Estructura a gran escala

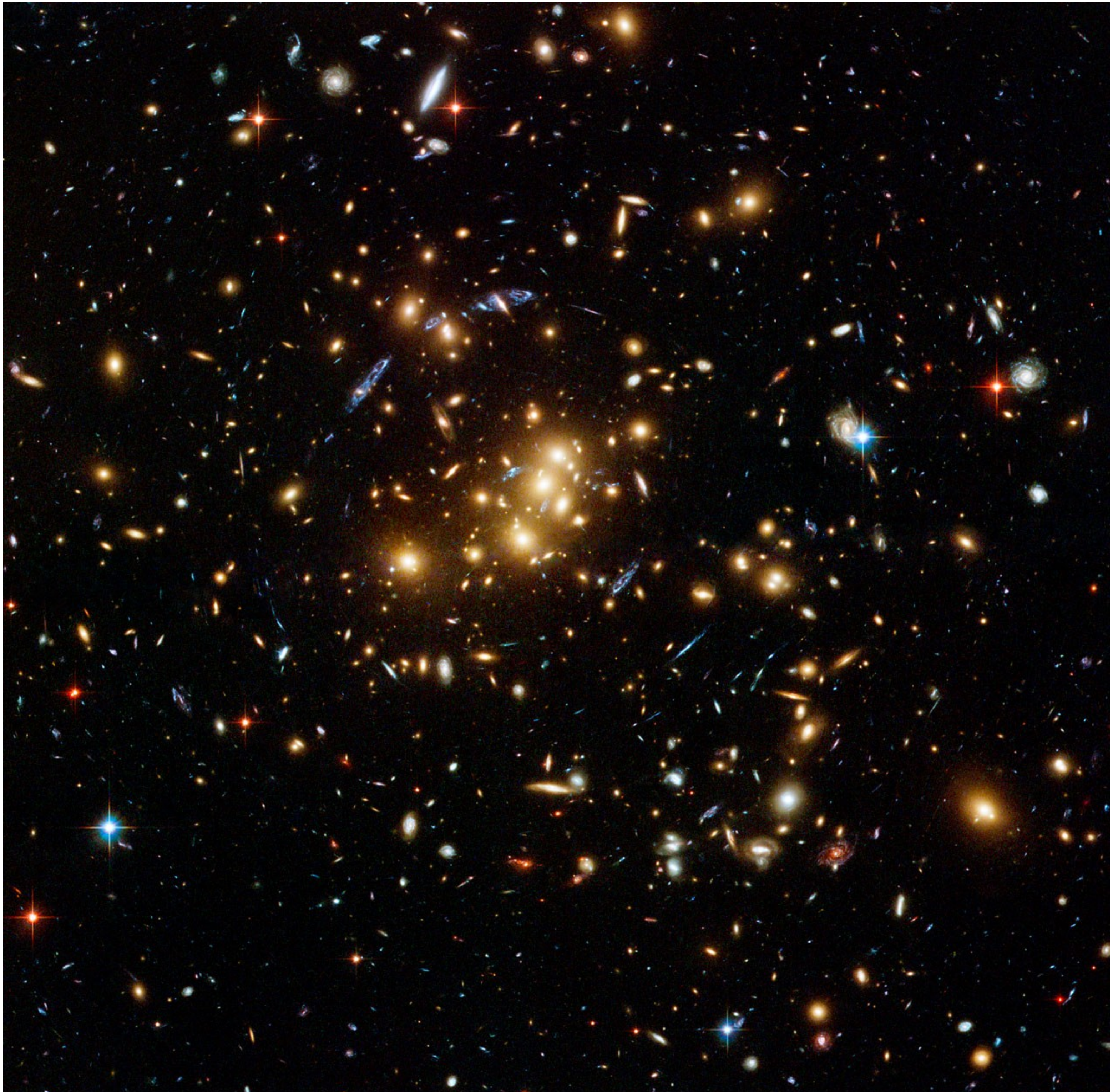
- Las estrellas se agrupan en galaxias.
- Las galaxias en cúmulos de galaxias
- Los cúmulos en supercúmulos de galaxias.
- Los supercúmulos en la estructura a gran escala.
- Grandes vacíos (20- 150 Mpc) limitados por paredes y filamentos.
- Es uno de los problemas básicos de la cosmología.

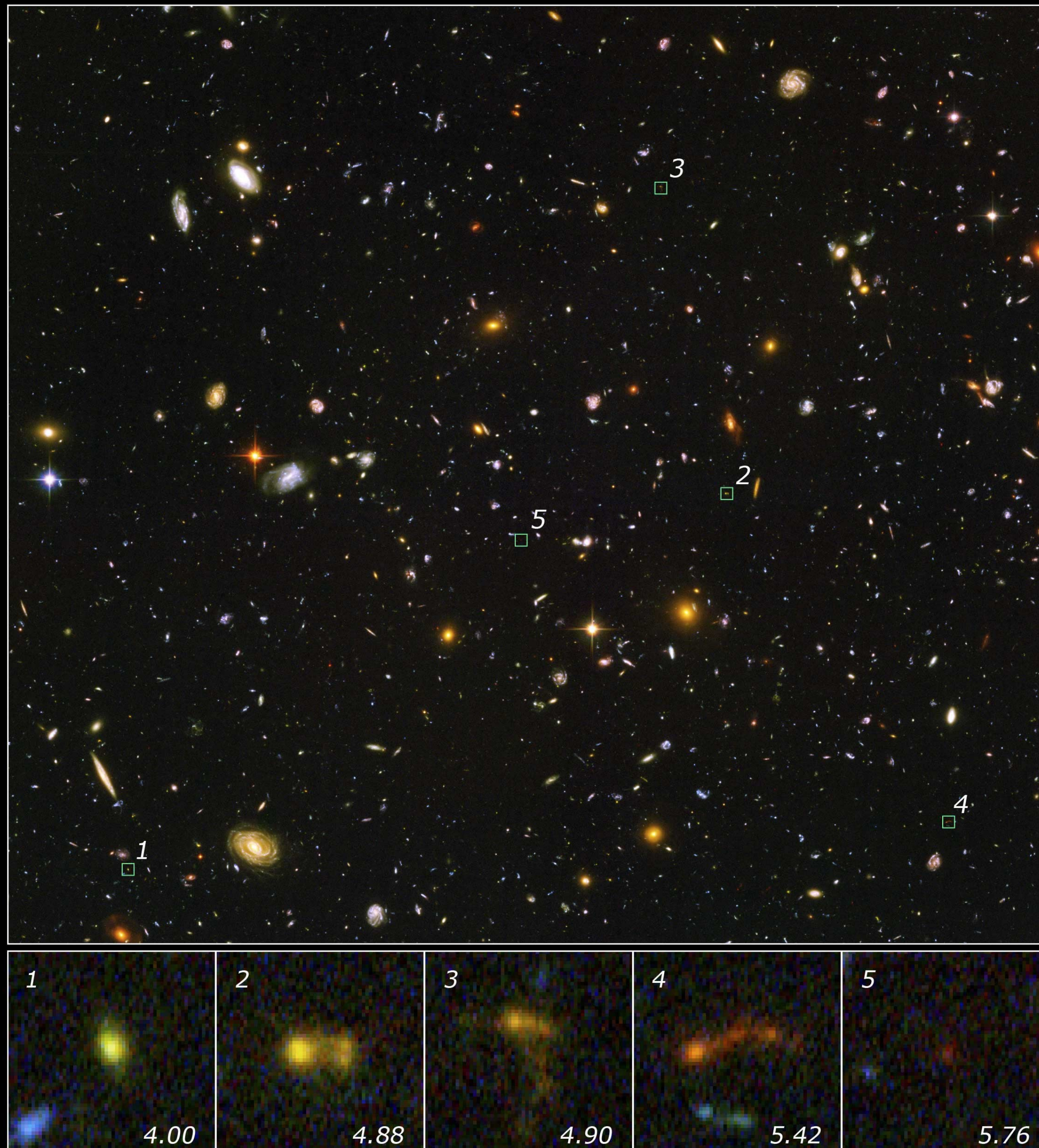
Crecimiento relativista

- Antes de la época de la Igualdad.
- Era de la luz.
- R proporcional a $t^{1/2}$
- Perturbaciones lineales.
- Consideraramos perturbaciones en la métrica (perturbaciones adiabáticas) pero no en la ecuación de estado (perturbaciones isotermas)

uster   Intes Mk69@900mm   St10XME L265min 300sec sub RGB 60/57/62min 200sec bin2x2   Gahberg 20080427/0507/0508   www.kerschhuber.astronomie.at


Coelum
Astronomia
The Cluster of Galaxies Abell 1185 by
CFH



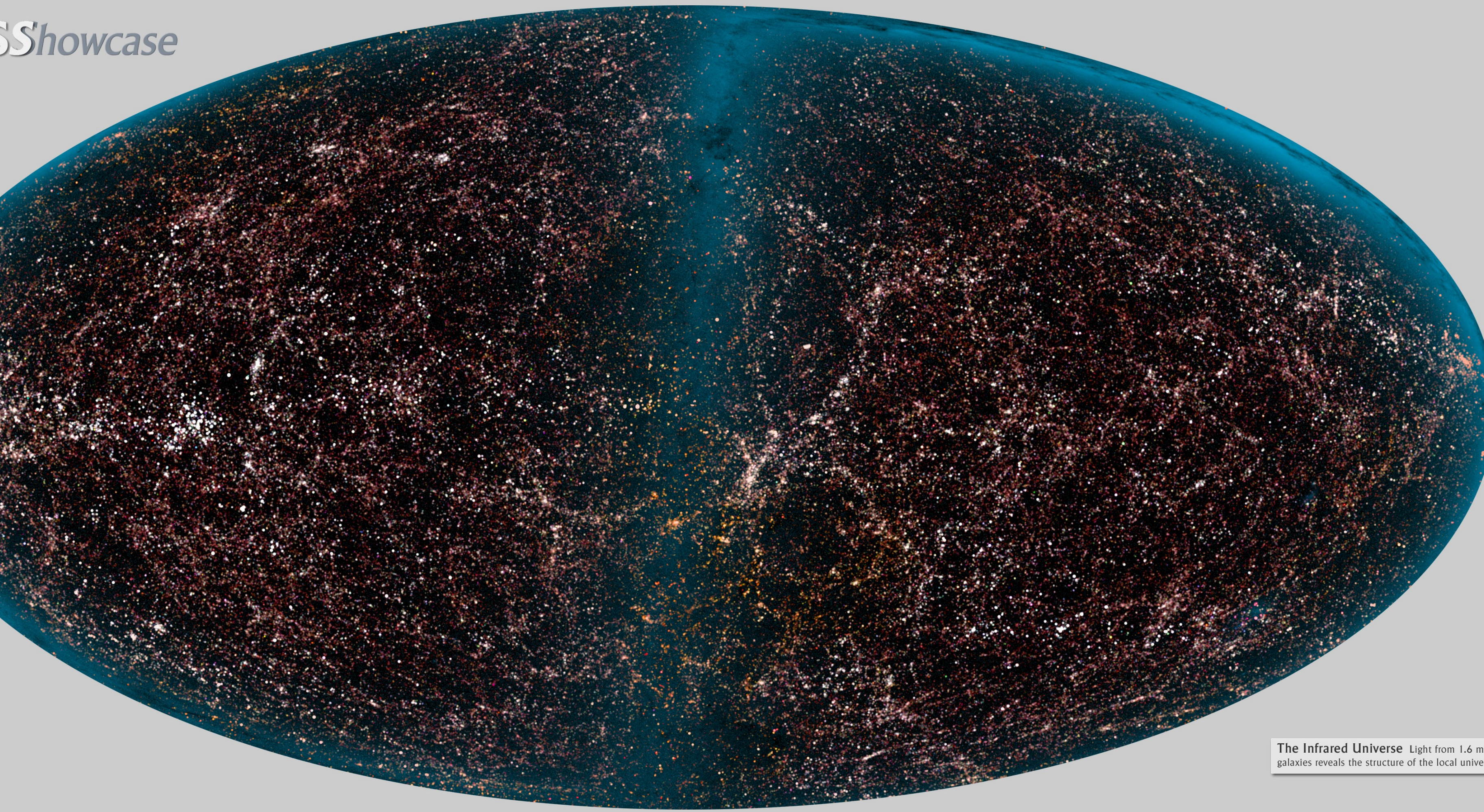


Galaxy Building Blocks in the Hubble Ultra Deep Field

Hubble Space Telescope • ACS/WFC

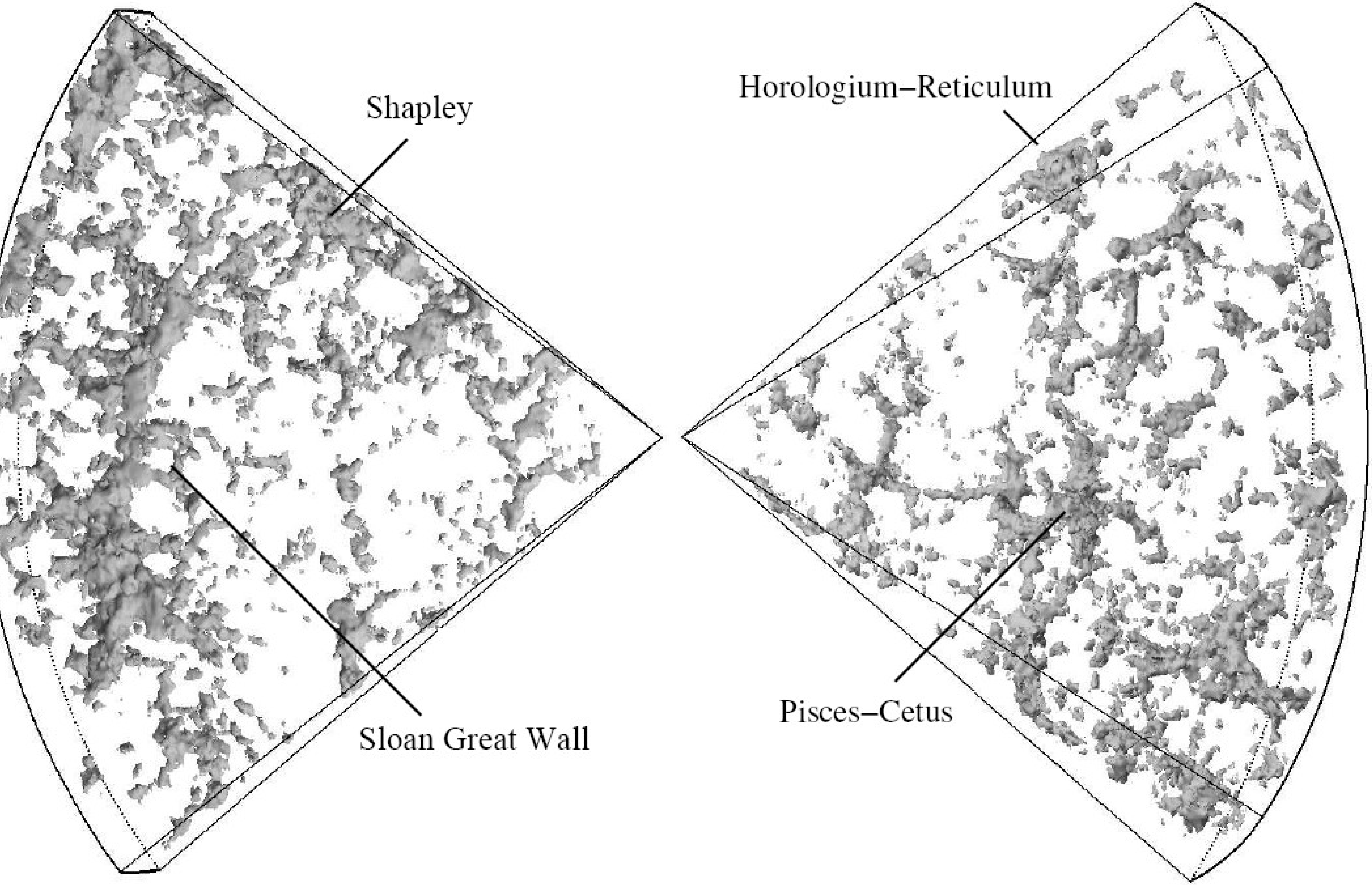
NASA, ESA, and N. Pirzkal (STScI/ESA) STScI-PRC07-31

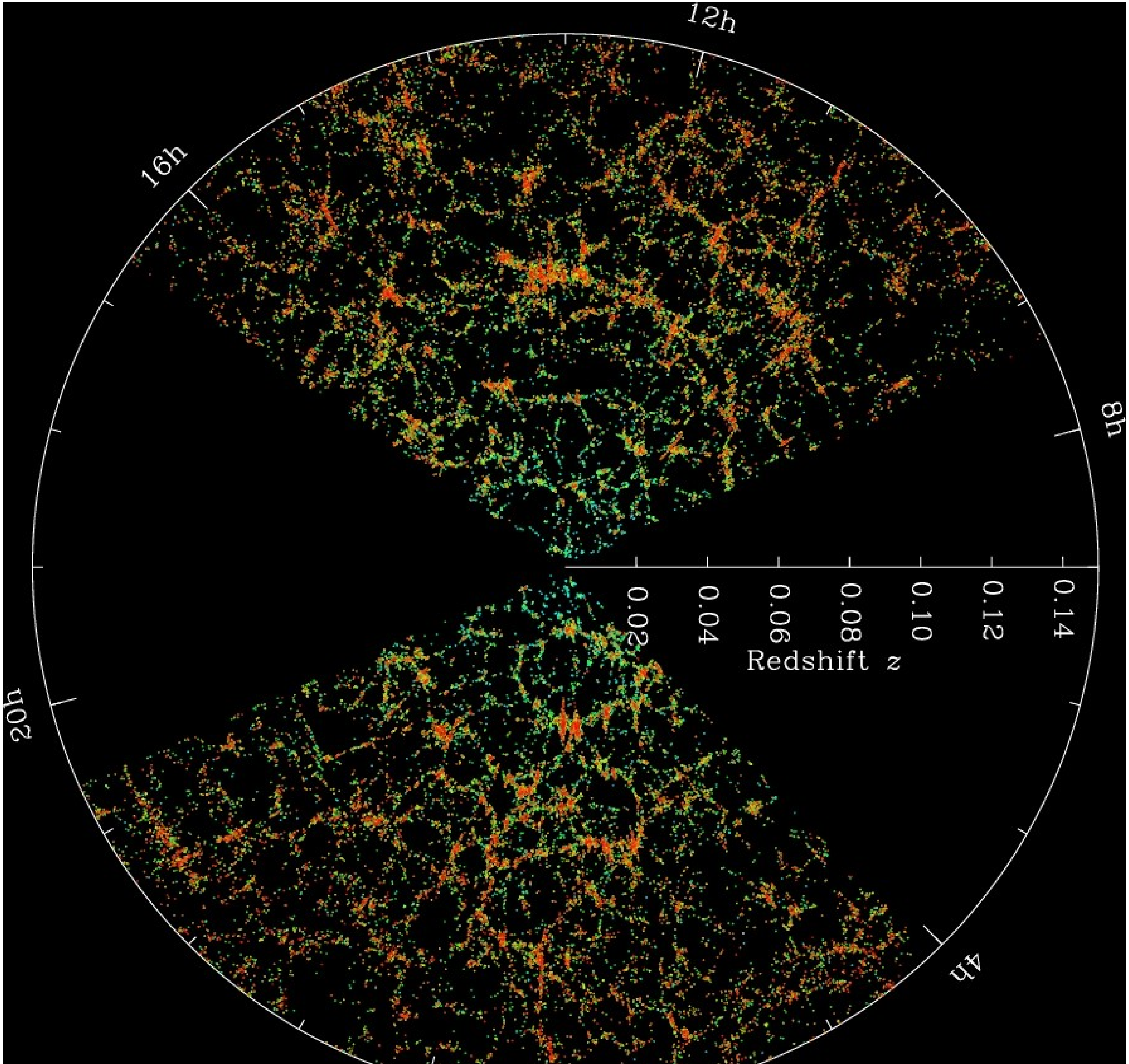
SShowcase

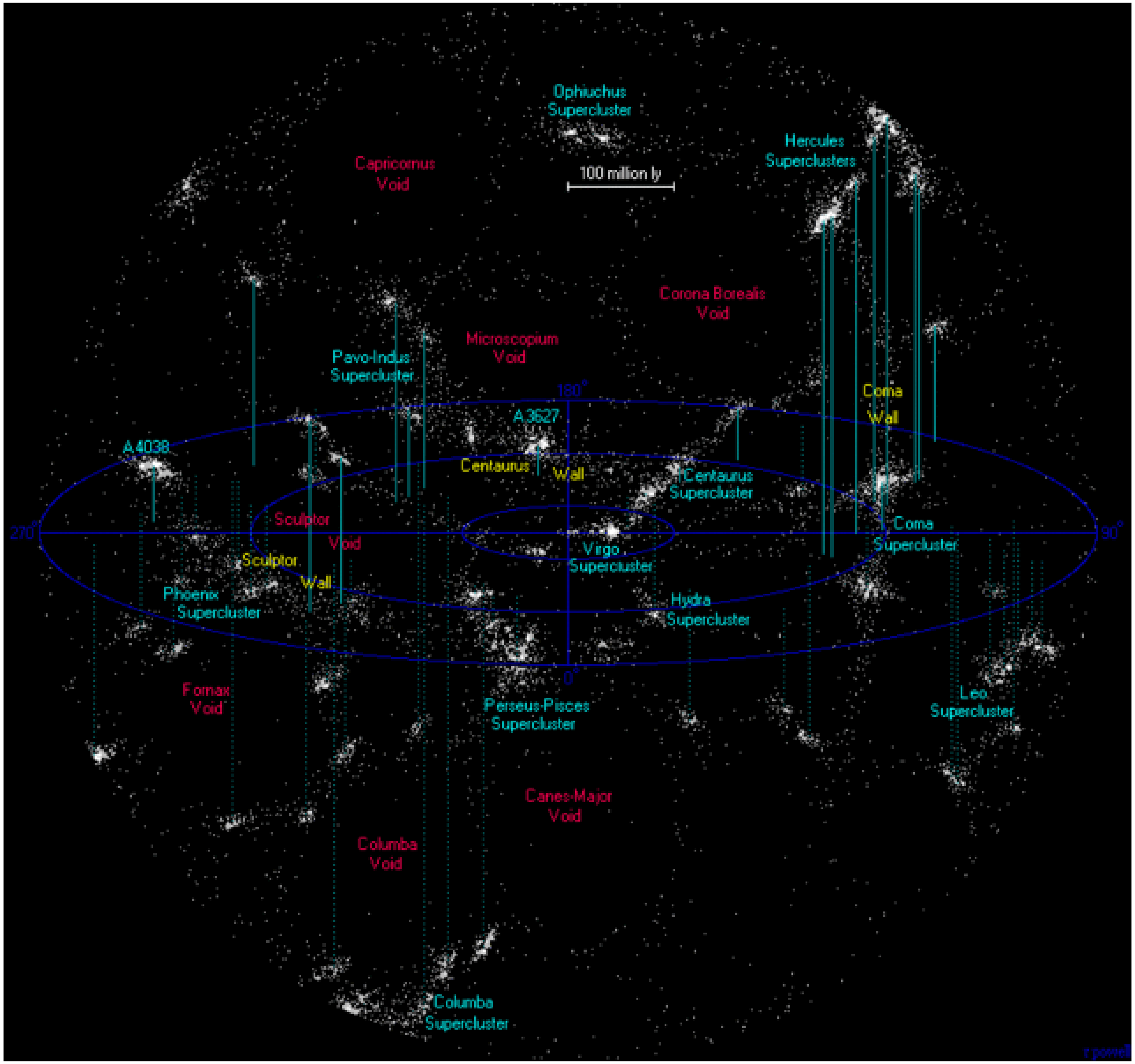


The Infrared Universe Light from 1.6 million galaxies reveals the structure of the local universe

Two Micron All Sky Survey Image Mosaic: Infrared Processing and Analysis Center/Caltech & University of Massachusetts


Shapley
Horologium–Reticulum
Sloan Great Wall
Pisces–Cetus

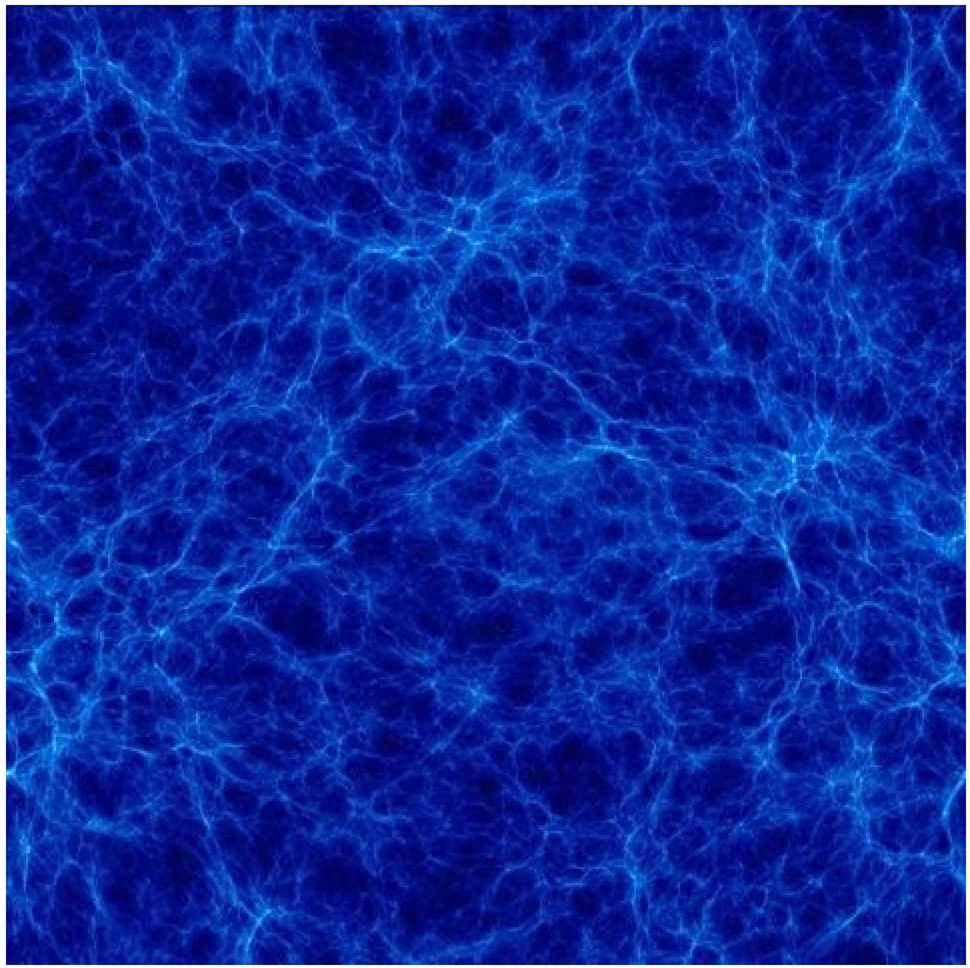

12h
16h
8h
20h
4h
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10
0.12
0.14
Redshift z



Ophiuchus Supercluster
Hercules Superclusters
Capricornus Void
100 million ly
Corona Borealis Void
Microscopium Void
Pavo-Indus Supercluster
180°
A3627
Coma Wall
A4038
Centaurus
Wall
Centaurus Supercluster
270°
Sculptor Void
Coma Supercluster
90°
Virgo Supercluster
Sculptor Wall
Phoenix Supercluster
Hydra Supercluster
0°
Fornax Void
Perseus-Pisces Supercluster
Leo Supercluster
Canes-Major Void
Columba Void
Columba Supercluster

Cómo modelar

- ¿Cuál es el espectro de inhomogeneidades primordiales?
- ¿Cuál es la ecuación de estado?
- Materia oscura fría, CDM, o caliente?
- ¿Identificación de CDM?
- Wimps?
- Machos?
- Neutralinos?



El nacimiento de las galaxias

- La masa de Jeans clásica nos dice la masa mínima de gas interestelar que puede colapsar para formar estrellas.
- El colapso es inicialmente isotermo.
- Al final es adiabático. Este cambio decide el proceso de la fragmentación.
- La masa de Jeans es la de un cúmulo abierto.
- La masa del último fragmento es una masa solar.

Masa de Jeans estelar

$$M_J = \pi^{1/2} \left(\frac{kT}{mG} \right)^{3/2} \rho^{-1/2}$$

Masa de Jeans galáctica

- Al contrario que las estrellas, las galaxias se formaron “todas a la vez”.
- El colapso galáctico es adiabático (las nubes pregalácticas están formadas por fotones)
- El colapso es relativo: está dentro de una expansión.
- Las galaxias nacen por aislamiento, más que por colapso absoluto.
- La densidad en la vecindad del Sol es similar a la densidad en la época de la Recombinación.

Velocidad del sonido

$$\epsilon = mn + aT^4 \qquad P = \frac{1}{3}aT^4 \qquad \sigma = \frac{4\pi T^3}{3\mathrm{n}}$$

$$\downarrow \qquad \downarrow \qquad \downarrow$$

$$\delta\varepsilon = m\delta n + 4aT^3\delta T$$
$$= mn\left(3\frac{\delta T}{T}\right) + 4aT^4\frac{\delta T}{T}$$
$$= \left(3\mathrm{mn} + 4\mathrm{aT}^4\right)\frac{\delta T}{T}$$

$$\delta P = \frac{4}{3}aT^3\delta T$$
$$= \frac{4}{3}aT^4\frac{\delta T}{T}$$

$$3\frac{\delta T}{T} = \delta\frac{n}{n}$$

$$V_S^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_Q \longrightarrow V_S^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \epsilon}\right)_Q$$

$$V_S^2 = \frac{\frac{4}{3}aT^4\frac{\delta T}{T}}{\left(3\mathrm{mn} + 4\mathrm{aT}^4\right)\frac{\delta T}{T}} = \frac{T\sigma}{3\left(m + T\sigma\right)}$$

ejemplos

Si el sistema es muy caliente $m \ll T\sigma$ por lo que $V_S^2 = 1/3$

Tras la recombinación:

$$\epsilon = mn + \frac{3}{2} nT \qquad P = nT \qquad n = constante\, T^{\frac{1}{(\gamma-1)}}$$

Con $\gamma = c_P / c_V = 5/3$

$$V_S^2 = \frac{\gamma T}{m}$$

Masa de Jeans

Cuando la energía gravitacional iguala la energía térmica

$$\frac{\left(\rho\lambda_J^3\right)^2}{\lambda_J}=T\frac{\rho}{m}\lambda^3$$

$$\lambda_J=V_S\rho^{-1/2} \longrightarrow \lambda_J=V_S\epsilon^{-1/2}$$

$$M_J\approx V_S^3\rho^{-1/2} \longrightarrow M_J=mn\lambda_J^3=mnV_S^3\epsilon^{-3/2}$$

Correcta $M_J=mnV_S^3\left(\epsilon+P\right)^{-3/2}$

M(Jeans) en medio en expansión

Tiempo de vida del Universo:

$$\frac{1}{H}=\frac{R}{\dot{R}}\approx\frac{R}{\left(\frac{8\pi\epsilon R^3}{3R}\right)^{1/2}}=\left(\frac{3}{8\pi\epsilon}\right)^{1/2}\approx\epsilon^{-1/2}$$

con k=0 y P=0. El período de Jeans:

$$\frac{\lambda_J}{V_S}=\frac{V_S\,\epsilon^{-1/2}}{V_S}=\epsilon^{-1/2}$$

¡Son del mismo orden!

Historia de la Masa de Jeans

$$M_J = mnV_S^3 (\epsilon + P)^{-3/2}$$

Universo dominado por la radiación:

$$M_J \approx mn\,\epsilon^{-3/2} = m\frac{4aT^3}{3\sigma}(aT^4)^{-3/2} = \frac{m}{a^{1/2}\sigma}T^{-3} = \frac{m}{a^{1/2}\sigma}T_0^{-3}\left(\frac{R}{R_0}\right)^3$$

$$M_J \propto R^3$$

Desde Igualdad hasta Recombinación

$$M_J = mnV_S^3(\epsilon + P)^{-3/2}$$

Igualdad: $mn_0 \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 \approx aT_0^4 \left(\frac{R_0}{R}\right)^4$

$$\frac{R_0}{R} = \frac{mn_0}{aT_0^4}$$

mn_0 es la densidad crítica (sea DM lo que sea) $\approx 10^{-29} g\,cm-3$

$$\frac{R_0}{R} \approx 2.5 \times 10^4$$

Ahora $m \gg T\sigma$, $\epsilon \approx mn$ luego $V_S = \frac{T\sigma}{3\mathrm{m}}$

$$M_J = mn\left(\frac{T\sigma}{3\mathrm{m}}\right)^{3/2}(mn)^{-3/2} = m^{-1/2}\left(\frac{4\mathrm{aT}^3}{3\sigma}\right)^{-1/2}\left(\frac{T\sigma}{3\mathrm{m}}\right)^{3/2} = \frac{1}{6}\frac{\sigma^2}{m^2}a^{-1/2}$$

M_J es constante! $M_J \approx 0.4\sigma^2 M_o \approx 4 \times 10^{19} M_o$

Tras la Recombinación

Ahora $V_S^2 \approx \frac{T}{m}$ y T es la temperatura de la materia

$$M_J = mn\left(\frac{T}{m}\right)^{-3/2}(mn)^{-3/2} = m^{-2} n^{-1/2} T^{-3/2} = m^{-2}\left(\frac{4aT_\gamma^3}{3\sigma}\right)^{-1/2} T^{3/2}$$

Como $T \propto R^{-2}$ y $T_\gamma \propto R^{-1}$ y como $T \approx \frac{T_\gamma^2}{T_R}$

$$M_J \approx m^{-2}\left(\frac{\sigma T_{\gamma 0}}{aT_R^3}\right)^{1/2} = \left(\frac{R_0}{R}\right)^{3/2}$$

$$M_J \propto R^{-3/2}$$

...resumiendo...

Entre Aniquilación e Igualdad

$$M_J \, 1.4\times\left(10^{28}\, R/R_0\right)^3 M_o$$

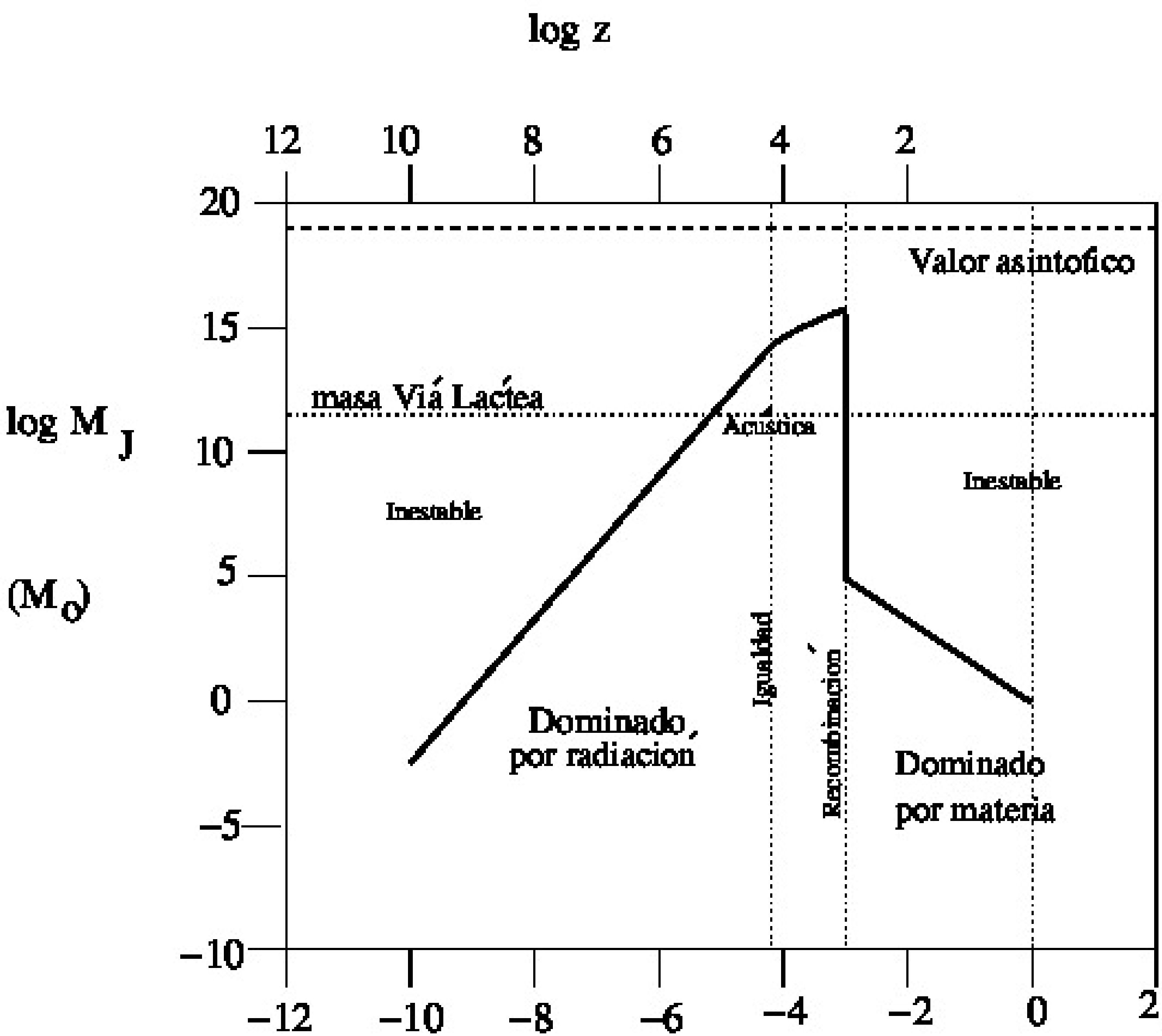
Entre Igualdad y Recombinación

$$M_J=4\times10^{19} M_o$$

Entre Recombinación y el presente

$$M_J=0.5\left(R/R_0\right)^{-3/2} M_o$$

Evolucion de la masa de Jeans



La masa de una galaxia

- A “pequeña escala” (como la de la MW) el fluido cósmico no es perfecto.
- Hay mecanismos disipativos.
- Sobre todo el de “difusión de fotones”.
- En la fase acústica esta disipación puede ser total.
- Las perturbaciones más pequeñas no alcanzan la Recombinación y no producen galaxias.
- La masa mínima que colapsa es la “masa de Silk”.

Masa de Silk

- Los fotones tienden a escapar de la nube oscilante, perdiéndose la condición de adiabacia.
- Arrastran a los bariones y, por tanto, a los electrones.
- Los fluidos reales se caracterizan por una viscosidady una conductividad térmica.
- Cuando el camino libre medio de los fotones es como la décima parte del tamaño de la nube, la viscosidad es importante

Masa mínima

$\sigma_T = (8\pi e^4)/(3\mathrm{m}_e^2) \qquad 0.67\times 10^{-24}\,cm^2$

Camino libre medio de los fotones: $\lambda_\gamma = (\sigma_T\, n)^{-1}$

Tamaño máximo de la nube que sobrevive:

$$\lambda \approx 10\,\frac{(R/R_0)^3}{\sigma_T\, n_0} = 10\,\frac{(m/R/R_0)^3}{\sigma_T\,(mn_0)}$$

que corresponde a una masa de Silk

$$M_S = mn\lambda^3 = 10^3\,\frac{m^3(R/R_0)^6}{(mn_0)^2\sigma_T^3} \approx 1\,M_{MW}$$

El profesor muestra aquí la película de la evolución de la proto-Vía-Láctea

Flujo libre

- Es otro límite de la masa límite. Otro mecanismo de amortiguamiento.
- Los neutrinos (u otras partículas relativistas) no sufren “scattering” de Thomson. Viajan libremente lo que suaviza las nubes.
- Pero cuando su temperatura es del orden de su masa, se termalizan y no suavizan.
- ¿Qué longitud recorre un neutrino antes de termalizarse? Esa es la longitud que buscamos.
- Vuelve a salir algo parecido a la masa de la Vía Láctea.

Newton o GR

Sabemos: $\frac{M_J}{\lambda_J} \approx V_S^2$

Tras la Recombinación $V_S^2 \approx T/m \ll 1$

Antes de la Recombinación $V_S^2 = 1/3$ del orden de la unidad

Cuando en un sistema $M \approx L$ hace falta GR

Crecimiento post-recombinacional

$\delta = \frac{\delta\rho}{\rho} = \frac{\rho - \langle\rho\rangle}{\langle\rho\rangle}$ Asumimos $\delta \ll 1$, aunque sabemos $\delta_0 \approx 10^5$

Si $\langle\rho\rangle_0 \approx 10^{-30}\, g\, cm^{-3}$

en la Recombinación $\langle\rho\rangle_R \approx 10^{-30}(1000)^3 = 10^{-21}\, g\, cm^{-3} \approx 10\, M_o\, pc^{-3}$

Las galaxias ¿nacen por aislamiento?

Perturbaciones lineales $: \rho \rightarrow \rho + \rho_1$ con $\rho_1 \equiv \delta\rho \ll \rho$

Magnitudes medias

$\rho = \rho(R/R_0)^{-3}$ $\vec{v} = (\dot{R}/R)\vec{r}$ $\vec{g} = -\frac{4\pi\rho}{3}\vec{r}$

donde $\dot{R}^2 = \frac{8\pi\rho}{3}R^2$

Ecuaciones perturbadas

Continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) + \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \vec{v}_1 + \vec{v} \cdot \nabla \rho_1 + 3\rho_1 \frac{\dot{R}}{R} = 0$$

Continuidad perturbada:

$$\dot{\rho}_1 + \rho \nabla \cdot \vec{v}_1 + \vec{v} \cdot \nabla \rho_1 + 3\rho_1 \frac{\dot{R}}{R} = 0$$

Movimiento perturbada

$$\dot{\vec{v}}_1 + \rho \nabla \cdot \vec{v} + \vec{v} \cdot \nabla \rho_1 - \vec{g}_1 = 0$$

$$\nabla \times \vec{g} = 0 \longrightarrow \nabla \times \vec{g}_1 = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{g} = 4\pi \rho \longrightarrow \nabla \cdot \vec{g}_1 = 4\pi \rho_1$$

Solución newtoniana

$$\ddot{\delta}+2\dot{\delta}+\frac{\dot{R}}{R}-4\pi\delta=0$$

$$\delta\propto t^{2/3}$$

$$\delta\propto t^{-1}$$ Acaba desapareciendo

$$\delta\propto t^{2/3}\propto R\propto(1-z)^{-1}$$

Cuando $\delta\geq 1$ las perturbaciones ya no son lineales: $\delta\propto R^{n}$ con n=2, 3, ...

Velocidad peculiar actual longitudinal: $V_0\approx H_0\lambda_0\delta_0$

En principio permite obtener la distribución de DM

Si no hubiéramos asumido $\Omega=1$ habríamos encontrado: $V_0=\Omega_0^{0.6}H_0\lambda_0\delta_0$

lo que podría permitir obtener información sobre H_0

Crecimiento de las perturbaciones

- Cuando una nube puede colapsar, ¿con qué velocidad lo hace?
- Tras la Recombinación el tratamiento matemático puede ser newtoniano.
- Antes de la Recombinación el tratamiento exige GR.
- Esto se debe a que...

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(R^5 U_i(\varepsilon + P)\right) = -R^3 \frac{\partial p_1}{\partial x^i}$$

Movimiento

$$\dot{\varepsilon}_1 + \frac{3\dot{R}}{R}(\varepsilon_1 + P_1) = -(\varepsilon + P)\left(\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial g_{kk}}{2\mathrm{R}^2} + \frac{\partial}{\partial x^i} U_1^i\right)\right)$$

Balance energía

$$\delta = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon + P} = \frac{3}{4}\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}$$

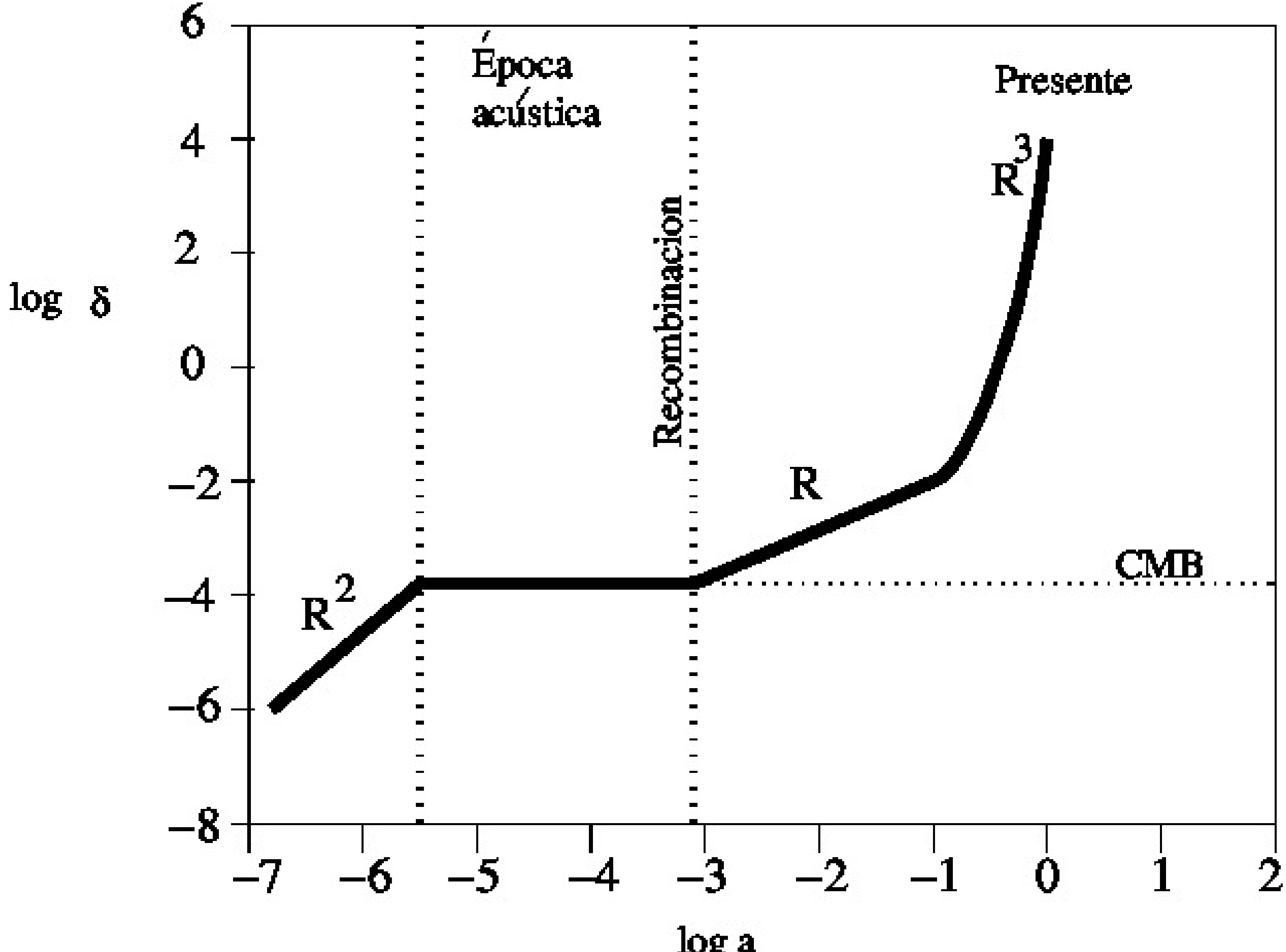
Con esta definición ligeramente diferente, obtenemos:

$$\delta g_{kk} = -2\mathrm{R}^2 \delta$$

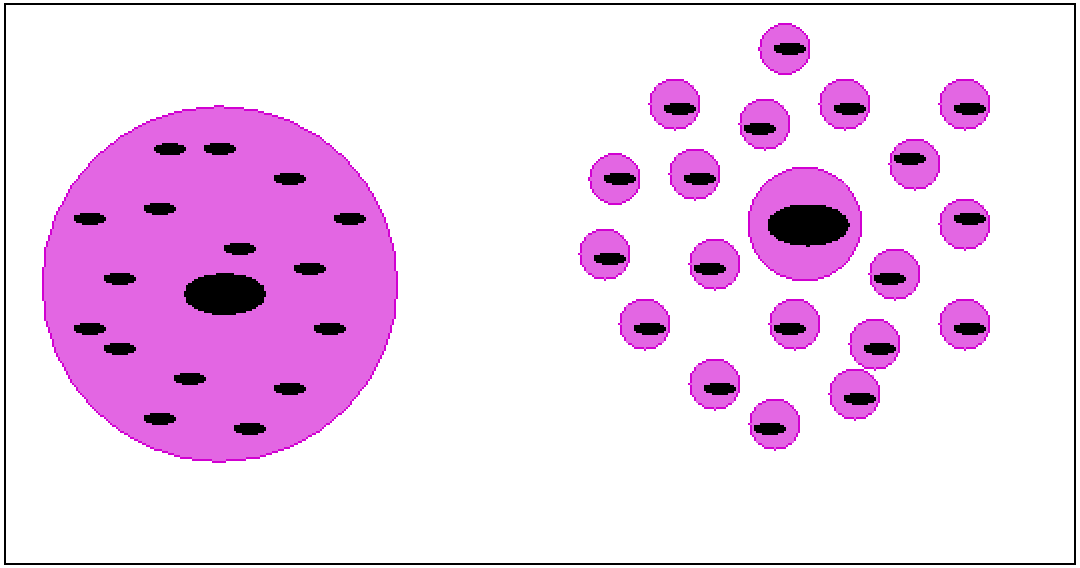
$$\ddot{\delta} + \frac{\dot{\delta}}{t} - \frac{\delta}{t^2} = 0 \longrightarrow$$

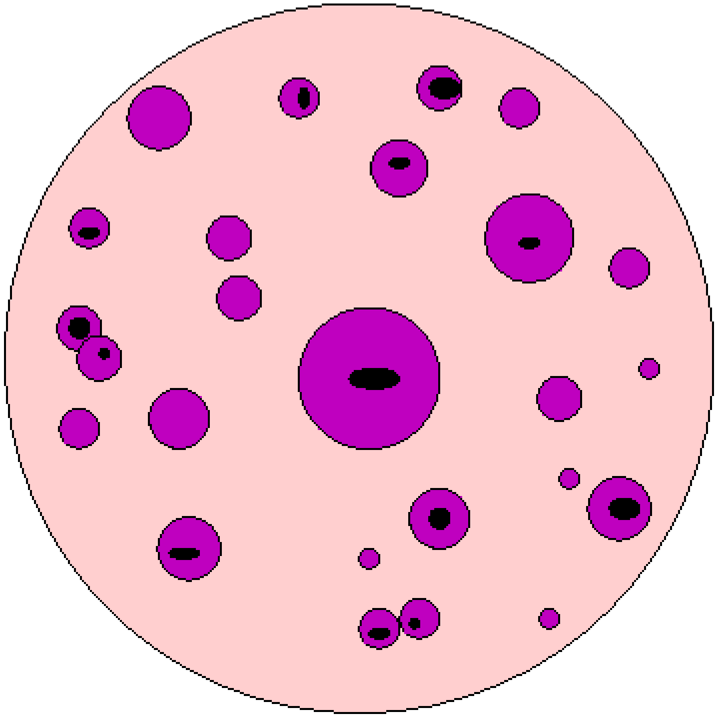
$$\delta \propto t \qquad \delta = \mathrm{constante} \times t$$

$$\delta \propto t^{-1}$$



log δ
log a
Época acústica
Recombinacion
Presente
CMB
R^2
R
R^3
6
4
2
0
−2
−4
−6
−8
−7
−6
−5
−4
−3
−2
−1
0
1
2





Galaxy clusters

- They are virialized. DM was first discovered in clusters.
- They were detected as many galaxies. Abell produced a first catalogue.
- But the intergalactic gas is much more massive than all galaxies (10-15 times higher).
- This gas is observed as bremsstrahlung emission.

GC DM

$$T \approx 10^8 K$$

$L_x \propto n_e^2$ because electrons are accelerated by protons

$L_x \propto n_e^2 r_0^3$ because volume is proportional to r_0^3

$$M_{gas} \propto n_e r_0^3$$

hence: $M_{gas} \propto L_x^{1/2} r_0^{3/2}$

The total mass (about $10^{14} - 10^{15} M_o$) in hydrostatic equilibrium

$M_{total} \propto r_0$

hence: $M_{gas} / M_{total} \propto r_0^{1/2} L_x^{1/2}$

We thus deduce M_{gas} / M_{total} about 0.1

- Baryonic acoustic oscillations
- Anisotropy spectra