

Historia reciente de la cosmología

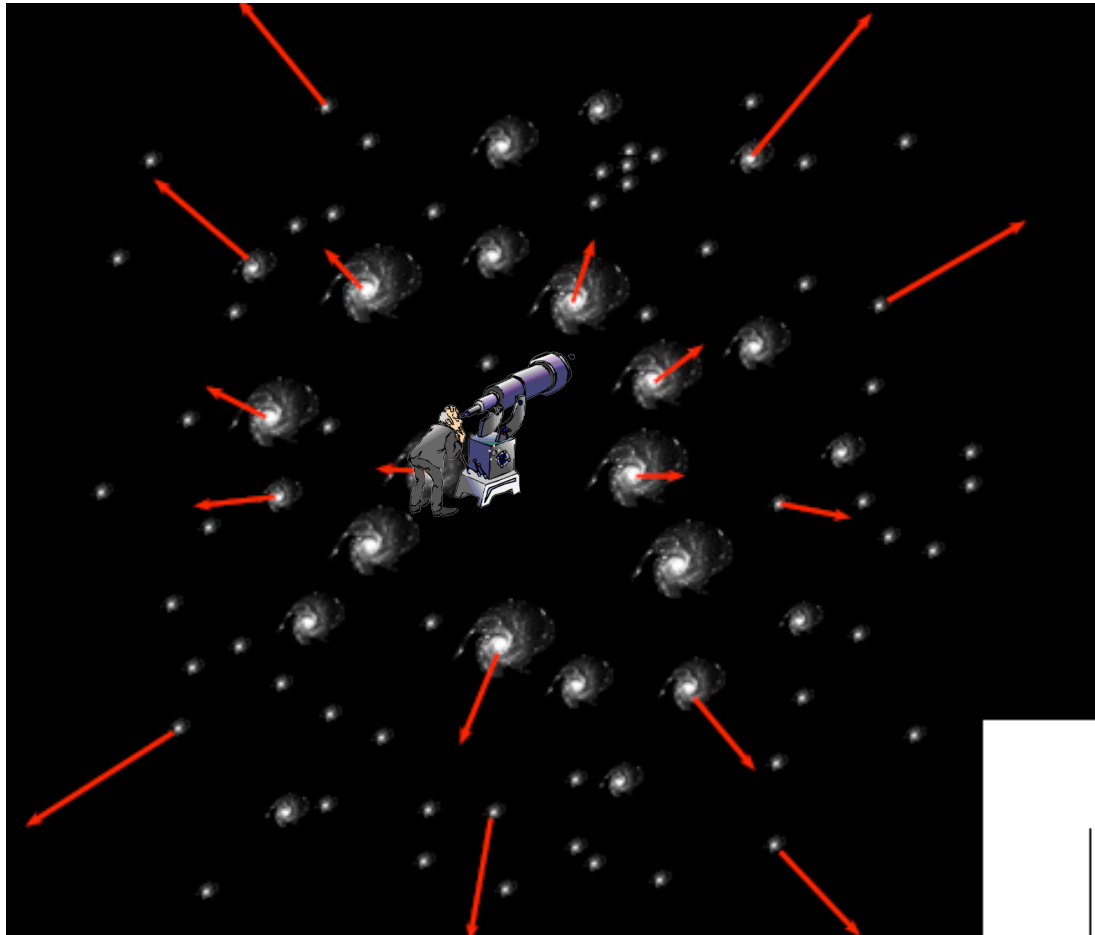
1. El big bang y pruebas en su favor
2. La geometría del universo en el que vivimos
3. Problemas y algunas soluciones de la cosmología
4. Modelos cosmológicos de la formación de galaxias.

"Escalera" de distancias

- Paralaje
 - Vecindad del sol ($\sim 1\%$ del diámetro de la Vía Láctea)

Se intenta encontrar "candelas estándar"

- Cepheides
 - Galaxias cercanas
- Relación de Tully-Fisher
 - Correlación empírica entre anchura de la línea de HI y la luminosidad
- Supernovas tipo I
 - Relación entre máxima luminosidad y tiempo característico de desvanecimiento

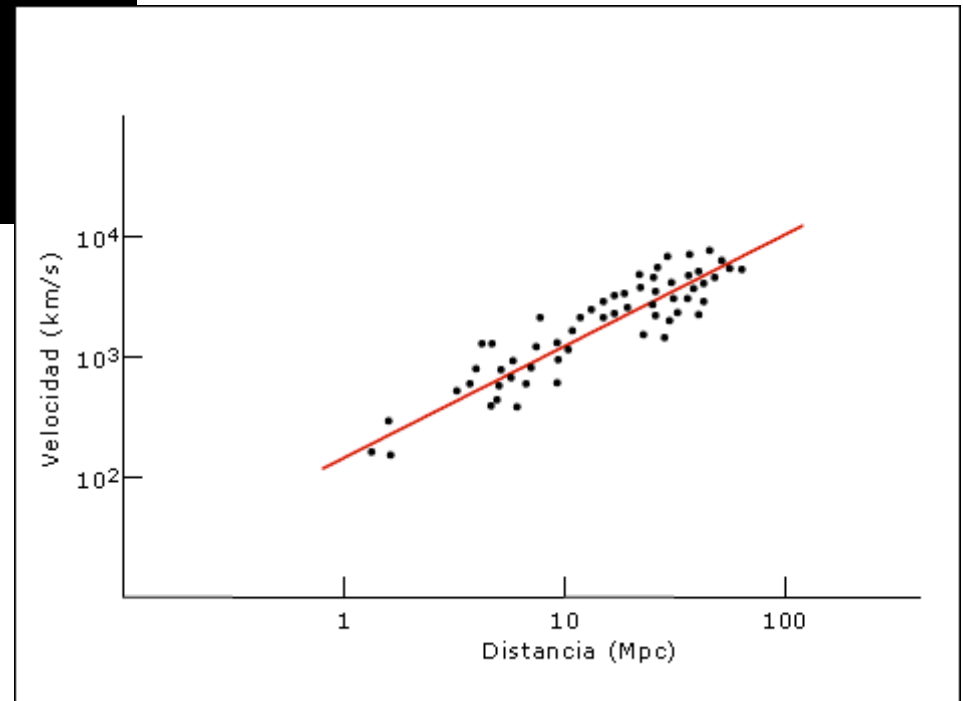


Primera indicación que el universo no era estático:

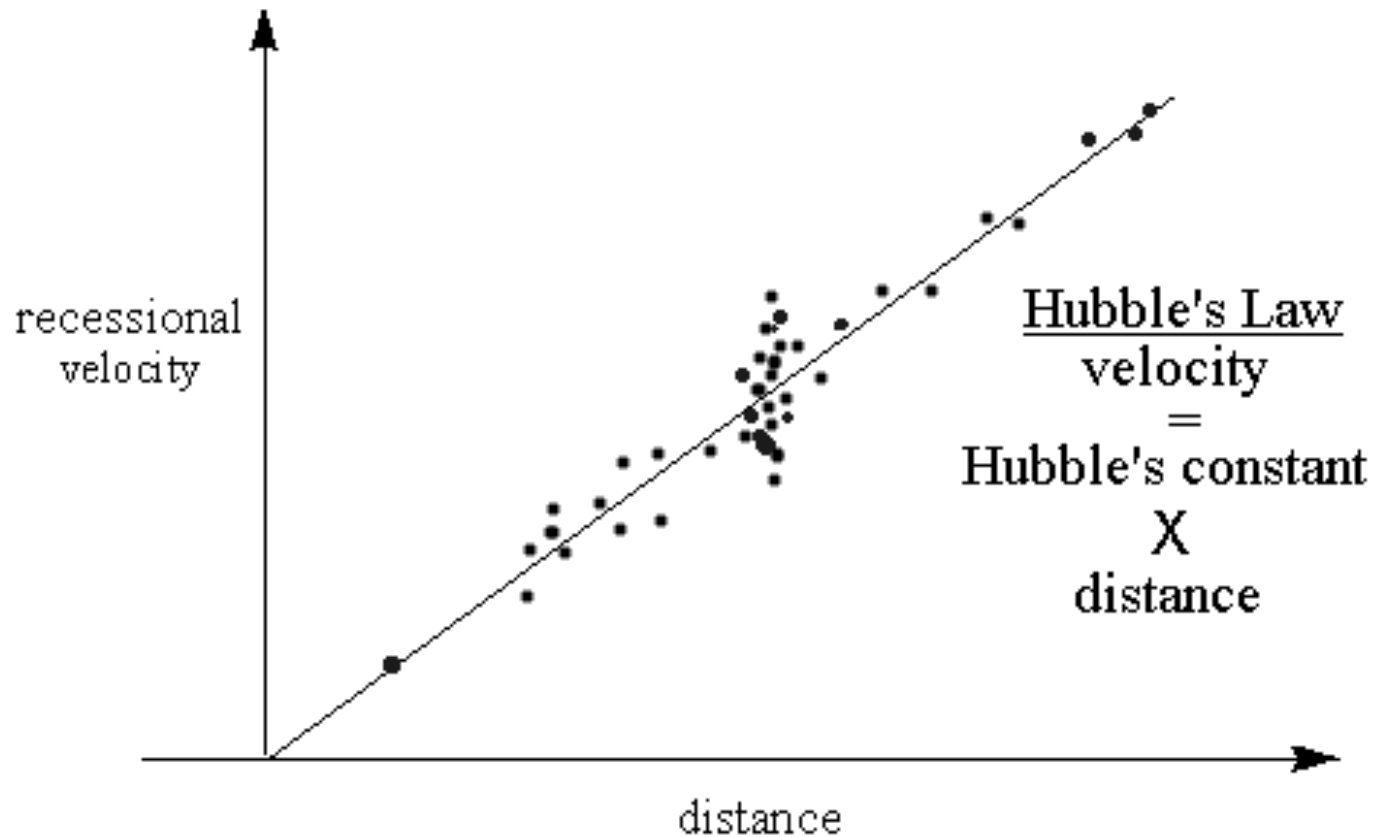
La ley de Hubble (1929):

Cuanto más lejos está una galaxia, más alta es su velocidad de recesión

La ley de Hubble demuestra:
o La expansión del universo
o "Nebulosas espirales" eran galaxias independientes de la Vía Láctea ("Islas universos")



Ley de Hubble (1929)



Relación entre la velocidad de recesión con respecto a nosotros y la distancia

→ Expansión del universo

Constante de Hubble

Valor actual de la constante de Hubble:

- Hubble (1926): $500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- Sandage (1956): $75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- Desde entonces: $50\text{-}100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- Valor desde 2003 (determinado con el satélite WMAP midiendo el la radiación de fondo cósmico de microondas) : $65\text{-}75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

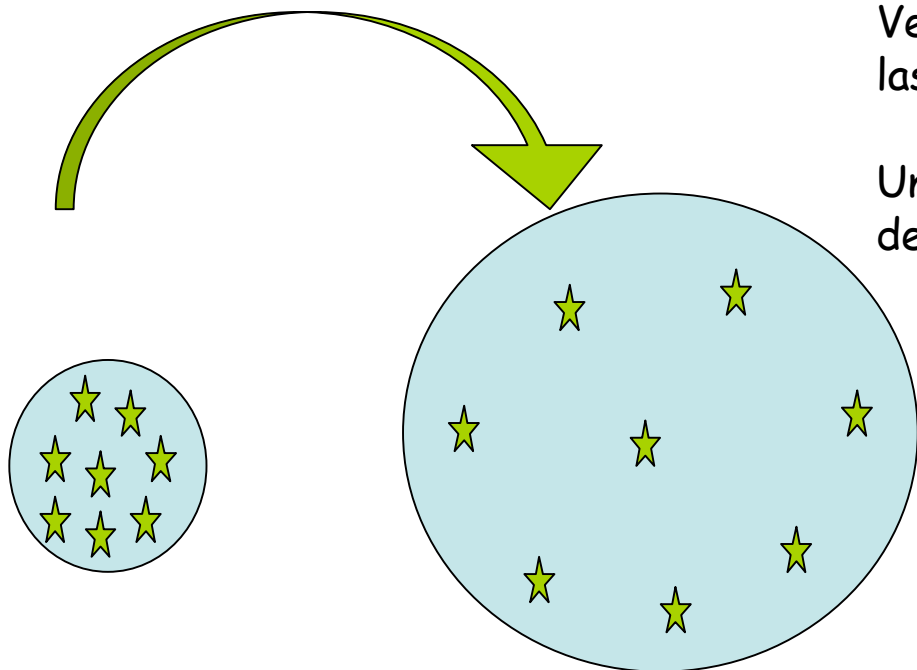
→ difícil a medirlo con exactitud

Ley de Hubble

- Universo está en expansión
- En el pasado era más pequeño
- Tiene que haber tenido un comienzo

→ Big Bang

Estamos nosotros un sitio privilegiado? No. Es igual para todos los sitios



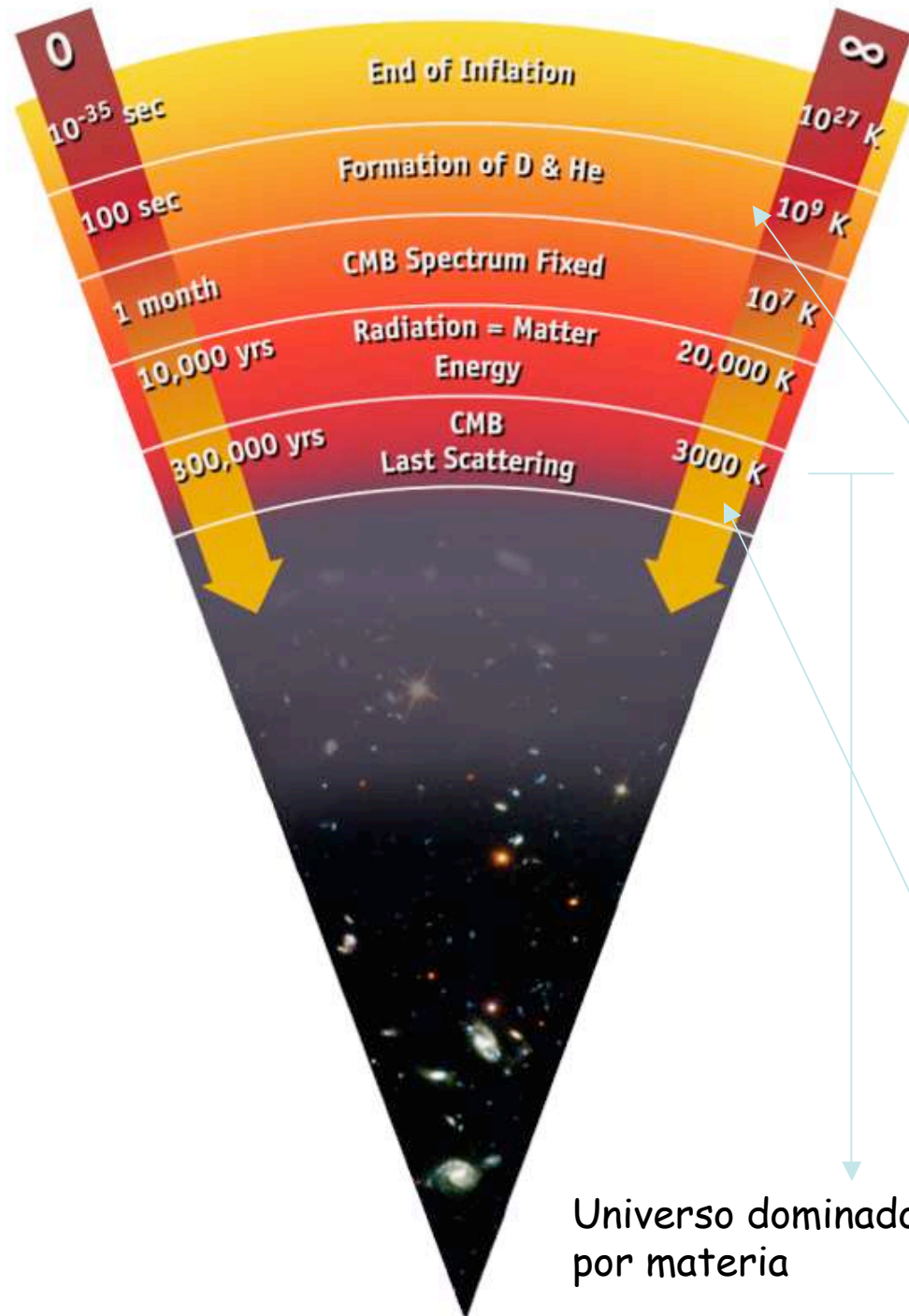
Velocidad proporcional a distancia para **todas** las galaxias

Universo está en expansión (**no** galaxias dentro del universo)

Teorías del Universo

- **Einstein (1917)**: Notó que con su teoría de relatividad general se podía encontrar solución con potencial de contracción o expansión. Él creía en universo estático
 - modificó sus ecuaciones con una constante cosmológica
 - más tarde decía: tontería mas grande de mi vida
 - se olvidó hasta hace poco
- **Lemaitre (1931)**: Universo empezó en gran explosión
- **George Gamov, Ralph Alpher, Robert Herman (1948)** proponen modelo más elaborado en la misma línea → base del modelo estándar de hoy día
- **Fred Hoyle (1948)**:
 - Inventó el nombre **BIG BANG** como algo despectivo
 - Defendió la teoría del **Steady State**:
 - Se crea constantemente nuevo espacio entre galaxias
 - Este espacio se llena de nuevas galaxias
 - → puede explicar expansión de galaxias sin que universo cambia
 - En contra de esta teoría (entre otras):
 - nuevas galaxias tendrían que ser jóvenes pero no lo vemos
 - Radiogalaxias/cuasares a gran distancias → universo tiene evolución

Historia del universo



Núcleo síntesis primordial

Época de recombinación:
Recombinación de electrones y protones, desacoplamiento de fotones, formación de estructuras pregalácticas

El universo en un año

1 Enero 0h00: Big Bang

1 En. 2h30m: Época de recombinación

Abril: Se forma la Vía Láctea

Junio: Se forma el Sol y la Tierra

Diciembre: Oxígeno en nuestra atmósfera

19 Dic.: Peces

21 Dic.: Plantas, insectos, anfibios

25 Dic.: Dinosaurios

30 Dic.: Mamíferos

31 Dic. 23 horas: Aparece el hombre

Nosotros reflejamos sobre el origen del universo: Últimos dos décimas de segundos.

Observaciones apoyando el Big Bang

1. Ley de Hubble → Expansión del universo
(si no se interpreta corrimiento al rojo de otra forma)
2. Radiación de fondo de microondas
3. Abundancia de He (y algunos otros elementos ligeros)

Detección del fondo de cósmico de microondas

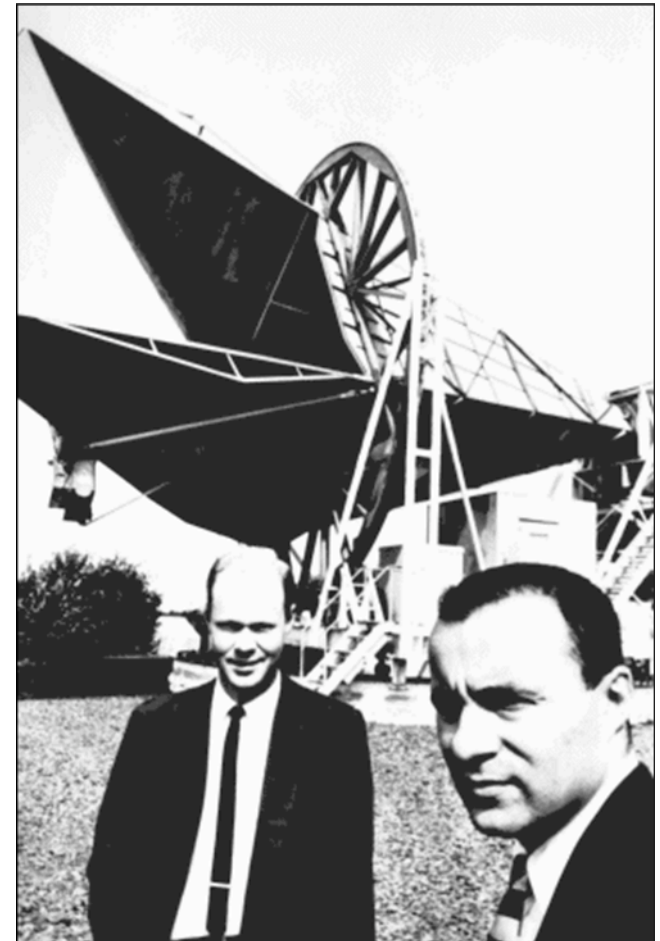
1964: Un grupo de astrónomos en la Universidad de Princeton construyó una antena para medir el fondo de microondas cósmico

1965: Arno Penzias y Robert Wilson de la compañía Bell Telephone Laboratories (como Jansky) buscan fuentes de interferencia (como Jansky...) en un reflector.

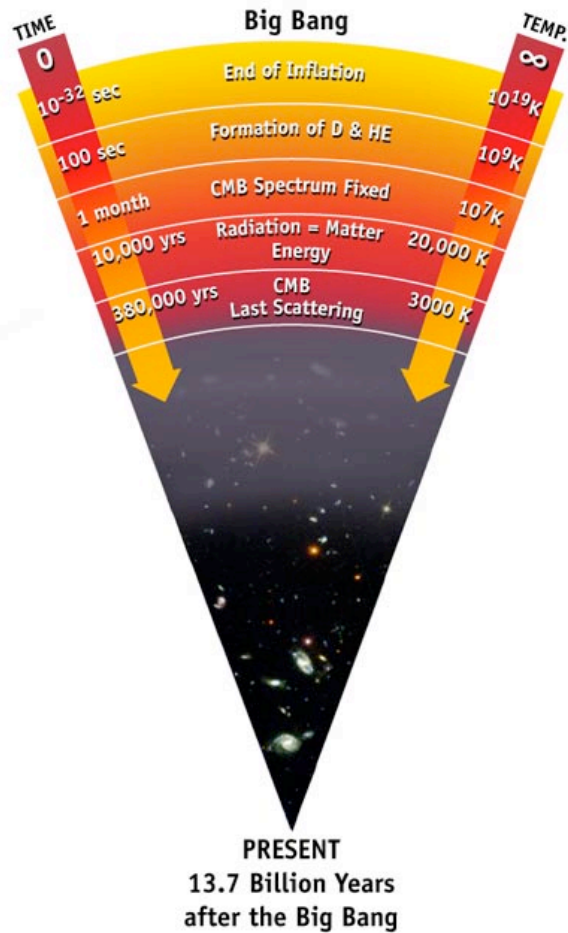
Eliminan todo, pero se queda un ruido....
... el fondo cósmico de microondas.

Recibieron en 1978 el premio Nobel para su descubrimiento

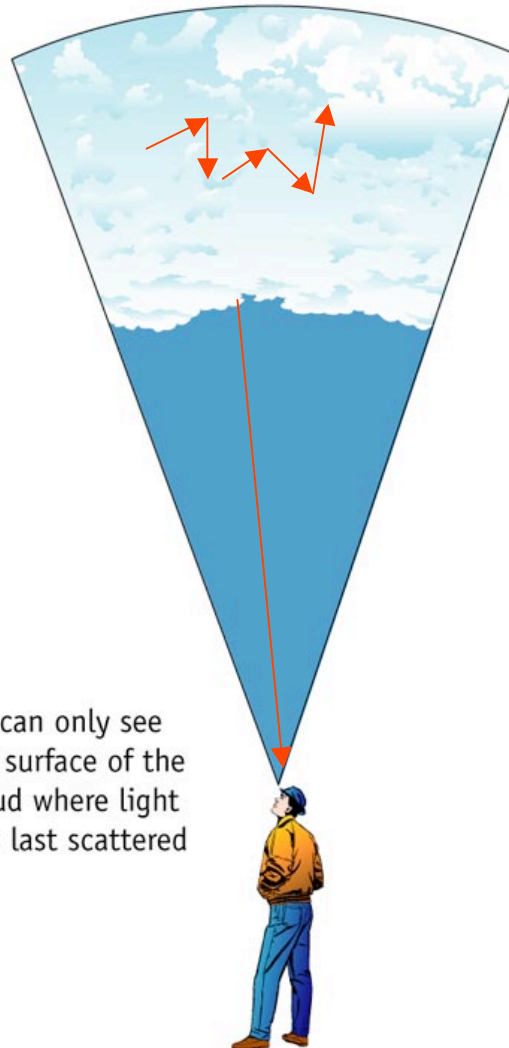
Eso fue un fuerte apoyo para la teoría del Big bang.



¿Que es la radiación de fondo?



The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.

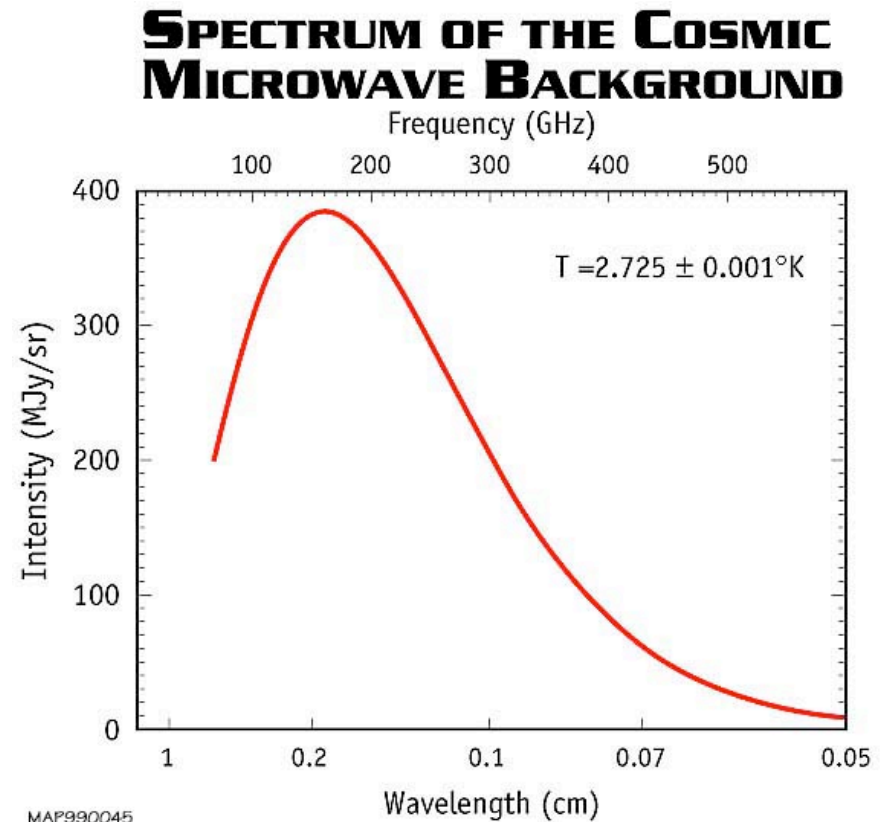


We can only see the surface of the cloud where light was last scattered

Superficie de última interacción entre materia y radiación

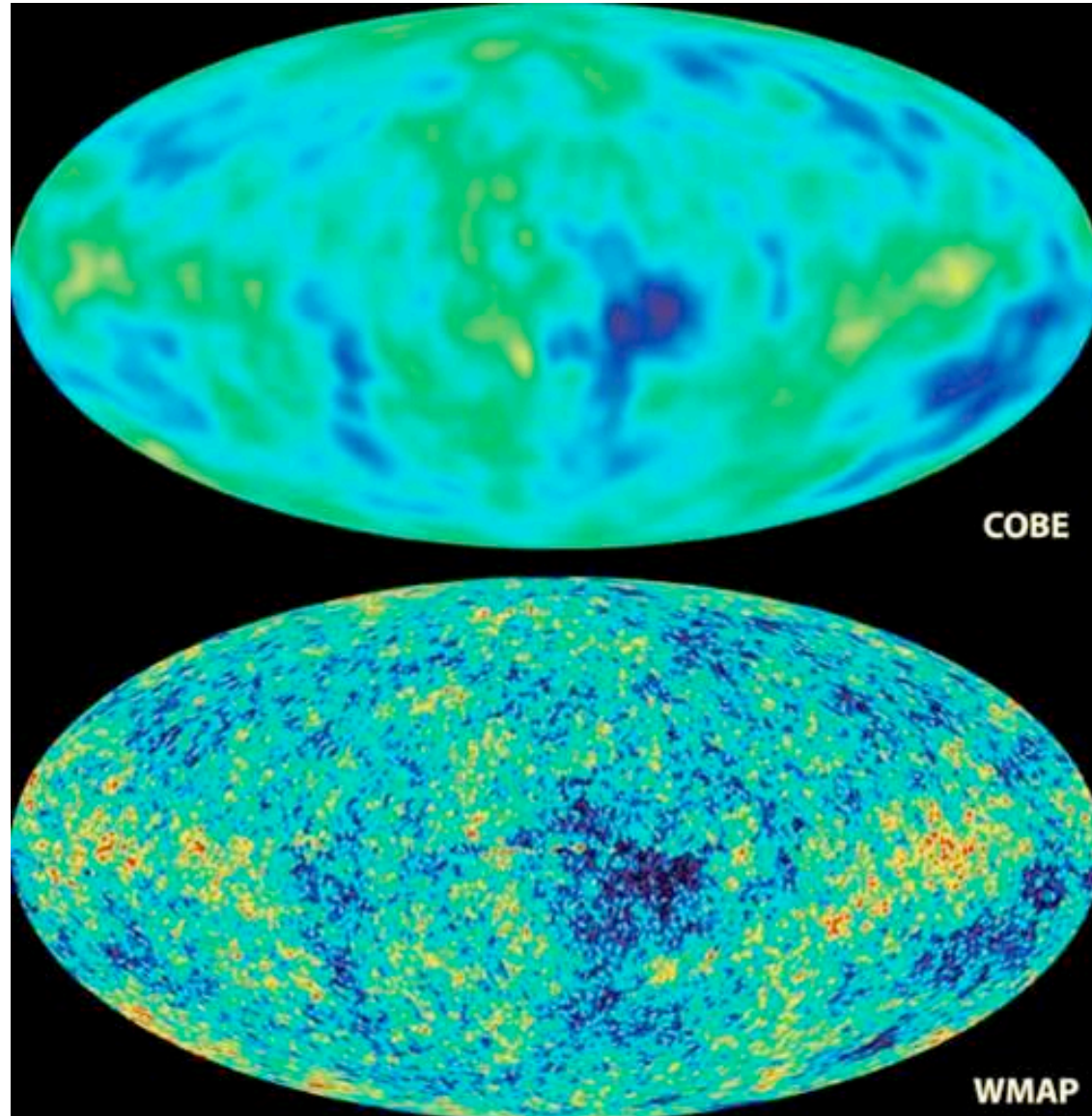
Radiación milimétrica del fondo

- Fotones que se liberaron en la época de recombinación
- Tenían entonces 3000K
- Han perdido su energía debido a la expansión a 2.725 K



Radiación de fondo visto por COBE (1992) y WMAP (2003)

- Espectro de cuerpo negro perfecta
- Temperatura 2.7 K, como esperado
- Muy homogéneo: Fluctuaciones en 1 parte en 10^6
- Misión europea actual: **Planck** (lanzado 21 de Mayo 2009)



Nucleosíntesis primordial

Observaciones:

- Gas consiste de 75% de H y 25% de He - independiente del contenido en otros metales. Esta cantidad alta de He no se puede haber formado en estrellas (la cantidad predicho debido a formación estelar es 0.25%)
- Se observa D y Li, elementos frágiles que no se pueden producir en estrella, sino más bien se destruyen

1964: Hoyle & Taylor calcularon que 25% de He se puede producir en época caliente después del Big Bang.

También se produce D (^2H), ^3He y Li

!Teorías cosmológicas predicen lo correcto!

Nucleosíntesis primordial

- Nucleosíntesis tiene lugar algunos minutos después del Big Bang cuando la temperatura está entre 10^{32} K y 10^9 K.
 - Los elementos He, D y Li se forman cuando chocan protones y neutrones → cantidad que se forma depende de la abundancia de p y n (= bariones)
 - Con una abundancia de bariones correspondiente a unos % de la densidad crítica (véase después) se puede explicar la abundancia de He, D y Li
 - D se destruye en colisiones con materia → su abundancia da un límite a la masa barionica (p, n) en el universo
- Nucleosíntesis primordial da resultados consistentes para los tres elementos a la vez
- Necesidad de materia oscura non-barionica

Como es el universo en que vivimos?

1. Principio Cosmológica:

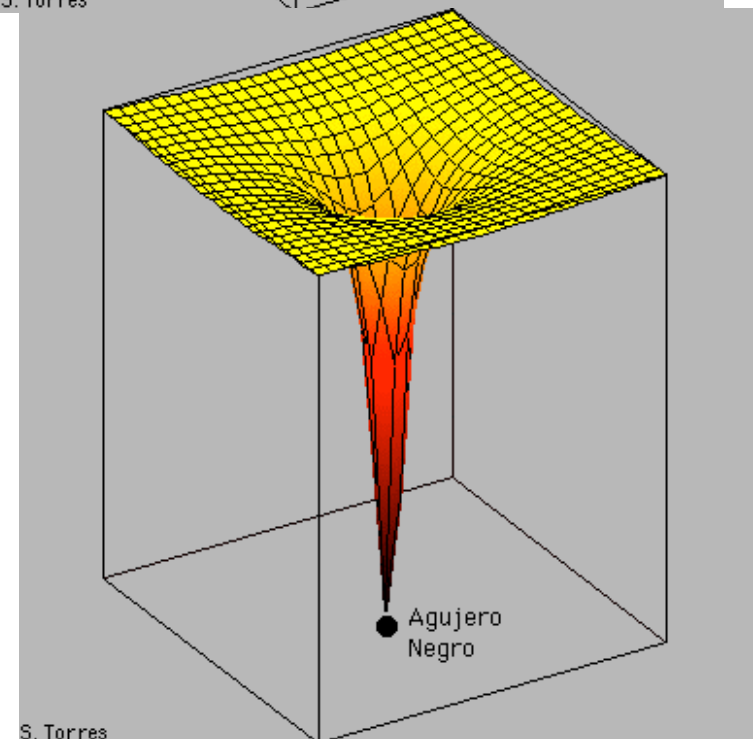
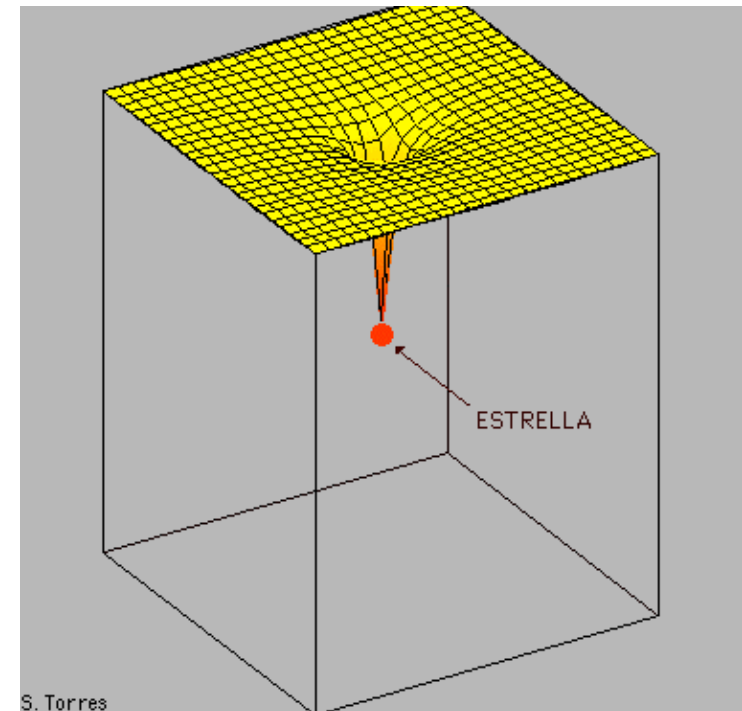
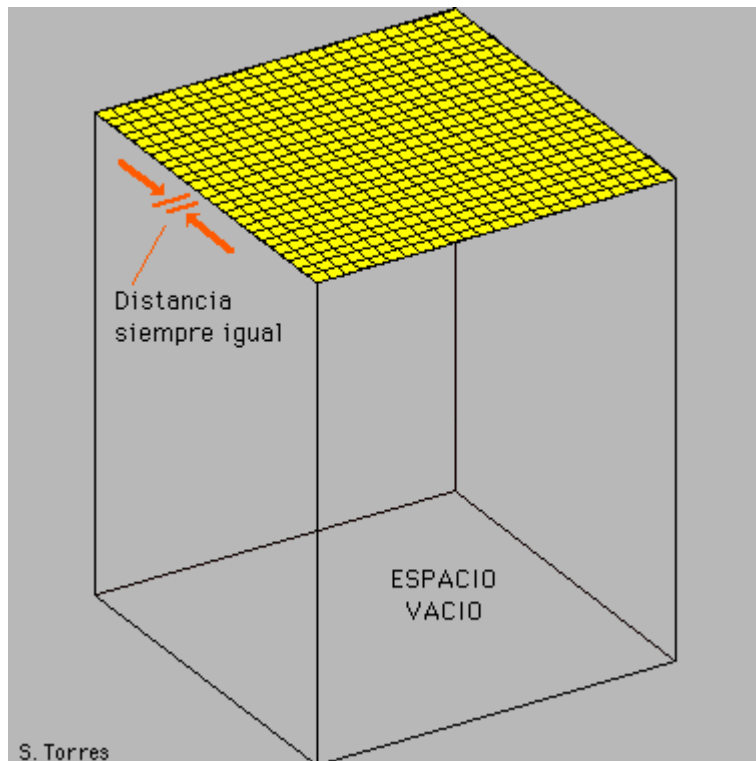
El universo es homogéneo y isótropo.

....a escalas grandes

Teoría de la relatividad general (=Teoría de relativista de la gravitación)

Dos características fundamentales

1. Espacio-tiempo está afectado por la materia, masa lo puede curvar
2. La materia se mueve a lo largo de líneas en el espacio-tiempo curvado



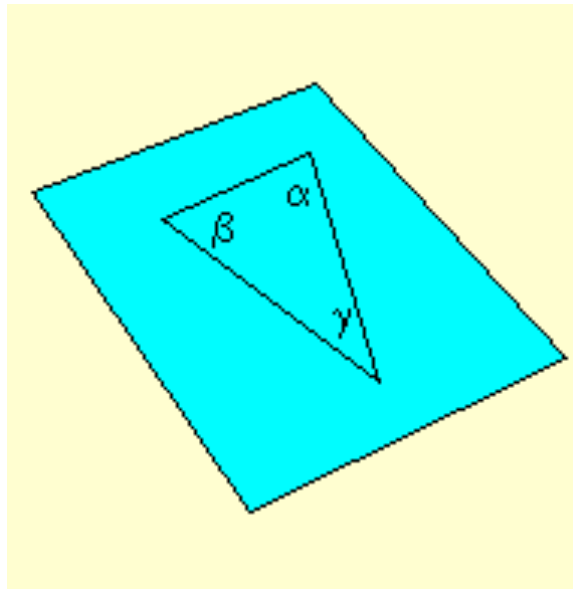
Modelos del universo

Se puede aplicar la relatividad general a la cosmología (buscar soluciones para las ecuaciones de la relatividad general):

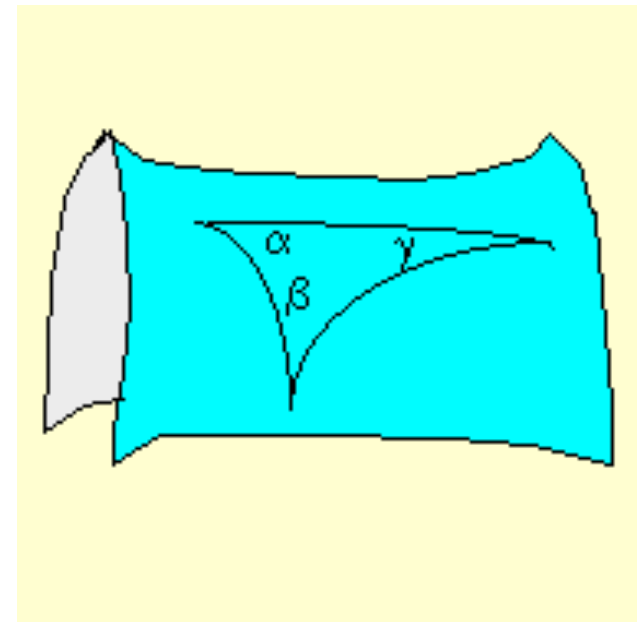
- **Einstein** introdujo la constante cosmológica, $\lambda \rightarrow$ el universo es estático (no expande ni contrae), el espacio tiene curvatura positiva
- **De Sitter** presentó un modelo con curvatura positiva y expansión
- El trabajo de **Friedmann, Robertson y Walker** resultó en una clase de modelos cosmológicos generales que incluyen modelos con diferentes curvaturas y expansión o contracción

Las soluciones de las ecuaciones de la relatividad general encontrados por Friedmann, Robertson y Walter predicen tres geometrías posibles:

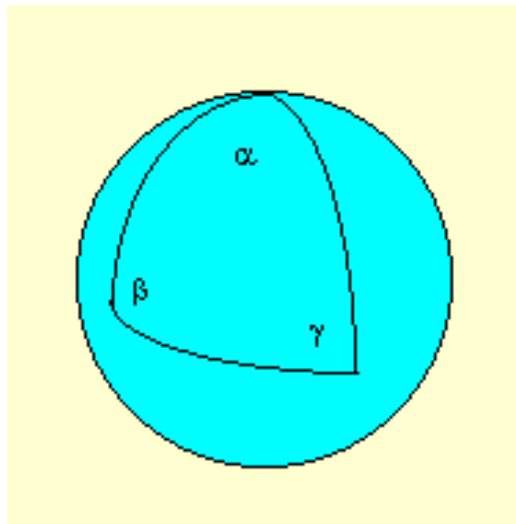
Plano



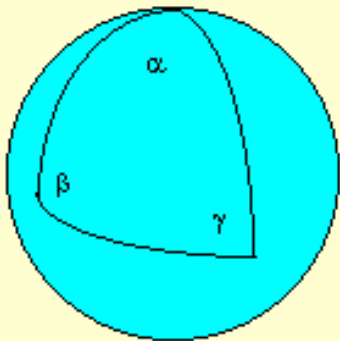
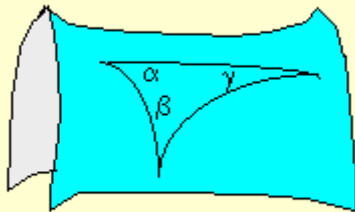
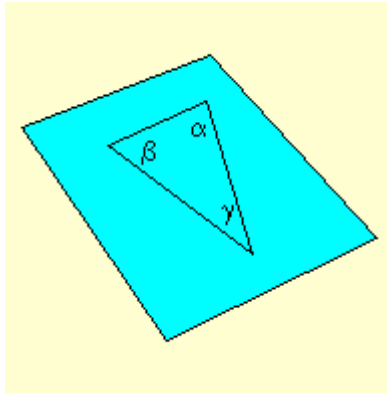
Curvatura negativa



Curvatura positiva

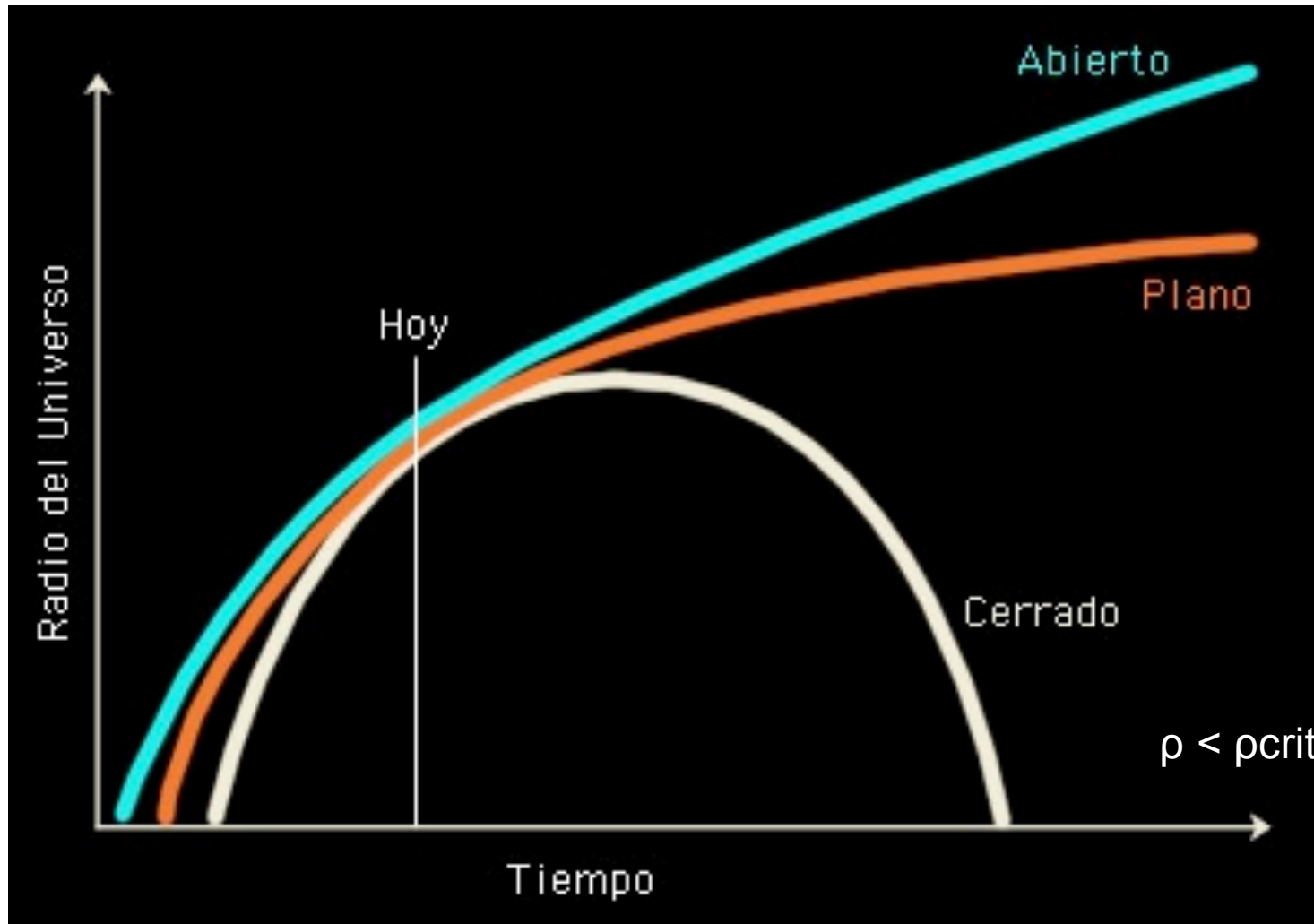


La geometría depende de la densidad



- **Plano:**
 - con la "densidad crítica"
 - en expansión con deaceleración, para en el infinito
 - abierto
- **Curvatura negativa:**
 - densidad por debajo de la densidad crítica,
 - Siempre en expansión
 - abierto
- **Curvatura positiva:**
 - densidad por encima de la densidad crítica
 - recolapso final

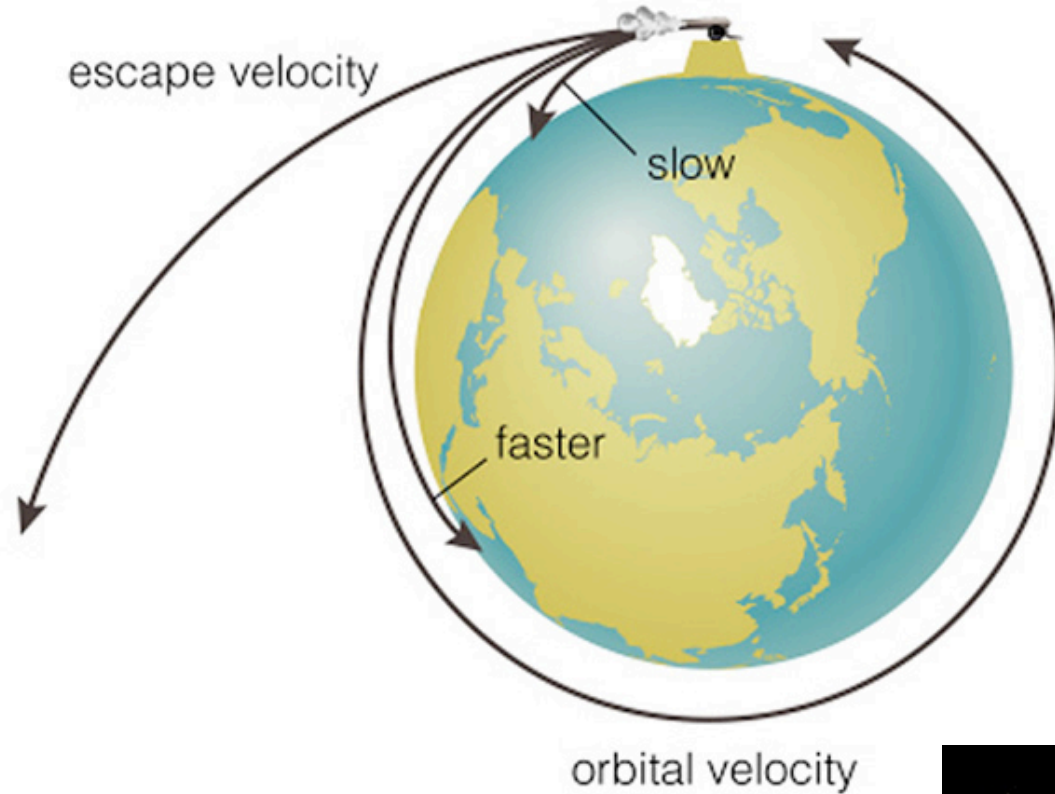
¿En qué universo vivimos?



$\rho < \rho_{crit}$

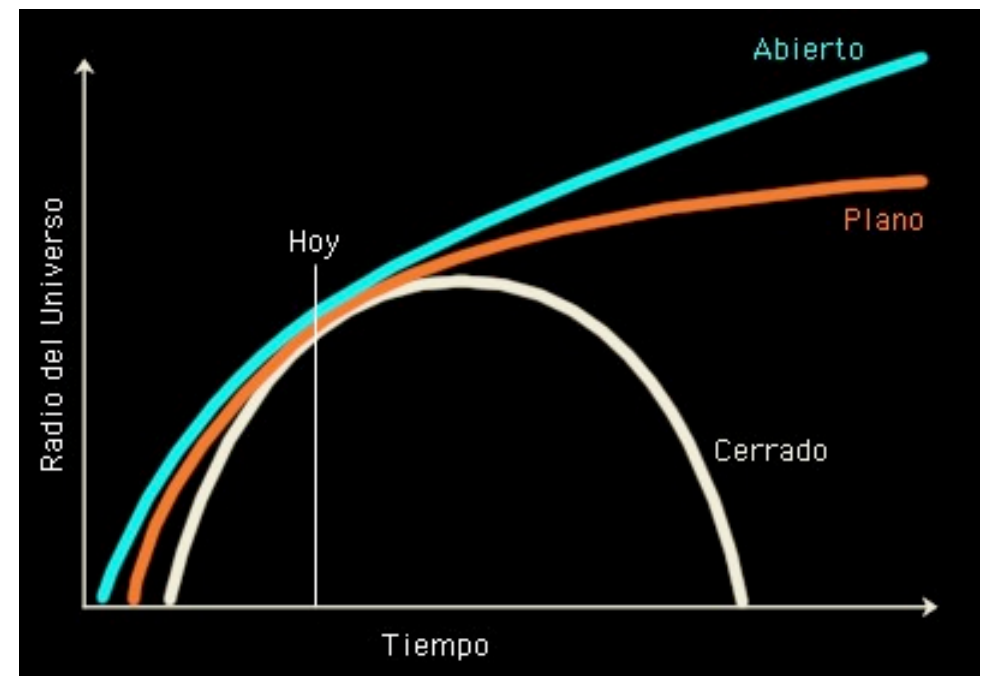
$\rho = \rho_{crit}$
Universo Einstein-
de-Sitter

$\rho < \rho_{crit}$



Análogo: velocidad de escape de la tierra

- $V < V_{esc}$: Objeto está ligado a tierra.
- $V = V_{esc}$: Objeto puede llegar hasta el infinito, pero ahí tiene velocidad 0
- $V > V_{esc}$: Objeto llega al infinito, y ahí tiene $V > 0$



Dinámica del universo

- En el modelo estándar del universo, la expansión está desacelerando en cada uno de los tres casos
 - La relatividad general predice una relación entre desaceleración y densidad crítica
- Medir los dos observables nos permite determinar en que tipo de universo vivimos (es decir, qué geometría tiene)
- Otra forma de medir la geometría: Analizando el fondo de microondas
- Respuesta de los datos del fondo de microondas: Vivimos en un universo plano, con densidad = crítica

Algunos problemas y algunas soluciones

1. ¿Qué es la *Materia oscura*?
2. ¿Por qué el fondo de microondas es tan homogéneo (el problema del horizonte)
3. ¿Por qué está la densidad tan cerca a la densidad crítica?
4. Edad del universo y de las estrellas
5. Aceleración de la expansión

1. ¿Qué es la Materia Oscura?

- Materia oscura cosmológica:
 - Se espera que el universo tiene densidad crítica (debido a observaciones del fondo de microondas), pero observamos mucho menos masa (solo ~1%)
 - Necesario para la formación de galaxias
- Materia oscura astrofísica
 - Zwicky (1937) encontró que la materia visible en cúmulos no era suficiente para explicar movimientos de galaxias
 - Confirmado después
 - Observaciones que lo indican
 - Curvas de rotación en galaxias
 - Dinámica de cúmulos
 - Simulaciones de interacciones de galaxias
 - hace falta más de ~10 veces masa gravitatoria que masa visible

Restricciones teóricas

Nucleosíntesis primordial:

- D, ^3He y Li se han formado en universo joven
 - Son elementos frágiles que se destruyen en colisiones con materia
- Abundancia de D, ^3He y Li requiere que bariones (p,e, n) no contribuyen más de 2-6% a la materia oscura

Candidatos para la materia oscura

Bariones: (solo pueden contribuir hasta $<10\%$ de la densidad crítica del universo):

- Agujeros negros
- Estrella neutrones aisladas
- Enanas marrones
- Grandes Jupiters
- Grandes piedras
- Gas molecular muy frío

Otros partículas elementales

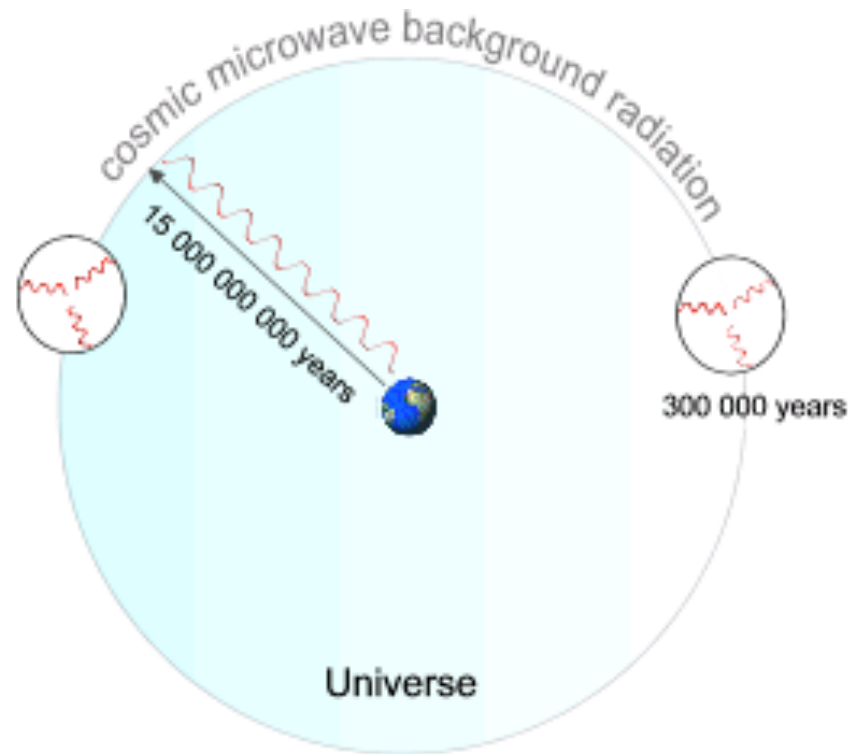
- Neutrinos (tiene masa, pero ya está descartado)
- Partículas elementales desconocidos
-

Candidatos más prometedores

- Teorías de partículas predicen muchos posibles candidatos !
 - Tienen que ser estables
- WIMPs (Weakly Interacting Massive Particle)
 - Solo interacción débil
 - Neutrinos no funcionan
- Más prometedor: Partículas predicho por la teoría de la supersimetría
 - Predice partículas compañeras supersimétricas con gran masa
- Se espera que se detecta una partícula candidato con el nuevo acelerador LEP en el CERN en Ginebra

2. ¿Por qué el fondo de microondas es tan homogéneo (el problema del horizonte)

- **¿Porqué el universo es tan uniforme?**
 - La temperatura del fondo de microonda demuestran es muy uniforme en todas las direcciones (variaciones son < 1 parte en 10^5)
 - Pero: En el momento de la emisión de la radiación de fondo no todas las partes eran en contacto causal, regiones lejanas eran "fuera del horizonte".
 - ¿Se formó el universo con distribución homogénea de temperaturas? ¿Por qué va a hacerlo?
- **Solución: Teoría de la inflación**
(desarrollado en los años 80 por Guth)



Solución: el modelo de inflación

A los 10^{-35} s el universo empezó una expansión exponencial, aumentando su tamaño un factor 10^{43} - 10^{50} .

- Niveló cualquier curvatura que el universo tenía antes → La curvatura se hace plana
- Al comienzo de esta época el universo era en contacto causal. La homogeneidad se mantiene durante la expansión y por eso vemos la temperatura de la radiación del fondo tan homogénea

¿Que ha causado la inflación?

- Nadie sabe, y eso es la parte insatisfactoria. Pero no hay alternativa a la inflación

3. ¿Porque esta la densidad del universo tan cerca de la densidad critica?

- Observaciones: Densidad del universo visible es algunos % de la densidad crítica - eso se considera muy cerca.
 - **Los modelos cosmológicos** predicen que entonces la densidad antes era incluso más cerca de la crítica
 - **¿Casualidad?** Eso es insatisfactorio
-
- Predicción de la teoría de la inflación: después de la fase de inflación la densidad del universo es la crítica, independiente del valor inicial
 - Inflación nivela cualquier posible curvatura que el universo tenía antes

4. Edad del universo y de las estrellas

- Primer argumento en contra de Big Bang:
 - Edad de cúmulos globulares: ~ 13 mil millones años
 - Edad del universo: $\sim 1/H$
 - Con $H=500 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1} \rightarrow$ Edad: 2 mil millones años
 - Hasta hace pocos años: $H=50-100 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$
 - \rightarrow Edad 10-20 mil millones años
 - Valor actual: Edad 13.7 mil millones años
- \rightarrow discrepancia ha desaparecida

5. Aceleración de la expansión

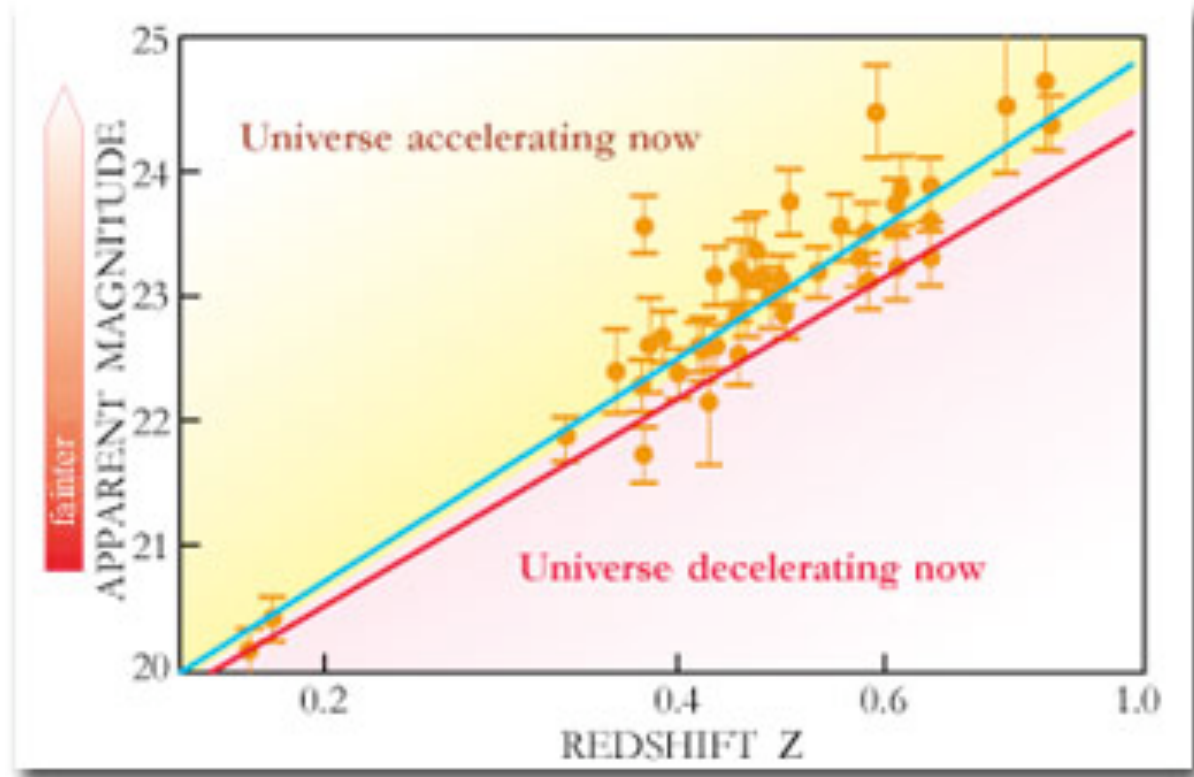
- Conocemos **constante de Hubble**, H_0 , que nos da el ritmo actual de expansión del universo, pero no el del pasado o del futuro.
- Se espera en un universo dominado por masa: la expansión se va desacelerando

¿Cómo lo podemos medir?

- Tenemos que medir la ley de Hubble a grandes distancia (cuando el universo era más joven) para ver como ha cambiado $H(t)$ con el tiempo
- Necesitamos medir velocidad de expansión (fácil: líneas espectroscópicas) y distancias (difícil: se necesita "candela estandar")
- Primeros intentos (años 1950-195) suponían que la galaxias más brillantes en un cúmulo tenían siempre la misma luminosidad
- Problemas:
 - No son buenas candelas estandar, tienen solamente más o menos la misma luminosidad
 - Más importante: en el pasado galaxias eran diferentes, sus propiedades han evolucionado con el tiempo

Midiendo el parámetro de deaceleración

- En un subgrupo de Supernovae (tipo Ia) se conoce muy bien el máximo de la luminosidad absoluta.
- Midiendo la magnitud aparente \rightarrow se puede deducir la distancia
- **Resultado:** El ritmos de expansión va aumentando!!
- Necesario: Algo que provoca esta aceleración \rightarrow **energía oscura**



¿Qué es la energía oscura?

- No tiene nada que ver con la materia oscura
- Características:
 - Presión negativa → produce fuerza expansiva
 - Presente en todo el universo
- Algunos posibles candidatos:
 - **Constante cosmológica**
 - Densidad de energía constante
 - Valor no se puede derivar de primeros principios
 - **Energía del vacío**
 - En física cuántica: Vacío no es igual a nada, sino es el estado de mínima (pero finita) energía
 - Valor se puede derivar pero sale mal en un orden 10^{120}
 - **Quintessencia**: Alguna Forma exótica de materia
 - Campo dinámico, densidad de energía puede variar en el tiempo
 - Hay diferentes candidatos en este grupo

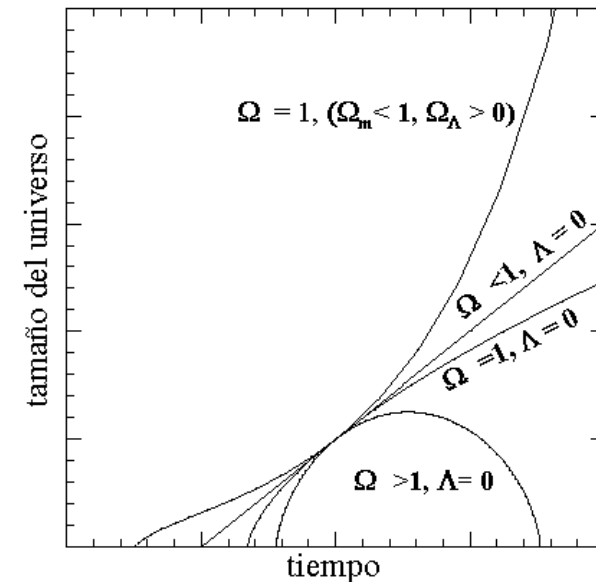
Parámetros cosmológicos

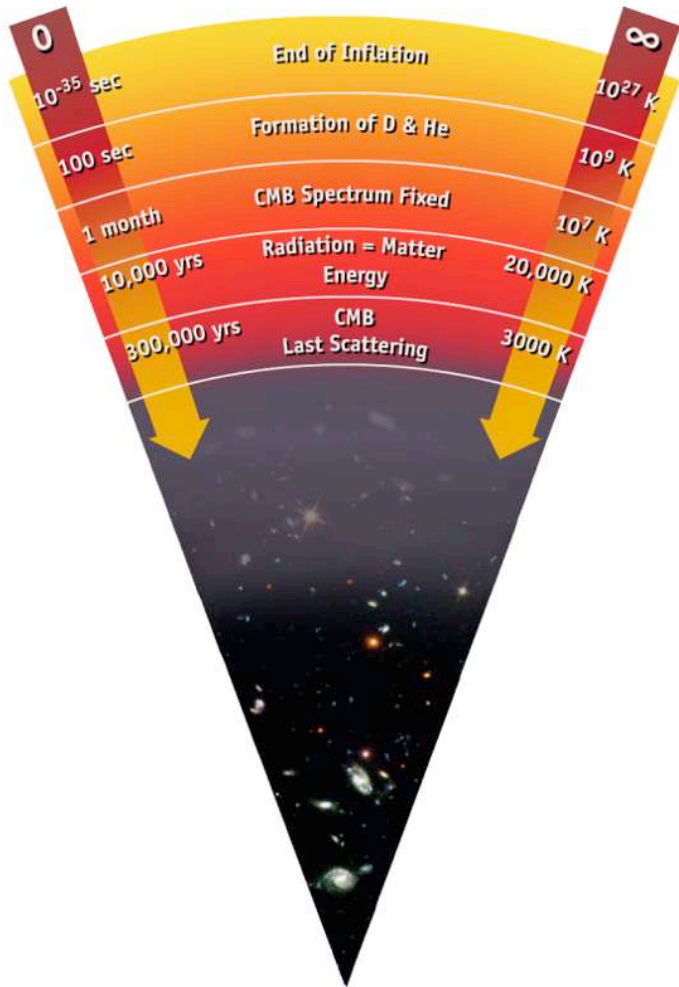
Determinado con observaciones de:

- Constante de Hubble en función de distancia
- Fondo de microondas cósmicos (WMAP)

Resultados:

- Densidad crítica (geometría plana)
 - Materia: 30%
 - Bariones: 3%
 - Bariones visibles 0.3%
 - Materia oscura 27%
 - Energía oscura: 70%
- Futuro del universo: expansión exponencial
- Edad del universo: 13.7 mil millones de años





Densidad del universo dominado por radiación

Densidad del universo dominado por materia

¿Porqué vivimos en un momento tan especial en el que densidad de materia \approx densidad de energía oscura?

Futuro: Densidad del universo dominado por energía oscura

Formación de galaxias

- Formado de fluctuaciones de densidad
 - Pequeñas fluctuaciones estocásticas
 - Fluctuaciones propuesta en el modelo de inflación
- Problema: Fluctuaciones aumentan como mucho lineal con el tamaño del universo.
- Hoy: amplitud de fluctuaciones \sim densidad
- Época de recombinación: debería de haber tenido fluctuaciones \sim 1/1000 de densidad para explicar las fluctuaciones de hoy
- Pero fluctuaciones en el fondo de microondas solo $1:10^6$!

Formación de galaxias

→ **Materia oscura necesaria!**

- No interactúa con fotones y no está en equilibrio con el campo de radiación responsable para el fondo de microondas
- Puede "colapsar" (producir contrastes en la densidad) antes del final de la recombinación

Formación de galaxias:

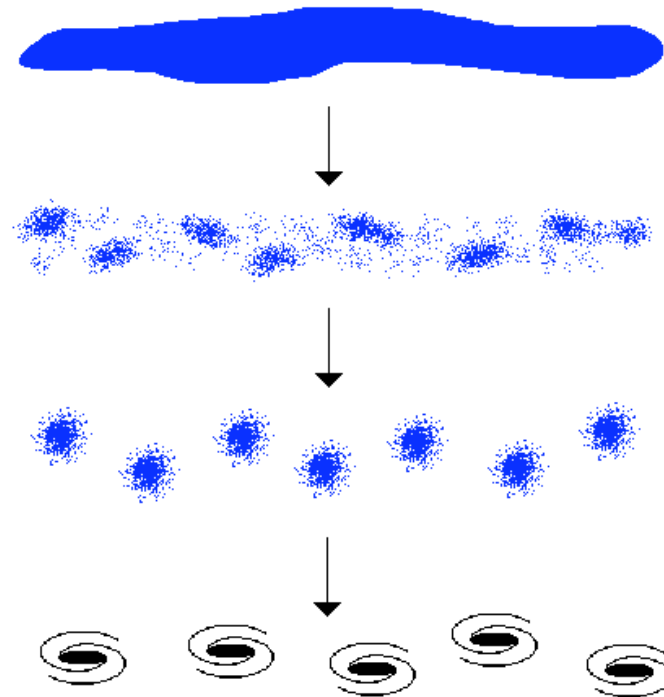
- Materia oscura produce gran estructura
- Materia luminosa colapsa en estructuras creadas por materia oscura
- Materia luminosa es indicador de materia oscura

Formación de galaxias en el modelo de materia oscura caliente

- Teoría mas aceptada hace algunos años
- Candidato para materia oscura: **Neutrino**
- **Materia oscura caliente**: Partícula que se mueve casi a la velocidad de la luz
- Primero grandes estructuras, después pequeñas: **"de arriba hacia abajo"**
- Se formarían primero cúmulos, galaxias se formarían por desintegración

Top-Down Structure Formation

in a top-down scenario, large pancakes of matter form first, than fragment into galaxy-sized lumps

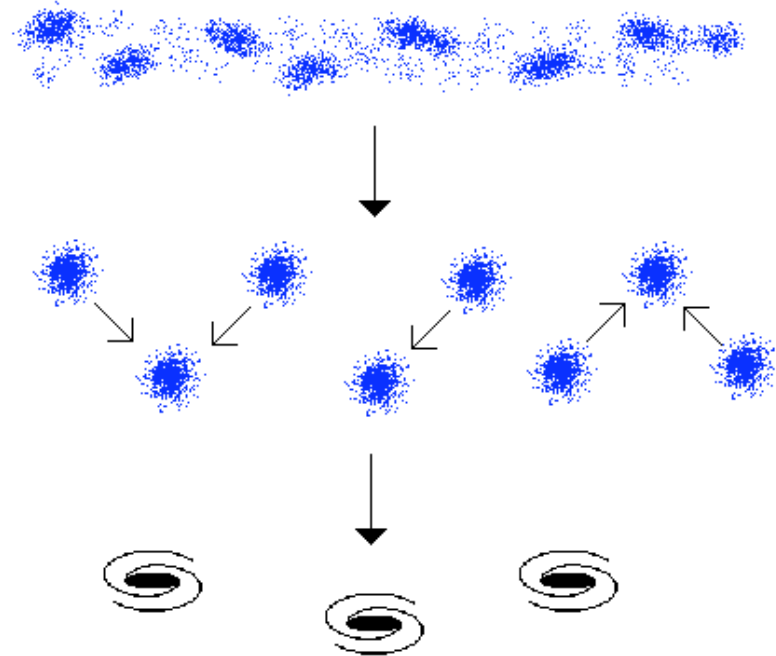


Formación de galaxias en el modelo de materia oscura frío

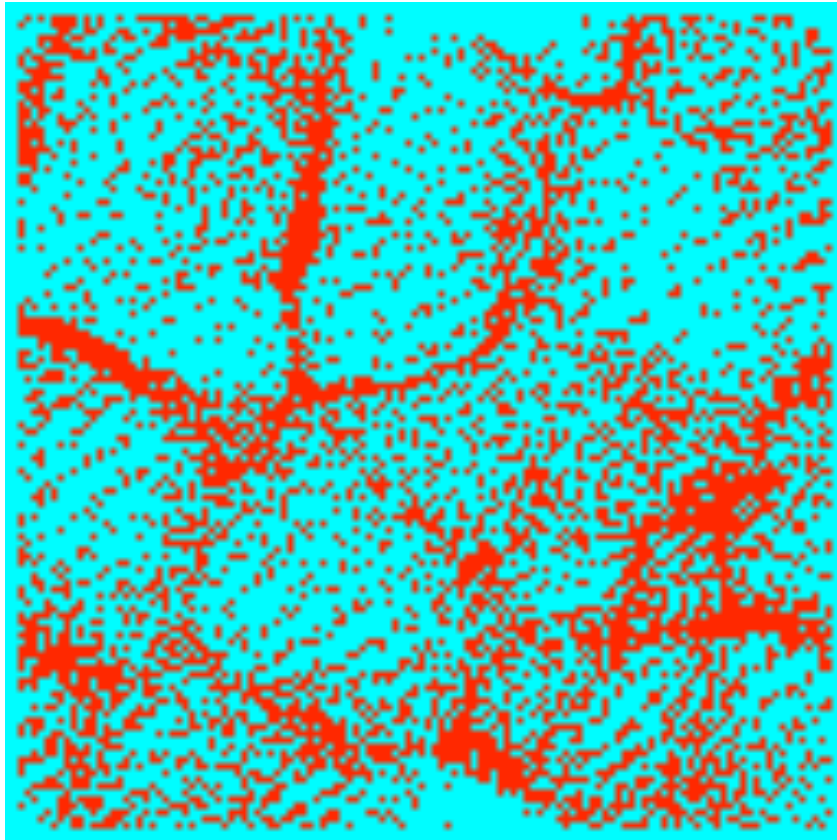
- Modelo más aceptado ahora (aunque no puede explicar todo)
- **Materia oscura frío:** Partículas con gran masa, y baja velocidad
- **Candidatos:** WIMPS (Weakly Interacting Massive Particle). Los más prometedores: Partículas predicho por la teoría de la supersimetría (predice partículas compañeras supersimétricas con gran masa), como el neutralino. El LHC en el CERN nos podrá dar una respuesta pronto...
- Primero objetos tienen masa de unos 10^6 Msol
- Objetos más grandes se forman después a través de interacciones, grandes estructura: "de abajo hacia arriba"

Bottom-Up Structure Formation

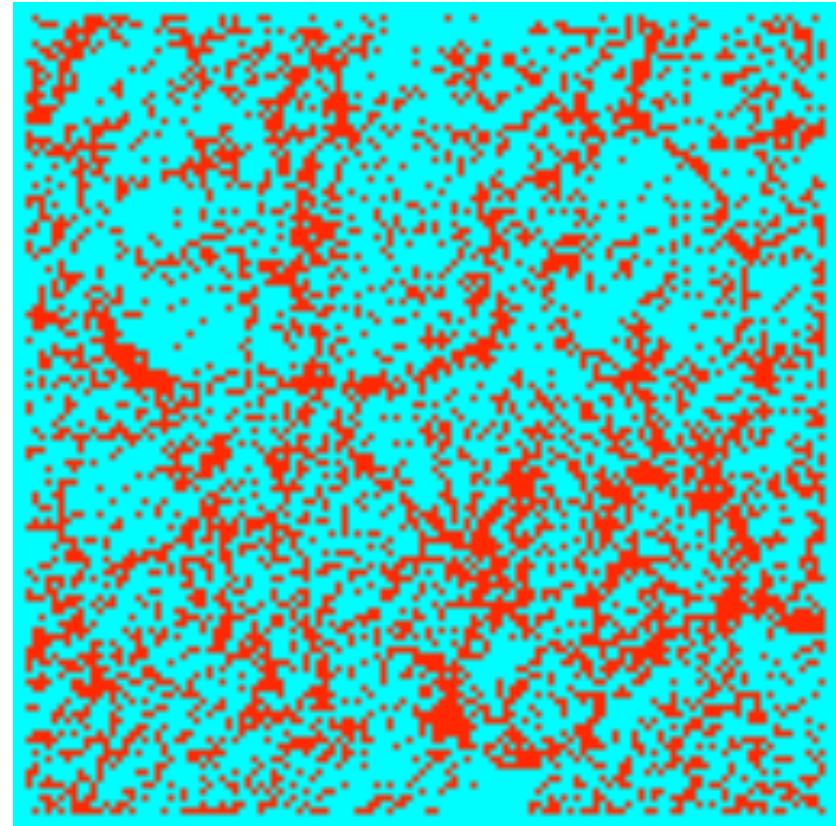
in a bottom-up scenario, small, dwarf galaxy-sized lumps form first, then merger to make galaxies and clusters of galaxies



Gran estructura



Materia oscura caliente:
Produce demasiado estructura a gran escala en comparación con las observaciones



Materia oscura fría:
Mejor de acuerdo con observaciones

Observación de la gran estructura: "Surveys" de galaxias

- Se han hecho (y se están haciendo) grandes surveys de galaxias, tanto de fotometría como de espectroscopía
- En los últimos 10-20 años ha sido posible observar el redshift para un gran número de galaxias → información tridimensional de la distribución de galaxias
- Hay dos estrategias generales de estos surveys:
 - Un campo relativamente grande, pero poco sensible
 - Un campo pequeño, y mucha profundidad

Algunos surveys

Center for Astrophysics

Point Source Catalog (IRAS)

2-degree Field Galaxy Redshift survey (with Anglo-Australian Telescope)

Sloan Digital Sky Survey

Deep Extragalactic Evolutionary Probe (with Keck and HST)

Table 4.2 A summary of five important galaxy redshift surveys. The CfA and the PSCz surveys were completed in 1989 and 1997 respectively.

Name	Number of galaxies in survey (approximate)	Mean redshift	Telescope diameter/m	Simultaneous spectral measurements ^a
CfA	1500	0.02	1.5	1
PSCz	15000	0.03	2.1	1
2dFGRS	250 000	0.10	3.9	400
SDSS	1000 000	0.10	2.5	640
DEEP	50 000	0.7–1.55	10	1

^aThe number of simultaneous spectral measurements describes how many galaxy redshifts can be measured in a single field-of-view at any one time.

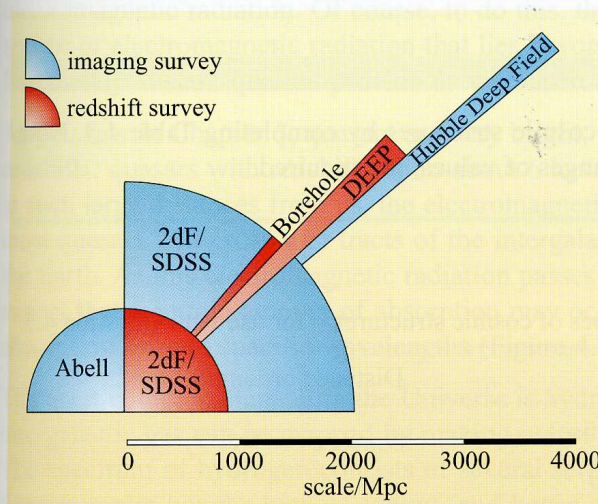
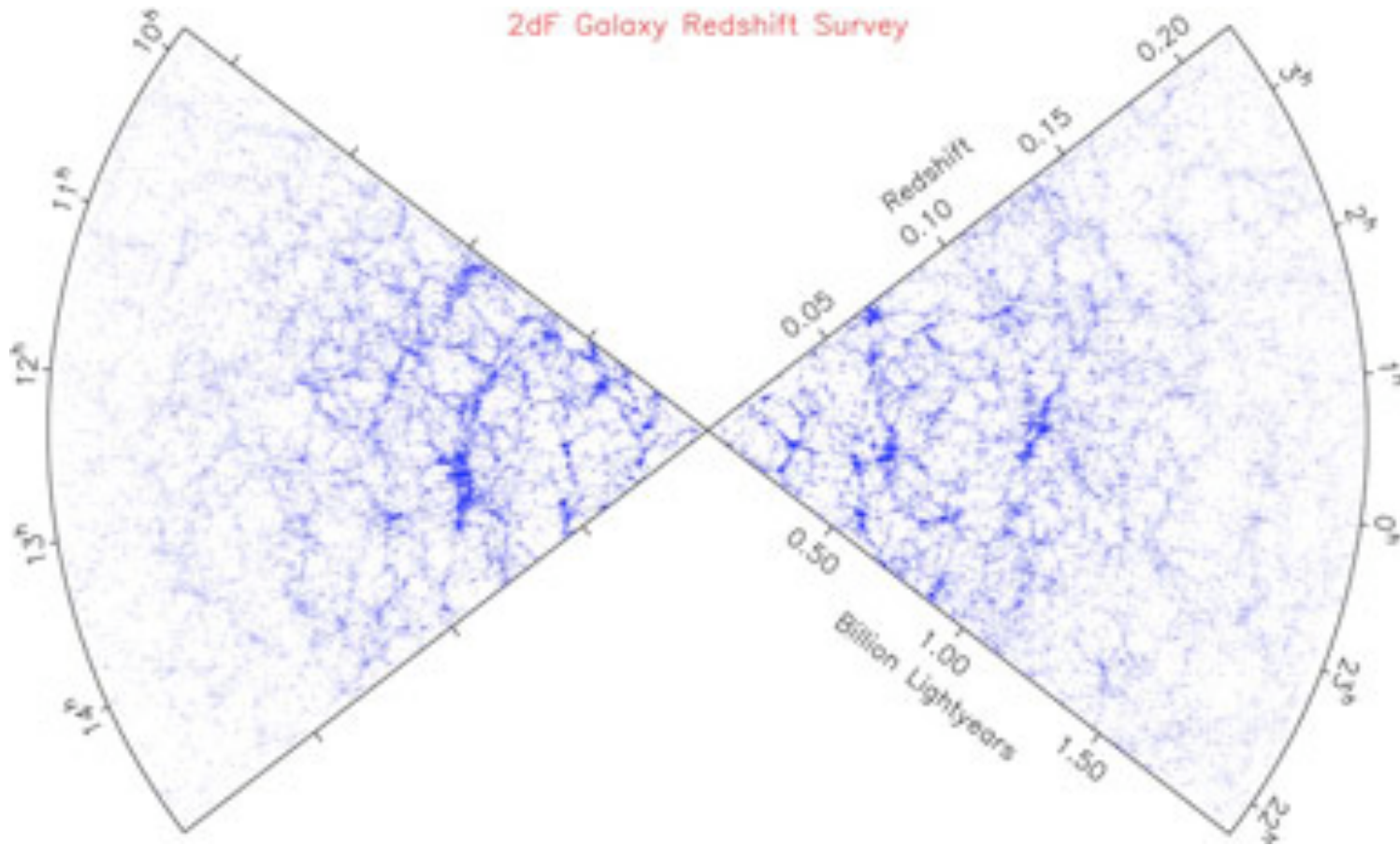


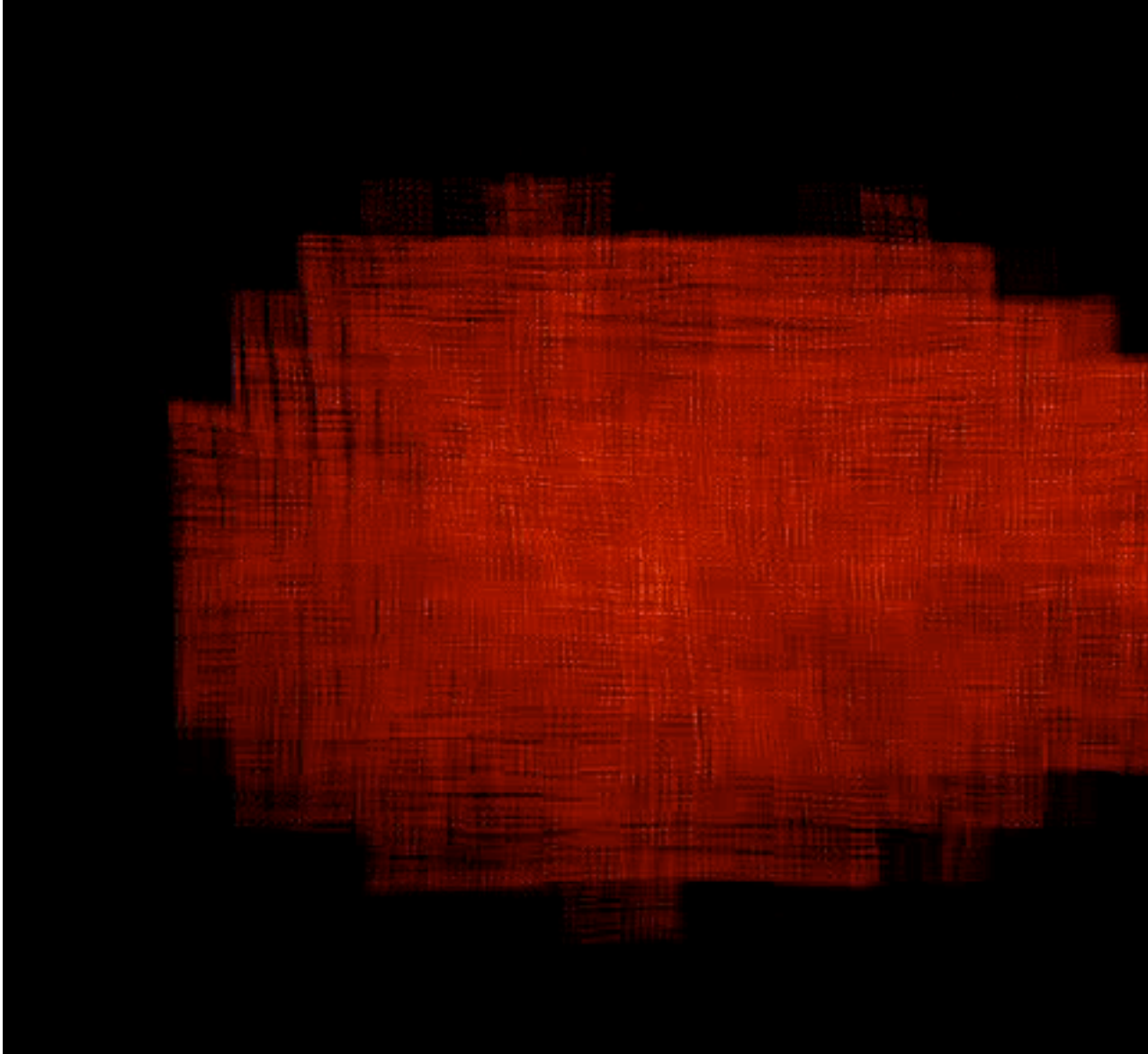
Figure 4.25 A schematic illustration of the relative scales of the different surveys. Imaging surveys can include fainter objects than redshift surveys, so the imaging elements of the SDSS and 2dF projects go out to much greater distances than their corresponding redshift elements. (Note that the extent of the sectors in this diagram are for illustration only – they do not correspond to the actual areas of sky covered by these surveys.)

Distribución de galaxies



Distribución filamentaria, “walls” y “voids” (zonas vacías)

Modelos cosmológico de materia oscura fría



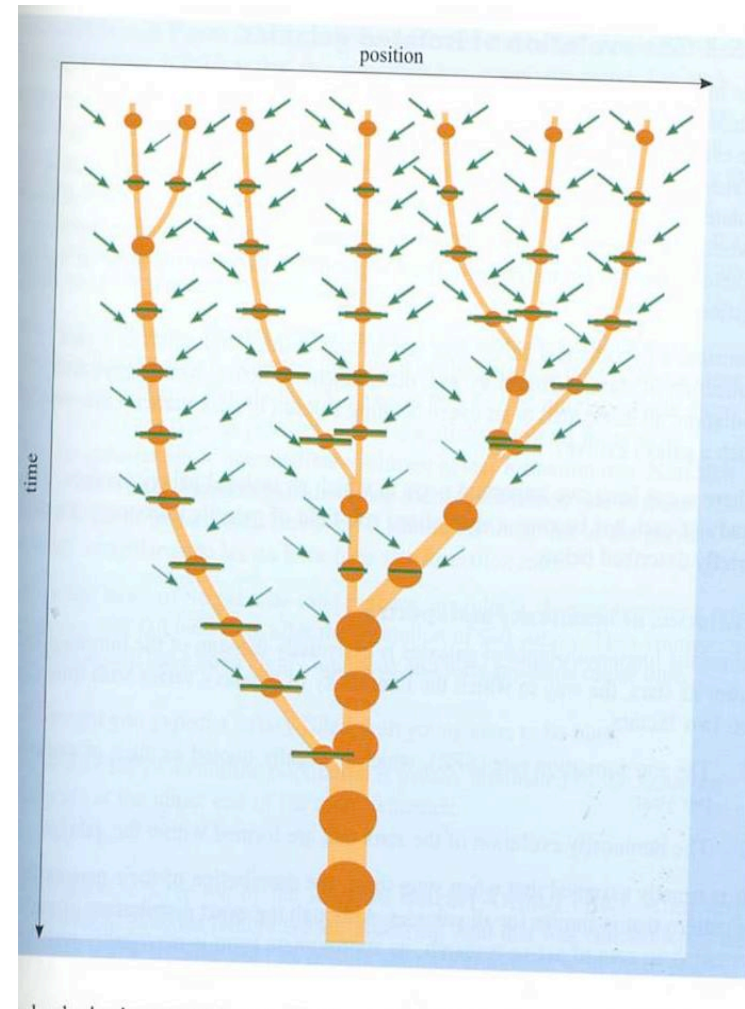
- Estructuras pequeñas se forman primero
- Estructuras grandes se forman de las pequeñas a través de fusiones

Simulaciones de M.
Steinmetz

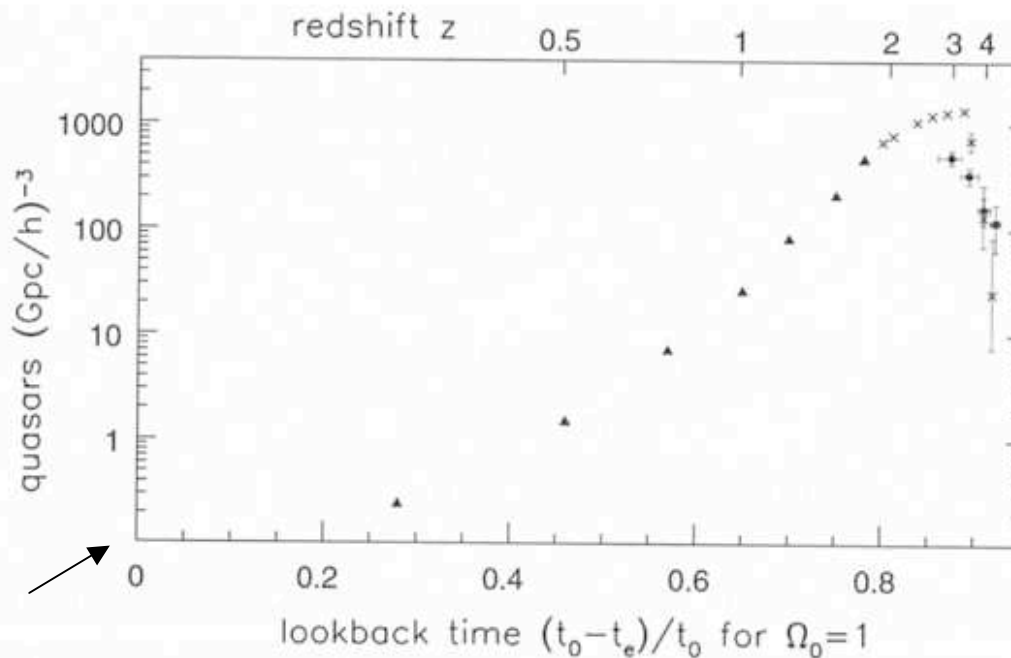
¿Cómo se pueden explicar los diferentes tipos de Hubble en el modelo de CDM?

No lo explica bien, pero se puede **destacar algunas propiedades:**

- El resultado de una fusión de galaxias es una **galaxia elíptica**
- ¿Pero como se forman **galaxias espirales?**
- Una posibilidad (no aceptada generalmente todavía) es que el disco se va formando después de una fusión poco a poco debido al "infall" de gas intergaláctico
- Ventaja de este escenario: Explica porque bulbos de galaxias son tan parecidos a galaxias elípticas.



Abundancia de cuasares en el pasado → mucho más abundantes que hoy



Hoy:
 ≈ 1 cuasar en
 1Gpc^3
(donde hay
unos 10^6
galaxias
similares a la
Vía Láctea)

Figure 8.13 Comoving density of bright quasars: the number in a region that will expand to a cube of side h^{-1} Gpc at the present day, assuming $\Omega_0 = 1$ and $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Different symbols show results from three surveys, of objects with slightly different characteristics; vertical and horizontal bars represent estimated errors – P. Hewitt.

¿Adonde han ido todos los cuasares?

- Quizás muchas galaxias han tenido una fase de AGN, posiblemente causado por la tasa más alta de interacciones a alto z .
- Después el AGN se ha "apagado".
- Si eso es correcto deberíamos de ver un agujero negro supermasivo en muchas galaxias.
- Hay indicios que eso es correcto en algunas galaxias

¿Porqué se ha apagado el AGN?

- No puede ser por falta de combustible global ya que necesita muy poco
- Pero no es fácil para la materia de caerse al agujero negro, porque necesita perder momentum angular. Eso solo es posible en el disco de acreción, directamente rodeando el AGN.
- Posiblemente el AGN ha "limpiado" su cercanía, y ya no hay material que se puede caer dentro
- Pero: el AGN se puede "despertar", por ejemplo debido a una fusión de galaxias: Un ejemplo puede ser Centaurus A