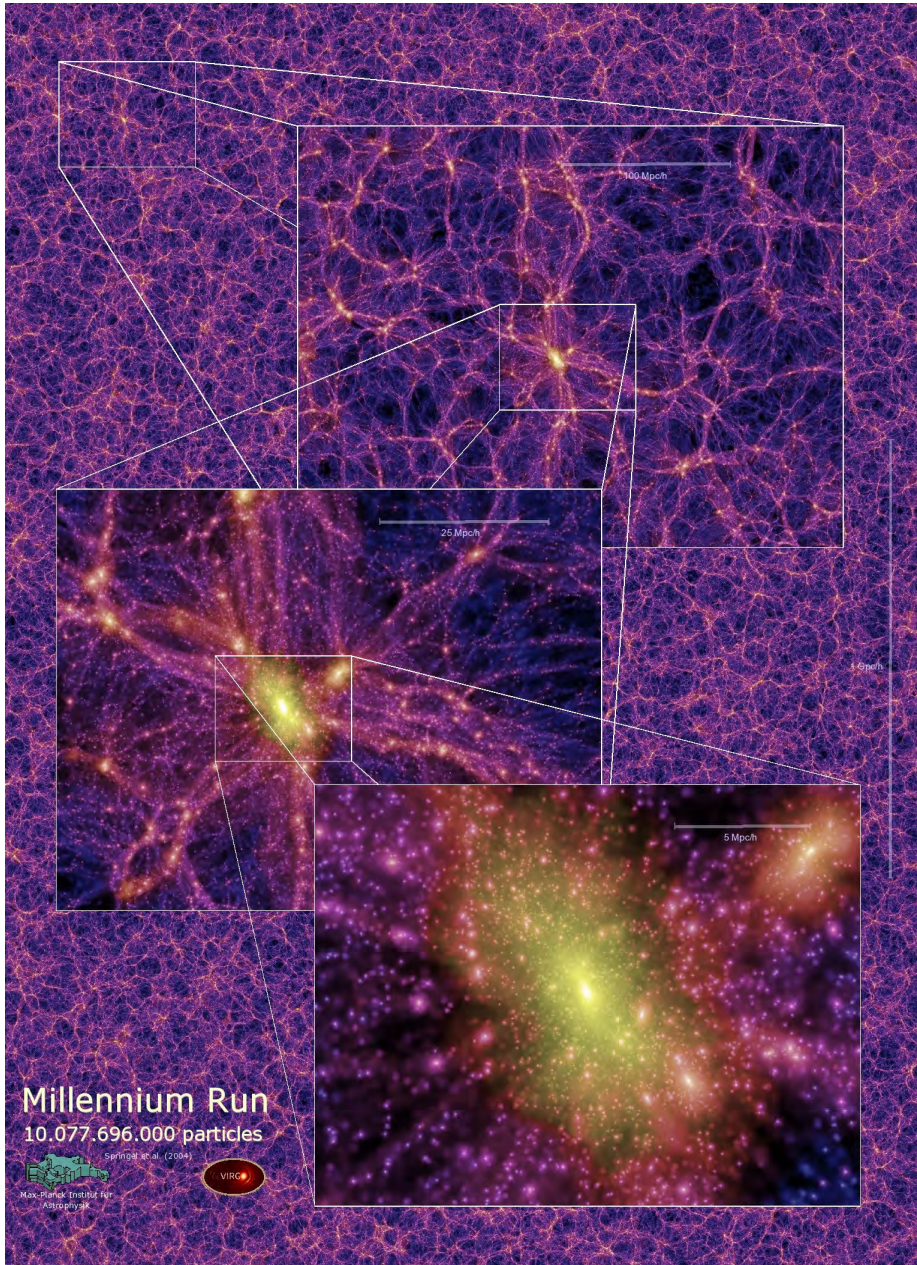
# Perfil de densidad de los halos de DM:



$$\rho(r) = \frac{\rho_c}{(r/r_s)^\gamma (1 + (r/r_s)^\alpha)^{(\beta-\gamma)/\alpha}}$$

- ( $\alpha, \beta, \gamma$ )
- NFW  $\longrightarrow$  (1,3,1)  
 (Navarro et al., ApJ, 1996)
- Moore'99  $\longrightarrow$  (1.5,3,1.5)  
 (Moore et al., MNRAS, 1999)





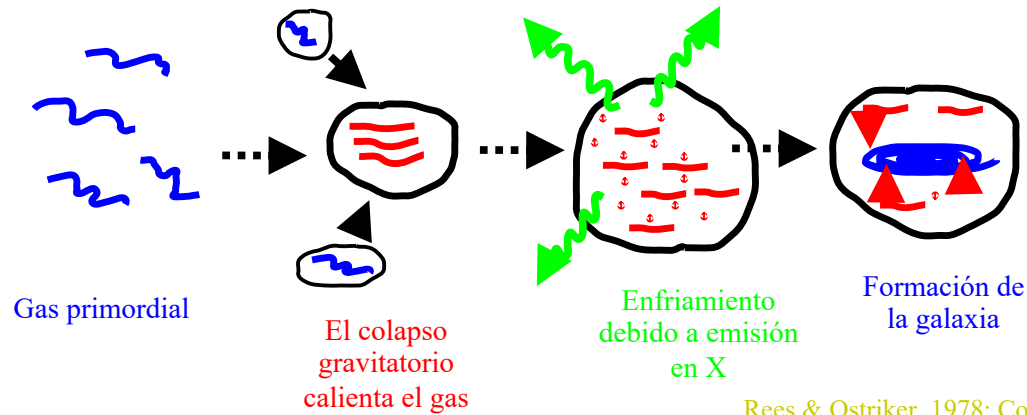
**10<sup>10</sup> particles**  
**512 CPUs**  
**343000 hours**  
**Volume: 9 Gpc<sup>3</sup>**





## Gas:

Es la componente crucial de las estructuras cosmológicas, ya que es directamente comparable con las observaciones.



Rees & Ostriker, 1978; Cole 1991; White & Frenk 1991; Wu, Fabian & Nulsen, 1999

## Características:

- física compleja, hidrodinámica
- **choques**, discontinuidad de contacto, rarefacciones
- enfriamiento y calentamiento
- formación estelar

## Ecuaciones de la hidrodinámica:

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{1}{a} \nabla \cdot (1 + \delta) \mathbf{v} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{1}{a} (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + H \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho a} \nabla p - \frac{1}{a} \nabla \phi$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{1}{a} \nabla \cdot [(E + p) \mathbf{v}] = -3H(E + p) - H \rho \mathbf{v}^2 - \frac{\rho \mathbf{v}}{a} \nabla \phi$$

$$\nabla^2 \phi = \frac{3}{2} H^2 a^2 \delta$$

x coordenada comóvil  
 $\delta = \rho / \rho_B - 1$  contraste densidad  
 $\rho_B$  densidad crítica  
 a factor de escala  
 $\mathbf{v} = x a$  velocidad peculiar  
 $\Phi$  potencial gravitatorio  
 E energía térmica+cinética

## Técnicas numéricas:

### Smoothed Particle Hydrodynamics

(Gingold & Monaghan 1977, Lucy 1977)

- x Enfoque Lagrangiano
- x alta resolución espacial
- x barato computacionalmente
- x pobre descripción de la hidro.
- x problemas de conservación

### Godunov's method

(Godunov 1959)

- x Enfoque Euleriano
- x baja resolución espacial
- x computacionalmente caros
- x precisa descripción hidro
- x perfecta conservación

# Formación de una galaxia

Redshift 8.1

Redshift 8.1

Side length 0.9Mpc/h

Side length 0.9Mpc/h

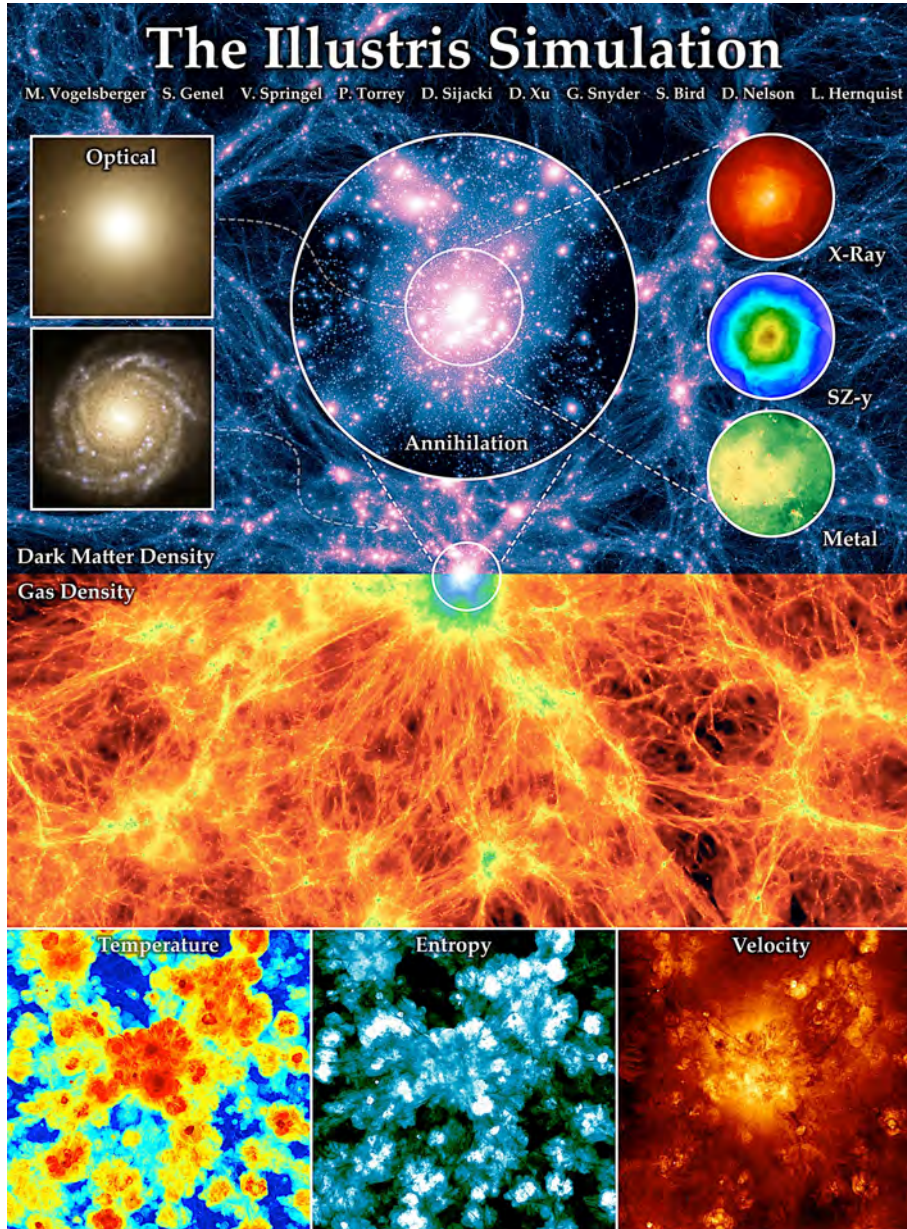
Redshift 8.1

Redshift 8.1

Side length 0.9Mpc/h

Side length 0.9Mpc/h





## Simulación con gas y materia oscura:

- Descripción de la evolución del gas (hidrodinámica)
- Evolución de la materia oscura
- Formación y evolución estelar
- Procesos de calentamiento y enfriamiento
- Agujeros negros supermasivos

## Código AREPO

Tamaño de la región simulada:  $\approx 10^6$  Mpc<sup>3</sup>

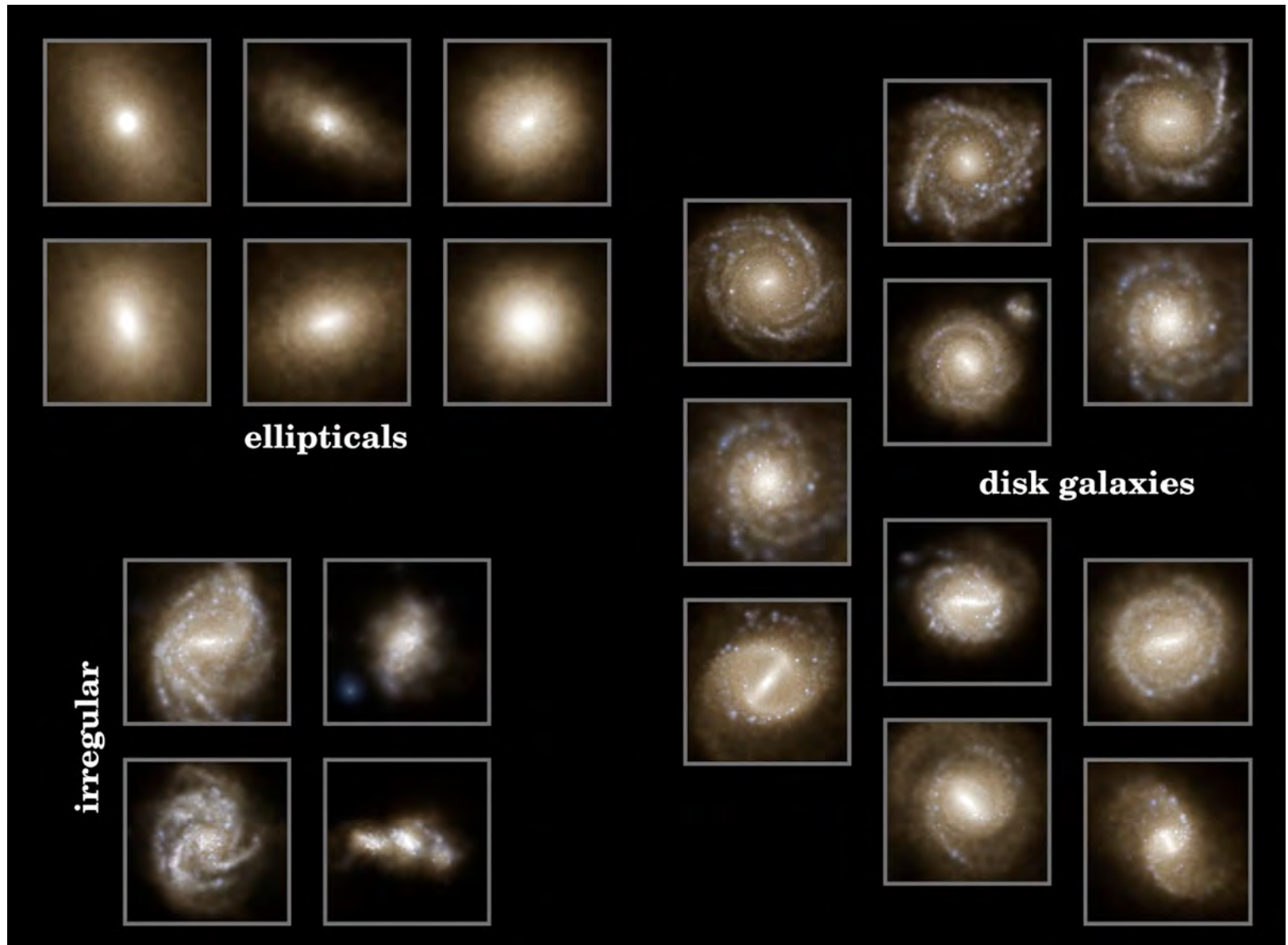
Número de partículas DM:  $\approx 6 \times 10^9$

Celdas de gas:  $\approx 6 \times 10^9$

Cálculo:

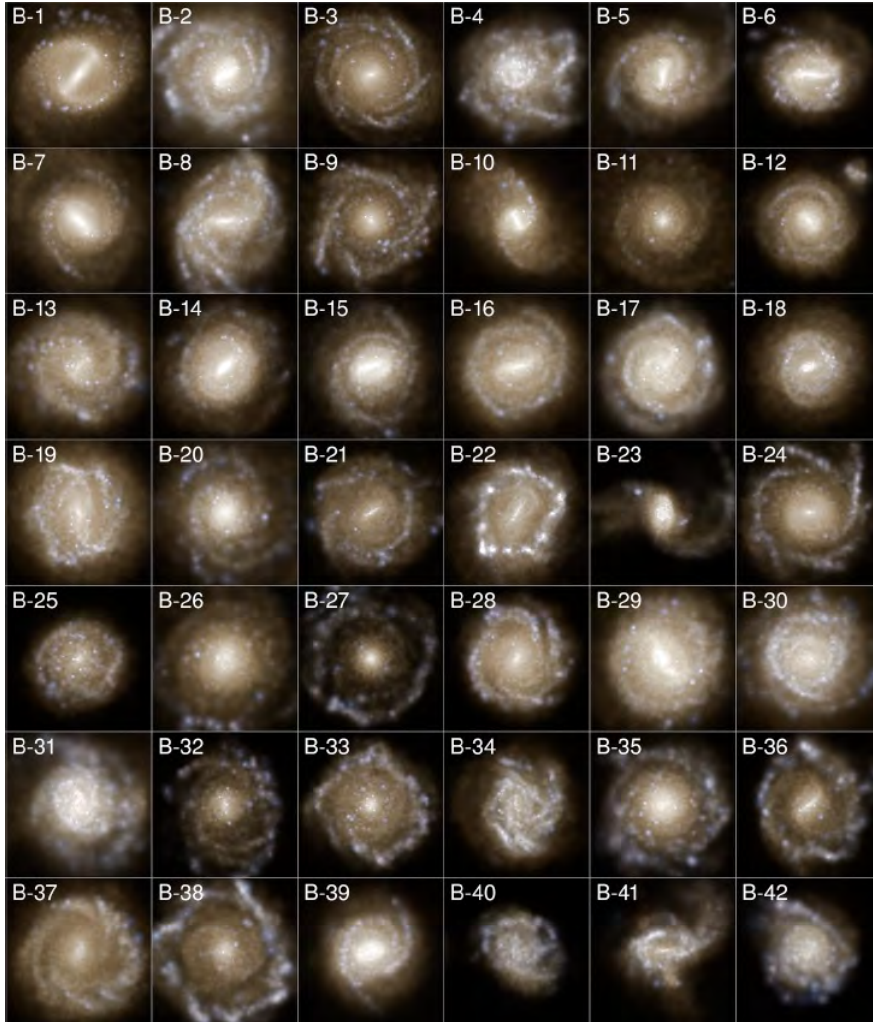
- 8192 núcleos de cálculo
- 25 TB memoria ram
- 19 millones horas CPU → 100 días

# Secuencia de Hubble "Virtual"

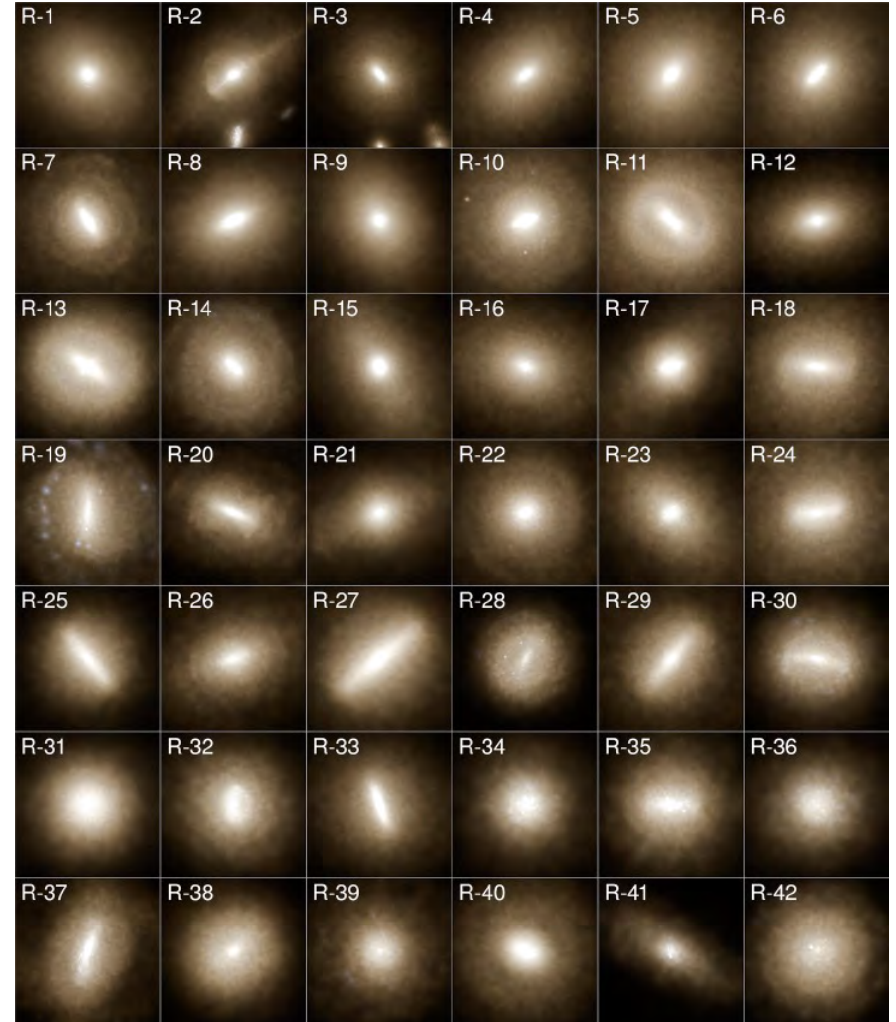




## Galaxias espirales



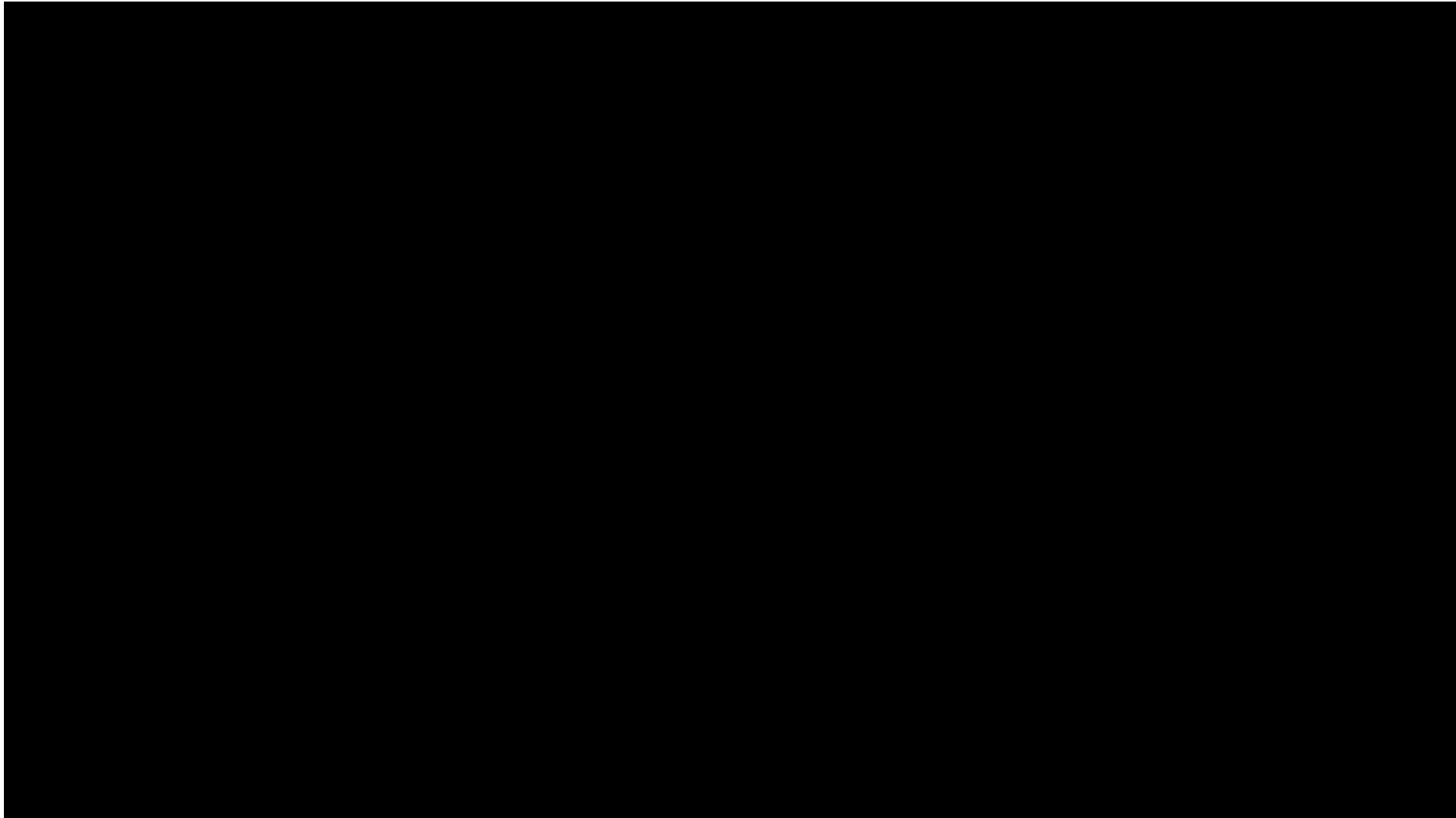
## Galaxias elípticas





# Física simplificada vs Física compleja





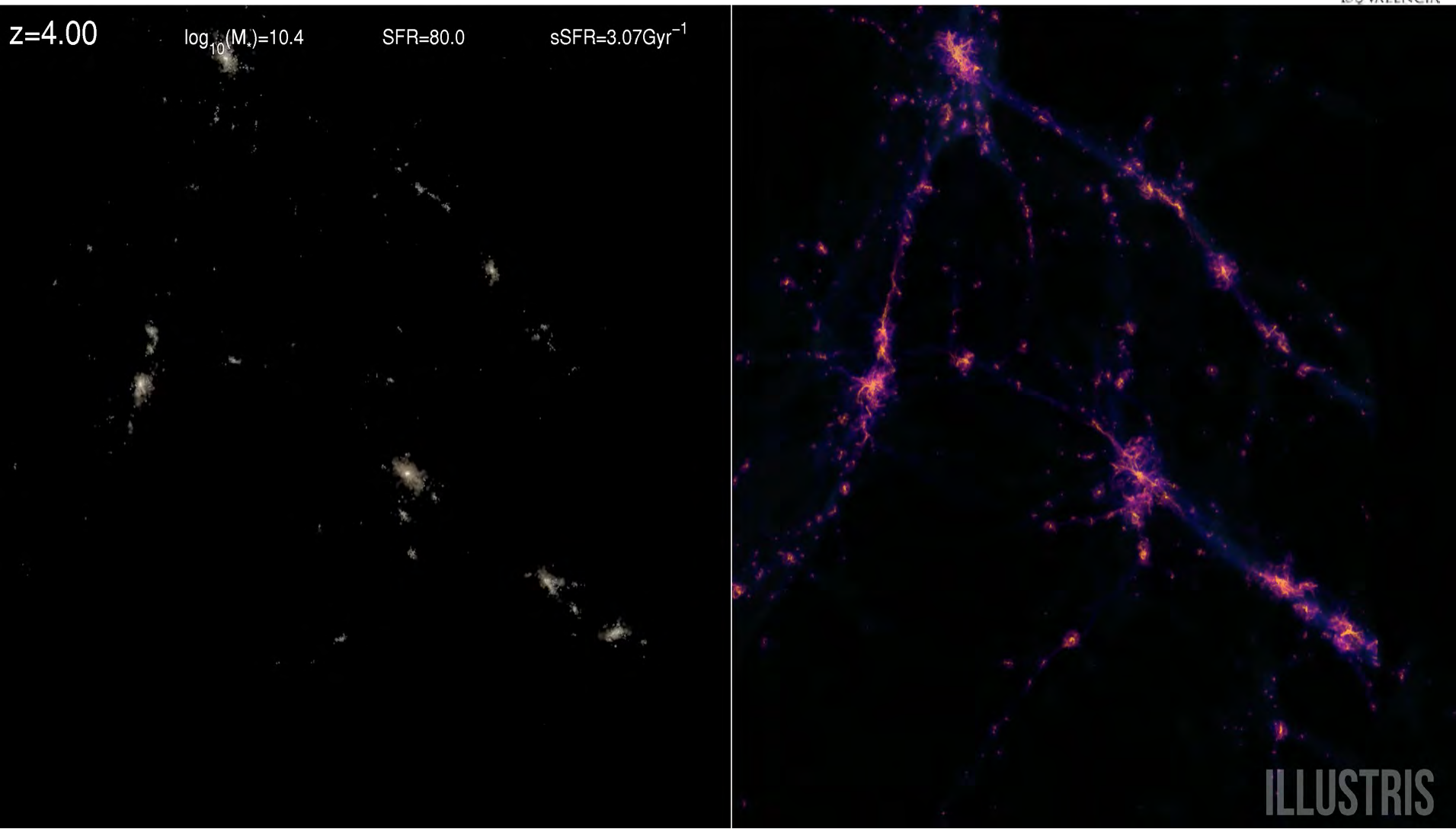
Evolución de una región de 10 Mpc de lado: se muestra: la materia oscura, temperatura (colores) y metales

# Zoom a una galaxia

Zoom desde la escala global de la simulación (100 Mpc) hasta una galaxia individual (10 Kpc).



# Formación de una galaxia elíptica

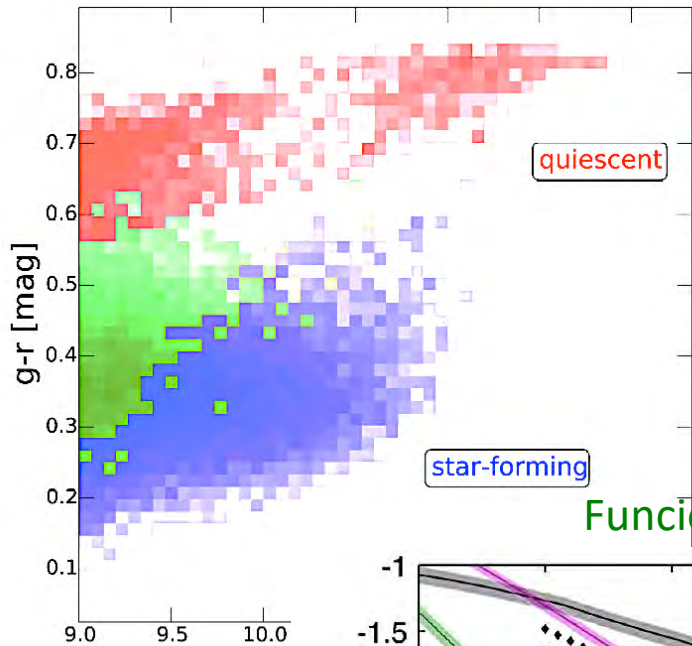


Region de 1 Mpc donde se forma una galaxia elíptica.

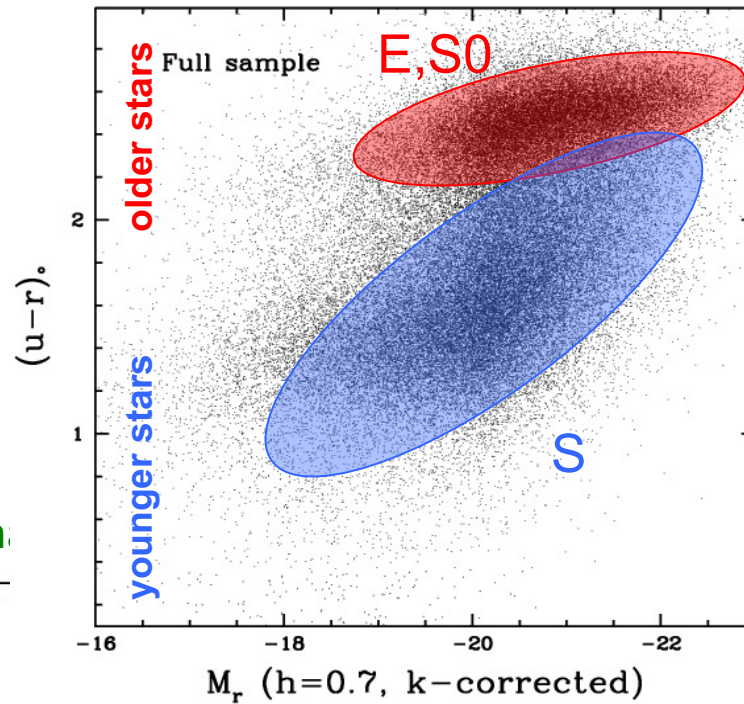
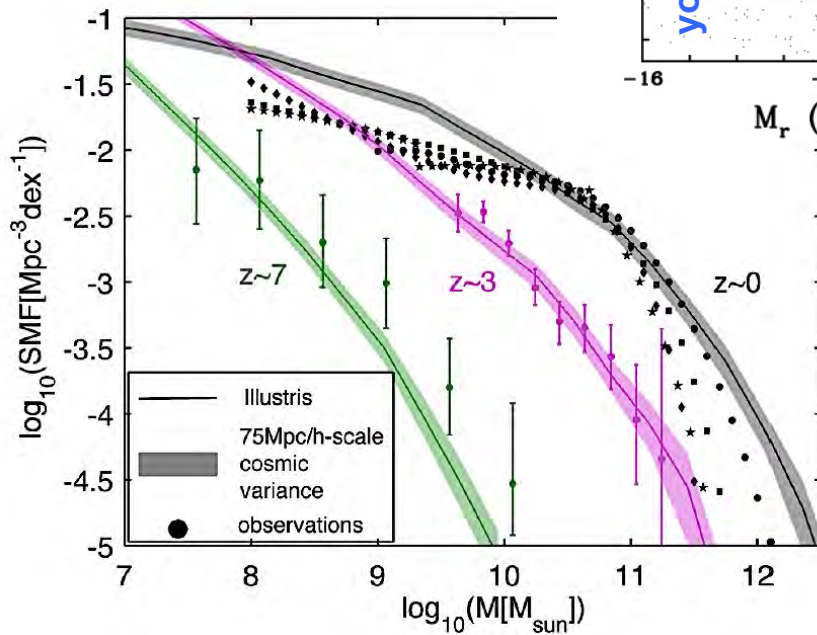
# Illustris TNG50: formación de una galaxia

# Resultados:

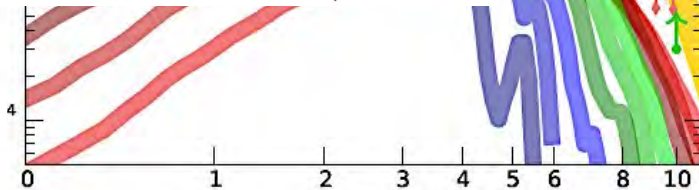
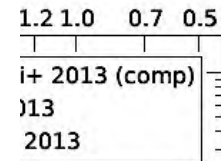
## Color-magnitud



## Función de masa



## evolución



← tiempo



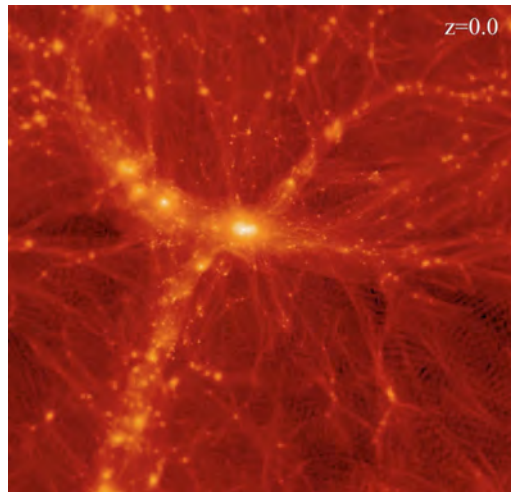
# El código cosmológico: **MASCLET**

(*Mesh Adaptive Scheme for CosmologicaL structurE evoluTion*) (Quilis, 2004)

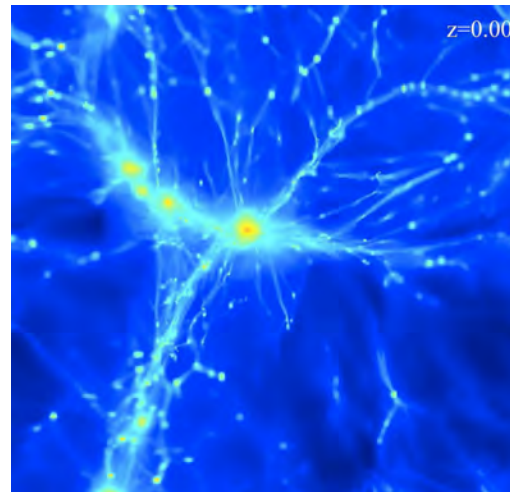


GAS + DM + ESTRELLAS + AMR

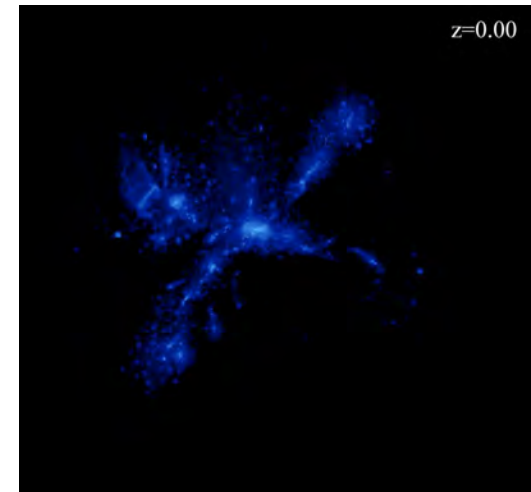
- Código **Euleriano** que describe la evolución acoplada del **gas y la materia oscura** (**hydro/N-body**) en una malla que se refina automáticamente (**AMR**).
- Gas y materia oscura están acopladas gravitatoriamente
- MASCLET está escrito en FORTRAN 95 y paralelizado usando OpenMP 3.0



Materia oscura (DM)



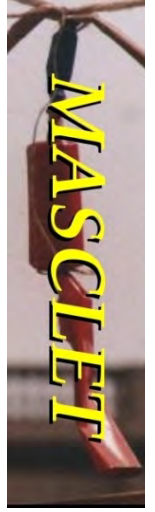
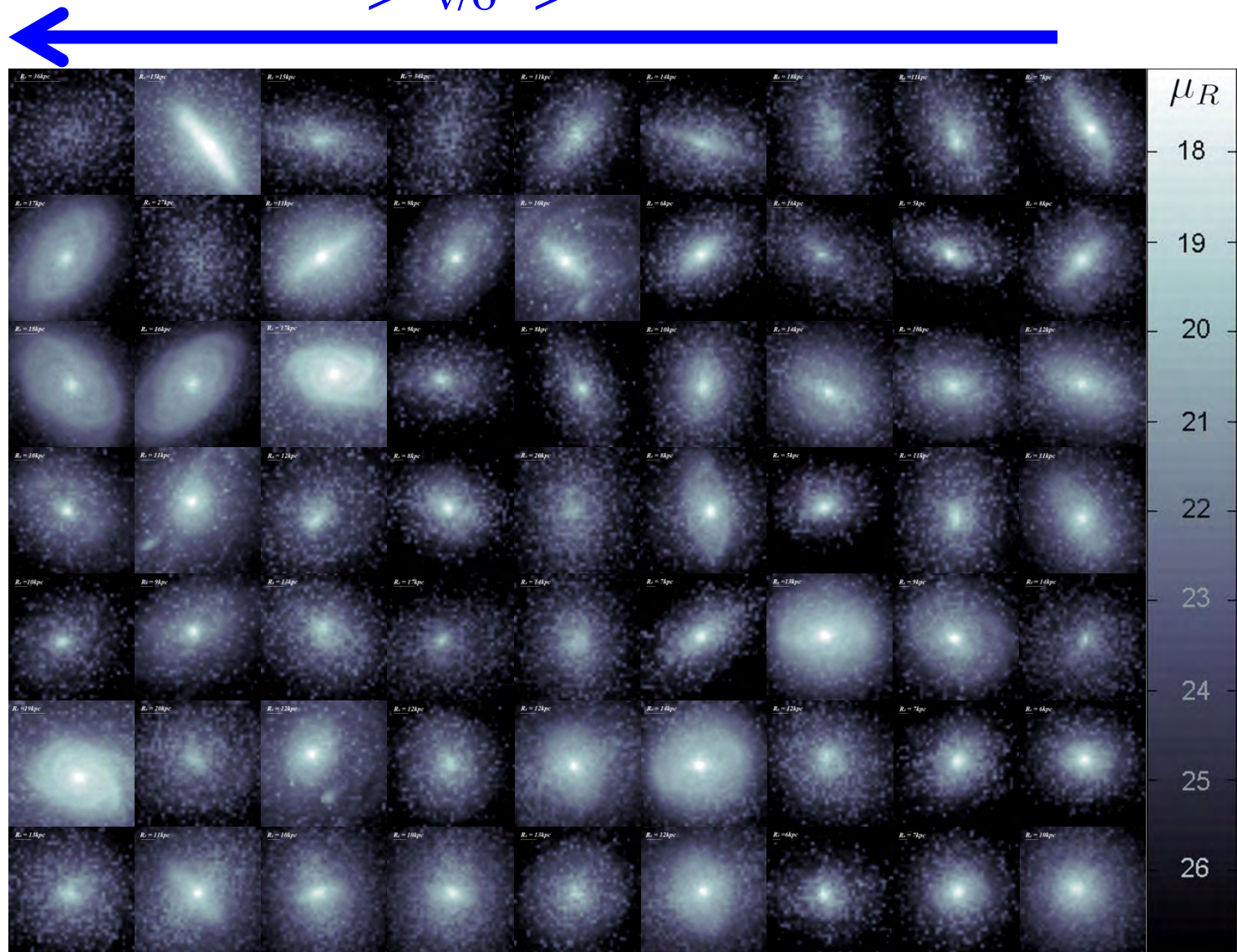
GAS



ESTRELLAS

# 'Valencian-GALAXY-zoo'

>  $v/\sigma$  >



+



## Conclusiones:

- ✧ La mayor parte de la materia del Universo está formada por partículas que sólo podemos detectar a través de su interacción gravitatoria con la materia ordinaria.
- ✧ A determinadas escalas espaciales, el Universo presenta una distribución que no es homogénea ni isotrópica.
- ✧ La organización de las estructuras que forman el Universo (estrellas, galaxias, cúmulos de galaxias) es jerárquica.
- ✧ La formación de estas estructuras se produce mediante fusiones de subestructuras más pequeñas (en masa y tamaño) que con el tiempo forman objetos mayores.



Ley de Gravitación Universal



Condiciones iniciales producidas por el Big Bang





*Simulado*



*Observado*