

Materia oscura en el Universo

“Dark matter in astronomy is like black money in economics”(Narlikar & Burbidge)

Asignatura: Cosmología.

Curso: 2008-2009

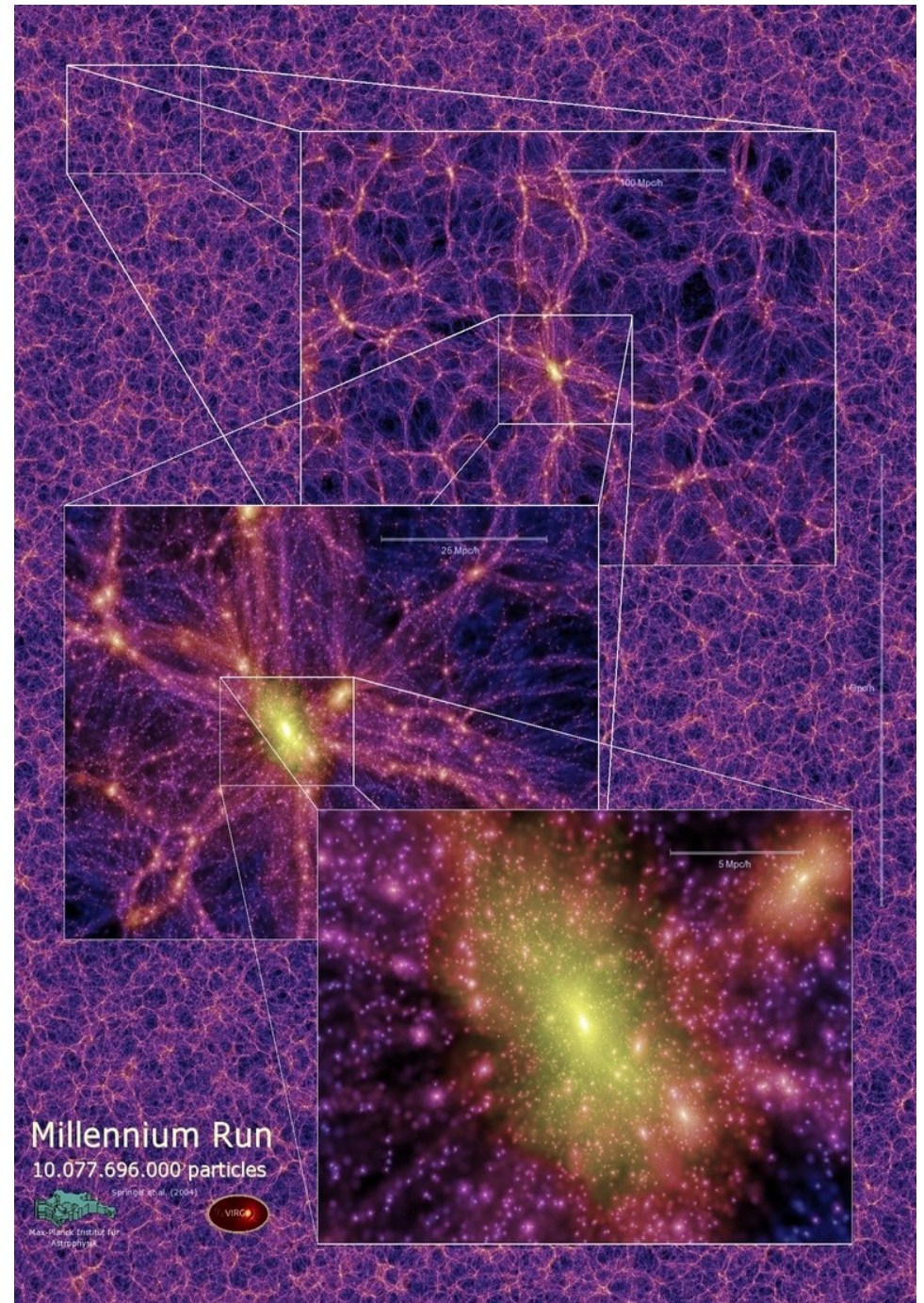
Beatriz Ruiz Granados

Correo electrónico: bearg@ugr.es

Transparencias en: www.ugr.es/~bearg/docencia/

Parte II:

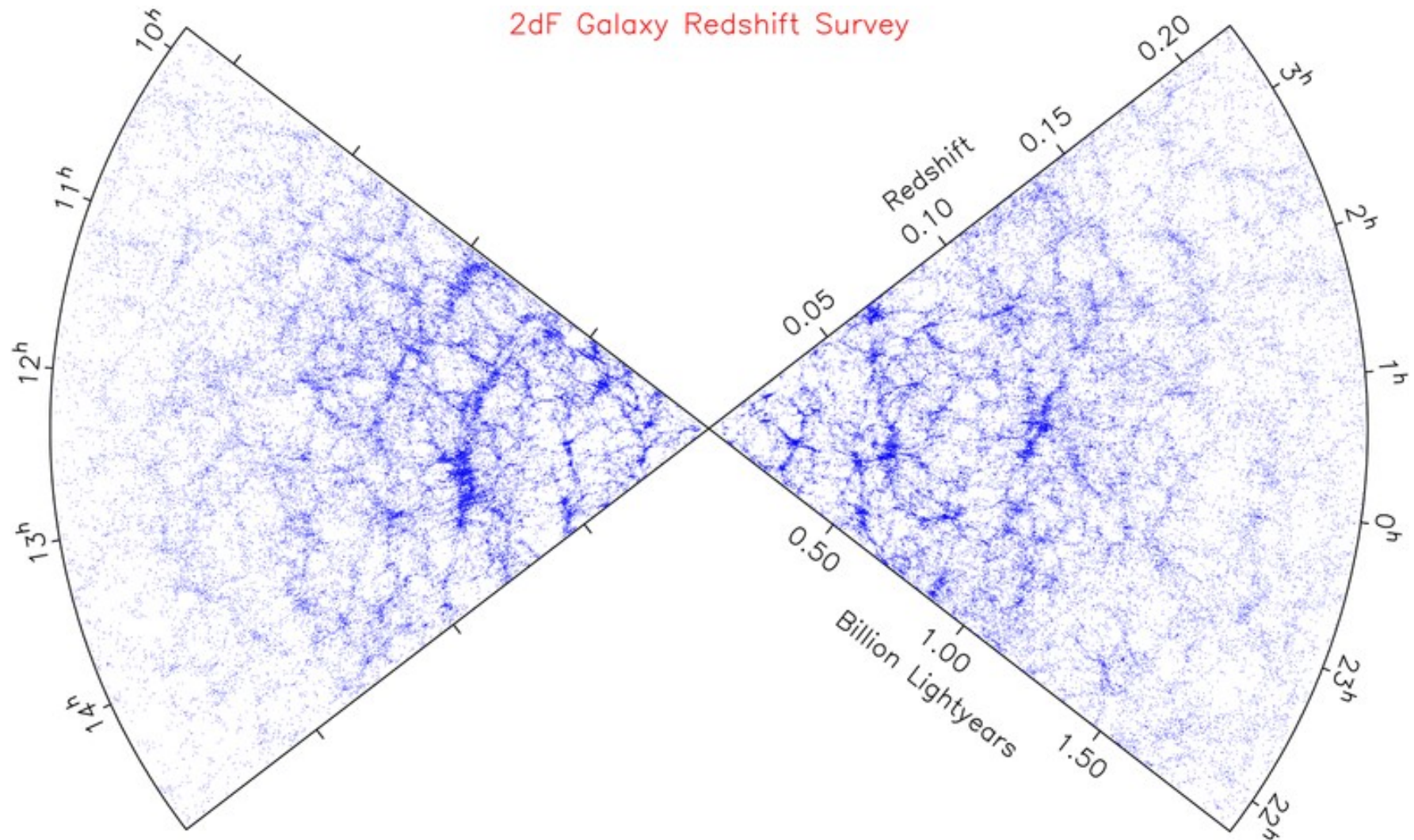
Materia Oscura en el Universo

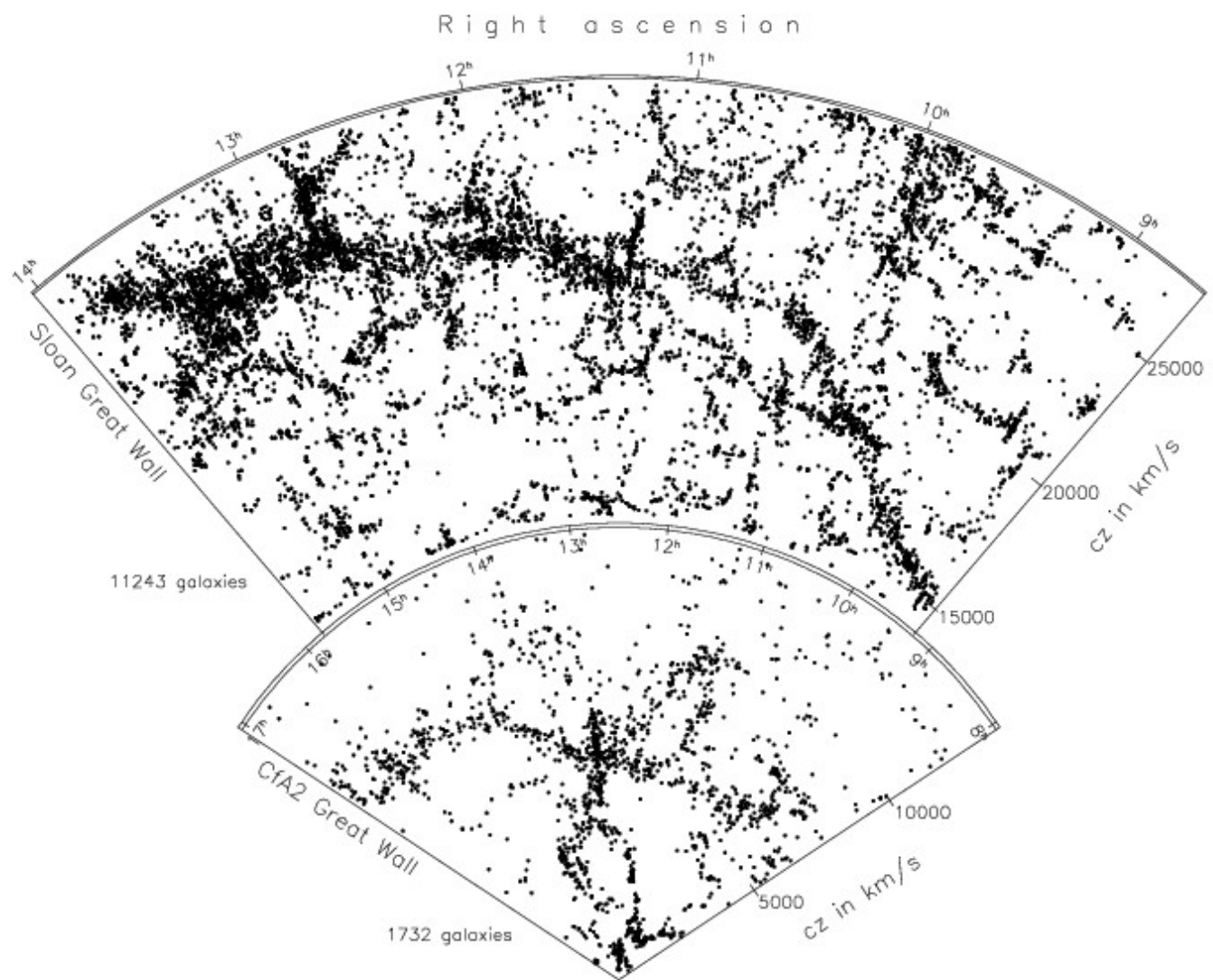


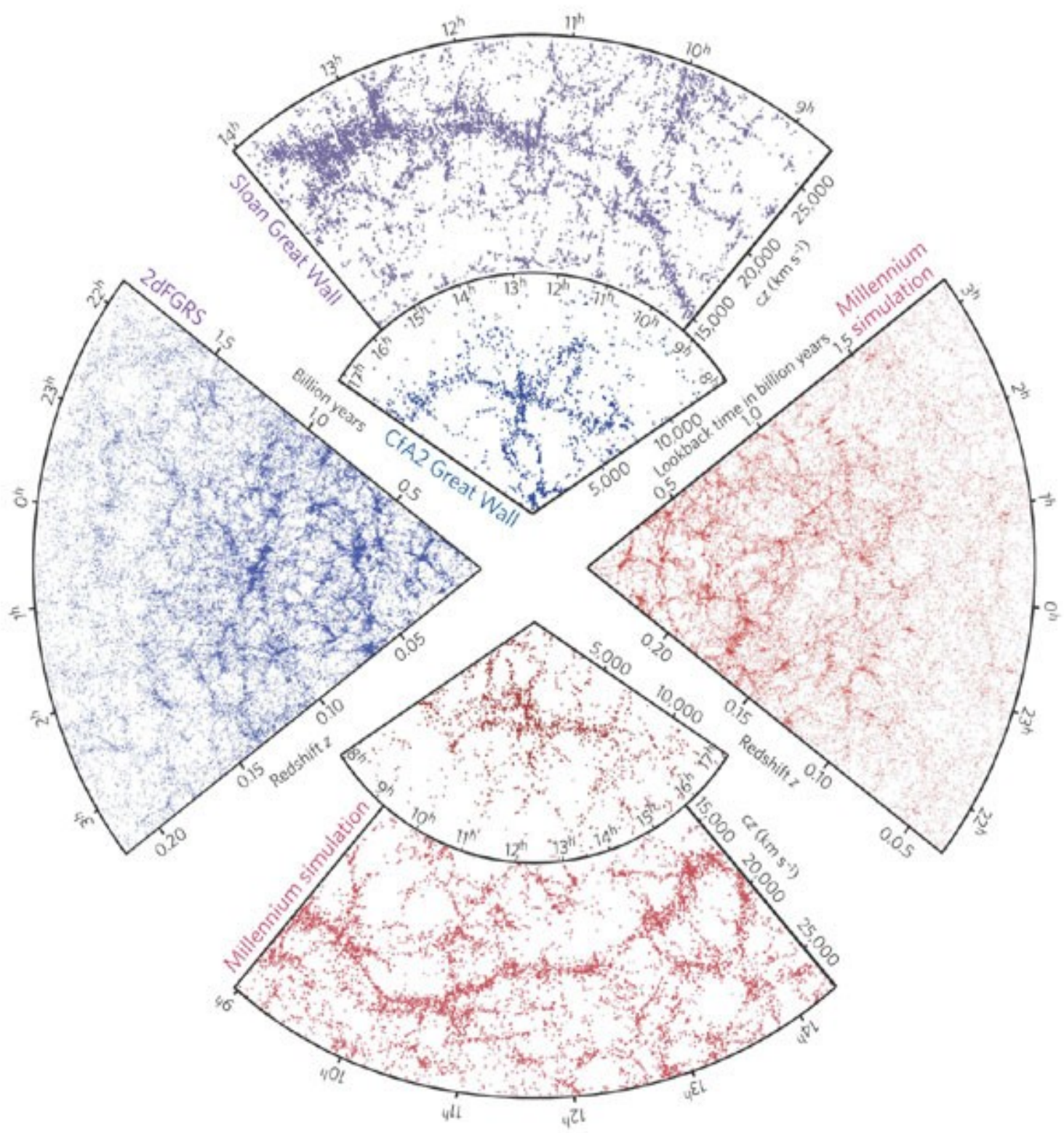
Contenidos:

- 1) Aspecto del Universo a gran escala: 1.1.Introducción.
1.2.El paradigma Λ -CDM.
- 2) Modelos jerárquicos de CDM.
- 3) Naturaleza de la materia oscura.
- 4) Origen y evolución de la estructura a gran escala. Teoría de perturbaciones.
- 5) Problemas del modelo Λ -CDM.
- 6) Bibliografía

1) ¿Cómo es el Universo a gran escala?

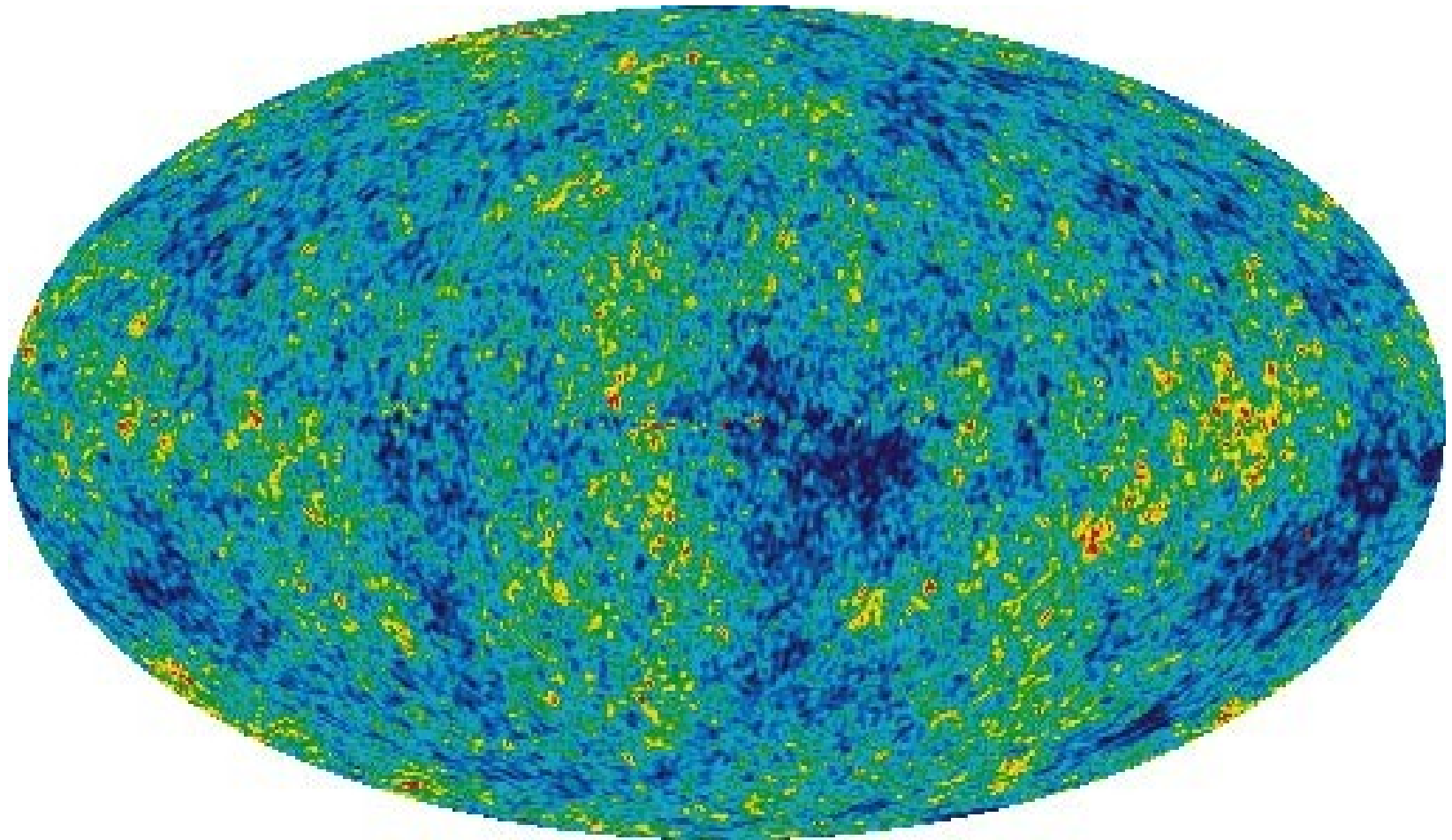






Radiación C3smica de Fondo

- Universo con $\sim 380\,000$ a1os



1.1. Introducción.

- El Universo a gran escala tiene una compleja.
- Muchos cúmulos están alienados dando lugar a filamentos gigantes y también a grandes vacíos.
- Observacionalmente, los *redshift surveys*, han sido imprescindibles para revelarnos la estructura a gran escala del Universo, junto con las anisotropías observadas en el CMB.
- Estos hechos observacionales han sido los que nos han permitido establecer la teoría para estudiar el origen y evolución de nuestro Universo.

1.1. Introducción.

- Los más importantes *redshift surveys* son:
 - Primero en 1977 : **CfA**
 - 2 degree field galaxy redshift survey **2dFGRS** Bajo
 - Sloan Digital Sky Survey **SDSS** z
 - **DEEP 2** Alto
 - **VIRMOS VLT deep survey** Z
- Medida a todo el cielo de la radiación de fondo (CMB):
 - COBE
 - **WMAP**
 - **PLANCK**

1.1. Introducción.

- Pero, ¿cómo se ha generado y cómo evoluciona la estructura a gran escala del Universo que observamos?
- Una posible respuesta a esta pregunta es lo que hoy día se conoce como **paradigma Λ -CDM.**

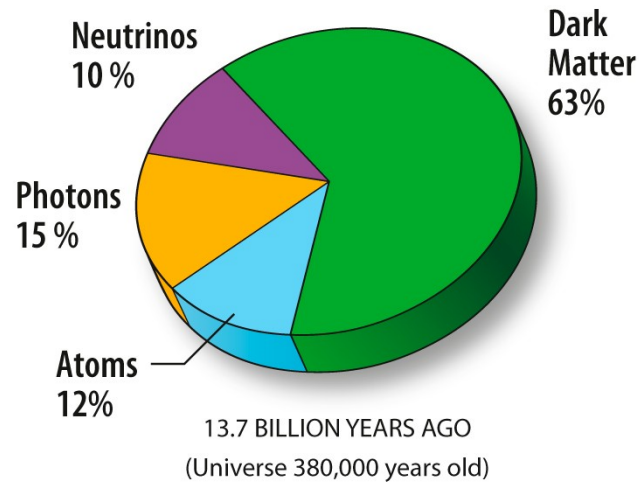
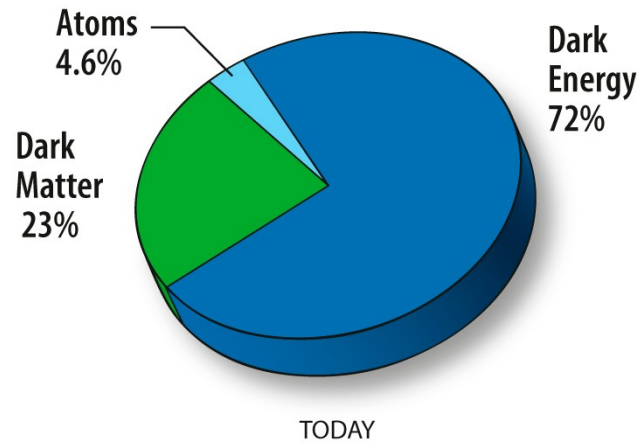
1.1. Introducción.

- La evolución de la estructura del Universo se estudia mediante teoría de perturbaciones cosmológicas para explicar la formación galáctica, el “clustering” en la distribución de galaxias y las anisotropías de la radiación de fondo (CMB).
- La Inflación hace que se necesite una gran cantidad de materia ya que predice $\Omega = 1$ (universo plano).
- Sin embargo la componente de materia bariónica es mucho menor que 1 \rightarrow existencia de materia oscura a gran escala.

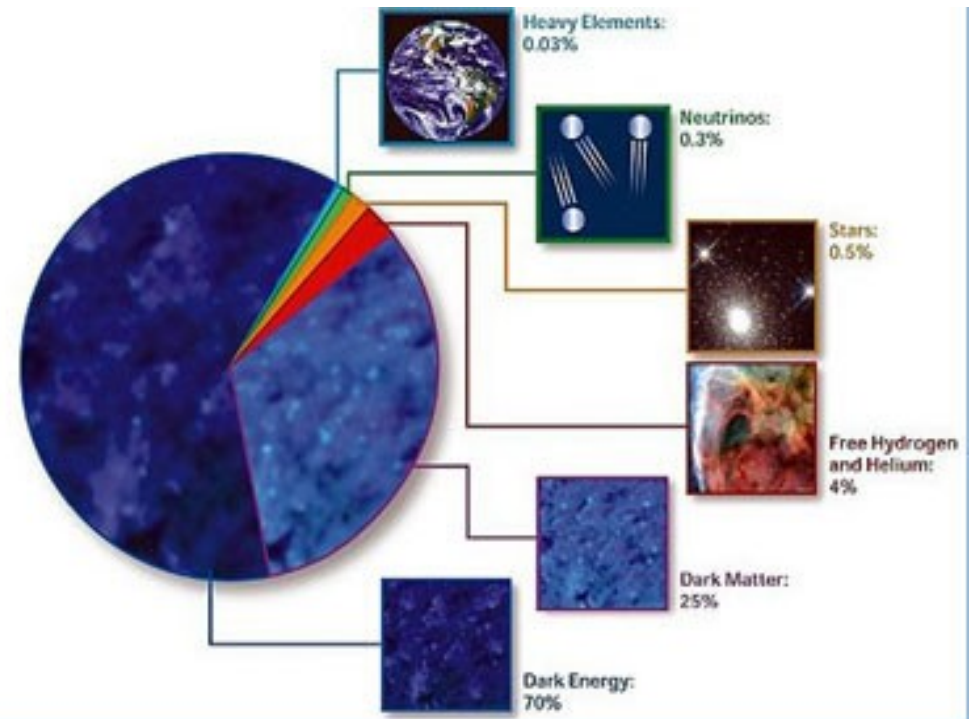
1.2. El paradigma Λ -CDM

- Nuestra actual imagen del Universo está descrita por modelo de concordancia Λ -CDM, basado fundamentalmente en dos componentes que nos son desconocidas: energía oscura (DE) y materia oscura fría (CDM).
- Ambas representan \sim el 95% de los constituyentes de nuestro Universo.
- Este modelo no nos explica el origen y la naturaleza ni de la DE ni de la CDM.

Composición del Universo



- Predicciones derivadas de WMAP5



1.2. El paradigma Λ -CDM

- El éxito del modelo se debe a que cuando se tienen en cuenta los resultados de CMB, de distancias de supernovas tipo Ia y las oscilaciones acústica de bariones (BAO) en la distribución de galaxias, los valores de los seis parámetros del modelo se reproducen.

WMAP Cosmological Parameters	
Model: Λ CDM	
Data: all	
$10^2 \Omega_b h^2$	2.186 ± 0.068
$\Delta_{\mathcal{R}}^2(k = 0.002/\text{Mpc})$	$(24.0 \pm 1.2) \times 10^{-10}$
h	$0.704^{+0.015}_{-0.016}$
H_0	$70.4^{+1.5}_{-1.6} \text{ km/s/Mpc}$
$\log(10^{10} A_s)$	3.175 ± 0.052
$n_s(0.002)$	0.947 ± 0.015
$\Omega_b h^2$	0.02186 ± 0.00068
$\Omega_c h^2$	$0.1105^{+0.0039}_{-0.0038}$
Ω_Λ	0.732 ± 0.018
Ω_m	0.268 ± 0.018
$\Omega_m h^2$	$0.1324^{+0.0042}_{-0.0041}$
σ_8	$0.776^{+0.031}_{-0.032}$
τ	$0.073^{+0.027}_{-0.028}$
θ_A	$0.5947 \pm 0.0019^\circ$

2. Modelos de CDM jerárquicos

- Modelos teóricos de materia oscura (CDM):
 - Artículos clave: Press & Schechter (1974), Rees & White (1978) y Peebles (1982).
 - Idea común:
 - La materia oscura es fría.
 - Los halos se formaron en un determinado tiempo de forma jerárquica, esto es, fueron emergiendo y formándose a partir de halos más pequeños.

2. Modelos de CDM jerárquicos.

- Ideas precedentes: Zeldovich (1970) – objetos de pequeña masa se forman a partir de procesos no lineales en cúmulos donde existe una gran cantidad de HDM.
- Poco después de la Recombinación: agregados de materia bariónica con una pequeña masa condensada, emergen para dar lugar a grandes condensaciones.
- Modelo decisivo fue el propuesto por White y Rees (1978).

2. Modelos de CDM jerárquicos.

- Considerando DM y el enfriamiento de los bariones para producir las componentes visibles de la galaxia.
- Adoptaron $\Omega_b = 0.2$. Y dedujeron que un **80%** debe ser **DM** y el **20%** restante estaría formado la mitad por **bariones aún no condensados** y la otra mitad formada por la **componente luminosa** que observamos.
- En este escenario los halos pequeños se forman primero mediante procesos de “merging”.
- Esta primera generación de halos dará lugar a otra y así sucesivamente en la que se irá haciendo cada vez más masivos los halos.
- El proceso se interrumpe por el hecho de que el Universo tiene una edad finita.



2. Modelos de CDM jerárquicos.

- Las glxs pequeñas pueden ser reminiscencia de los halos “primigenios”. Como ellas se formaron primero, podrían tener menor masa pero mayor densidad.
- Cuando estos halos pequeños con un “core” luminoso se mezclan con otros para dar uno mayor, la materia bariónica no se destruiría sino que queda orbitando (una galaxia mayor).
- En el modelo CDM por tanto las estructuras pequeñas se forman antes y predice que a una escala suficientemente grande la densidad debe estar distribuida aleatoriamente. (Escala ~ 30 Mpc).

2. Modelos de CDM jerárquicos.

- **Confrontación con las observaciones:**
 - Las glxs enanas tiene su propio halo de materia y no parece ser que sea enano.
- **Nuevos modelos:**
 - Semi-analíticos.
 - Simulaciones N-cuerpos: i.e. [millenium simulation](#)
 - Analíticos

3. Naturaleza de la Materia Oscura

- Está constituida por partículas que se mueven lentamente la densidad de energía de la DM se debe fundamentalmente a la masa en reposo de dichas partículas.
- Son partículas por tanto que no colisionan y tampoco presentan disipación.
- Su naturaleza es no bariónica aunque...

La “fauna” de la materia oscura

- Candidatos bariónicos:
 - Enanas marrones, enanas blancas, agujeros negros.
 - MACHOS : Massive Astrophysical Compact Halo Objects.
 - Gas
- Candidatos no bariónicos:
 - HDM: partículas moviéndose a velocidades relativistas.
 - CDM: WIMPs o partículas de interacción débil (energía en reposo ~ 10 GeV)

3. Naturaleza de la DM

Table 3 Summary of nonbaryonic dark matter candidates^a

Candidate/particle	Approximate mass	Predicted by	Astrophysical effects
$G(R)$	—	Non-Newtonian gravitation	Mimics DM on large scales
Λ (cosmological constant)	—	General relativity	Provides $\Omega = 1$ without DM
Axion, majoron, goldstone boson	10^{-5} eV	QCD; PQ symmetry breaking	Cold DM
Ordinary neutrino	10–100 eV	GUTs	Hot DM
Light higgsino, photino, gravitino, axino, sneutrino ^b	10–100 eV	SUSY/SUGR	Hot DM
Para-photon	20–400 eV	Modified QED	Hot/warm DM
Right-handed neutrino	500 eV	Superweak interaction	Warm DM
Gravitino, etc. ^b	500 eV	SUSY/SUGR	Warm DM
Photino, gravitino, axino, mirror particle, simpson neutrino ^b	keV	SUSY/SUGR	Warm/cold DM
Photino, sneutrino, higgsino, gluino, heavy neutrino ^b	MeV	SUSY/SUGR	Cold DM
Shadow matter	MeV	SUSY/SUGR	Hot/cold (like baryons)
Preon	20–200 TeV	Composite models	Cold DM
Monopoles	10^{16} GeV	GUTs	Cold DM
Pyrgon, maximon, perry pole, newtorites, Schwarzschild	10^{19} GeV	Higher-dimension theories	Cold DM
Supersymmetric strings	10^{19} GeV	SUSY/SUGR	Cold DM
Quark nuggets, nuclearites	10^{15} g	QCD, GUTs	Cold DM
Primordial black holes	10^{15-30} g	General relativity	Cold DM
Cosmic strings, domain walls	$10^{8-10} M_{\odot}$	GUTs	Promote galaxy formation, but cannot contribute much to Ω

^a Abbreviations: DM, dark matter; QCD, quantum chromodynamics; PQ, Peccei & Quinn; GUTs, grand unified theories; SUSY, supersymmetric theories; SUGR, supergravity; QED, quantum electrodynamics.

^b Of these various supersymmetric particles predicted by assorted versions of supersymmetric theories and supergravity, only one, the lightest, can be stable and contribute to Ω , but the theories do not at present tell us which one it will be or the mass to be expected.

Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter

George R. Blumenthal* & S. M. Faber*

* Lick Observatory, Board of Studies in Astronomy and Astrophysics, University of California, Santa Cruz, California 95064, USA

Joel R. Primack^{†§} & Martin J. Rees^{‡§}

[†] Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California 94305, USA

[‡] Institute of Theoretical Physics, University of California, Santa Barbara, California 93106, USA

The dark matter that appears to be gravitationally dominant on all scales larger than galactic cores may consist of axions, stable photinos, or other collisionless particles whose velocity dispersion in the early Universe is so small that fluctuations of galactic size or larger are not damped by free streaming. An attractive feature of this cold dark matter hypothesis is its considerable predictive power: the post-recombination fluctuation spectrum is calculable, and it in turn governs the formation of galaxies and clusters. Good agreement with the data is obtained for a Zeldovich ($|\delta_k|^2 \propto k$) spectrum of primordial fluctuations.

WHY are there galaxies, and why do they have the sizes and shapes that we observe? Why are galaxies clustered hierarchically?

plausible that the Universe is dominated gravitationally by cold DM than by ordinary matter (baryons) or hot or warm DM.

4. Origen y evolución de la estructura a gran escala.

- Tiene que dar cuenta de:
 - La época de la formación de las galaxias.
 - El “clustering” de la distribución de galaxias.
 - La amplitud de las anisotropías del CMB.

Partiendo de que la gravedad es la fuerza dominante, la formación de estructura debió surgir a partir de una pequeña fluctuación que tuvo lugar en la distribución uniforme de materia en el universo temprano.

4. Origen y evolución de la estructura a gran escala.

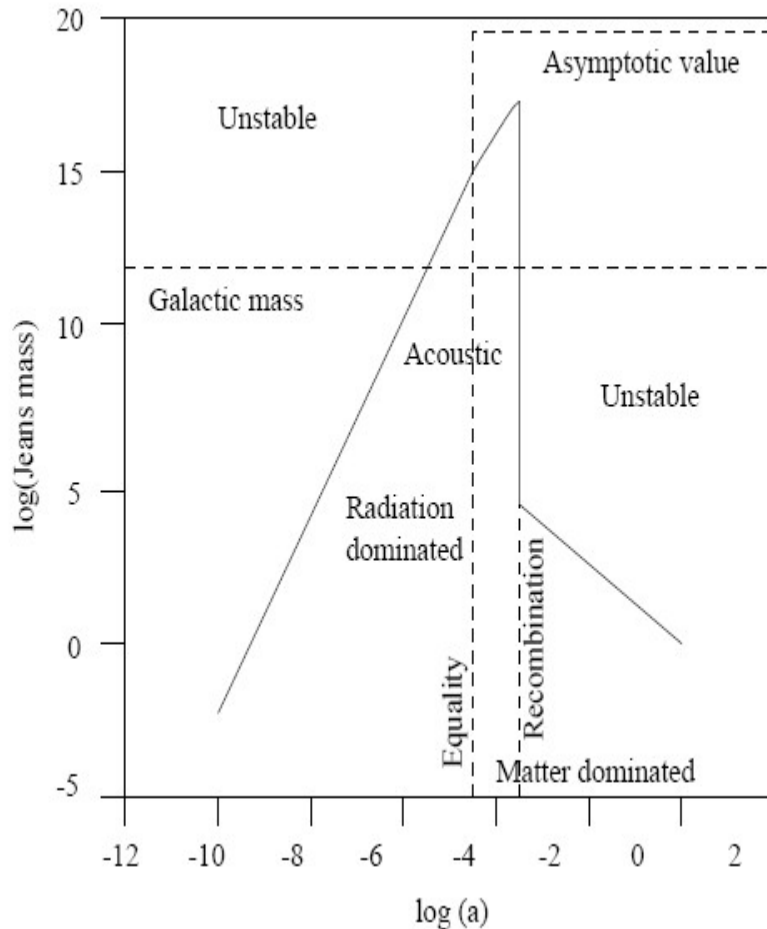
- Dos posibles orígenes se han propuesto para esta pequeña perturbación que dio lugar a la estructura a gran escala:
 - 1) Origen en una fluctuación cuántica producida durante inflación.
Da lugar a una distribución Gaussiana, perturb. Adiabática, espectro más o menos de escala invariante. (Harrison, Zeldovich 1970)
 - 2) Origen en los defectos topológicos como p.ej. Cuerdas cósmicas.

4. Teoría de perturbaciones.

4.1. Idea cualitativa de crecimiento de fluctuaciones primordiales.

- Punto de partida:
 - Época de la Aniquilación
 - Conocemos el espectro primordial de fluctuaciones (asumiendo Harrison-Zeldovich)
- Concepto fundamental en todo esto: Masa de Jeans = mínima masa capaz de colapsar.
- Dada una masa, sabemos que colapsa y cómo es ese colapso en función del tiempo, dependiendo de la época de la historia térmica del Universo en que nos encontremos.

4.2. Crecimiento de fluctuaciones



- Entre la época de la Aniquilación y la Igualdad: $M_J \sim R^3$
- Entre la Igualdad y la Recombinación aumenta hasta alcanzar un valor asintótico constante de $M_J \sim 4 \times 10^{19} M_{\text{sol}}$
- Durante Recombinación cae a $M_J \sim 10^5 M_{\text{sol}}$
- En la post-Recombinación: $M_J \sim R^{-3/2}$

4.3. Teoría de perturbaciones cosmológicas. Tratamiento cuantitativo

- Principio Cosmológico.

“Desviaciones” en el universo temprano de la
homogeneidad → Inhomogeneidades →
Formación de estructura.

- ¿Cómo se aborda? Teoría de perturbaciones.

4.3. Teoría de perturbaciones cosmológicas. Tratamiento cuantitativo

- Perturbación de la métrica de FRW:

$$\begin{aligned} ds^2 &= \left[g_{\mu\nu}^{(0)} + g_{\mu\nu}^{(1)} \right] dx^\mu dx^\nu \\ &= a^2(\tau) \left[-d\tau^2 + \gamma_{ij}(\vec{x}) dx^i dx^j + h_{\mu\nu}(\vec{x}, \tau) dx^\mu dx^\nu \right]. \end{aligned}$$

$$h_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{(1)} / a^2.$$

- Las perturbaciones de la métrica son:
- Estas perturbaciones se descomponen teniendo en cuenta el gauge en el que estamos trabajando y los grados de libertad.
- La descomposición se hace en lo que se llama modos escalares, vectoriales y tensoriales.

- Notas: El factor de escala verifica la ecuación:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi}{3} G a^2 \bar{\rho}(a) - K$$

4.3. Teoría de perturbaciones cosmológicas.

Tratamiento cuantitativo

- Los tipos de gauge que suelen utilizarse son el síncrono y el newtoniano.
 - Descomposición para el **gauge newtoniano** de las perturbaciones de la métrica:

$$h_{00} \equiv -2\psi, \quad h_{0i} \equiv w_i, \quad h_{ij} = 2(\phi\gamma_{ij} + S_{ij}) \text{ with } \gamma^{ij}S_{ij} = 0.$$

$$w_i = w_i^{\parallel} + w_i^{\perp} \quad \text{where } \vec{\nabla} \times \vec{w}^{\parallel} = \vec{\nabla} \cdot \vec{w}^{\perp} = 0$$

Con:

$$S_{ij} = S_{ij}^{\parallel} + S_{ij}^{\perp} + S_{ij}^T,$$

$$S_{ij}^{\parallel} = \left(\nabla_i \nabla_j - \frac{1}{3} \gamma_{ij} \nabla^2 \right) \phi_S, \quad S_{ij}^{\perp} = \nabla_i S_j^{\perp} + \nabla_j S_i^{\perp}.$$

$$\gamma^{jk} \nabla_k S_{ij} = \gamma^{jk} \nabla_k S_{ij}^{\parallel} + \gamma^{jk} \nabla_k S_{ij}^{\perp}.$$

4.3. Teoría de perturbaciones cosmológicas. Tratamiento cuantitativo

- En la ***aproximación lineal*** de la teoría de perturbaciones cada uno de los modos evoluciona de manera independiente.
- Los modos vectoriales y tensoriales no producen perturbaciones de densidad y por tanto no afectan la formación de estructuras.

4.3. Teoría de perturbaciones cosmológicas. Tratamiento cuantitativo

- Formación de estructuras:
 - La métrica considerando únicamente perturbaciones escalares queda como:

$$ds^2 = a^2(\tau) \left[-(1 + 2\phi)d\tau^2 + (1 - 2\phi)\gamma_{ij}dx^i dx^j \right]$$

- Utilizaremos las ecuaciones de Einstein para obtener las ecuaciones de movimiento de las perturbaciones consideradas en función del tensor energía-momento, así como la ecuación de conservación de la energía.

4.3. Teoría de perturbaciones cosmológicas.

Tratamiento cuantitativo

- Recordemos que el tensor energía-momento para un fluido ideal es:

$$T^{\mu\nu} = (\rho + p)V^\mu V^\nu + pg^{\mu\nu}$$

- Considerando las perturbaciones de las cantidades que aparecen, esto es, densidad y presión, escribiremos:

$$\begin{aligned} T^0_0 &= -\rho(\vec{x}, \tau) = -[\bar{\rho}(\tau) + \delta\rho(\vec{x}, \tau)] , \\ T^0_i &= [\bar{\rho}(\tau) + \bar{p}(\tau)] v_i(\vec{x}, \tau) = -[\bar{\rho}(\tau) + \bar{p}(\tau)] \nabla_i W , \\ T^i_j &= [\bar{p}(\tau) + \delta p(\vec{x}, \tau)] \delta^i_j , \end{aligned}$$

4.3. Teoría de perturbaciones cosmológicas. Tratamiento cuantitativo

- Utilizando las ecuaciones de Einstein:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = -8\pi \tau_{\mu\nu}$$

- Obtenemos:

$$(\nabla^2 + 3K)\phi = 4\pi G a^2 \left[\delta\rho + 3\frac{\dot{a}}{a}(\bar{\rho} + \bar{p})W \right] ,$$

$$\partial_\tau \phi + \frac{\dot{a}}{a}\phi = 4\pi G a^2 (\bar{\rho} + \bar{p})W ,$$

$$\partial_\tau^2 \phi + 3\frac{\dot{a}}{a}\partial_\tau \phi - \left(8\pi G a^2 \bar{p} + 2K \right) \phi = 4\pi G a^2 \delta p .$$

4.3. Teoría de perturbaciones cosmológicas.

Tratamiento cuantitativo

- Resumiendo y recapitulando:
 - ¿Cómo funciona la teoría de perturbaciones?
 - Introducimos una perturbación en la métrica.
 - Fijamos un gauge.
 - Para estudiar la formación y evolución de estructuras sólo nos interesan las perturbaciones escalares.
 - Escribimos el tensor energía-momento – en la aproximación de fluido perfecto – para cada una de las componentes del Universo que estemos considerando teniendo en cuenta su ecuación de estado que dependerá de la época del Universo en que nos encontremos.
 - El tensor energía-impulso que hay que introducir en el sistema de ecuaciones será la suma de cada uno de los tensores energía-impulso de las componentes consideradas, esto es:

4.3. Teoría de perturbaciones cosmológicas. Tratamiento cuantitativo

- Para componentes materiales (fotones, bariones y partículas de CDM):

$$\tau^{\mu\nu} = p g^{\mu\nu} + (p - \rho) U^\mu U^\nu$$

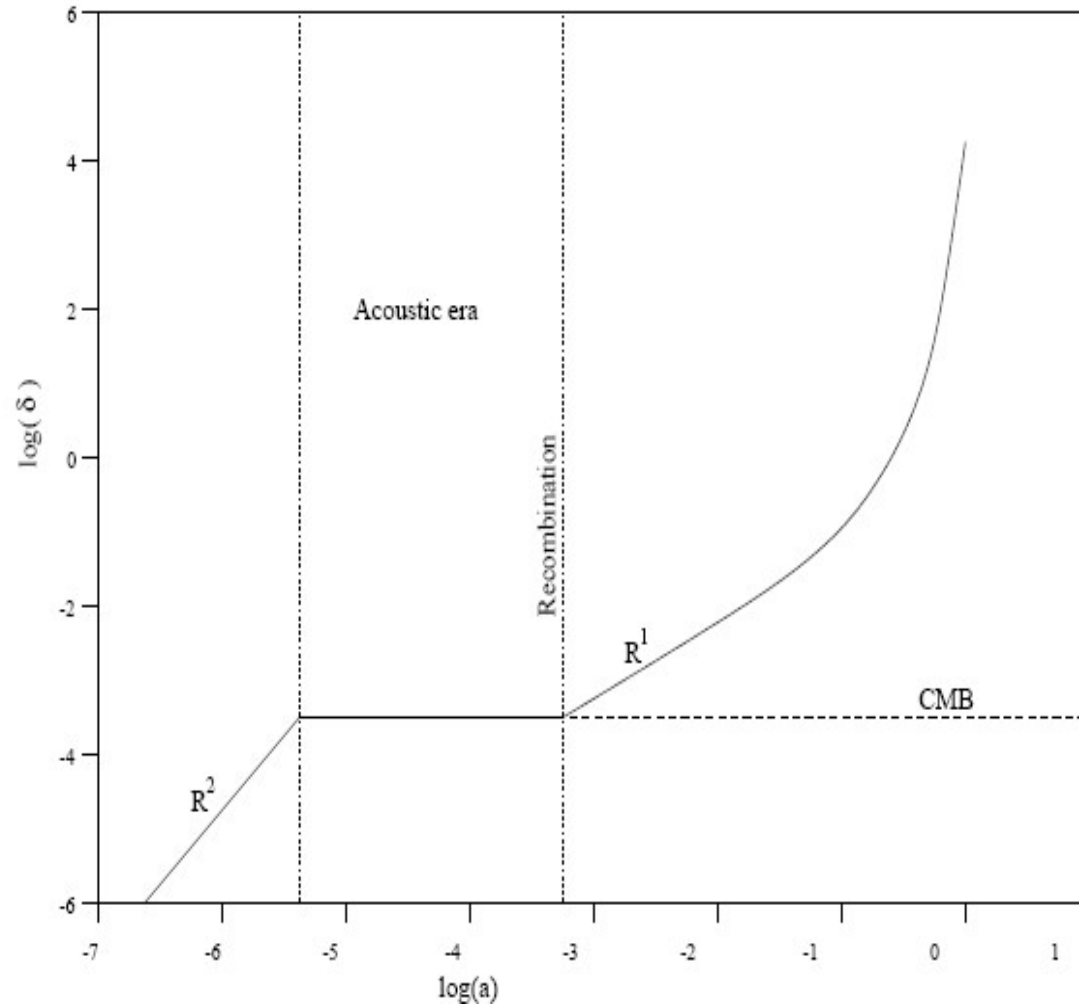
- Para energía oscura: $\tau_{\mu\nu} = (\Lambda/8\pi) g_{\mu\nu}$

4.3. Teoría de perturbaciones cosmológicas.

Tratamiento cuantitativo

- Cada una de las componentes tendrá una ecuación de estado. Se sustituye en el tensor correspondiente.
- Planteamos el sistema de ecuaciones formado por las ecuaciones de Einstein y la conservación de energía-momento.
- Teniendo en cuenta que cada cantidad que aparece será, *esa cantidad + c cantidad*
- Finalmente obtendremos un sistema de ecuaciones que al resolverlo nos dará la evolución de la estructura.

4.3. Teoría de perturbaciones cosmológicas. Tratamiento cuantitativo



4.3. Teoría de perturbaciones cosmológicas.

- Para el caso de CDM obtendremos, el balance energético nos da la ecuación:

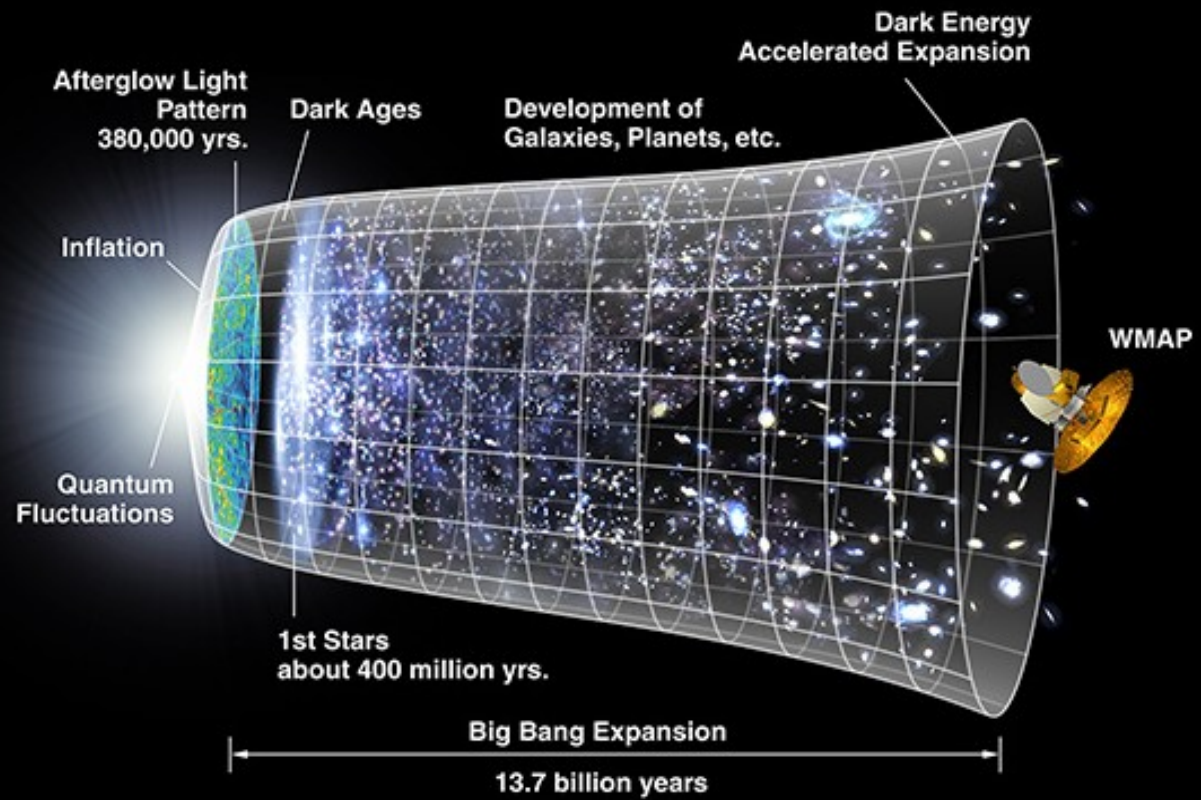
$$\frac{\partial \delta\rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u}' + \frac{\rho}{2a^2} \frac{\partial h}{\partial t} + 3(\delta\rho) \frac{\dot{a}}{a} - \rho \frac{\dot{a}}{a^3} h = 0$$

- Blablabla... muy complicado todo, en el resto de ecuaciones obtenemos acoplamientos entre fotones y CDM...
- La solución: Numérica por supuesto aunque... hay aproximaciones en que se pueden obtener soluciones analíticas.

5) Problemas del paradigma cosmológico actual.

- Recordemos que el paradigma cosmológico actual se sustenta en dos pilares fundamentales:
 - Teoría de la Relatividad General.
 - Principio Cosmológico: “El Universo es isótropo y homogéneo”.

Asumiendo que la materia está distribuida homogéneamente a gran escala, utilizamos la TRG para ver qué efectos gravitatorios producen esa materia. Esto es lo que hemos visto en el apartado anterior con la teoría de perturbaciones cosmológicas.



5) Problemas del paradigma cosmológico actual.

- Observacionalmente este modelo está soportado por varios hechos:
 - La expansión del Universo.
 - La abundancia de elementos ligeros H, He, Li.
 - La radiación cósmica de fondo de microondas.
 -
- ...PERO...

5) Problemas del paradigma cosmológico actual.

- Veamos algunas críticas:

- **¿Desplazamiento al rojo = expansión?**

El propio Hubble dijo en 1947:

“It seems likely that redshifts may not be due to an expanding Universe, and much of the speculation on the structure of the universe may require re-examination”

La TRG predice expansión. Pero otras posibles interpretaciones podrían ser:

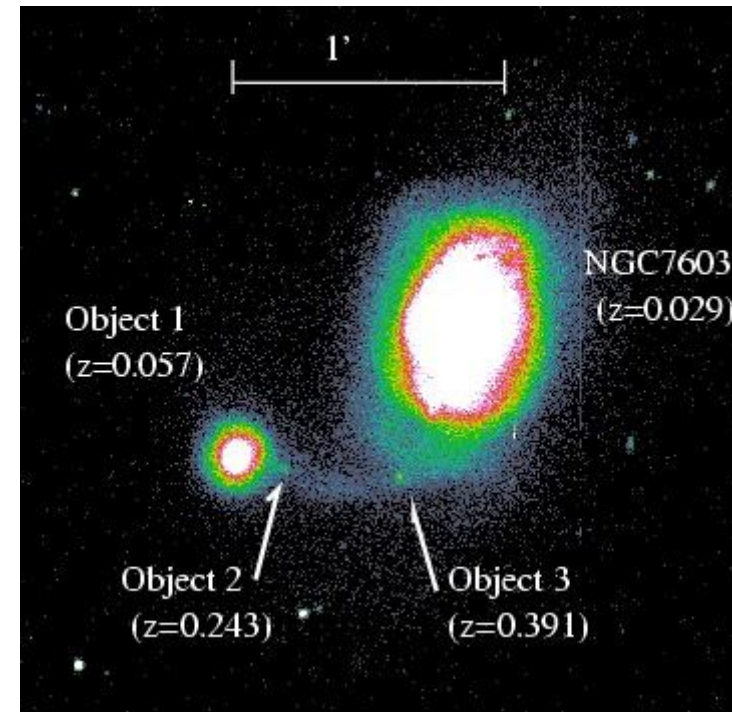
i) Zwicky propuso “el fotón cansado” : al interaccionar los fotones con la materia u otros fotones, pierden energía.

ii) Desplazamiento al rojo gravitatorio entre 2 regiones con distinto ϕ

Otras variantes exóticas están representadas por hipótesis de masa variable para las partículas, por citar alguna.

Aunque pueda parecer imparcial, lo cierto es que, los tests que tratan de medir la variación de alguna variable con z no suelen dar resultados concluyentes pues depende de la evolución o de los modelos que favorezcan, o no, la expansión.

Pero aún dando por sentado la expansión, un desplazamiento espectral al rojo no significa, en todas las galaxias, que se deba a la expansión.



- Respecto a la **radiación cósmica de fondo**:
 - Por ejemplo, entre otros varios errores, se predijo anisotropías del orden de 10^{-2} - 10^{-3} (Sachs & Wolfe, 1967) cuando realmente son del orden de 10^{-5} => esto se arregló introduciendo la materia oscura.
 - Además la $T \sim 2.725$ K observada tiene explicaciones alternativas como p.ej. Temperatura del espacio intergaláctico 1-6 K debida a la absorción de la radiación de las estrellas y/o la energía de rayos cósmicos.
 - Los picos Doppler del CMB pueden interpretarse también en el marco de MOND.
 - No se entiende por qué el cuadrupolo y el octupolo están alineados y correlacionados con la eclíptica solar.

- Respecto a la **abundancia de elementos ligeros**:
 - Si a las estrellas de una galaxia no les ha dado tiempo de formar elementos más pesados que el H, se observa un 24% de He, que representa en teoría el He primordial. Sin embargo, hay galaxias con abundancias de un 21% (Terlevich et al. 1992).
 - Fallan las predicciones de abundancia de berilio, litio, etc..

Otro “reproche”:

- Todo se explica por medio de la evolución de las fluctuaciones primordiales teniendo en cuenta únicamente gravedad... pero, ¿y si hay algo más?
- Aquí ha dado lugar a distintos modelos cosmológicos alternativos.