

Física Fundamental: Cosmología

El origen y la evolución del universo

Eusebio Sánchez (CIEMAT)

Introducción a la física de partículas para profesores de ciencias y tecnología

Contenido

Introducción

Distancias y tiempos cósmicos
Cómo medir distancias
El desplazamiento al rojo
Cómo se realizan las observaciones

El Big Bang hoy: Λ CDM

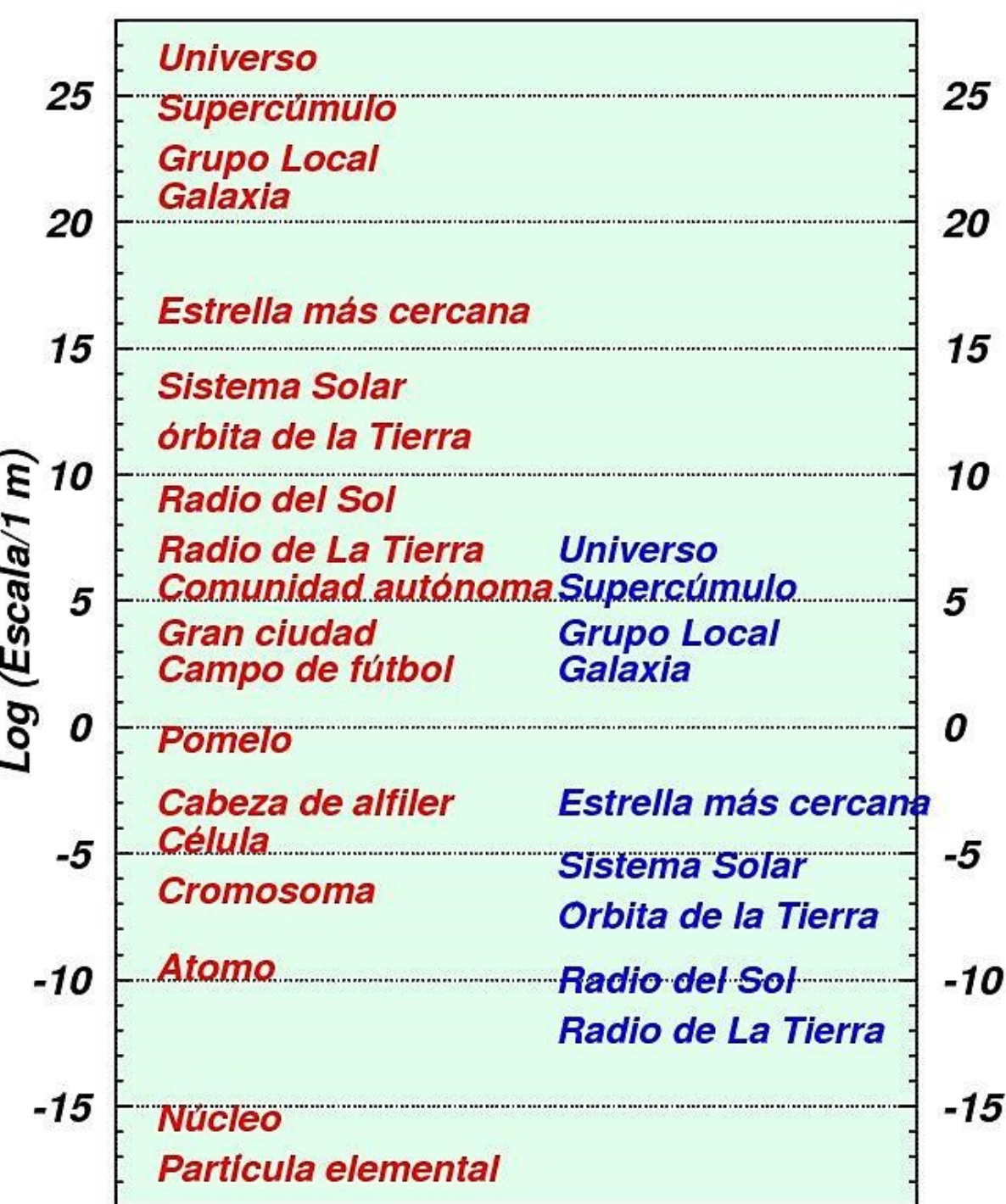
Bases de la cosmología
Soporte observacional
Parámetros cosmológicos
Consecuencia: El lado oscuro del universo

Materia oscura

Energía oscura

El universo temprano: bariogénesis e inflación

Conclusión



La cosmología trata de las escalas espaciales más grandes, el universo visible completo

El universo contiene estructuras ordenadas jerárquicamente

Observar a estas enormes distancias es también observar a tiempos remotos por la velocidad finita de la luz

La historia del universo condensada en un año

January	February	March																																			
1 BIG BANG!!!																																					
April	May	June																																			
	1 Milky Way																																				
July	August	September																																			
		9 Solar system 14 Earth 25 Life (on Earth)																																			
October	November	December																																			
2 Oldest rocks known 9 Oldest fossils known (bacteria, blue-green algae)	1 Sex 12 Photosynthesis 15 Eukaryotes flourish	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>16</td> <td>17</td> <td>18</td> <td>19</td> <td>20</td> <td>21</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>23</td> <td>24</td> <td>25</td> <td>26</td> <td>27</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td>29</td> <td>30</td> <td>31</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	1				5											16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31				
1				5																																	
	16	17	18	19	20	21																															
22	23	24	25	26	27	28																															
29	30	31																																			

La historia humana , desde el descubrimiento del fuego, los últimos 15 minutos

Previo: Cómo medir los objetos celestes

Posición en el cielo

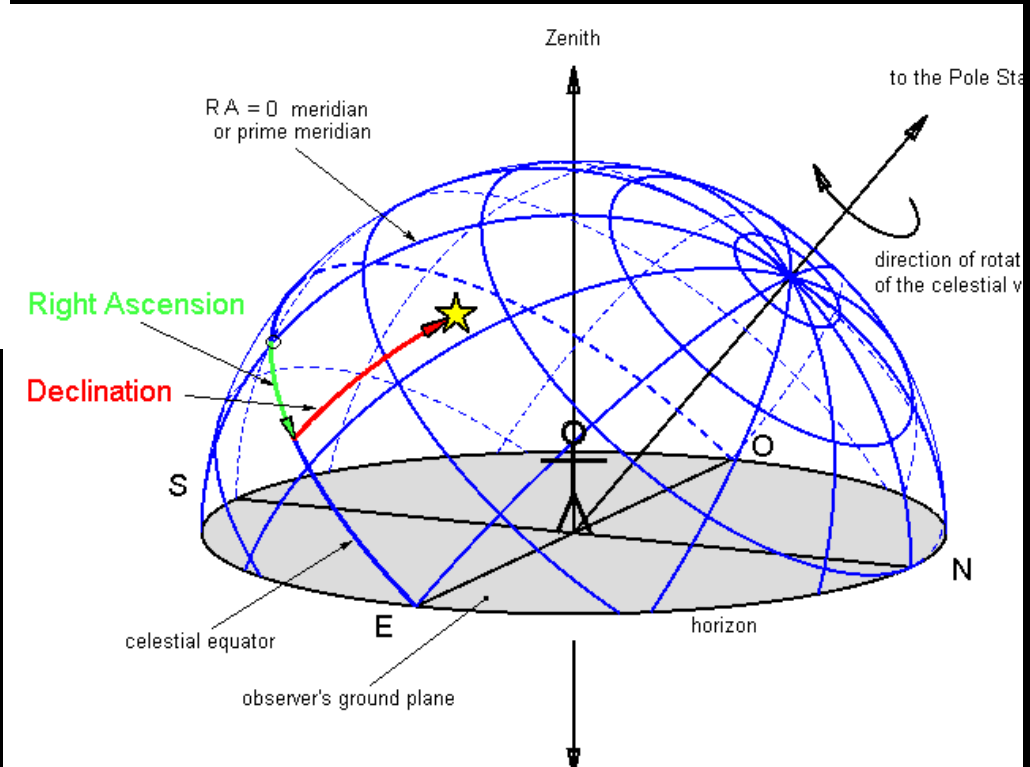
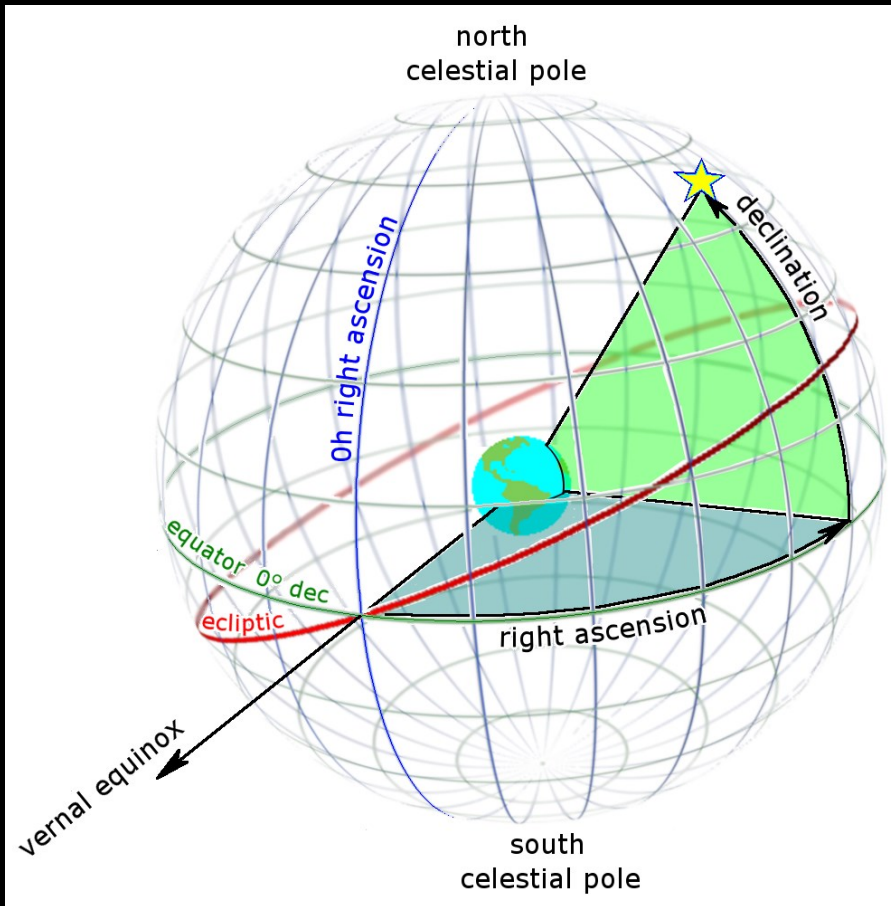
Distancia

Velocidad a la que se alejan (o acercan)

Otras propiedades: *Temperatura, densidad, composición química...*

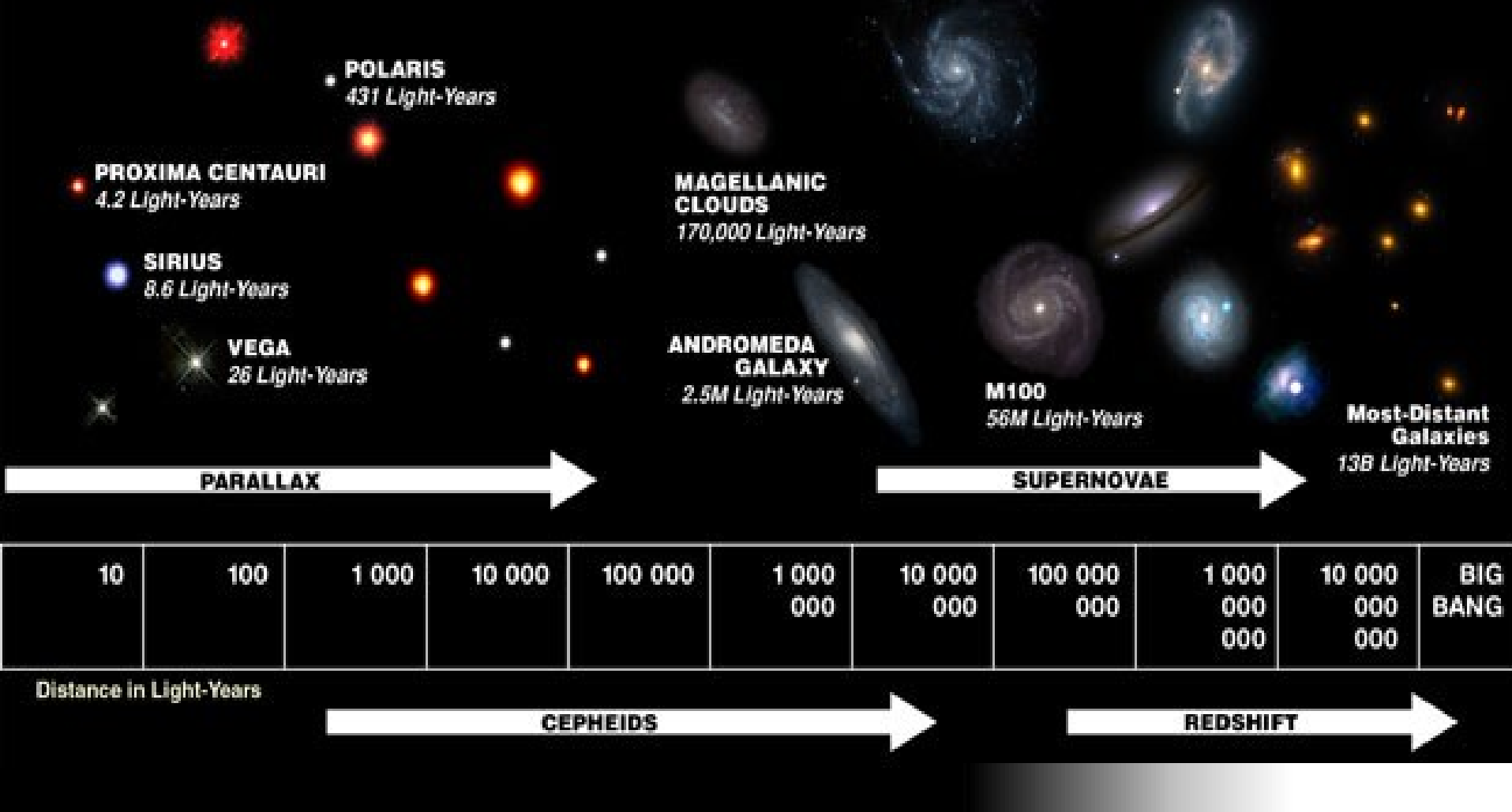
Coordenadas ecuatoriales: Ascensión recta, declinación

En los grandes proyectos cosmológicos se utilizan las coordenadas ecuatoriales para situar los objetos en el cielo



La tercera dimensión es mucho más difícil de medir

Cómo medir distancias: Escalera de distancias cósmicas



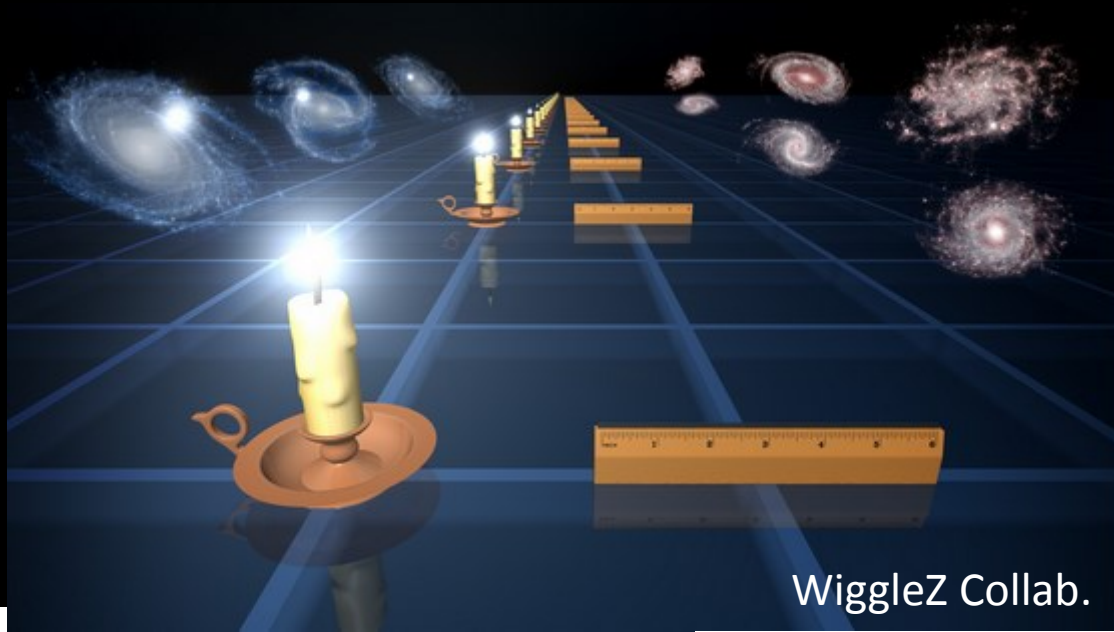
Distintos métodos que se van encadenando

COSMOLOGÍA

Distancias cósmicas: Candela estándar y regla estándar

Distancia
por
luminosidad

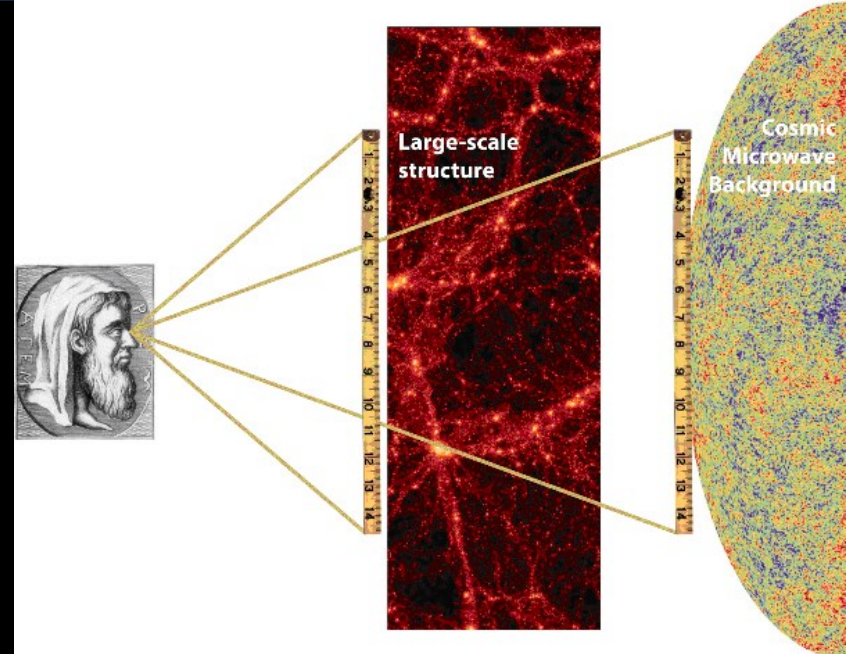
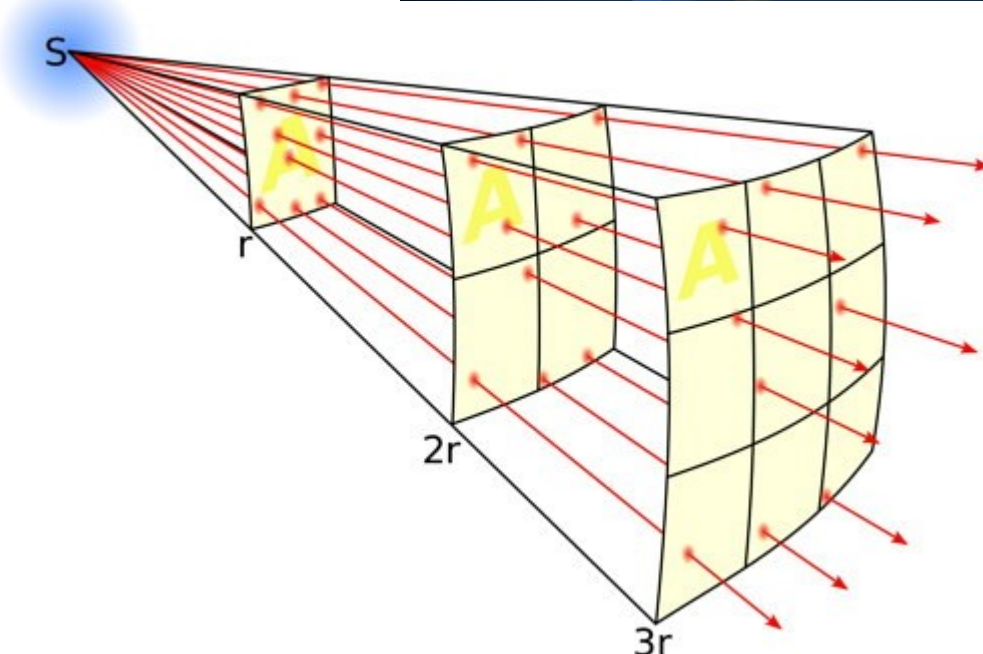
$$F = \frac{L}{4\pi D_L^2}$$



WiggleZ Collab.

Distancia
por
diámetro
angular

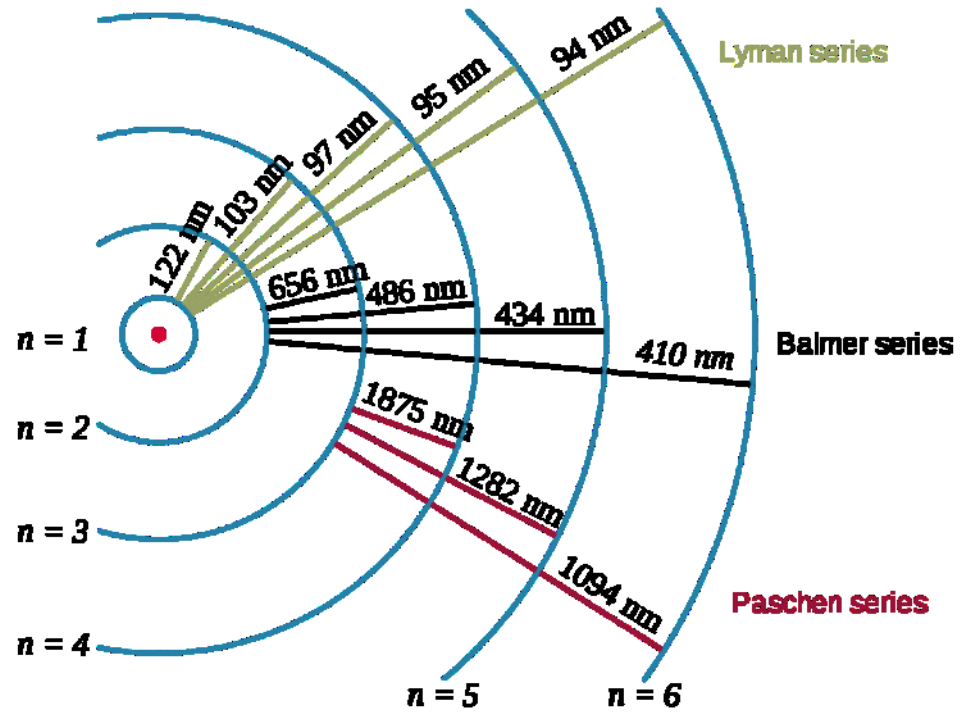
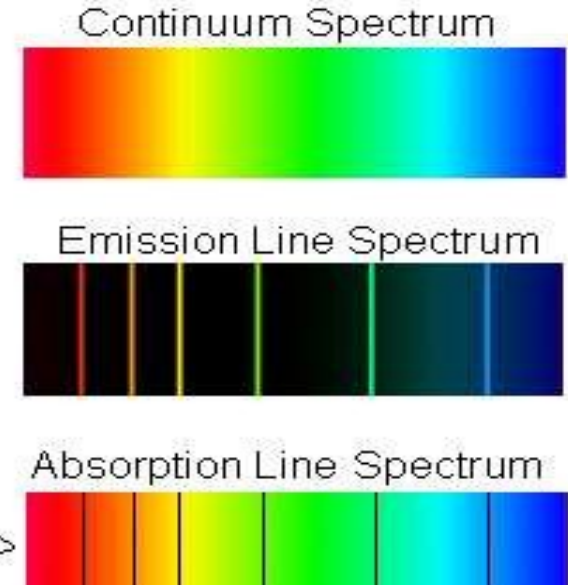
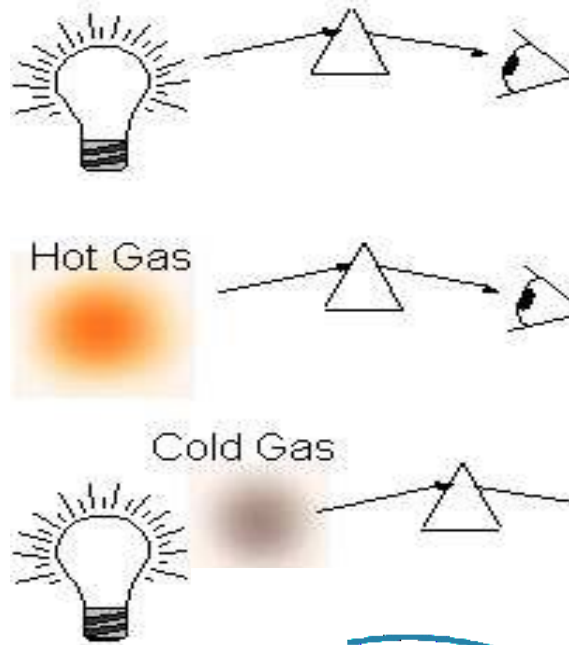
$$D_A = \frac{R}{\theta}$$



Velocidad: Los espectros atómicos

Los átomos absorben o emiten fotones solamente de ciertas energías, fijadas por su estructura electrónica.

Estas energías se observan como líneas brillantes u oscuras al hacer pasar la luz por un prisma que la dispersa en longitudes de onda.

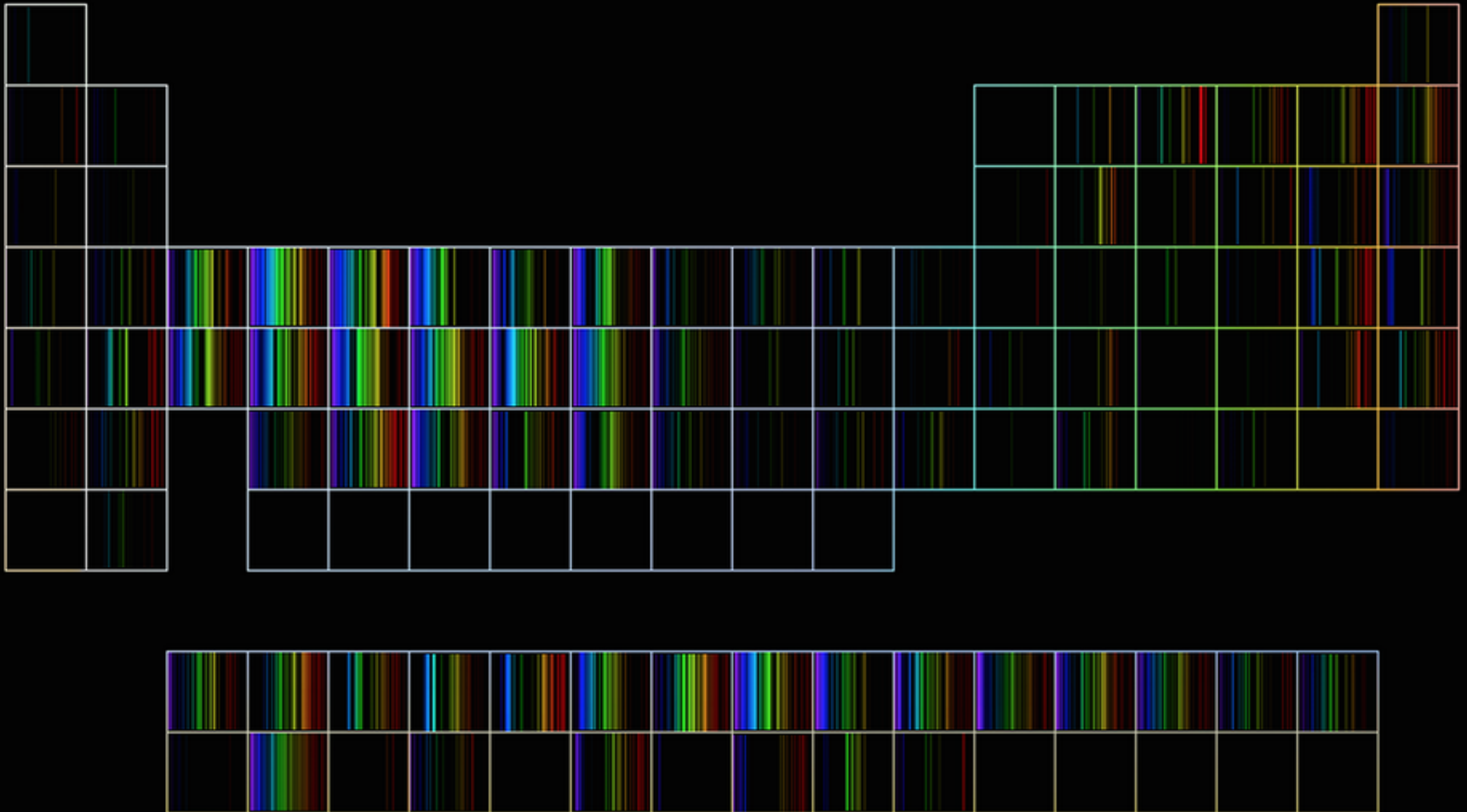


Modelo de Bohr:

$$E = 13.6 \left[\left(\frac{1}{n_1^2} \right) - \left(\frac{1}{n_2^2} \right) \right] \text{ eV}$$

Los espectros son las firmas de los átomos

Emission Spectra of the Elements



Los espectros nos dicen a qué velocidad se alejan o acercan los objetos

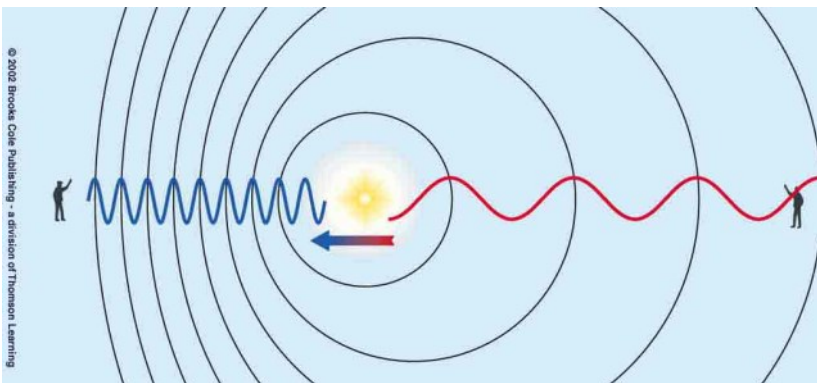
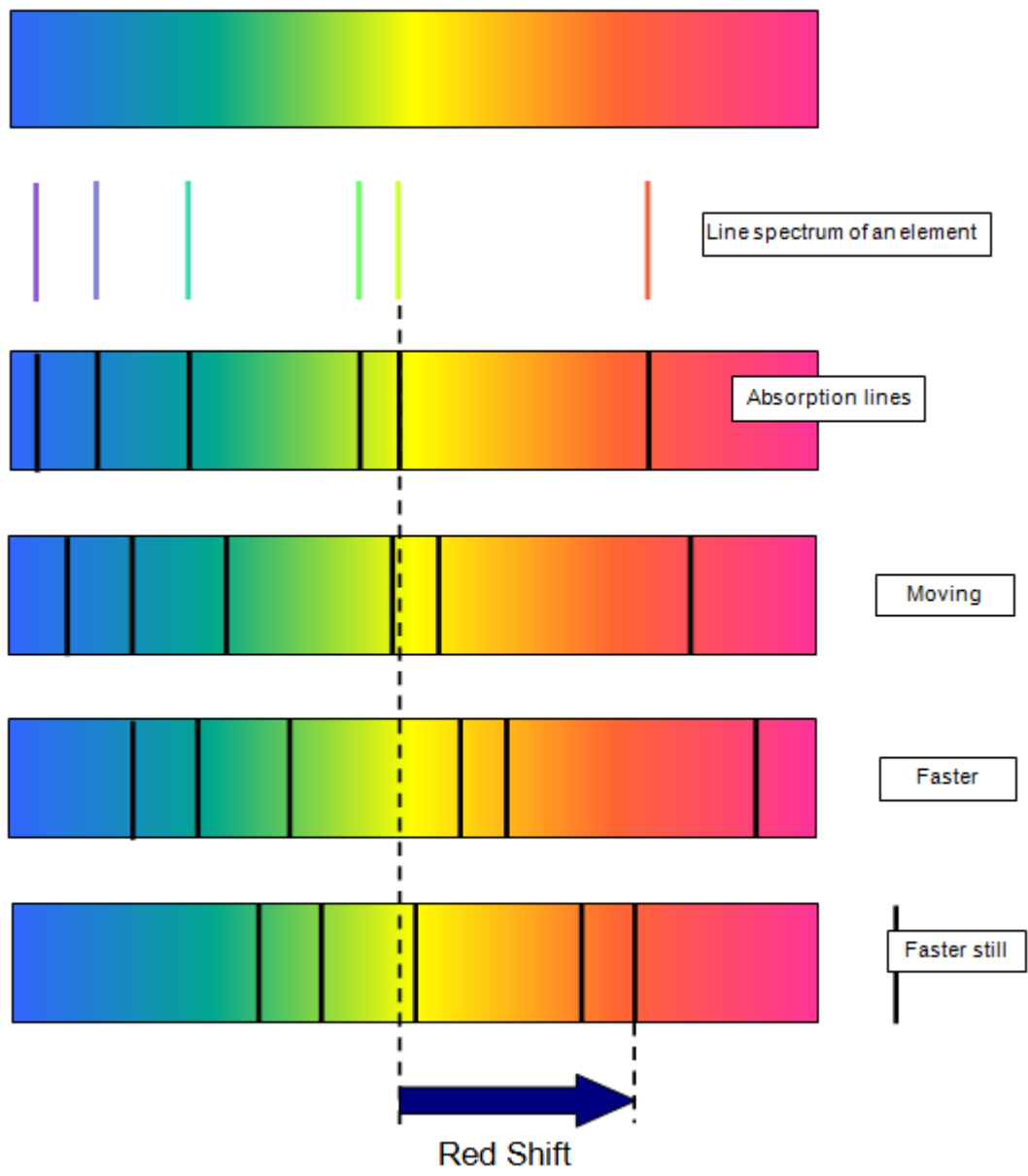
Las líneas espectrales desplazan su posición cuando el emisor está en movimiento

La medida del desplazamiento de las líneas permite obtener la velocidad a la que se mueve la fuente.

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$

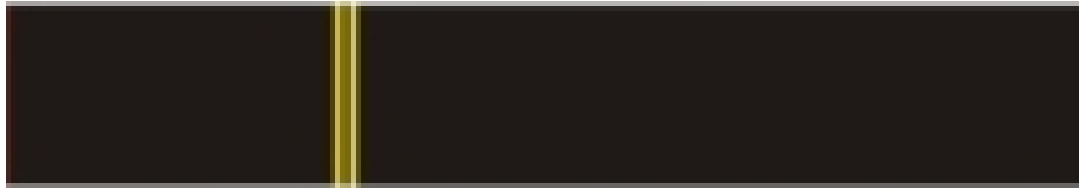
Para z pequeño, $v \sim cz$

λ = medida ; λ_0 = en reposo ; c = luz





SOL



Sodio



Hidrógeno



Litio



Mercurio

Composición química a partir del espectro

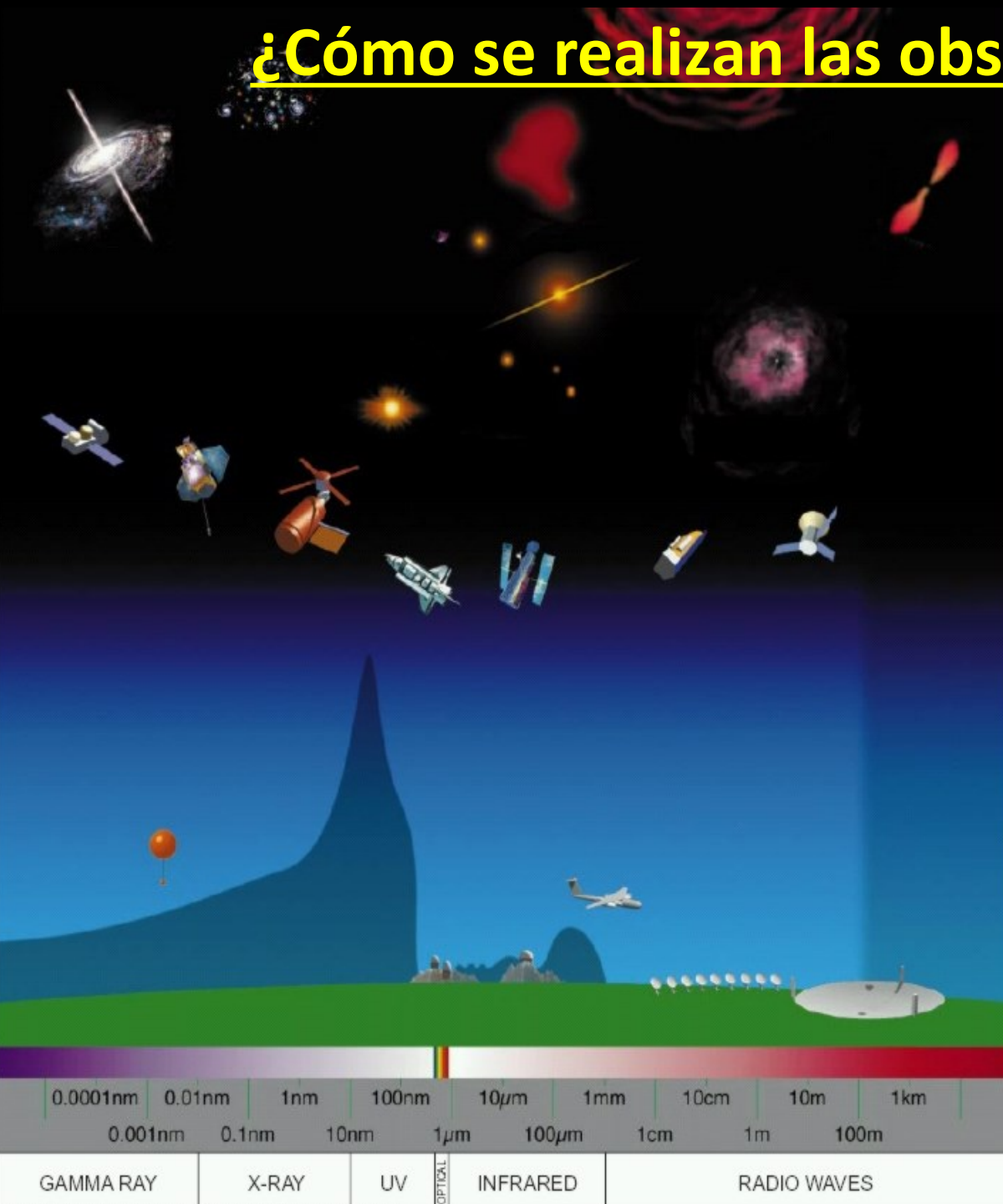
En este caso se ve que el Sol contiene hidrógeno y sodio, pero no litio ni mercurio

Cosmología:

Distancia como función de z

Y la formación y evolución de las estructuras cósmicas (supercúmulos, cúmulos, galaxias...)

¿Cómo se realizan las observaciones?



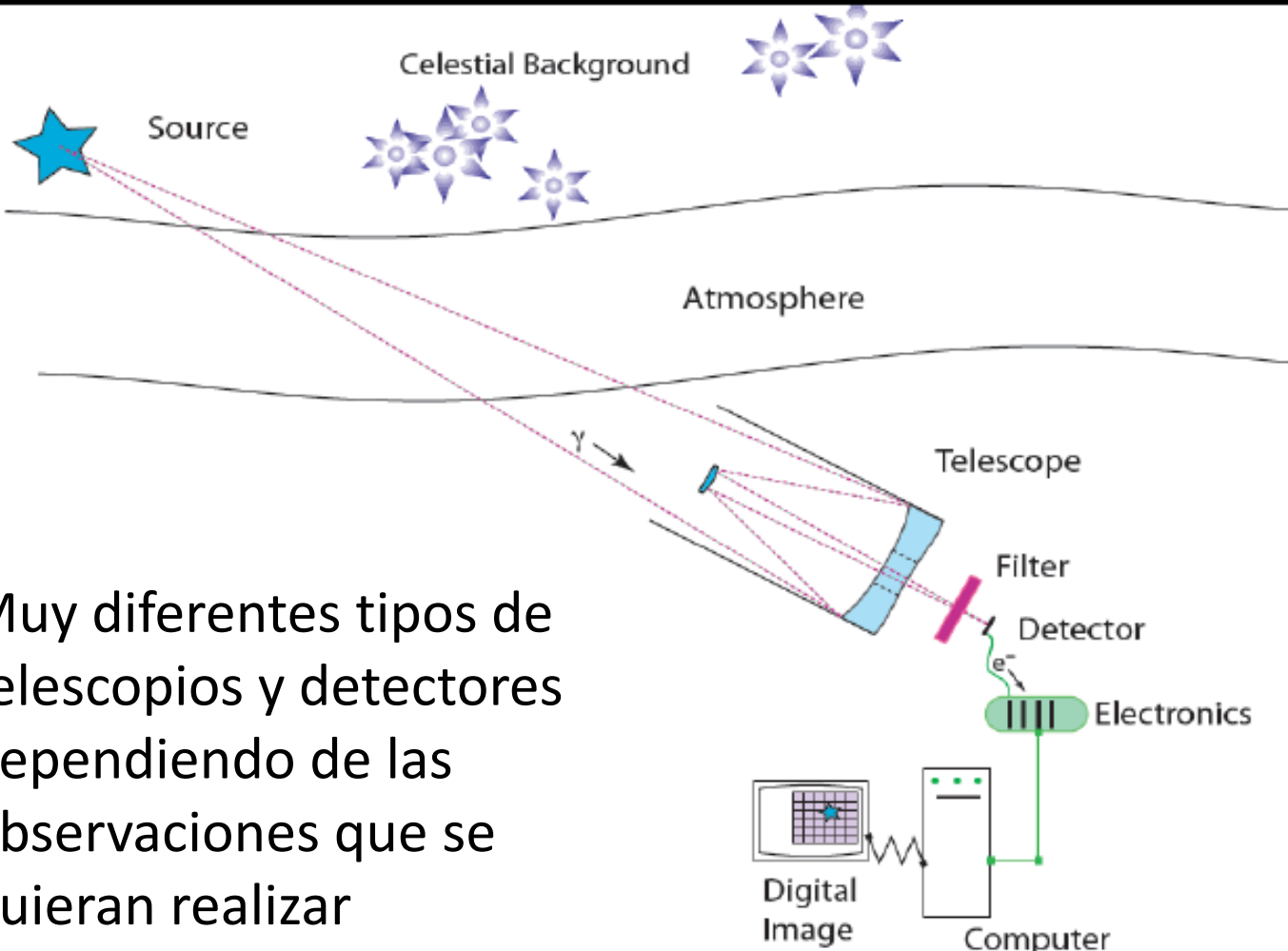
Potentes telescopios tanto en tierra como en el espacio

En muy diferentes longitudes de onda (no solamente luz visible)

También se observan otras partículas que vienen del espacio (rayos cósmicos, neutrinos...)

Cómo realizar las observaciones

Multitud de efectos observacionales influyen en la medida



Muy diferentes tipos de telescopios y detectores dependiendo de las observaciones que se quieran realizar

La fuente de luz

La atmósfera

Telescopio y óptica

Cámara

Electrónica+DaQ

Procesado y calibración de los datos

Análisis científico

El telescopio Blanco, en Chile

Su espejo
tiene un
diámetro de
4 m
(los más
grandes
~10m)

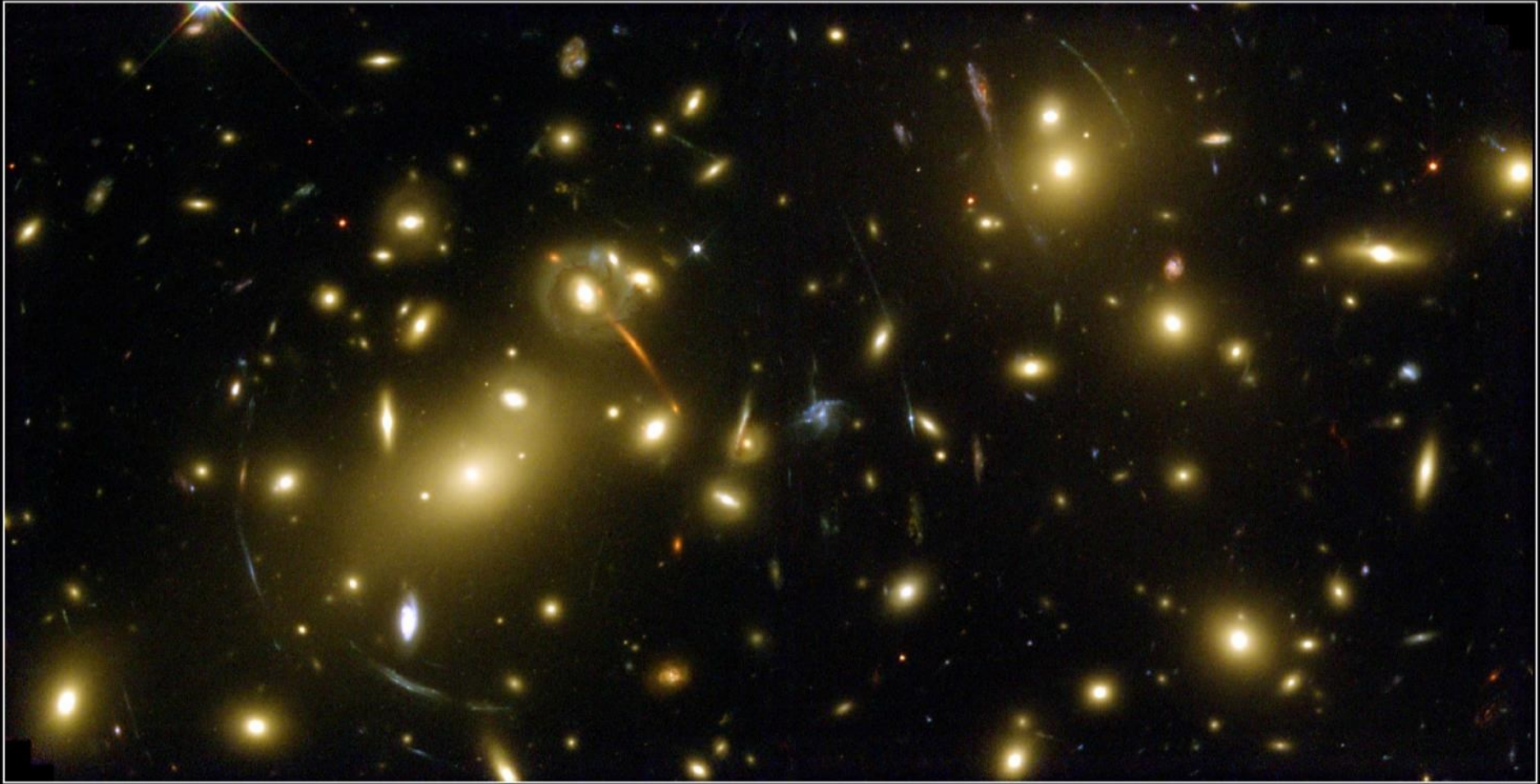


El telescopio Blanco, en Chile



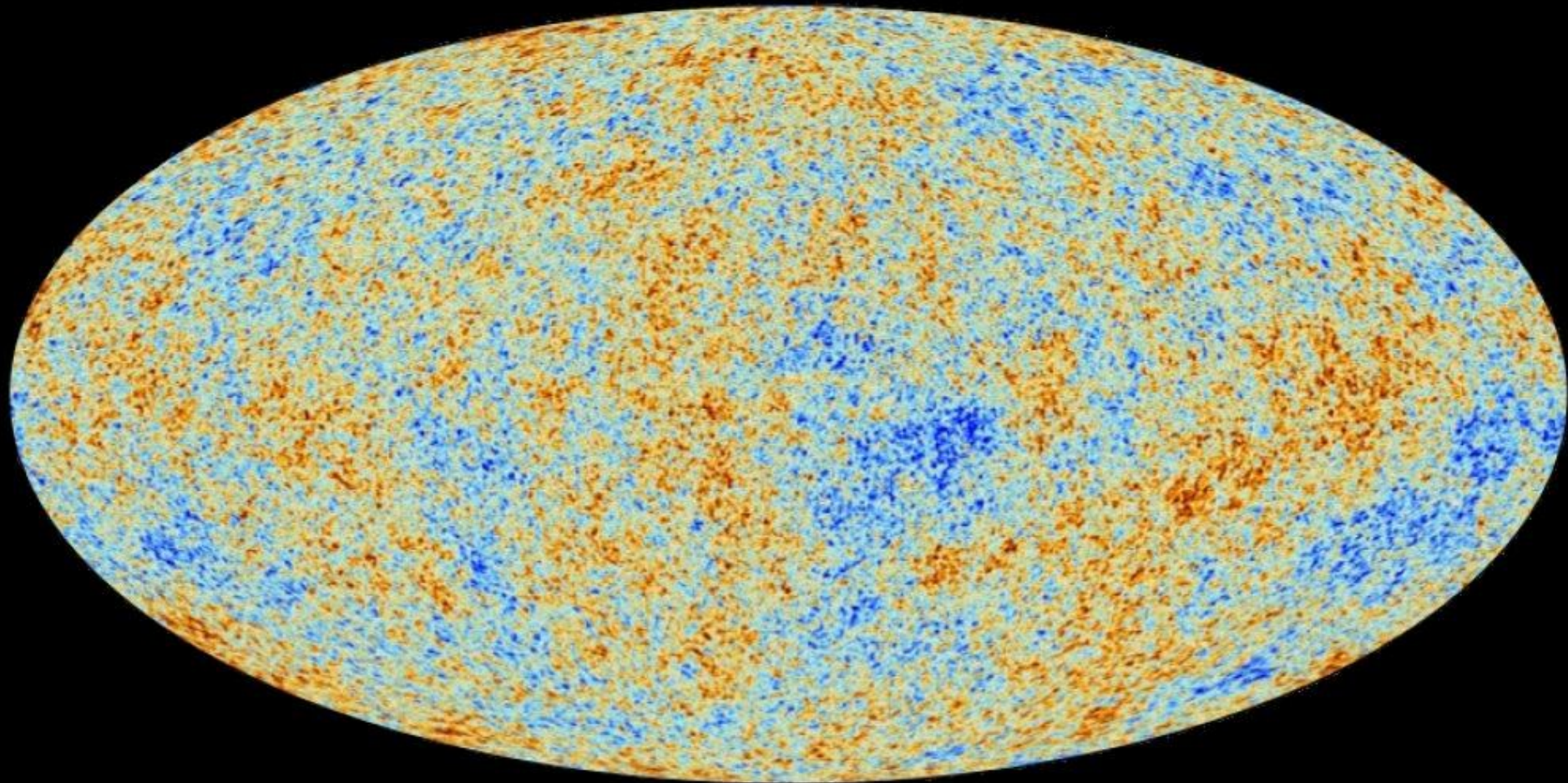
Image from darkenergydetectives.org





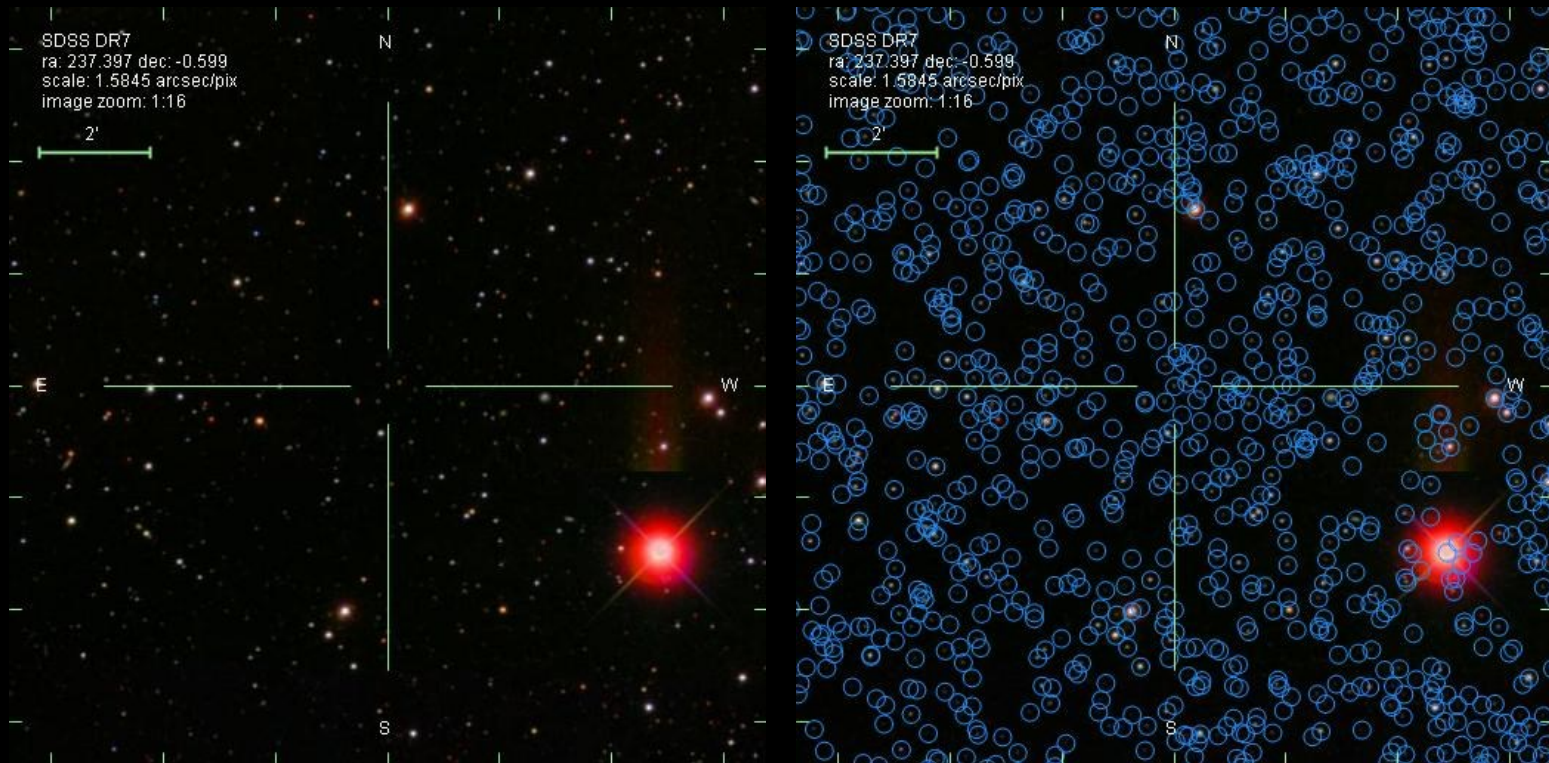
Galaxy Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2

Mapa de la CMB obtenido por el telescopio espacial Planck



De las imágenes a los resultados

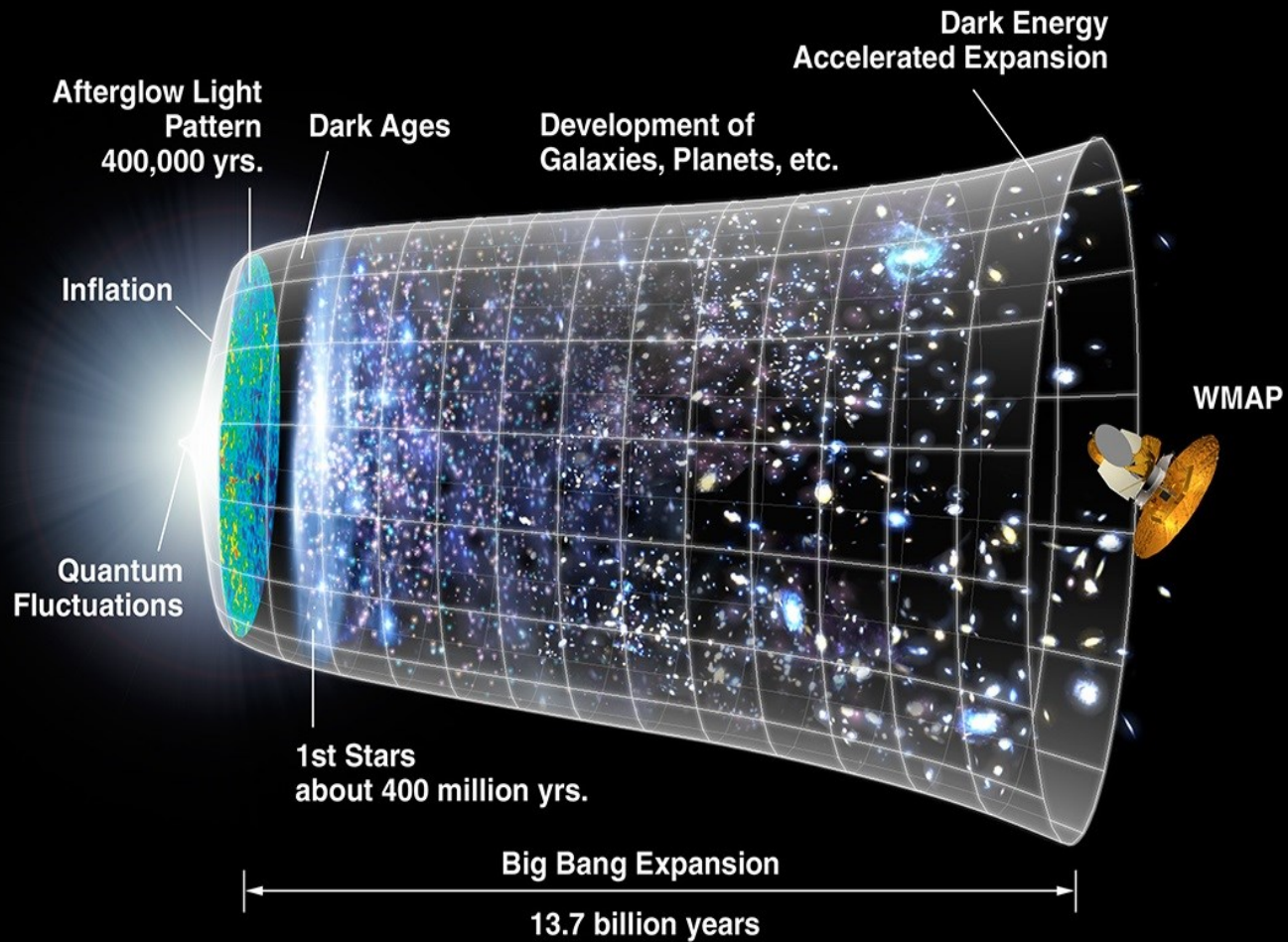
Los objetos (en general, galaxias) se detectan mediante programas informáticos especializados



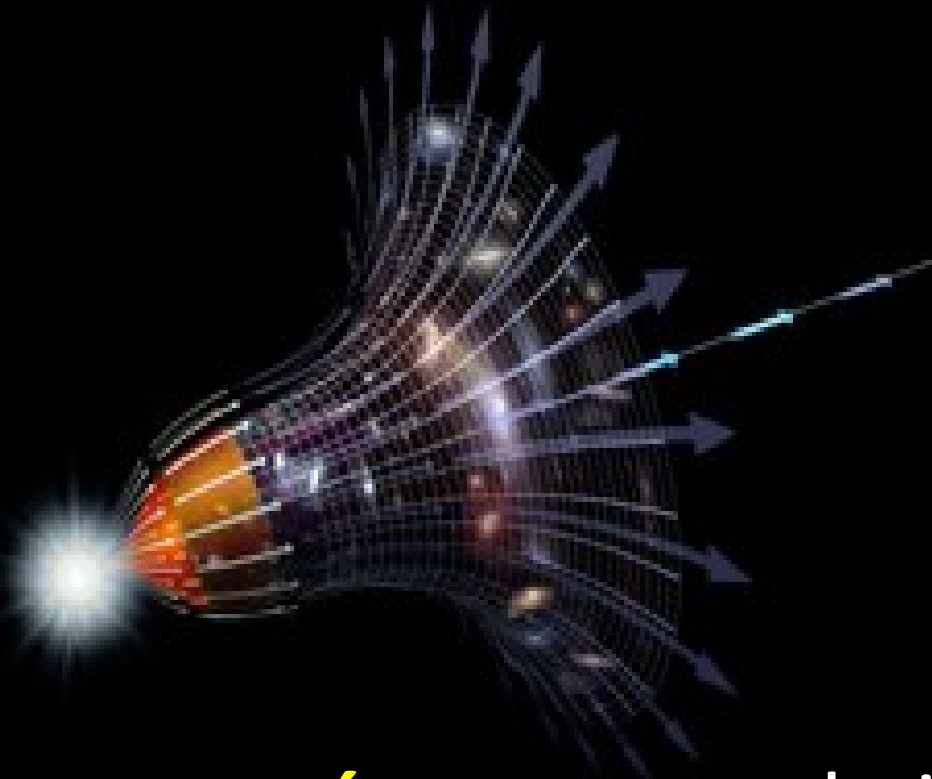
Para obtener cosmología:

- Medir la posición de los objetos en el cielo
- Clasificar objetos: ¿Estrellas, galaxias, cuásares...?
- Medir z

COSMOLOGÍA: LA CIENCIA DEL UNIVERSO



EL BIG BANG



El universo comenzó en un estado inicial muy denso y muy caliente y desde entonces se está expandiendo y enfriando

Bases de la cosmología

Λ CDM

PRINCIPIO
COSMOLÓGICO

RELATIVIDAD
GENERAL

INFLACIÓN

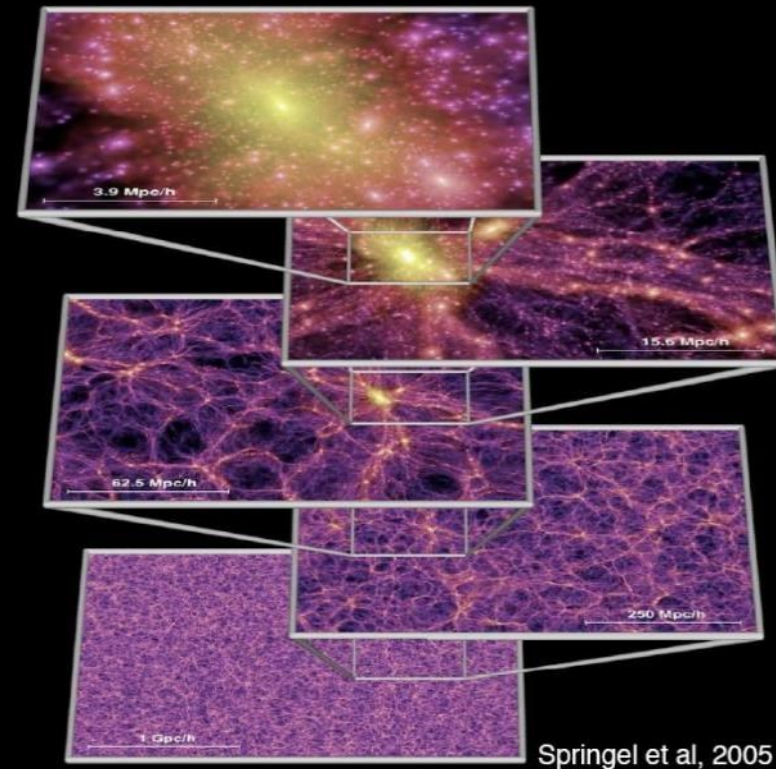


El principio cosmológico

El universo es homogéneo e isótropo

Es decir, las propiedades del universo son las mismas independientemente del punto donde las midamos y de la dirección en la que miremos.

Solamente se cumple cuando tomamos regiones de un tamaño de alrededor de 100 Mpc o mayores,

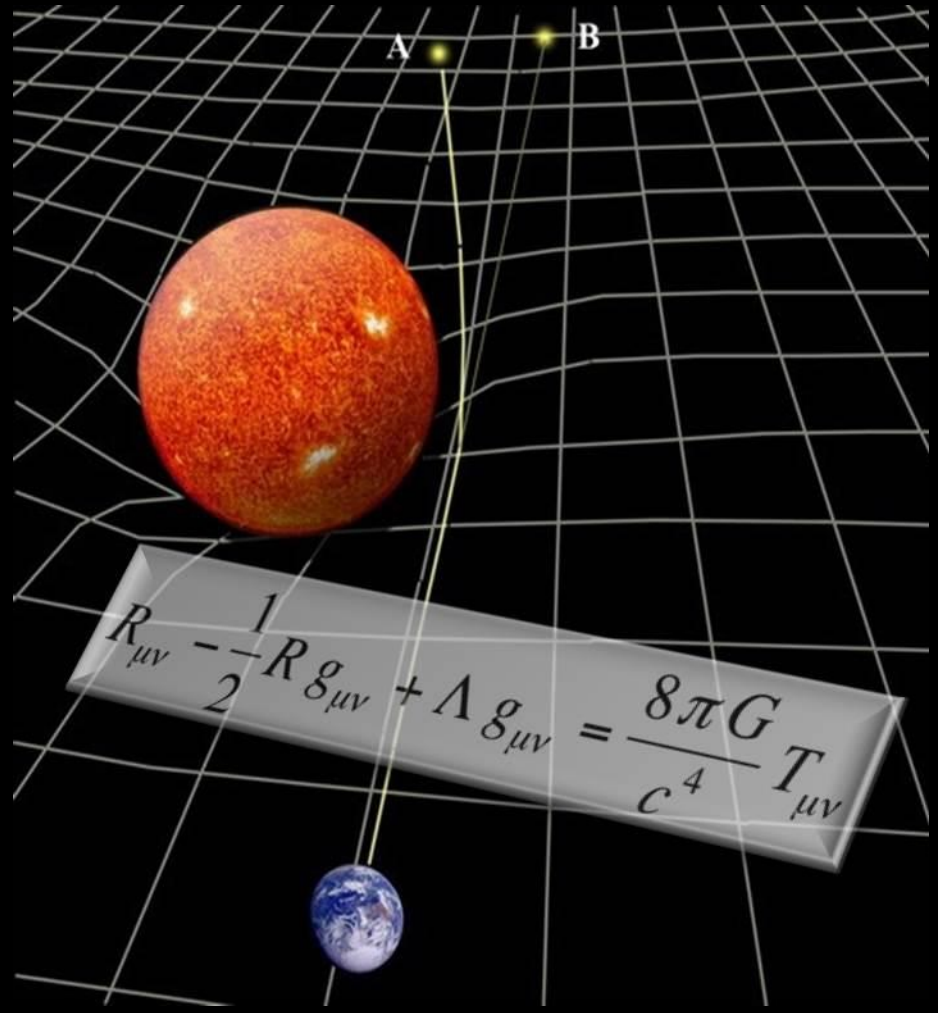
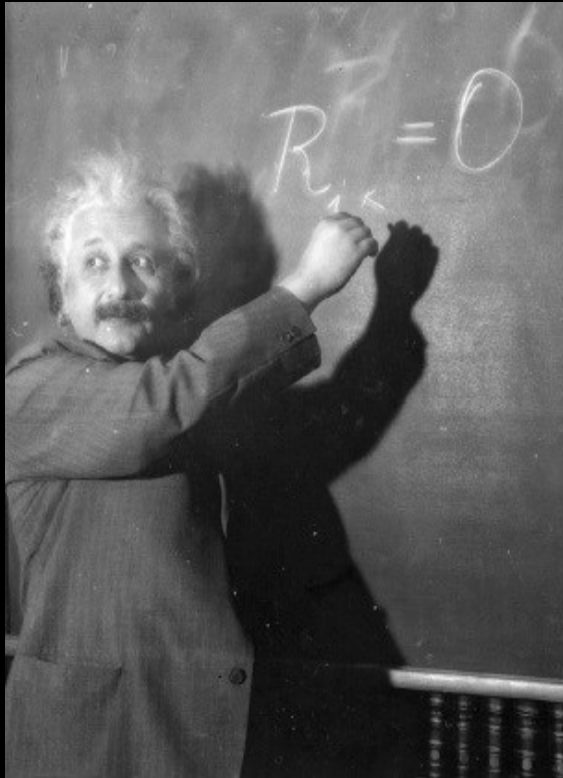


La teoría del Big Bang es capaz de explicar por qué ocurre esto. Describe cómo se forman las estructuras que se observan en el universo.

La Teoría de la Relatividad General

La fuerza de la gravedad es la curvatura del espacio-tiempo

“El espacio le dice a la materia cómo moverse, la materia le dice el espacio cómo curvarse.”, *J. A. Wheeler*



El principio cosmológico impone la forma de la métrica

Métrica de FLRW

Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left[dr^2 + S_k^2(r) (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right]$$

$$S_{+1}(r) = R \sin(r/R)$$

$$S_0(r) = r$$

$$S_{-1}(r) = R \sinh(r/R)$$

a: scale factor of the universe

R: Radius of curvature
(constant)

t: proper time

r: comoving distance

La teoría de la relatividad general predice un universo en expansión (o contracción)

Factor de escala: Cómo se expanden las distancias con el tiempo

Tiempo cósmico: El que mide un observador que ve el universo en expansión uniforme

Coordenadas comóviles: Se expanden con el universo

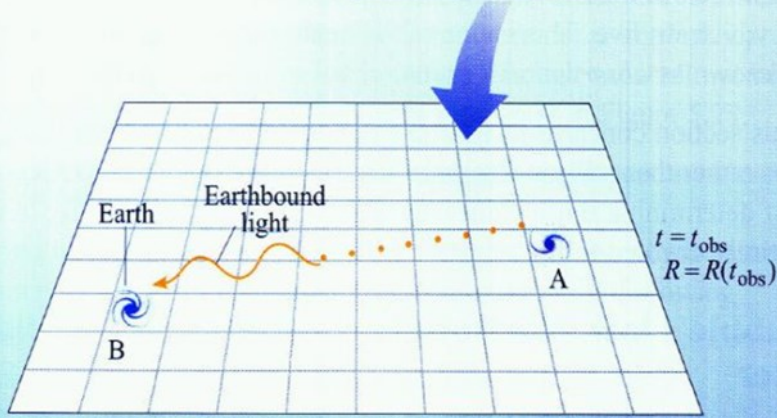
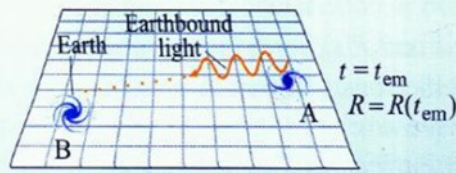
3 posibles geometrías:

$\rho < \rho_c \rightarrow$ abierto (hiperbólico)

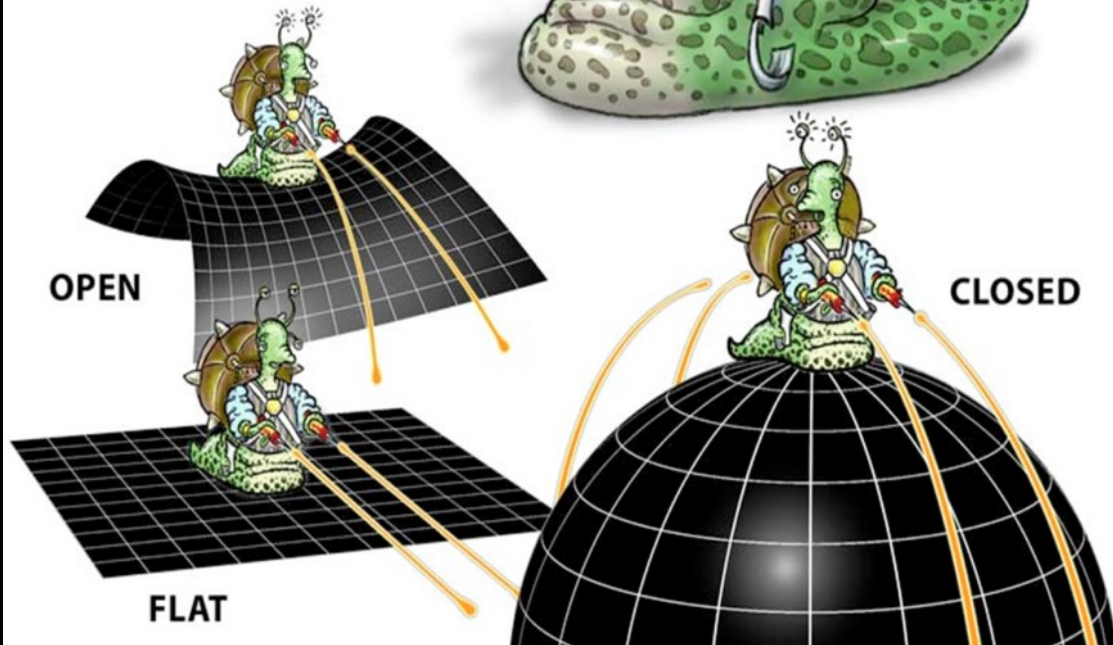
$\rho = \rho_c \rightarrow$ plano (euclídeo)

$\rho > \rho_c \rightarrow$ cerrado (elíptico)

3 posibles geometrías

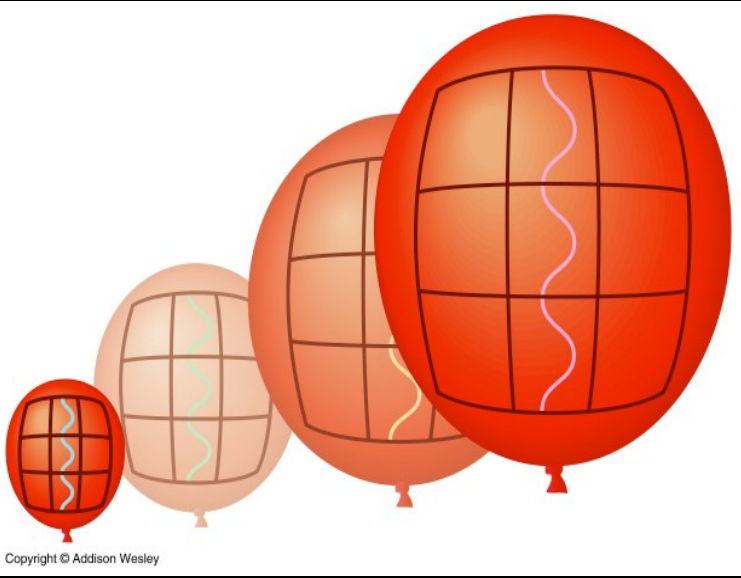


Las coordenadas comóviles se expanden con el universo



La luz de las galaxias se observa desplazada al rojo porque el universo se expande

La expansión del espacio
arrastra a la luz y
aumenta su longitud de
onda → Desplazamiento
al rojo



El desplazamiento al rojo es una medida de la escala del universo en el momento en el que se emitió la luz

$$\frac{\lambda_e}{a(t_e)} = \frac{\lambda_o}{a(t_0)}$$

$$a(t_e) = 1 / (1 + z)$$

Al introducir la métrica de FLRW en las ecs. de Einstein, se obtienen las ecs. de Friedmann:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$
$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

G = Constante de Newton
ρ = Densidad de energía
P = Presión
Λ = Cte. cosmológica

Se necesita especificar los tipos de materia energía que están presentes en el universo para resolver las ecuaciones

Ecuación de estado de fluidos isotrópicos ideales: $p=w\rho$

$$T_{\mu\nu} = \left(\rho + p/c^2 \right) u_{\mu} u_{\nu} + p g_{\mu\nu}$$

Tensor energía-momento para un fluido ideal

Además de las ecuaciones de Friedmann, la ecuación de continuidad

$$\dot{\rho} + 3\left(\rho + \frac{P}{c^2}\right)\frac{\dot{a}}{a} = 0$$

Dada la ecuación de estado, relaciona densidad con factor de escala

El universo está lleno de una mezcla de fluidos, con $p=w\rho$

- materia (ordinaria u oscura): $p=0$, $w=0$

- radiación: $p=\rho/3$, $w=1/3$

- Constante cosmológica: $p=-\rho$, $w=-1$

- Energía oscura $w=w(t)<-1/3$ (para expansión acelerada)

Para cada tipo de materia, la densidad cambia de una manera diferente con el factor de escala:

$$\rho \propto a^{-3(1+w)}$$

Materia: a^{-3}

Radiación: a^{-4}

Cte. Cosmológica: $ijij$ Constante!!!!

Distancias

La distancia comóvil a una fuente luz de desplazamiento al rojo z es:

$$r(z) = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_\Lambda + \Omega_k(1+z')^2 + \Omega_M(1+z')^3 + \Omega_r(1+z')^4}}$$

Para un universo euclídeo

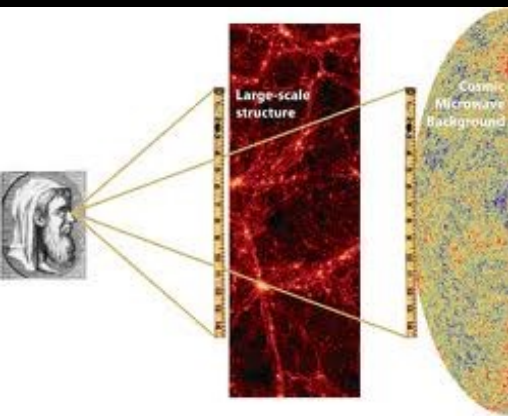
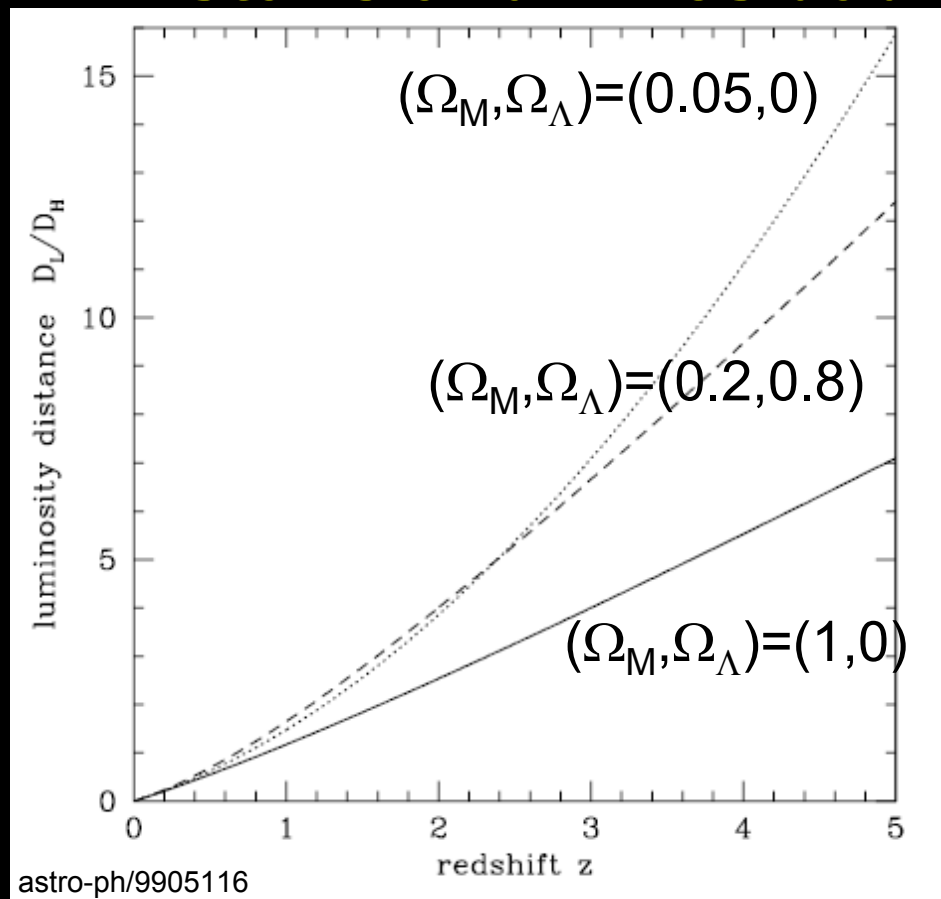
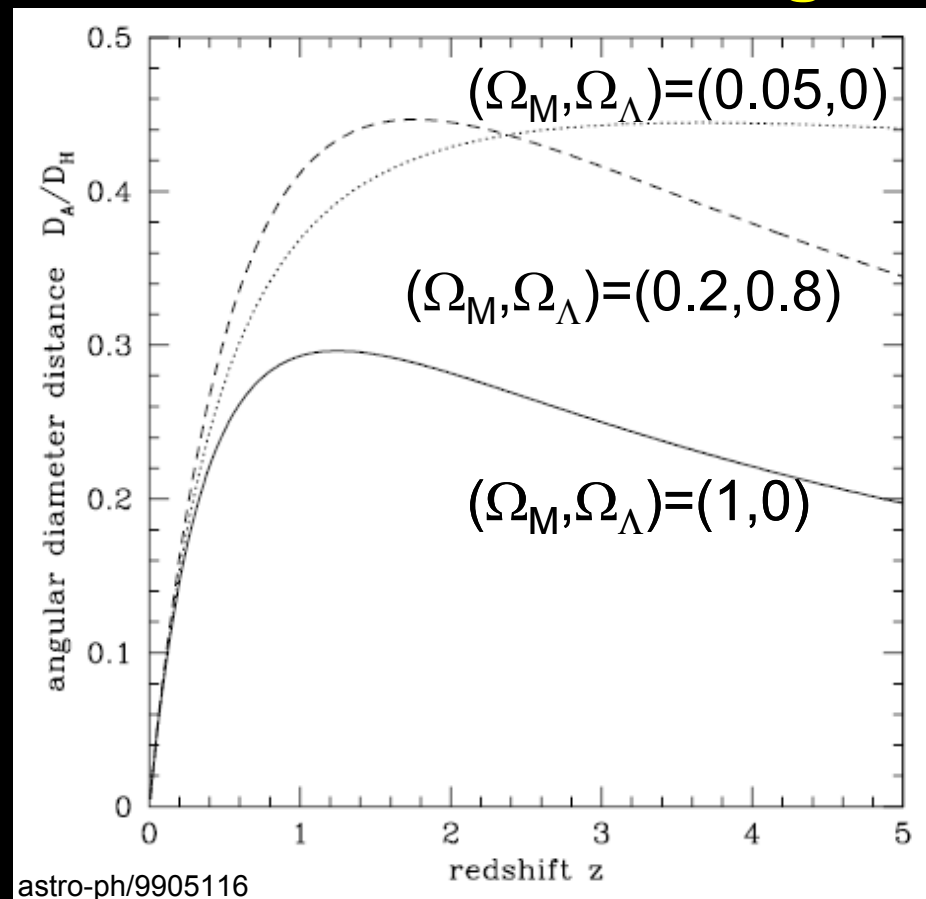
Distancia por luminosidad: $d_L = r(z) (1+z)$

Distancia diámetro angular: $d_A = r(z)/(1+z)$

Por tanto, a partir de una colección de reglas estándar o candelas estándar a diferentes desplazamientos al rojo, tendremos muchos valores de $r(z)$, de donde podemos obtener Ω_m , w , etc.

Distancia diámetro angular

Distancia luminosidad



**REGLAS
ESTÁNDAR**

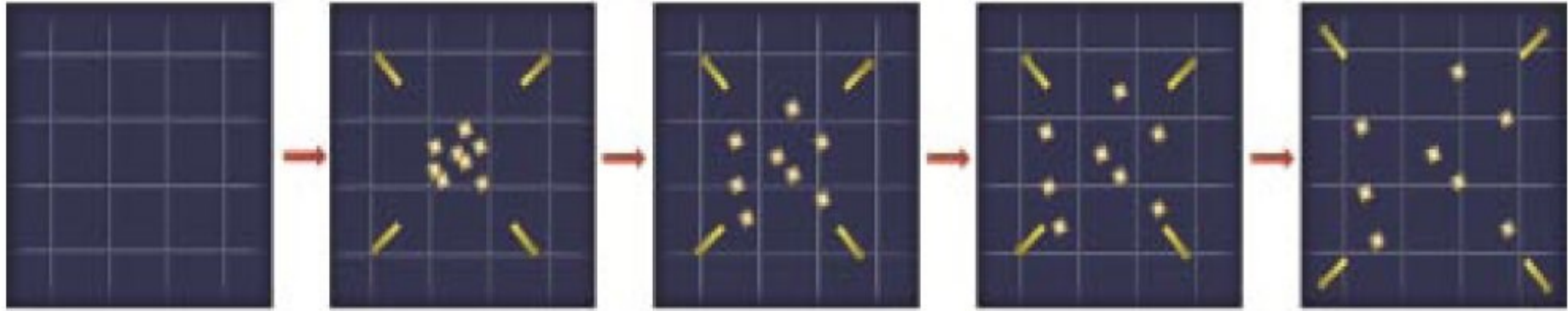


**CANDELAS
ESTÁNDAR**

WHAT KIND OF EXPLOSION WAS THE BIG BANG?

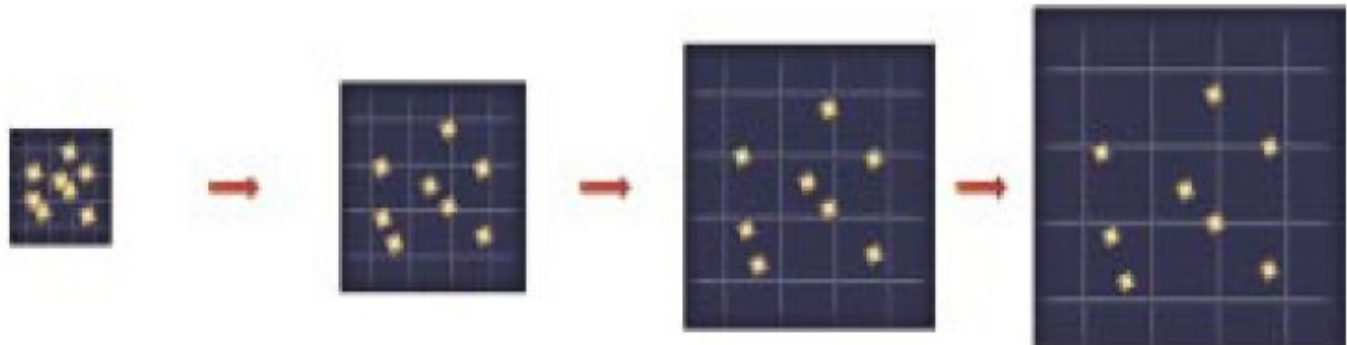
WRONG: The big bang was like a bomb going off at a certain location in previously empty space.

In this view, the universe came into existence when matter exploded out from some particular location. The pressure was highest at the center and lowest in the surrounding void; this pressure difference pushed material outward.



RIGHT: It was an explosion of space itself.

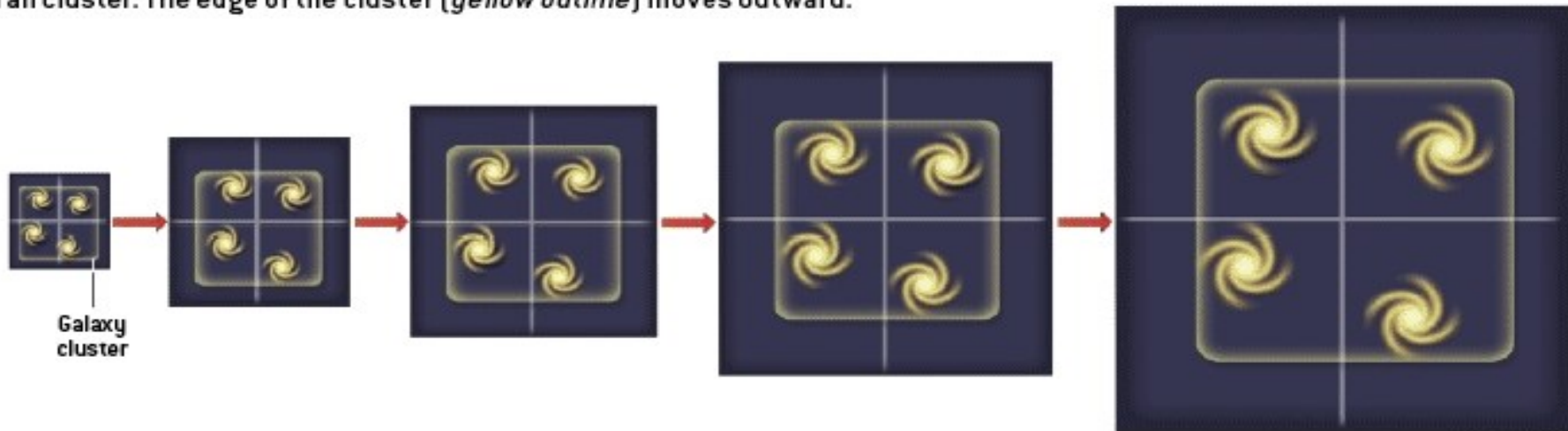
The space we inhabit is itself expanding. There was no center to this explosion; it happened everywhere. The density and pressure were the same everywhere, so there was no pressure difference to drive a conventional explosion.



DO OBJECTS INSIDE THE UNIVERSE EXPAND, TOO?

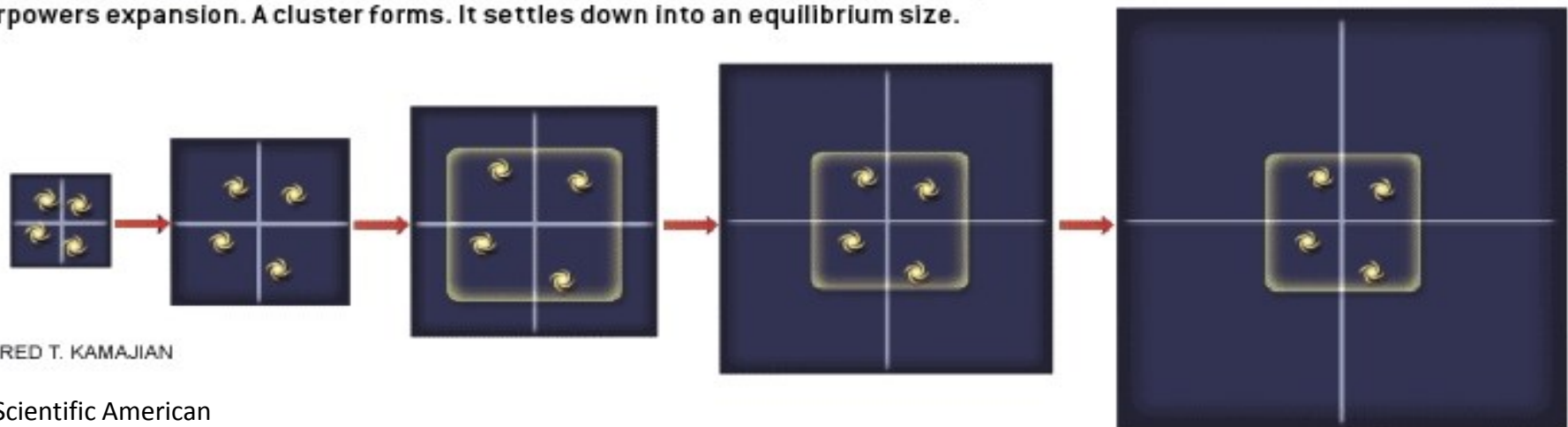
WRONG: Yes. Expansion causes the universe and everything in it to grow.

Consider galaxies in a cluster. As the universe gets bigger, so do the galaxies and the overall cluster. The edge of the cluster (yellow outline) moves outward.



RIGHT: No. The universe grows, but coherent objects inside it do not.

Neighboring galaxies initially get pulled apart, but eventually their mutual gravity overpowers expansion. A cluster forms. It settles down into an equilibrium size.

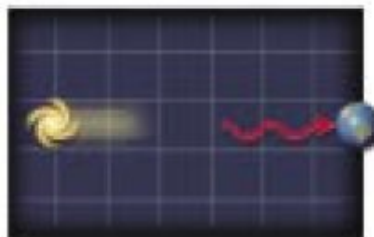
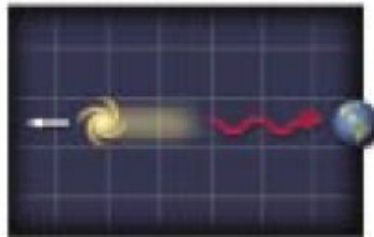
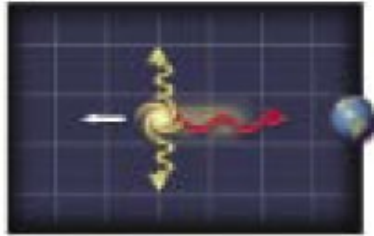


ALFRED T. KAMAJIAN

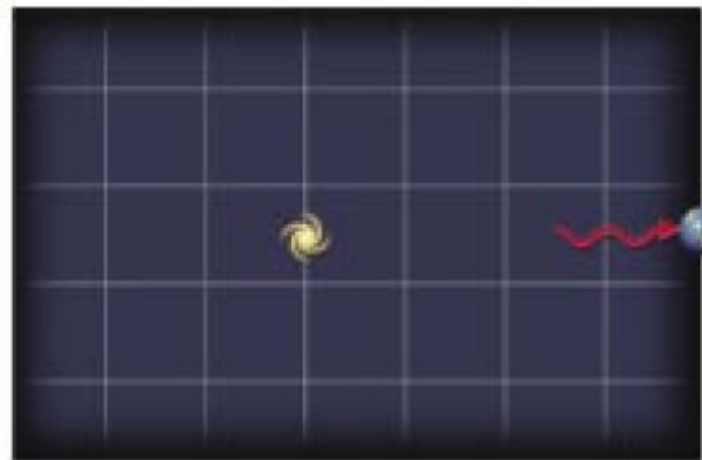
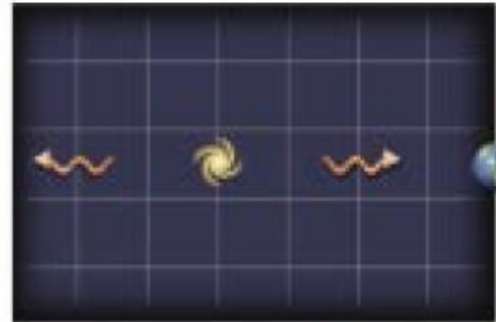
WHY IS THERE A COSMIC REDSHIFT?

WRONG: Because receding galaxies are moving through space and exhibit a Doppler shift.

In the Doppler effect, a galaxy's movement away from the observer stretches the light waves, making them redder (*top*). The wavelength of light then stays the same during its journey through space (*middle*). The observer detects the light, measures its Doppler redshift and computes the galaxy velocity (*bottom*).



RIGHT: Because expanding space stretches all light waves as they propagate.

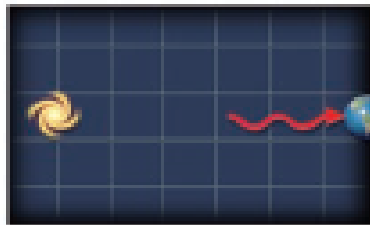
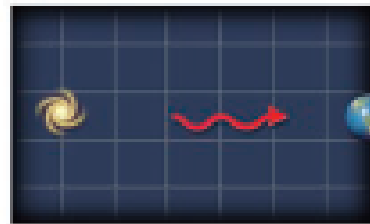
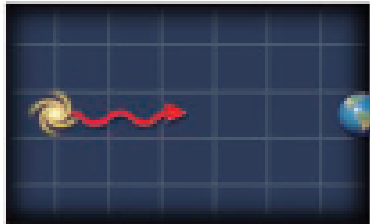


Galaxies hardly move through space, so they emit light with nearly the same wavelength in all directions (*top*). The wavelength gets longer during the journey, because space is expanding. Thus, the light gradually reddens (*middle* and *bottom*). The amount of redshift differs from what a Doppler shift would produce.

HOW LARGE IS THE OBSERVABLE UNIVERSE?

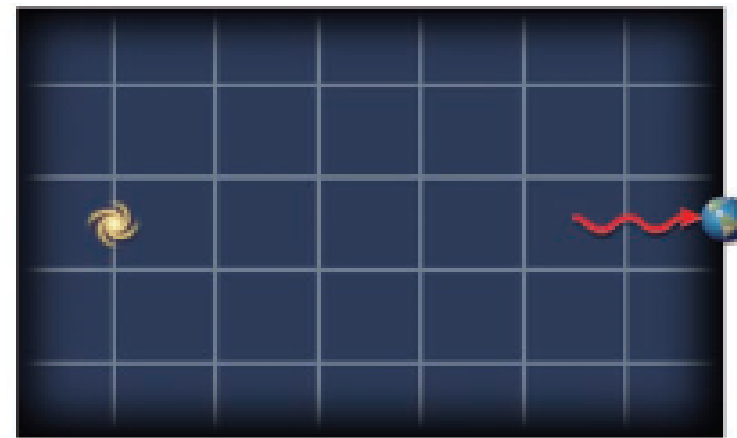
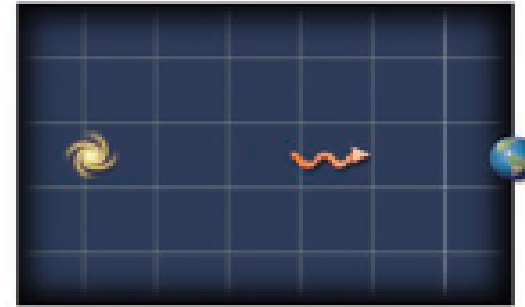
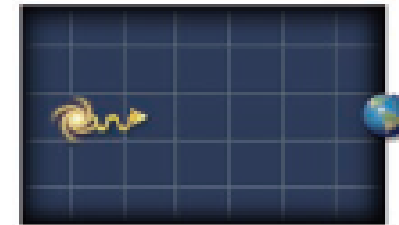
WRONG: The universe is 14 billion years old, so the radius of the observable part is 14 billion light-years.

Consider the most distant observable galaxy—one whose photons, emitted shortly after the big bang, are only now reaching us. A light-year is the distance photons travel in one year. So a photon from that galaxy has traveled 14 billion light-years.



From
Scientific
American

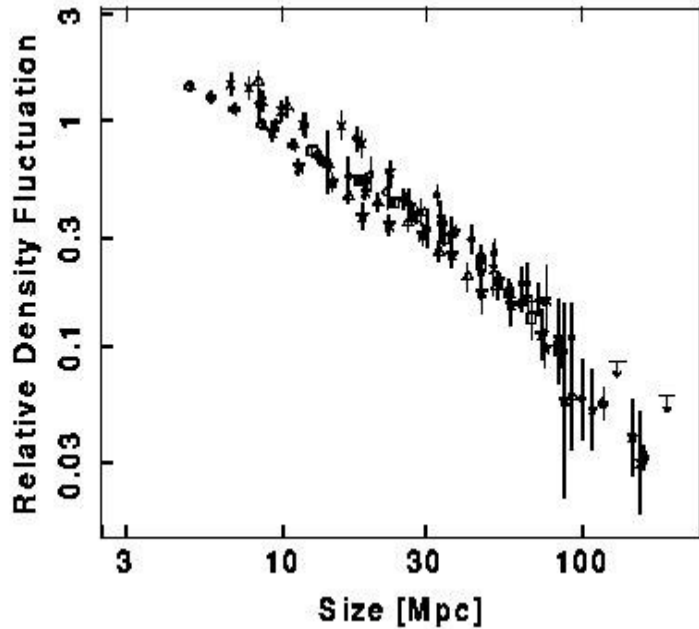
RIGHT: Because space is expanding, the observable part of our universe has a radius of more than 14 billion light-years.



As a photon travels, the space it traverses expands. By the time it reaches us, the total distance to the originating galaxy is larger than a simple calculation based on the travel time might imply—about three times as large.

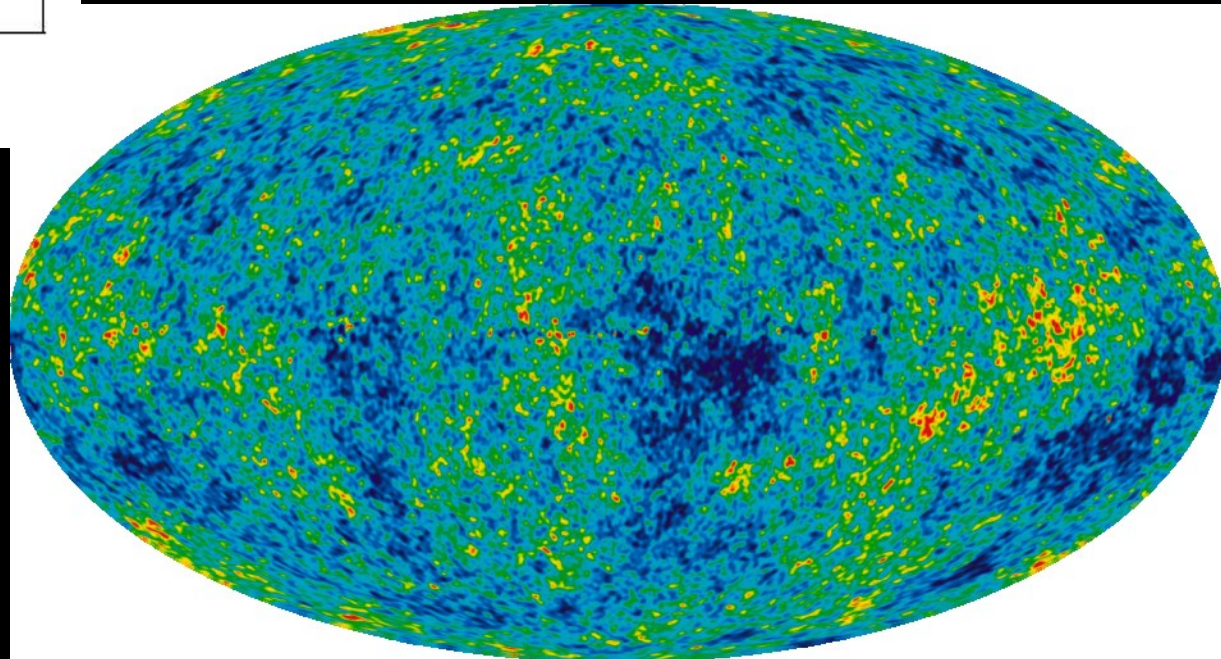
BASE OBSERVACIONAL

Verificación observacional del principio cosmológico



Homogeneidad: Difícil de observar. Comprobado que la distribución de galaxias se hace uniforme con una precisión de unos pocos por ciento a partir de distancias del orden de 100 Mpc

Isotropía: Comprobada con una precisión de 1 parte en 10^5 gracias a la radiación de fondo

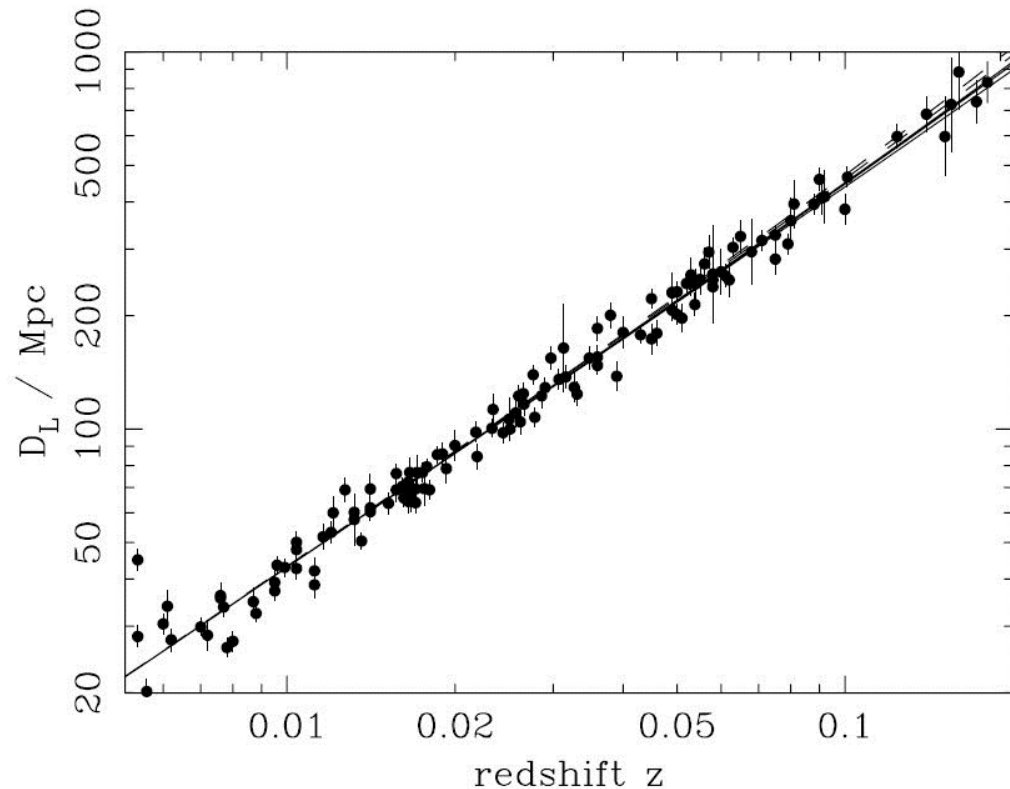
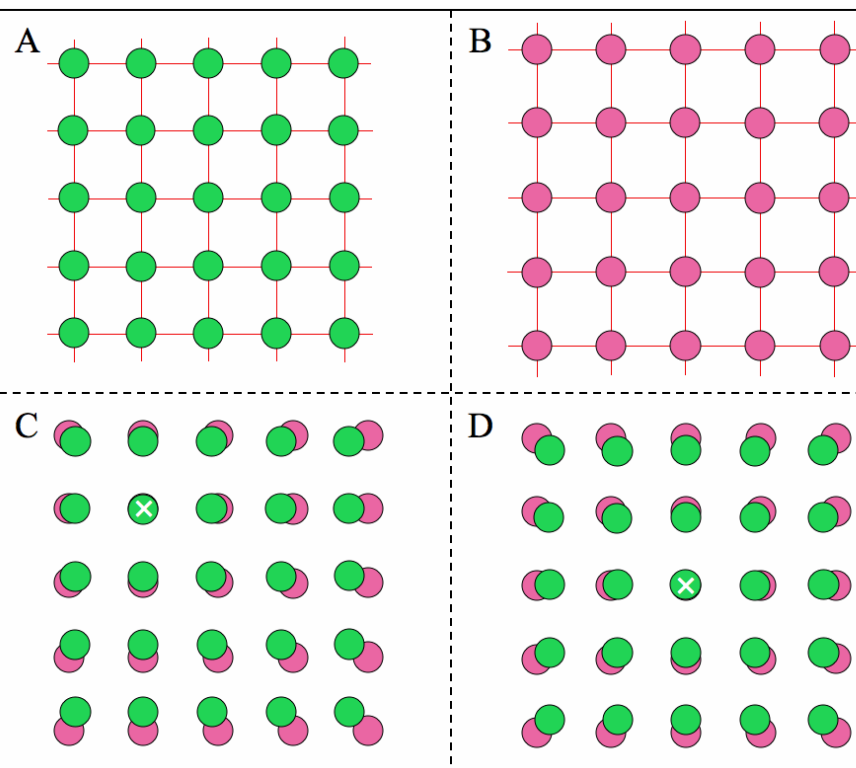


Expansión: La ley de Hubble

Las galaxias se alejan de nosotros con una velocidad proporcional a la distancia, el universo se expande de acuerdo con el principio cosmológico

$$cz \sim v = H d = \frac{\dot{a}}{a} d$$

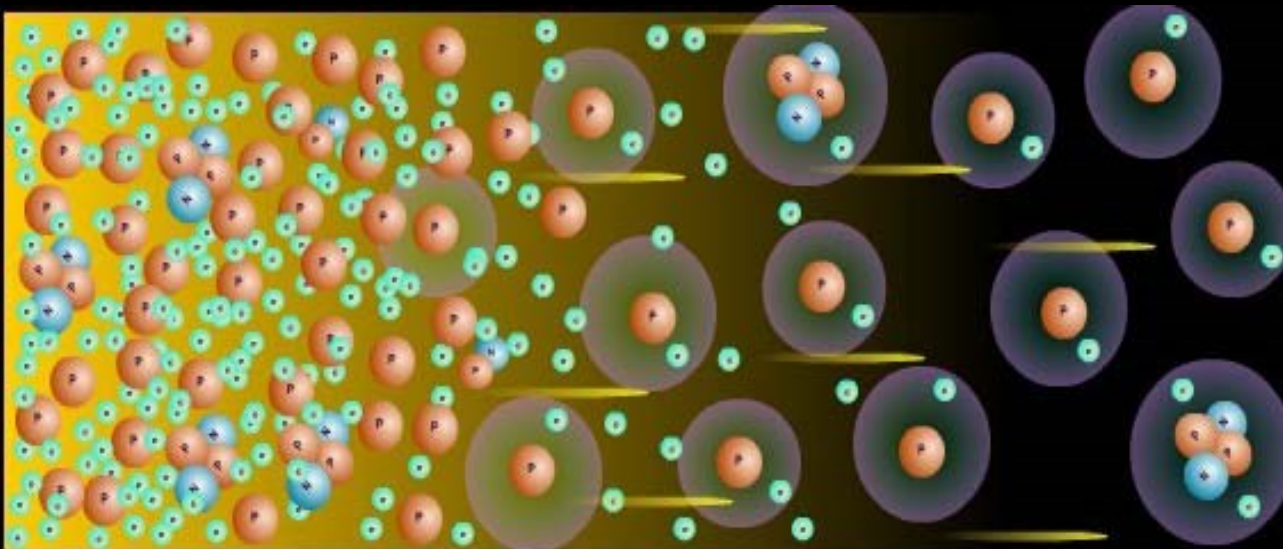
H = Hubble constant (km/s/Mpc), v = velocidad, d = distancia



LA RADIACIÓN DE FONDO DE MICROONDAS

Una de las predicciones decisivas del Big Bang

Procede del desacoplo materia-radiación, cuando el universo tenía **380000 años**. Es decir, de hace unos...**¡¡¡13800 millones de años!!!** (Si el universo fuera una persona de **80 años**, la CMB sería una foto de cuando tenía **¡13 meses!**)

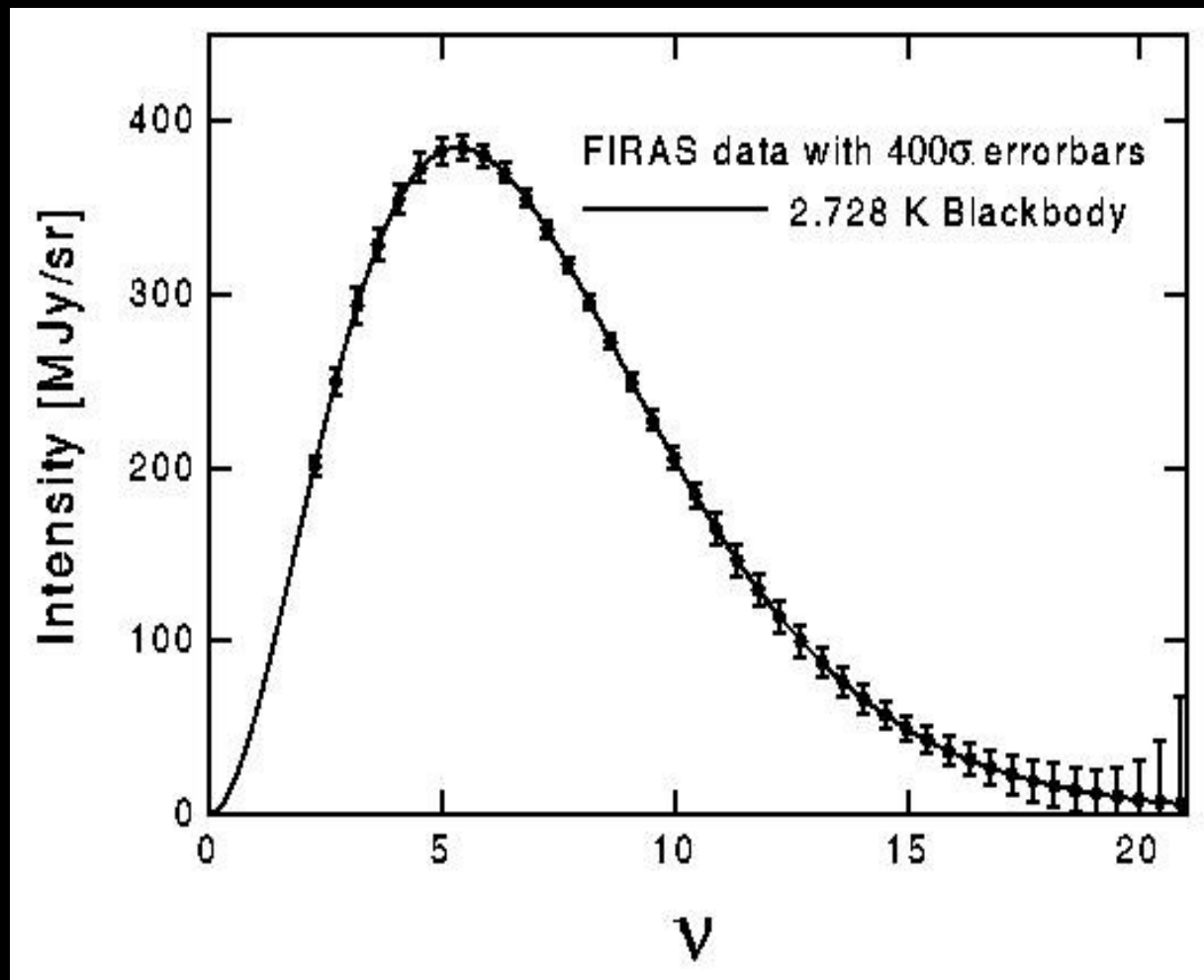


Se confirmó que no era completamente uniforme en 1992. Sus pequeñas anisotropías son la huella del origen de todas las estructuras que vemos ahora (cúmulos, galaxias, estrellas,...)

La radiación de fondo de microondas (CMB)

Se produjo a una temperatura de 3000 K, cuando el universo era suficientemente frío como para que se formasen átomos, y se ha ido enfriando desde entonces debido a la expansión

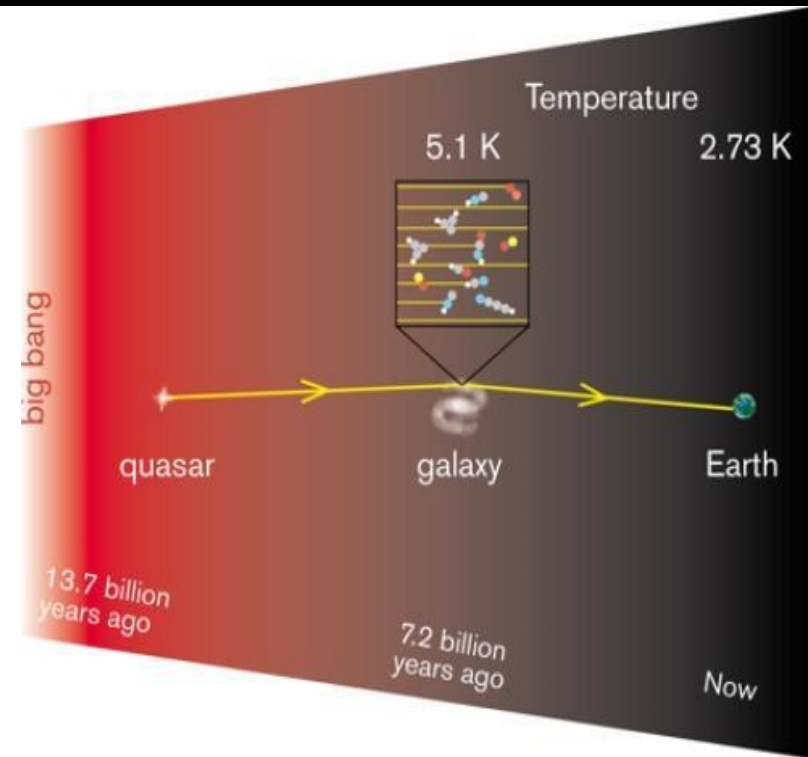
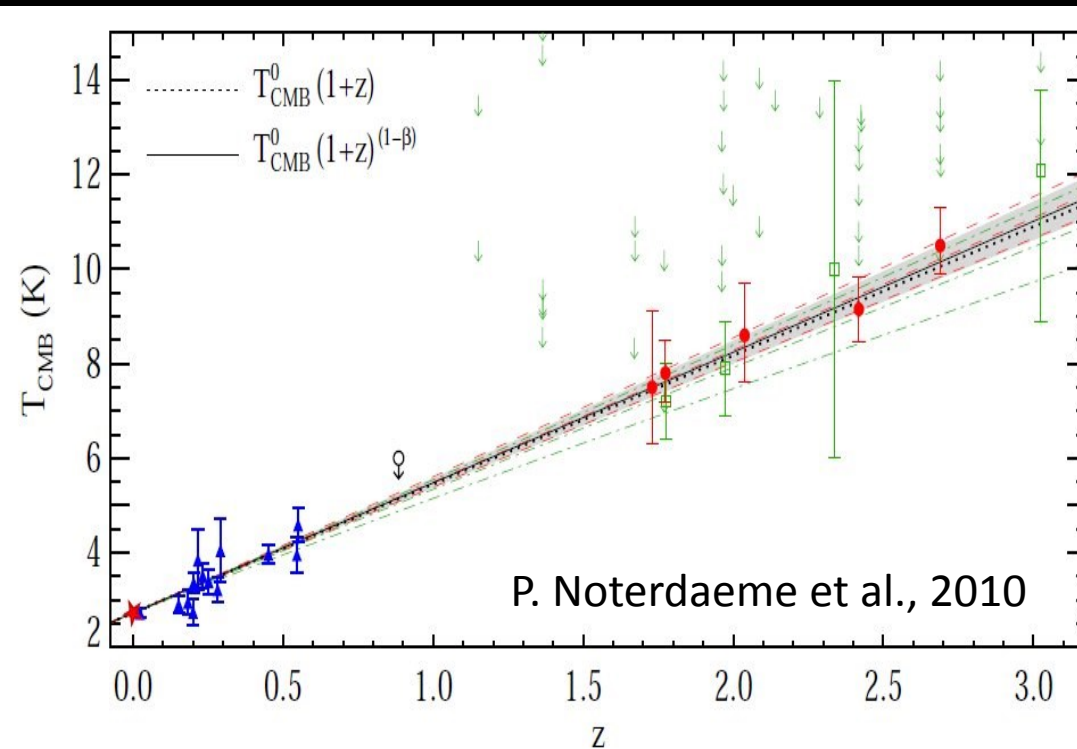
Espectro de cuerpo negro a 2.72548 ± 0.00057 K



La radiación de fondo de microondas (CMB)

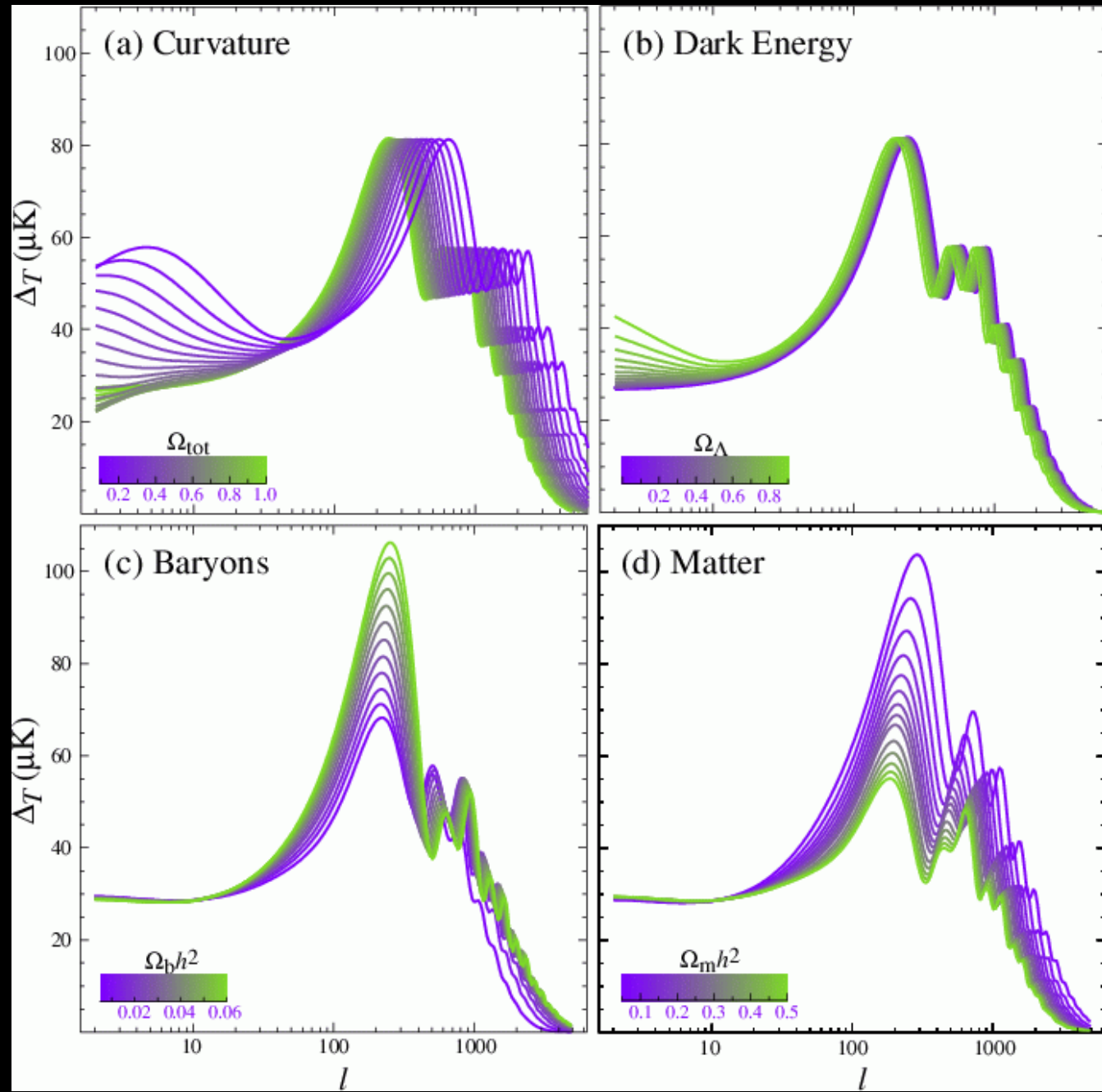
El universo era más caliente en el pasado

El ritmo de enfriamiento es exactamente el predicho por la teoría del Big Bang

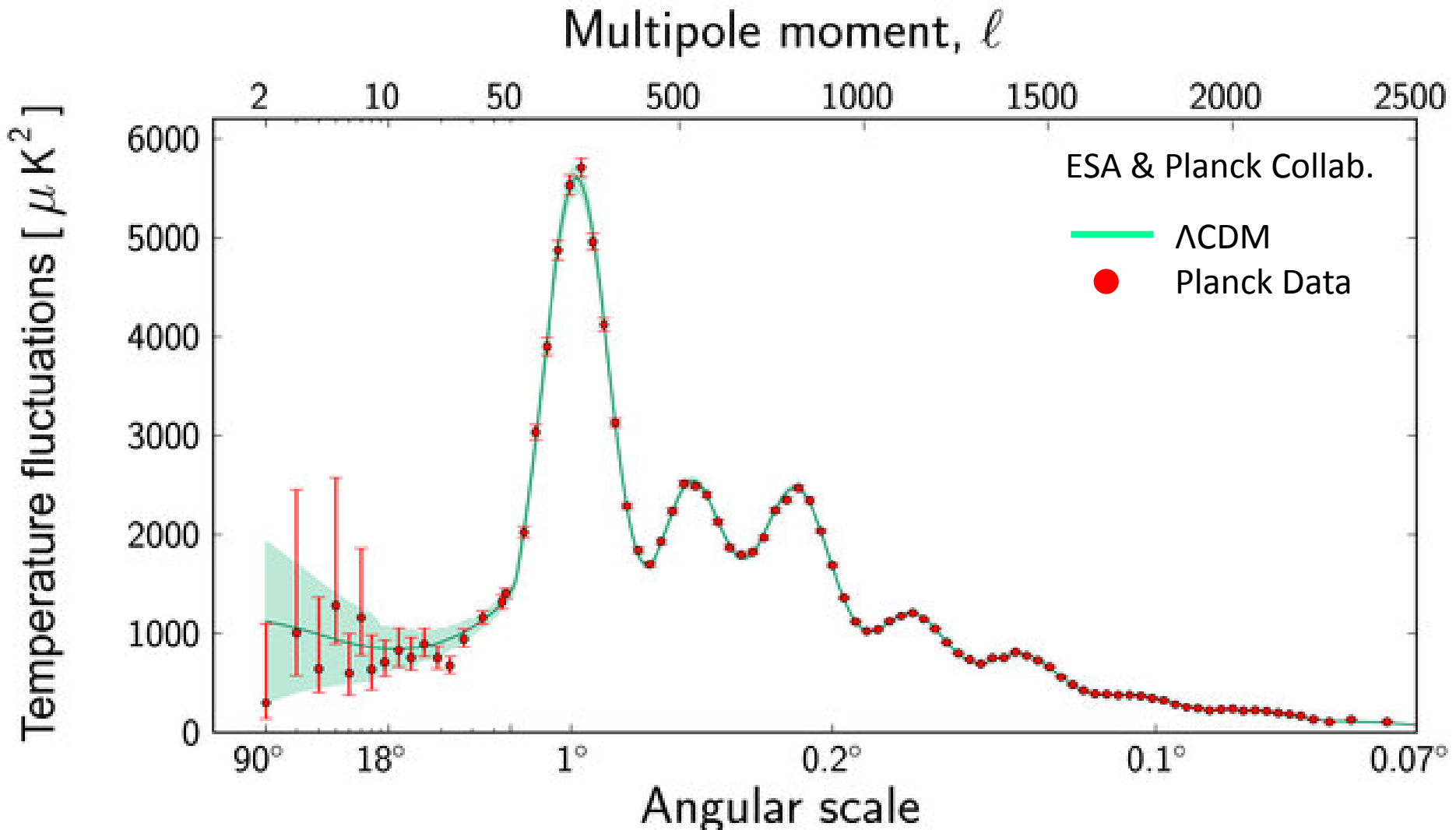


La radiación de fondo de microondas (CMB)

El valor de los parámetros cosmológicos cambia la forma del espectro de potencias de la CMB



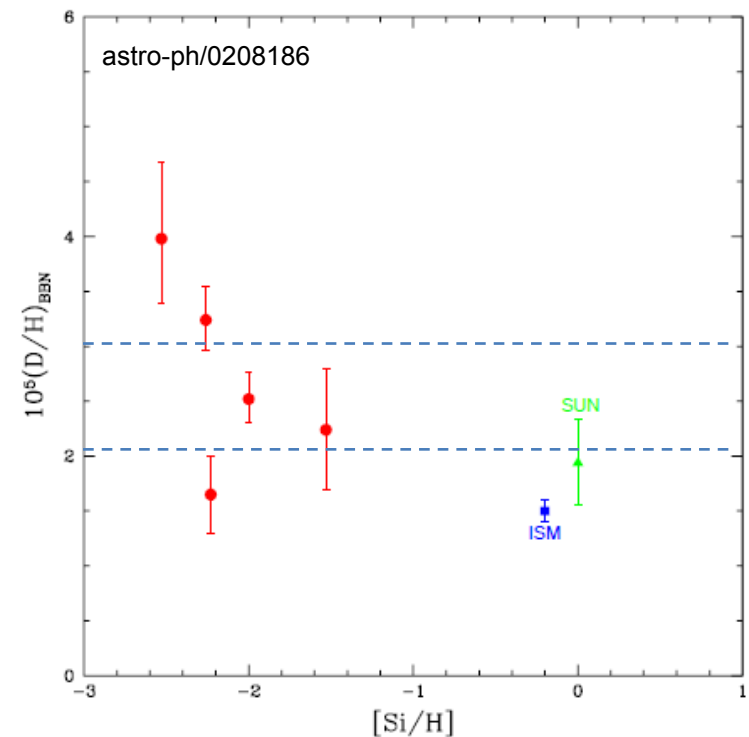
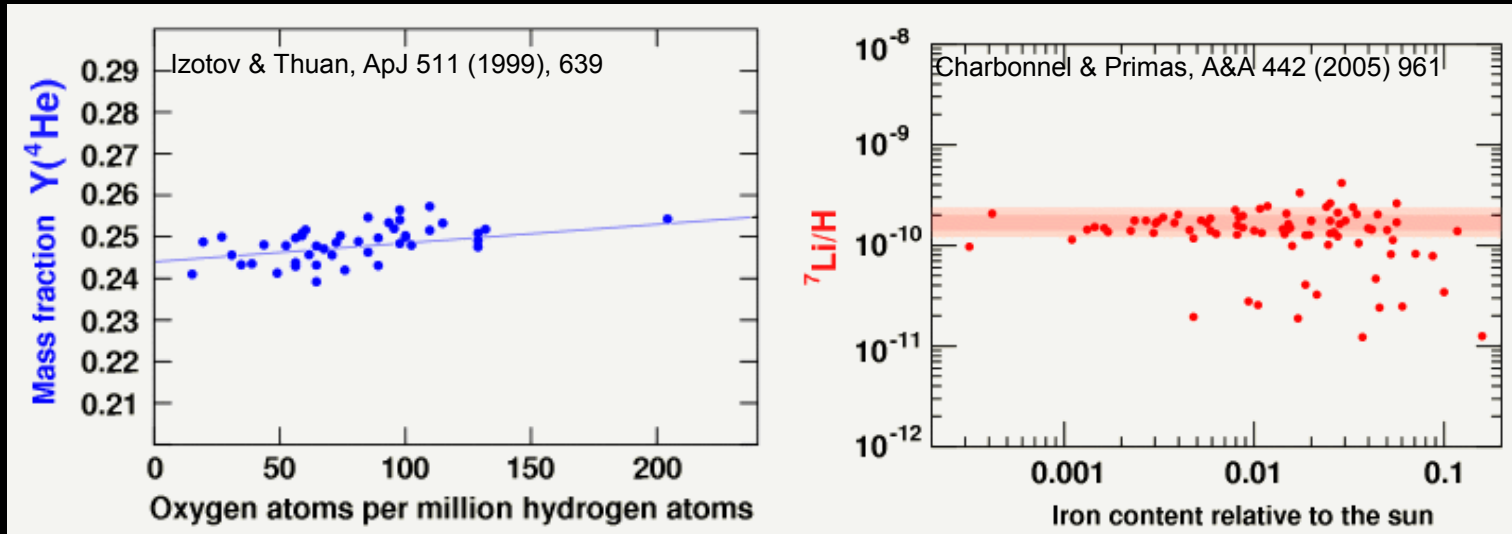
La radiación de fondo de microondas (CMB)



El acuerdo entre ΛCDM y los datos es extraordinario
La geometría del universo es EUCLÍDEA

La nucleosíntesis primordial

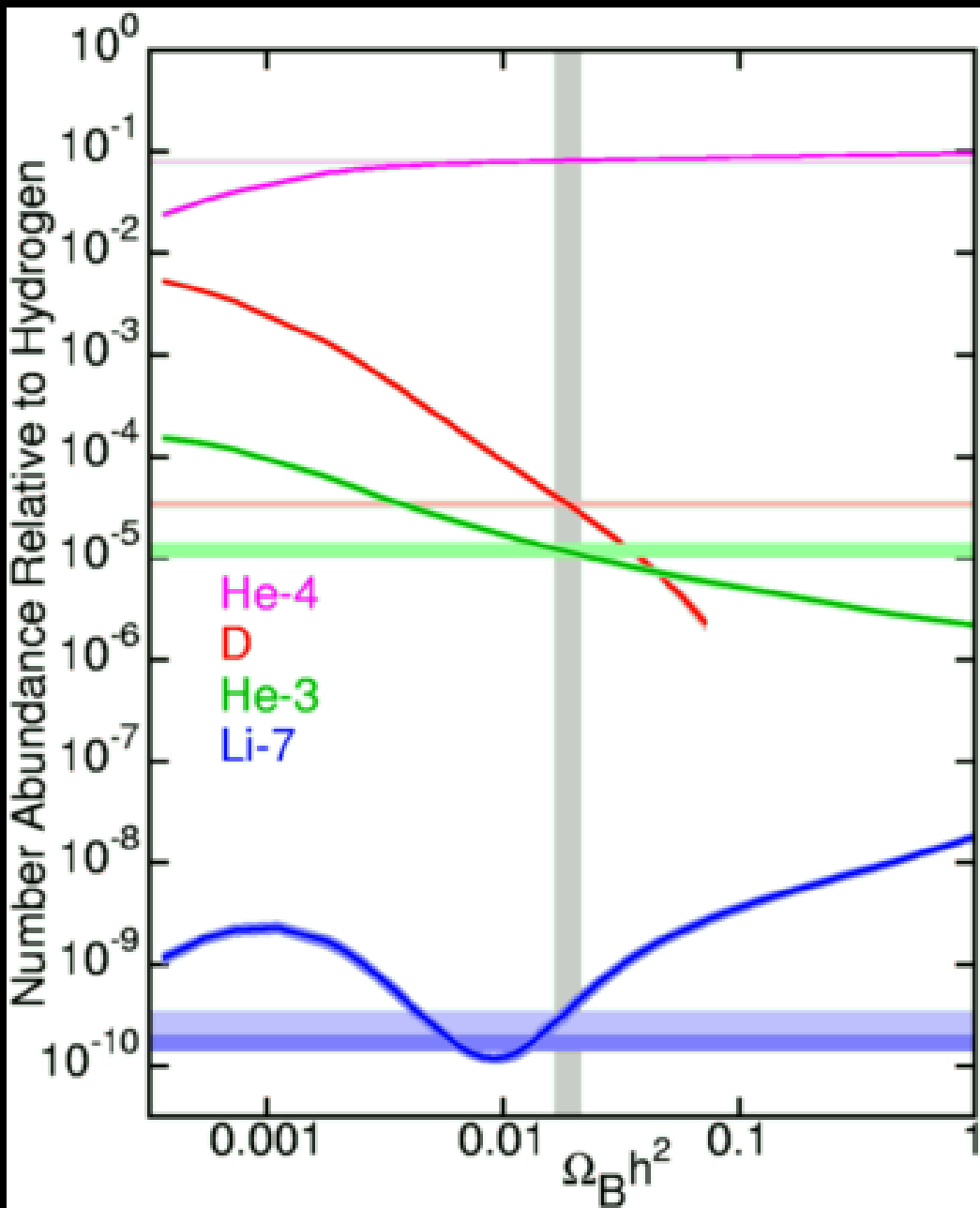
Los núcleos atómicos más ligeros se formaron en el primer cuarto de hora del (desde ~3 minutos a ~20 minutos tras el BB)



Medir sus abundancias:

- D → Líneas de absorción en QSOs
- ^4He → Regiones HII extragalácticas de baja metalicidad (O/H).
- ^7Li → Estrellas enanas del halo galáctico. Errores sistemáticos grandes.

Nucleosíntesis: Materia oscura no bariónica



Las abundancias miden el número de bariones (protones y neutrones, es decir, materia normal)

Es una física bien conocida (átomos)

Número de fotones por barión de la CMB. ¡En perfecto acuerdo con las abundancias!

¡HAY MATERIA OSCURA NO BARIÓNICA!

Las supernovas Ia: energía oscura

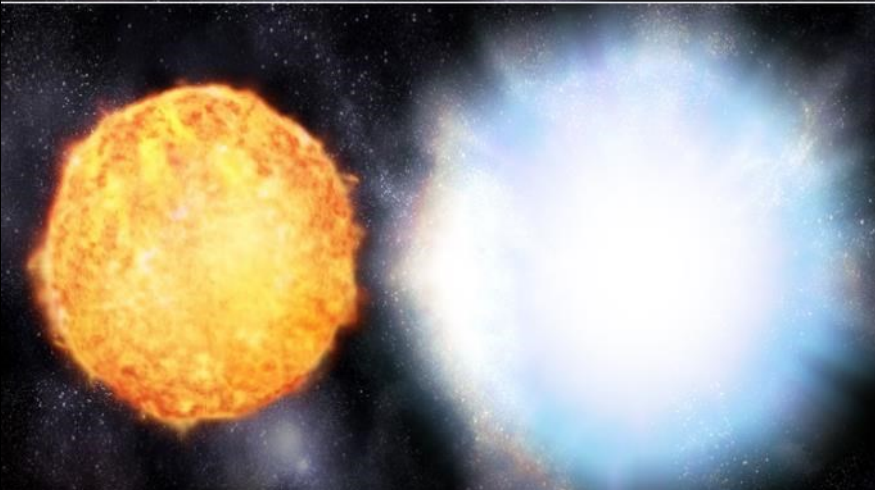
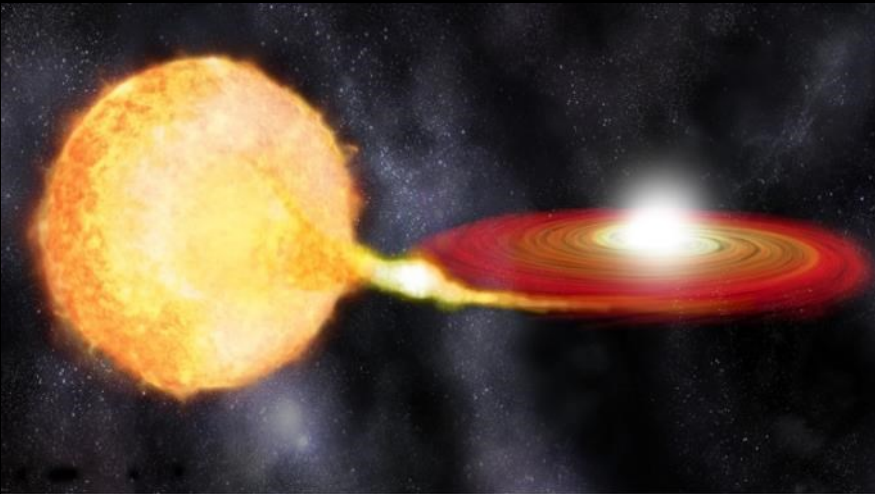
Las supernovas son el resultado de la muerte violenta de estrellas muy masivas. Son extraordinariamente brillantes, por eso se pueden ver a enormes distancias

S_nIa

En sistemas binarios gigante roja-enana blanca

La enana blanca obtiene masa a costa de la gigante

Al llegar al límite de Chandrashekar explota. Todas son iguales, explotan al alcanzar ese límite (amnesia estelar)



SN 1998aq

NGC 3982
A. Riess (STScI)

SN1998aq

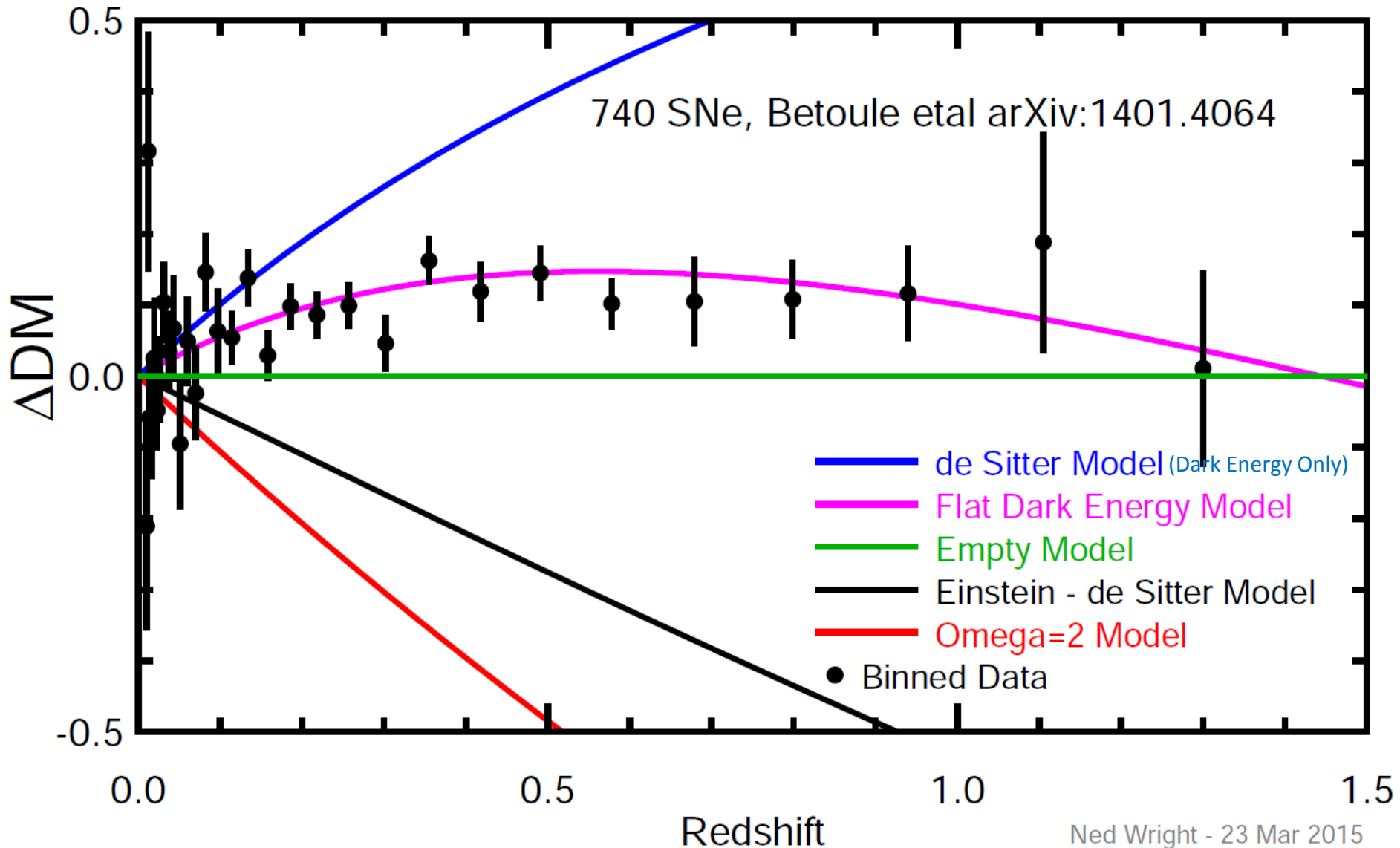
Ground

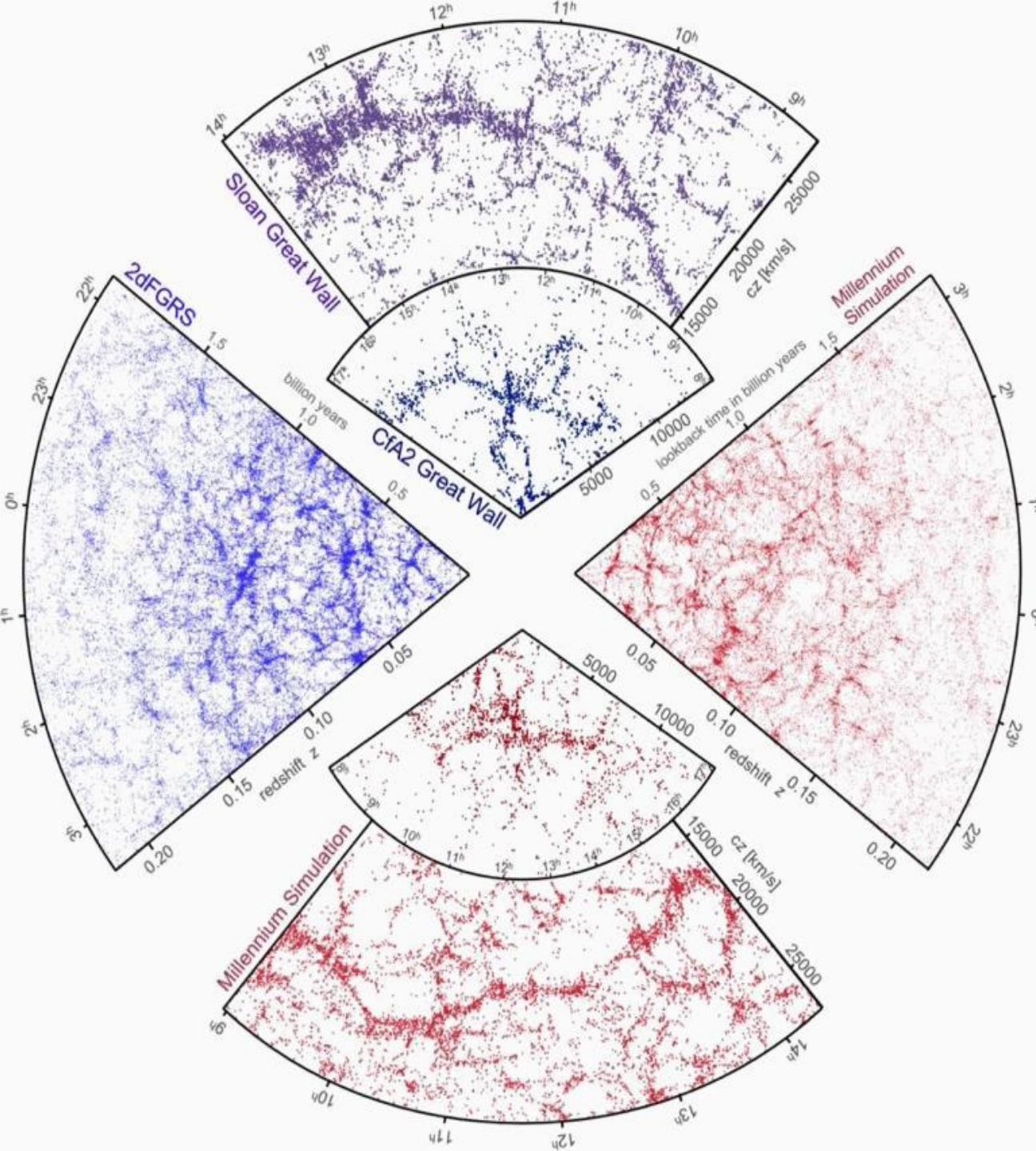
HST WFPC2



Las supernovas Ia: energía oscura

LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO SE ACELERA: ¡¡¡ENERGÍA OSCURA!!!





La estructura a gran escala (LSS) del universo

El Big Bang con un $\sim 70\%$ de energía oscura y un $\sim 30\%$ de materia total (normal y oscura), es capaz de describir la formación de estructuras en el universo

El Big Bang hoy: Λ CDM

No es especulación. Basado en una enorme cantidad de observaciones precisas

CMB $\rightarrow \Omega_{\text{TOT}} \sim 1$ (El Universo es PLANO)

BBN+CMB $\rightarrow \Omega_{\text{B}} \sim 0.05 \rightarrow$ La mayor parte del universo es no-bariónico

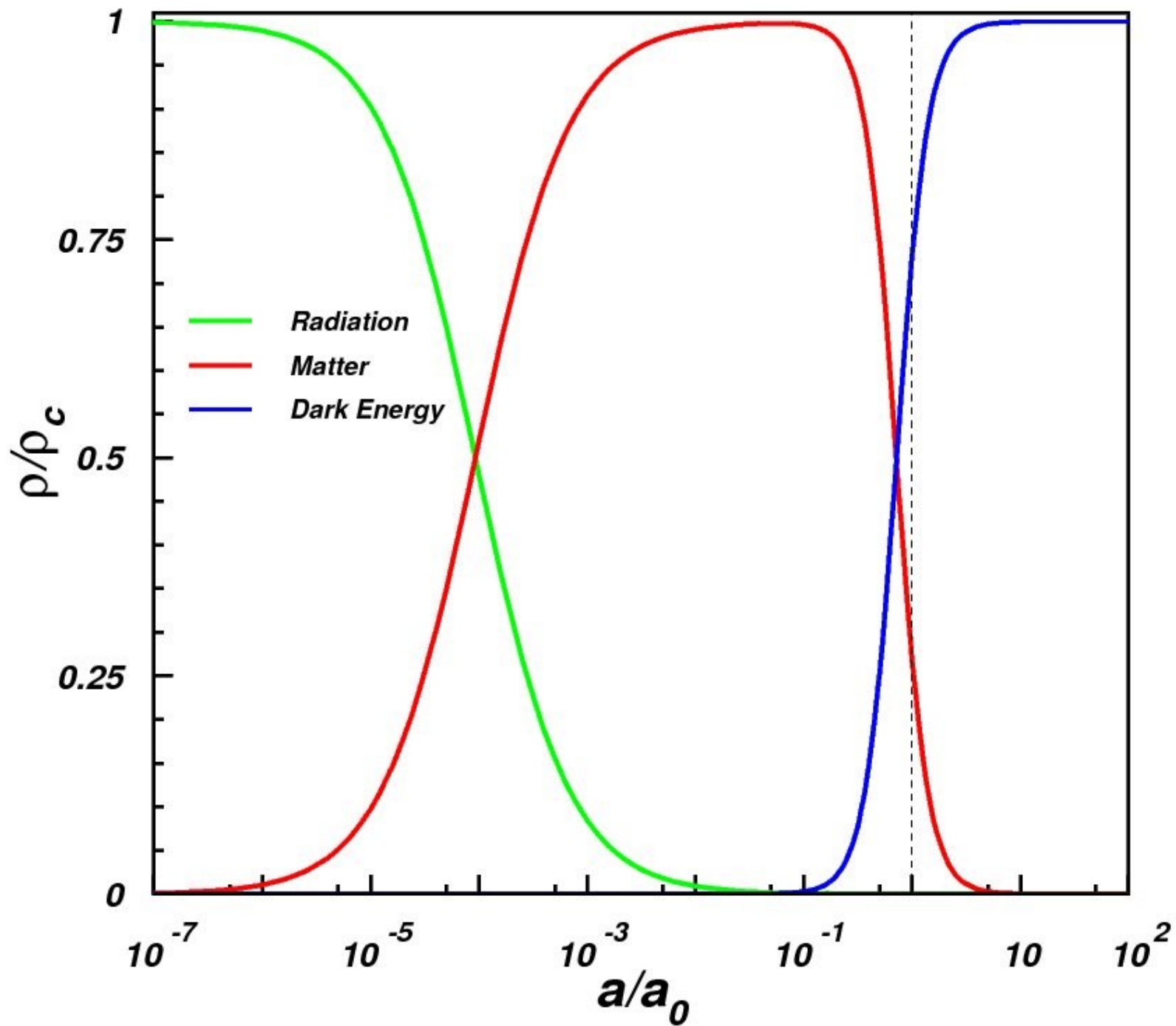
LSS+DINÁMICA \rightarrow ¡MATERIA OSCURA! ; $\Omega_{\text{DM}} \sim 0.27$

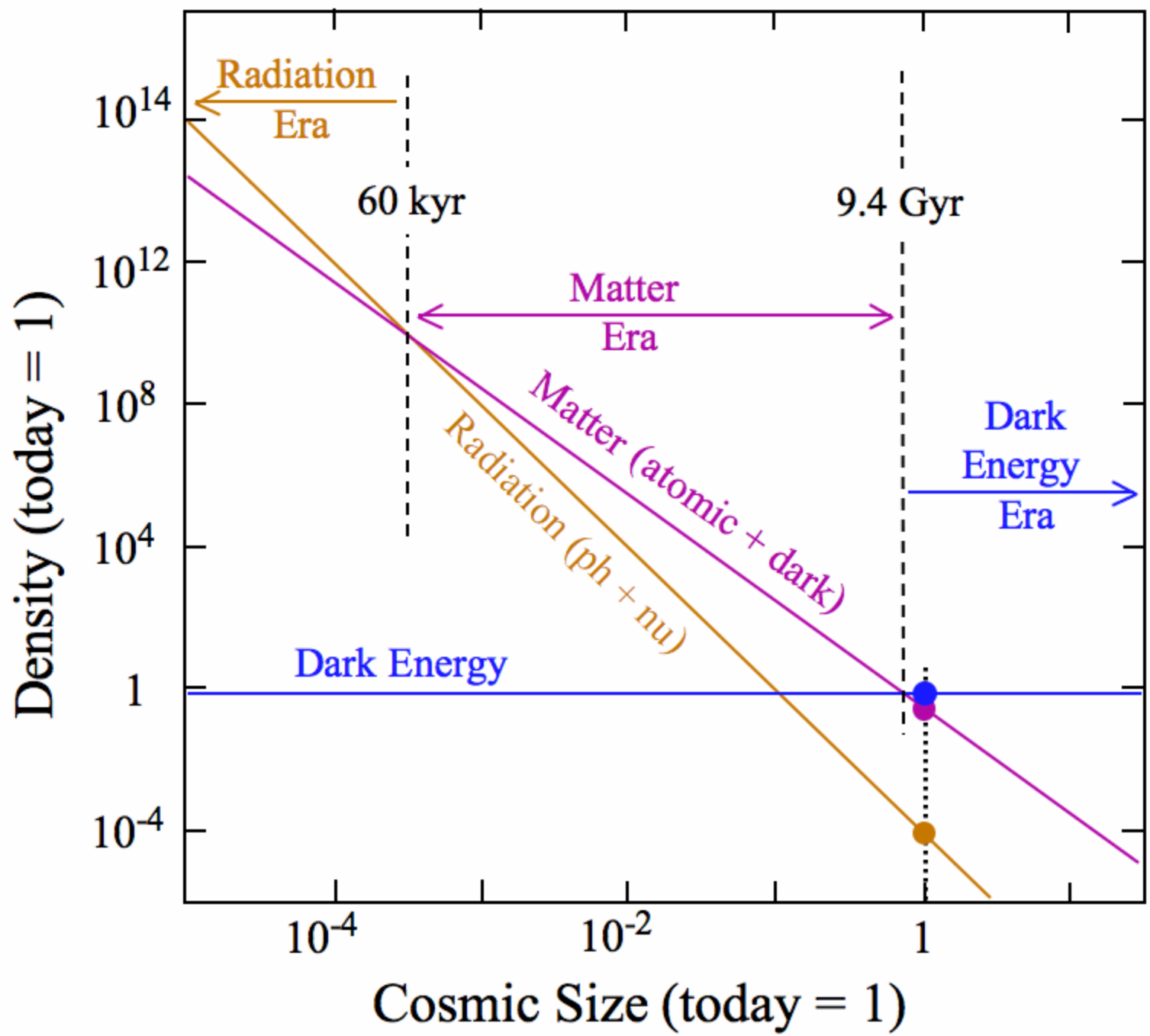
Supernovae Ia+LSS+CMB \rightarrow ¡ENERGÍA OSCURA! ; $\Omega_{\text{DE}} \sim 0.68$

- Homogeneidad a gran escala
- Ley de Hubble
- Abundancias de elementos ligeros
- Existencia de la CMB
- Fluctuaciones de la CMB
- LSS
- Edades de las estrellas
- Evolución de las galaxias
- Dilatación temporal del brillo de SN
- Temperatura vs redshift (Tolman test)
- Efecto Sunyaev-Zel'dovich
- Efecto Sachs-Wolf integrado
- Galaxias (rotación/dispersión)
- Energía oscura (expansión acelerada)
- Lentes gravitacionales (débiles/fuertes)
- Consistencia de todas las observaciones

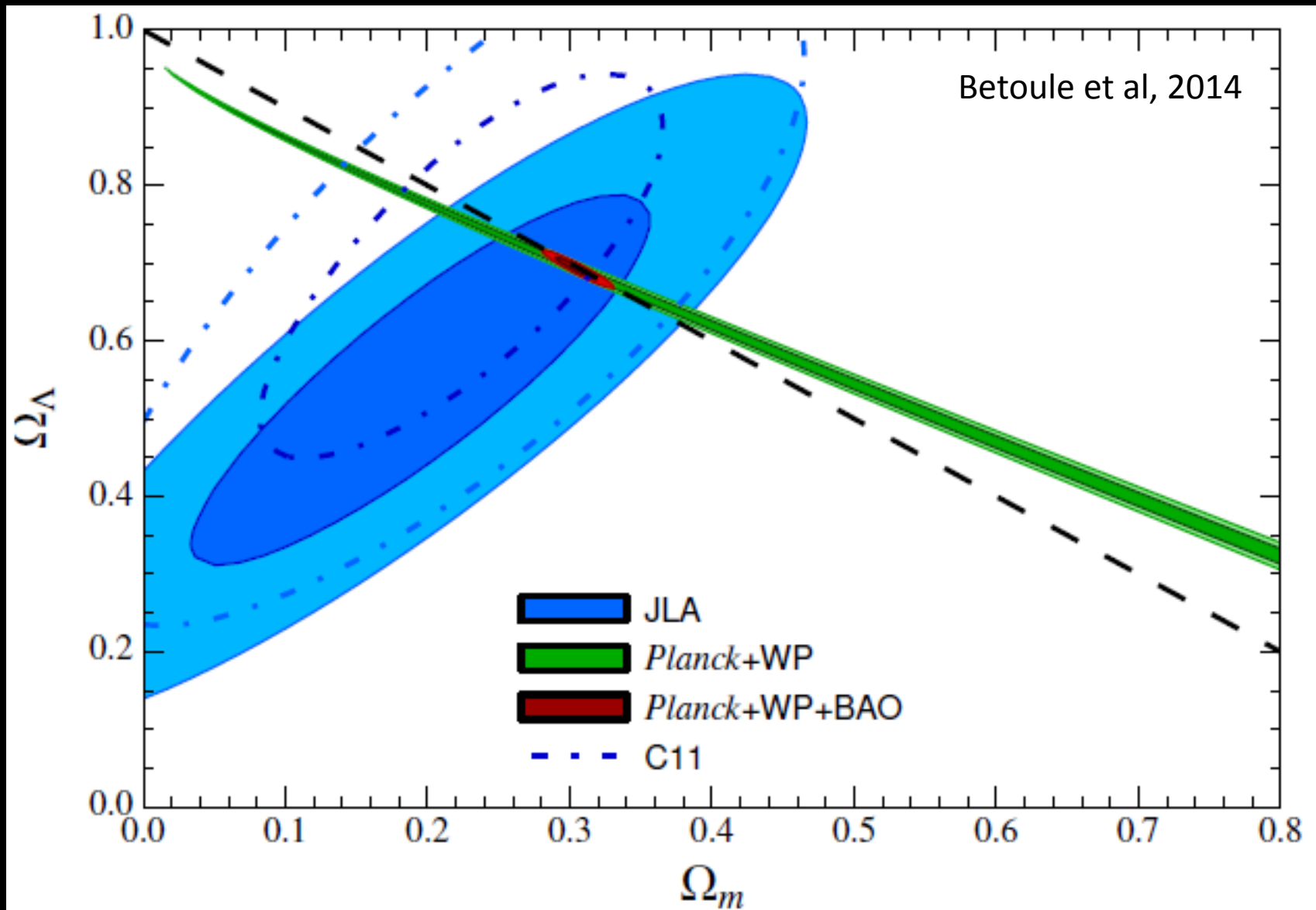
Historia del universo

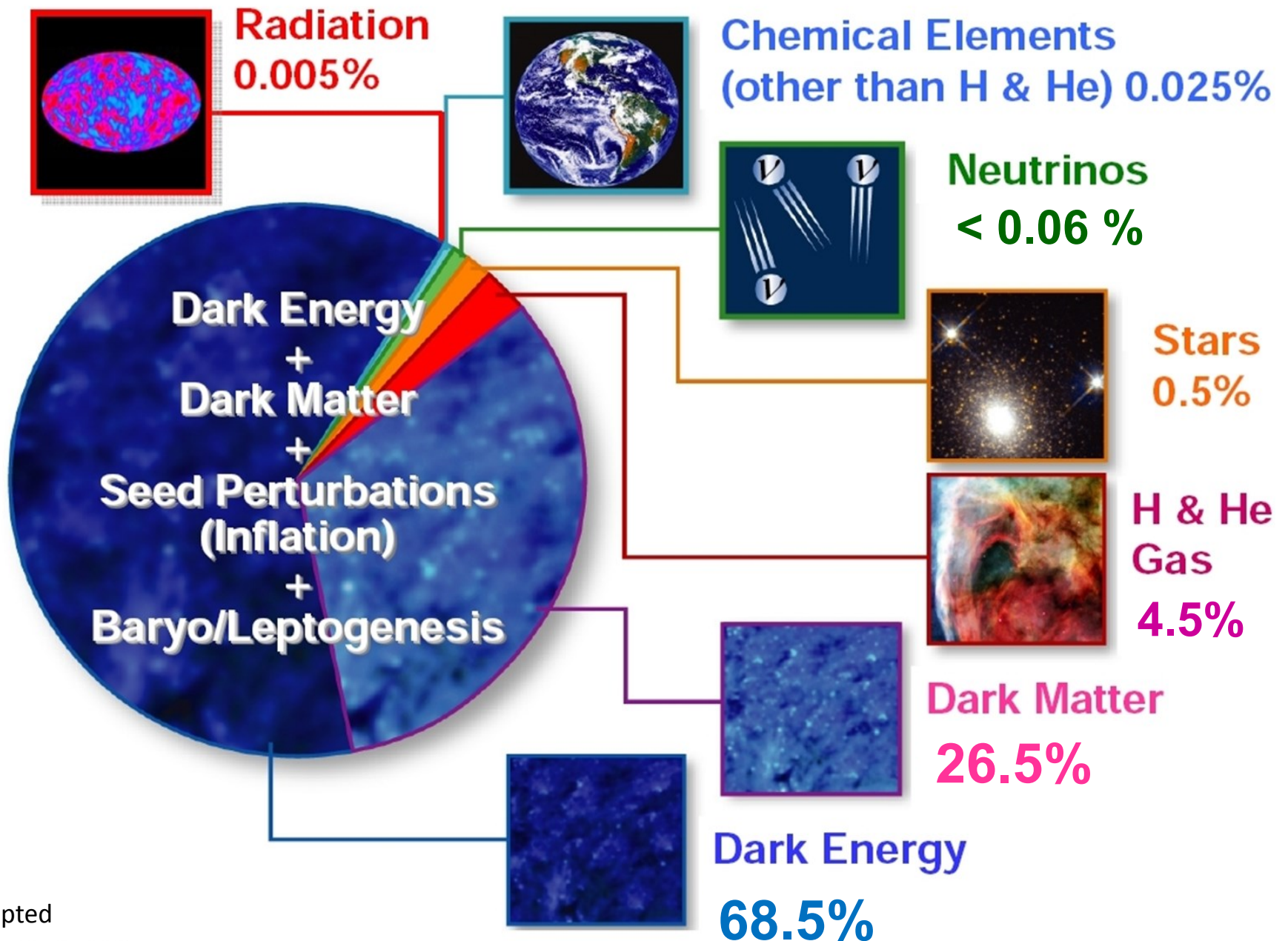
Era	Fenómenos físicos	t	z	T	Radio
Planck	Gravedad cuántica	$<10^{-43}$ s			
Inflación	Inflación, bariogénesis				
Radiación	Transición de fase EW	$\sim 10^{-12}$ s	10^{15}	100 GeV	5×10^{-5} ly (asteroides)
	Transición de fase QCD	$\sim 10^{-6}$ s	10^{12}	150 MeV	0.04 ly
	Desacoplo de neutrinos	1 s	6×10^9	1 MeV	8 ly (Sirio)
	Aniquilación e+ e-	6 s	2×10^9	500 keV	23 lyr
	BBN	3 min	4×10^8	100 keV	115 lyr
	Igualdad materia-rad.	60000 yr	3200	0.75 keV	15 Mlyr
Materia	Recombinación	260 kyr	1400	0.33 eV	33 Mlyr
	Desacoplo de la CMB	380 kyr	1100	0.25 eV	42 Mlyr
	Reionización	~ 250 Myr	~ 20	~ 5 meV	3 Glyr
	Igualdad materia-en. oscura	9 Gyr	0.4	0.33 meV	33 Gly
Energía oscura	Hoy	13.8 Gyr	0	0.24 meV	46 Gyr





La existencia de la energía oscura y de la materia oscura está comprobada. Los esfuerzos actuales se centran en entender su naturaleza





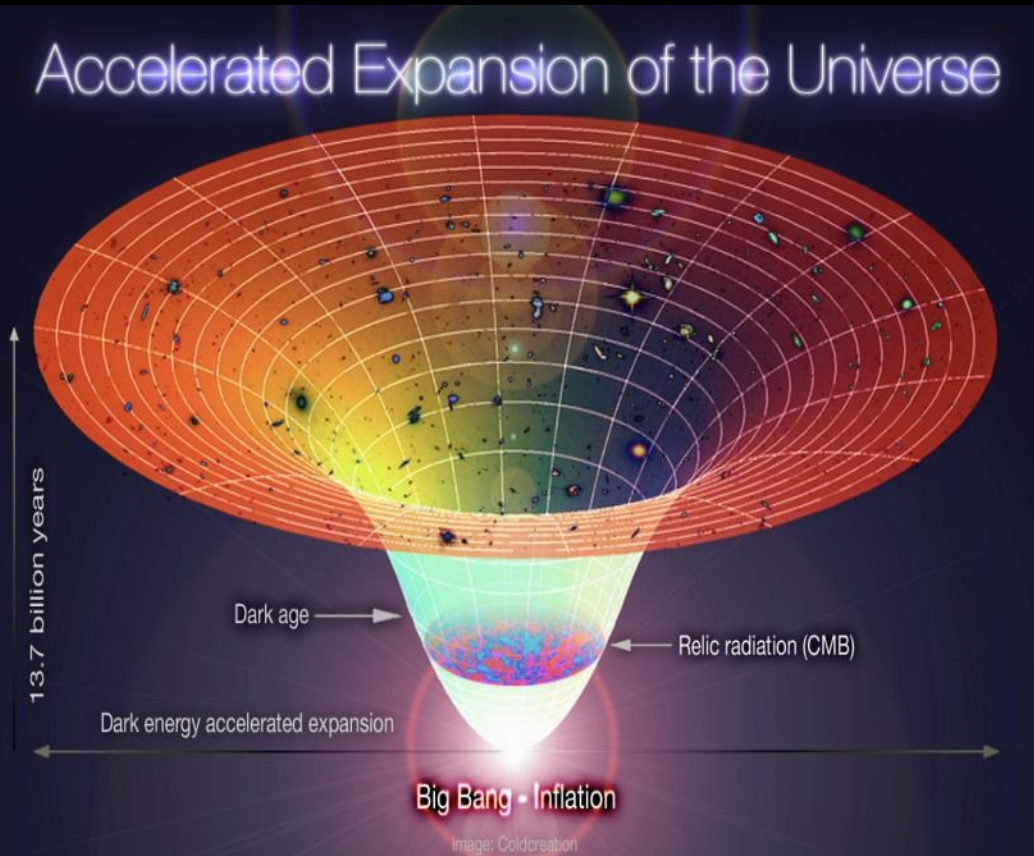
Adapted
From Rocky Kolb

El Big Bang hoy: Λ CDM

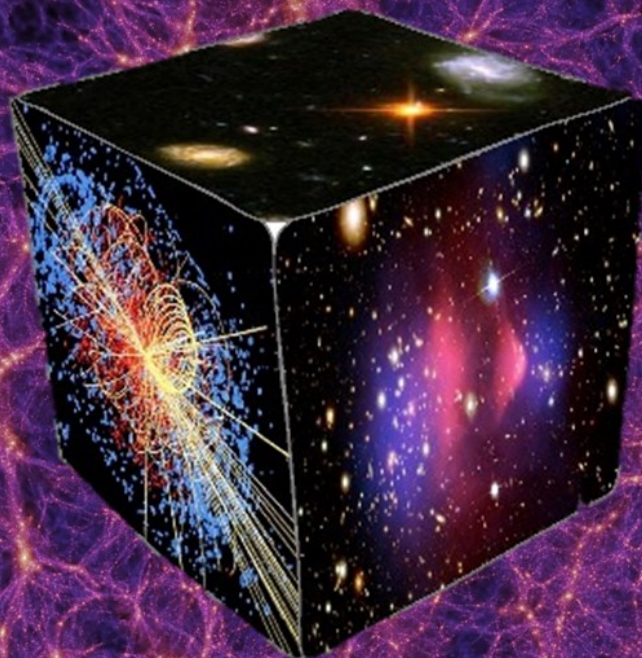
La teoría del Big Bang es una excelente descripción del universo observado

El 95% del contenido del universo es de naturaleza desconocida

La cosmología requiere física más allá del Modelo Estándar de las partículas



MATERIA OSCURA



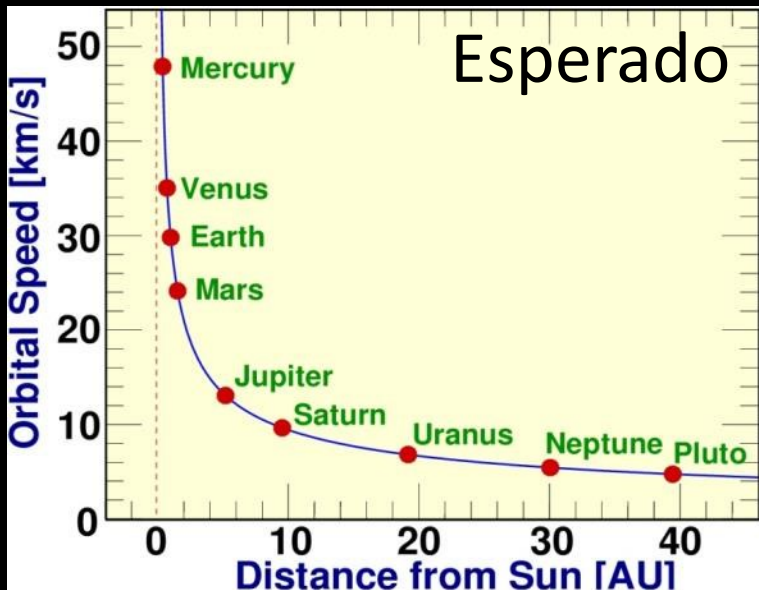
Evidencia Observacional

La existencia de la materia oscura se deduce de muchas observaciones diferentes

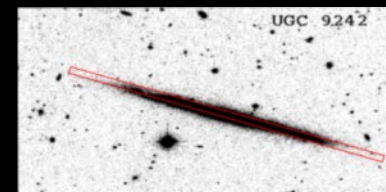
La primera evidencia se obtuvo en los años 30, y desde entonces no ha hecho más que crecer. Algunas de las principales medidas que muestran la existencia de la materia oscura son:

- **Las curvas de rotación de las galaxias espirales y la dispersión de velocidades en galaxias elípticas.**
- **La relación masa luminosidad en cúmulos de galaxias**
- **Las lentes gravitacionales**
- **La estructura a gran escala del universo**
- **Las abundancias primordiales: Materia oscura no bariónica**

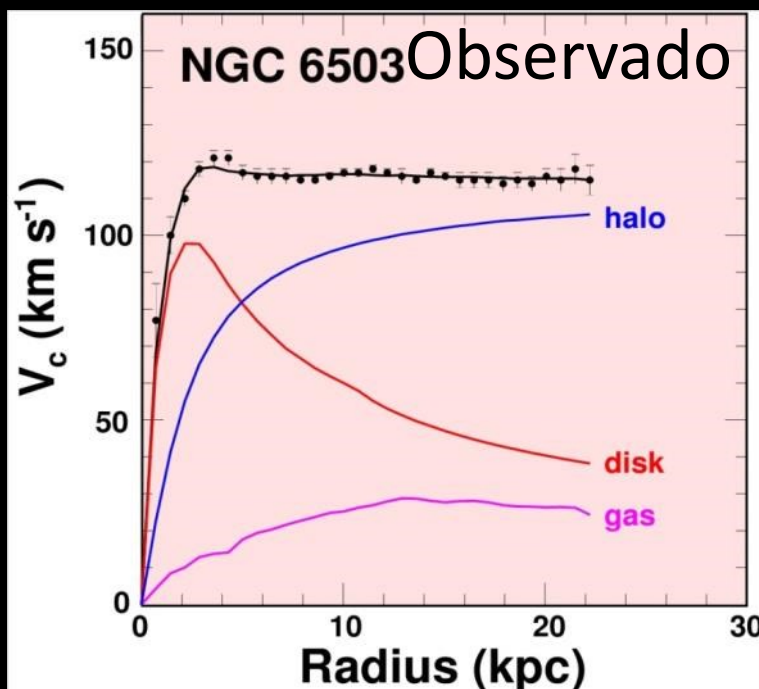
Curvas de Rotación



Medir el desplazamiento al rojo de diferentes zonas de la galaxia. Uno de los extremos se aleja y el otro se acerca, y se puede medir la velocidad de rotación.

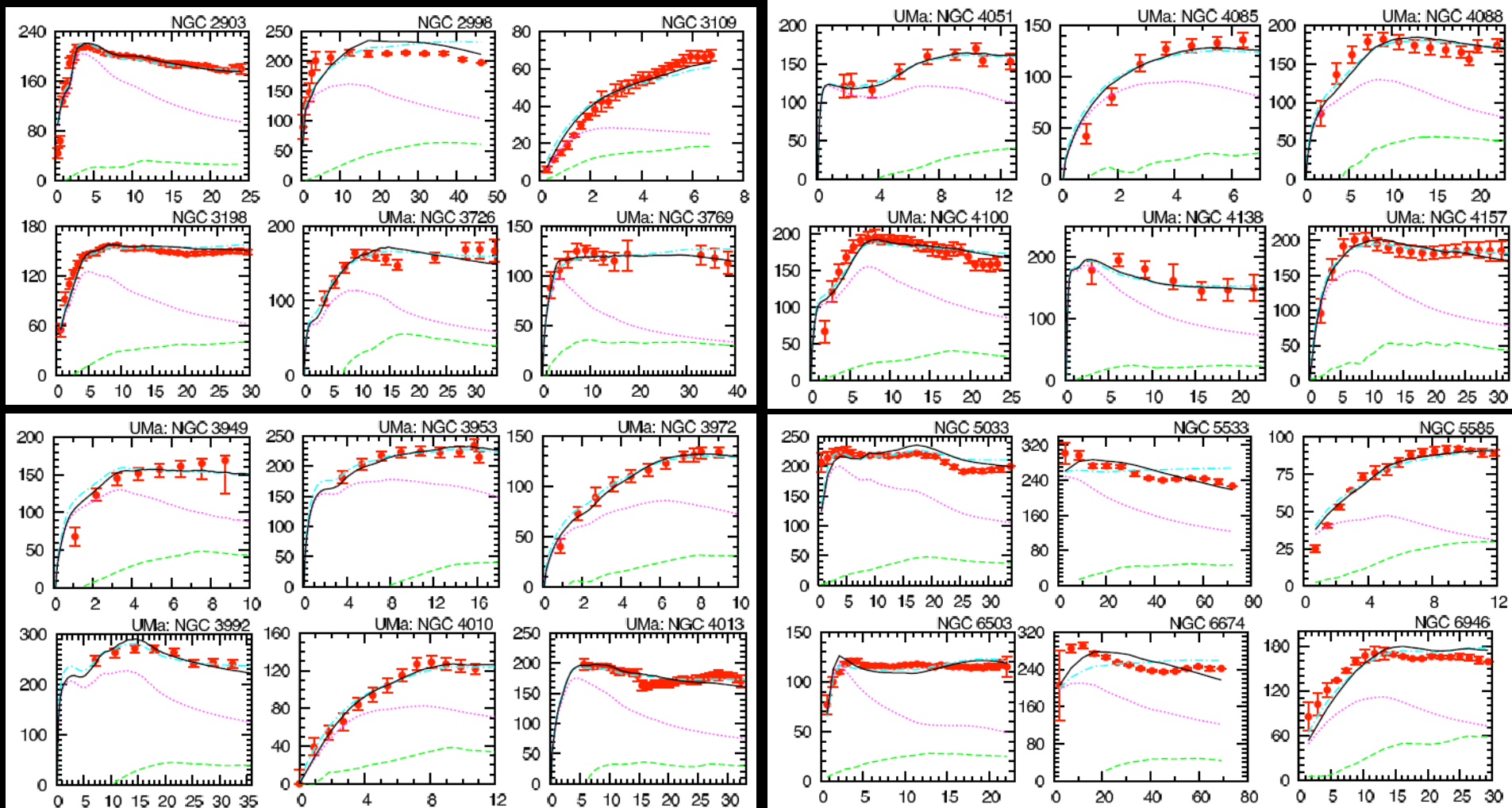


Las galaxias no obedecen la predicción de la gravedad de Newton (o Einstein) que se espera a partir solamente de sus estrellas. Se necesita más materia (invisible) para mantener esa velocidad de rotación



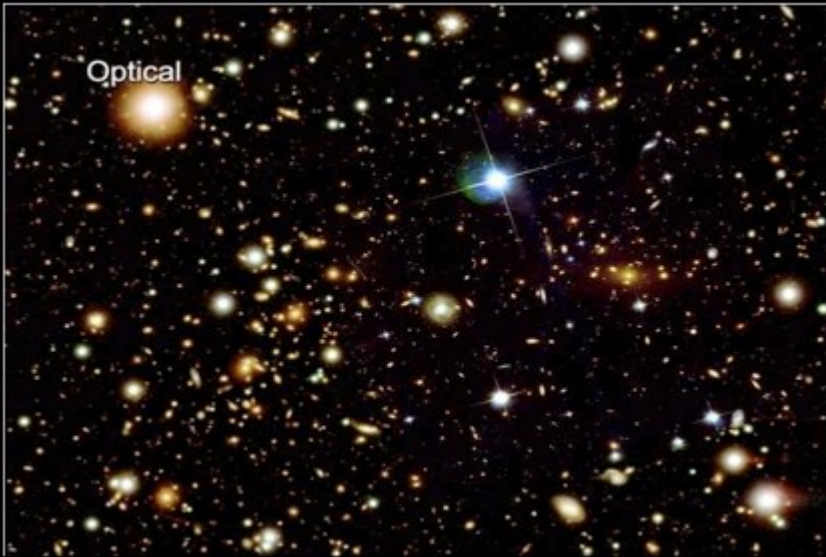
!!!**MATERIA OSCURA!!!**

Curvas de rotación



!!!MATERIA OSCURA!!!!

Masa total >> Masa visible



Near Infrared • Hubble
Visible • Hubble
X-ray • Chandra
Dark Matter Map

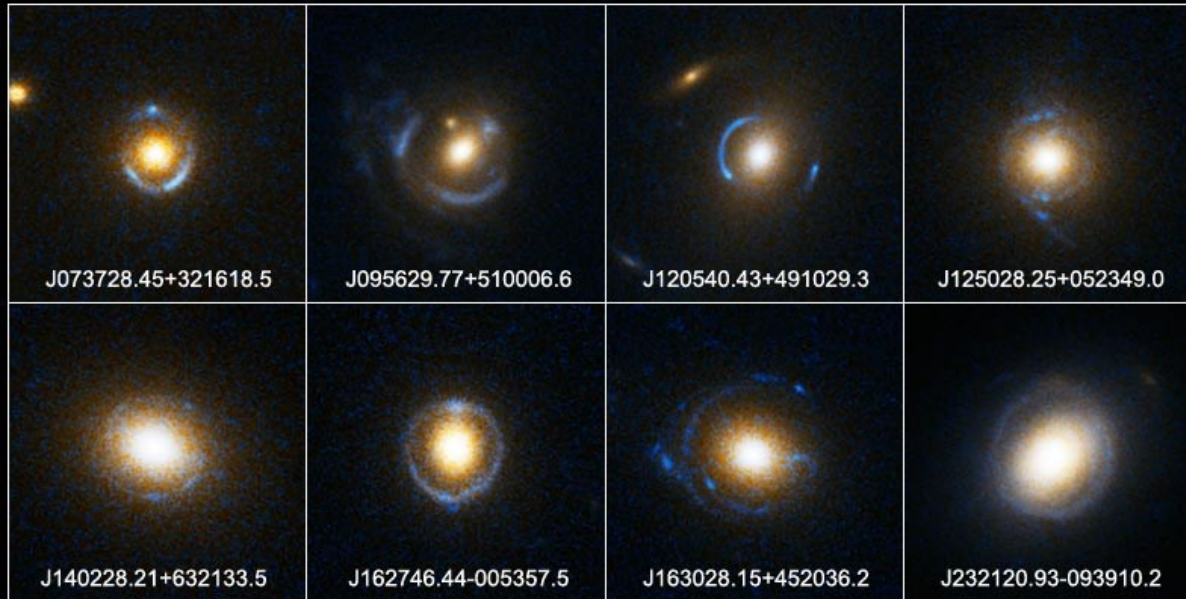
1.5 million light-years
460 kiloparsecs 70"



Lentes gravitacionales

Einstein Ring Gravitational Lenses

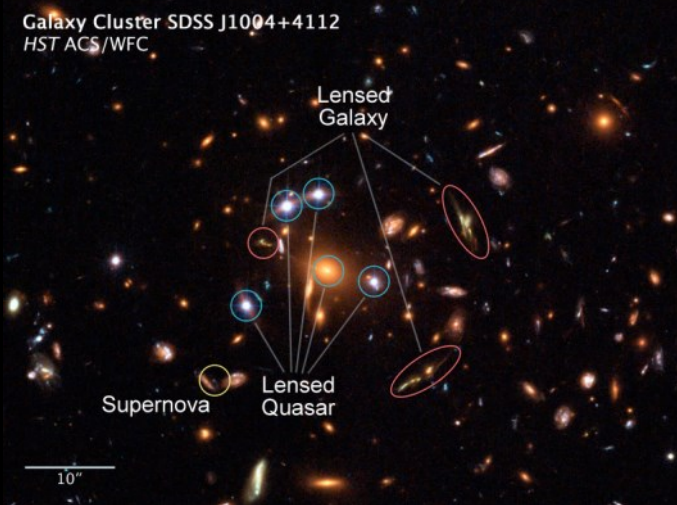
Hubble Space Telescope • ACS



NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

STScI-PRC05-32

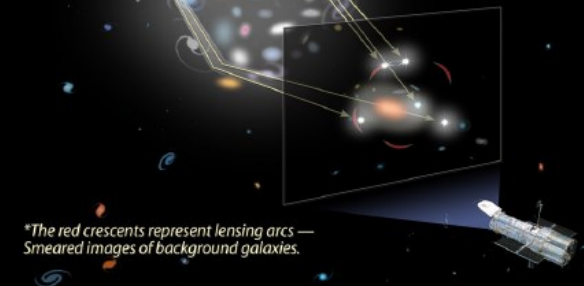
Galaxy Cluster SDSS J1004+4112
HST ACS/WFC



Gravitational Lensing Splits Quasar Light into Five Images

Distant quasar with host galaxy

Light emitted from quasar bends around intervening galaxy cluster, producing lensed images*



*The red crescents represent lensing arcs — smeared images of background galaxies.

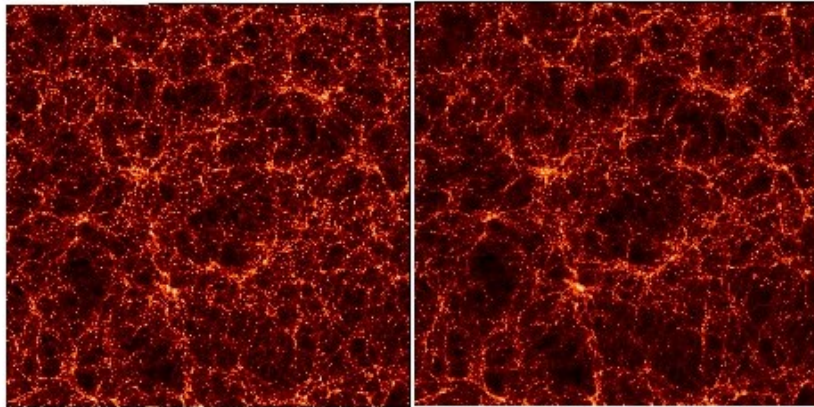
LSS

Diferentes contenidos de materia producen diferentes niveles de estructura

$z=0$

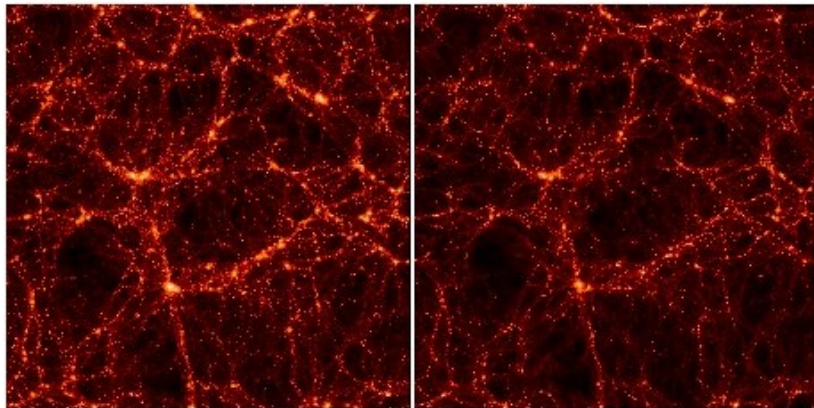
SCDM

τ CDM



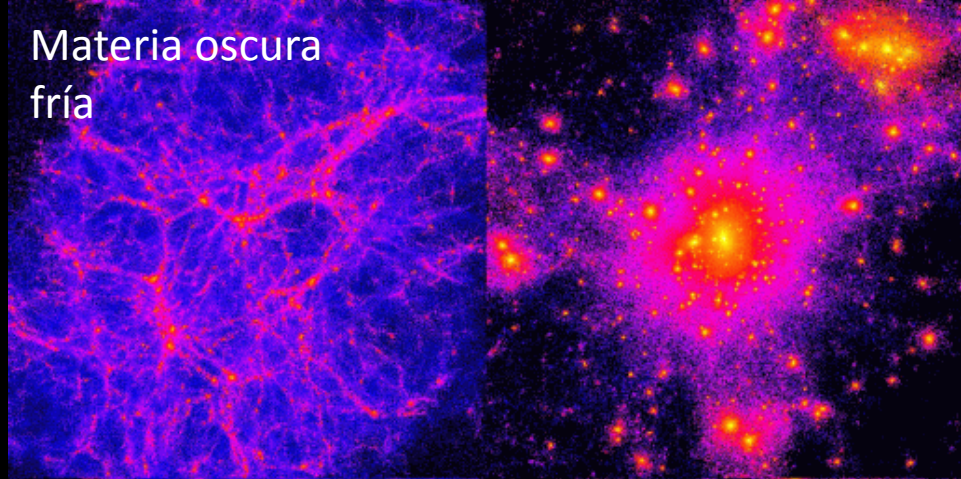
Λ CDM

OCDM

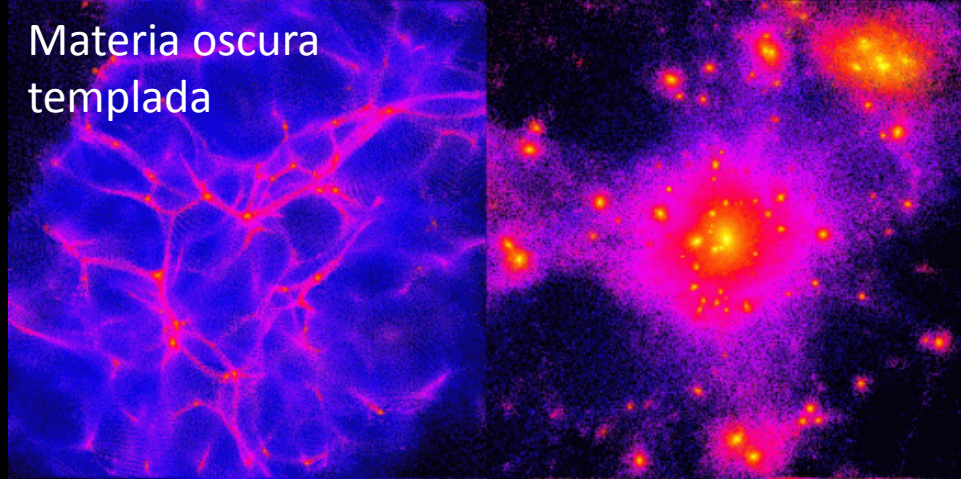


The VIRGO Collaboration 1996

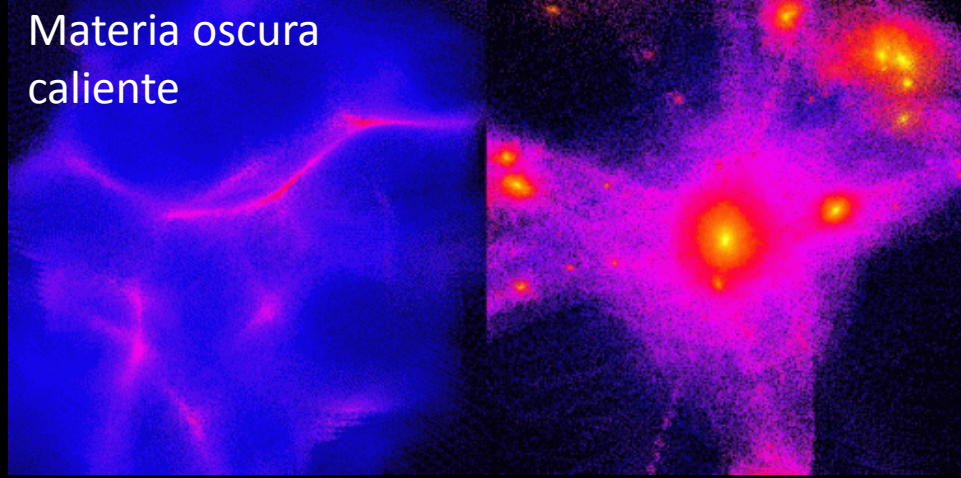
Materia oscura
fría



Materia oscura
templada

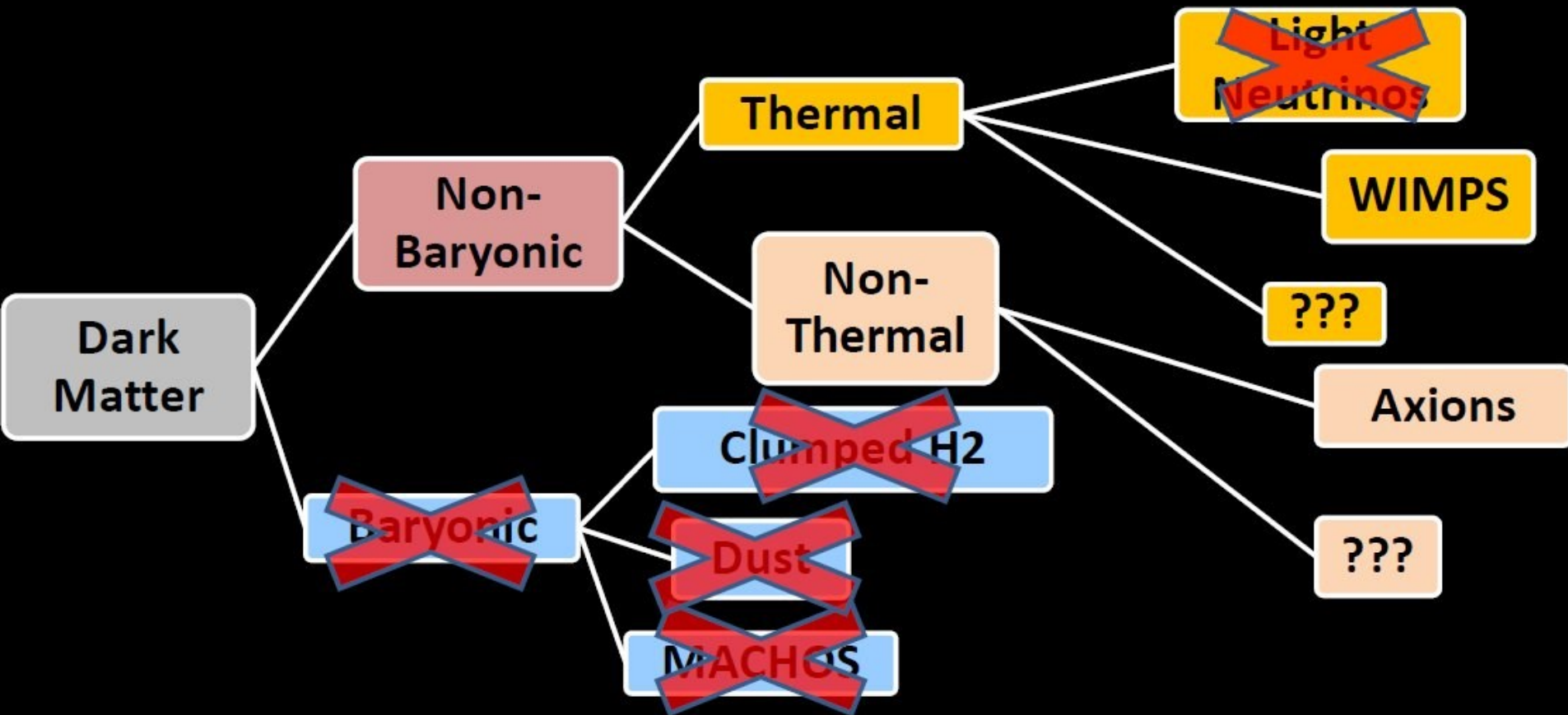


Materia oscura
caliente



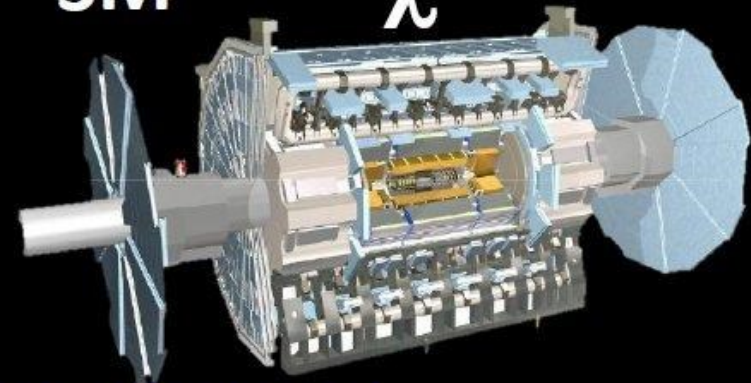
¿Qué sabemos sobre la materia oscura?

Puesto que el crecimiento de estructura en el universo es abajo-arriba (los cúmulos y supercúmulos todavía se están formando), **LA MATERIA OSCURA ES FRÍA**: *Partículas no relativistas, estables, neutras y que interactúan muy débilmente*



Cómo detectar materia oscura

SM χ
SM χ



PRODUCTION:

Produce and measure DM from particle colliders



INDIRECT DETECTION:

Measure gamma rays, neutrinos, positrons, antiprotons, anti-deuterons, etc from DM annihilation



DIRECT DETECTION:

Measure DM scattering off targets in detectors on Earth

χ χ
SM SM

Situación actual

Evidencia de la existencia de MATERIA OSCURA FRÍA:
Estable, neutra y no relativista. Forma el $\sim 25\%$ de la densidad del universo

Si son WIMPs, la abundancia local es $\sim 0.4 \text{ GeV/cm}^3$

Si $m_{\text{WIMP}} \sim 100 \text{ GeV}$, unos 10 WIMPs interaccionan con un cuerpo humano al año

Si $m_{\text{WIMP}} \sim 10 \text{ GeV}$, unos 10^5 WIMPs interaccionan con un cuerpo humano al año

Hay un enorme esfuerzo internacional para la detección de materia oscura en el laboratorio, pero hasta hoy no se ha observado ninguna señal

LA ENERGÍA OSCURA



¿Qué entendemos por energía oscura?

El descubrimiento de la expansión acelerada del universo (1998) fue una gigantesca sorpresa, ya que se esperaba justo lo contrario debido a la acción de la gravedad (atractiva y no repulsiva)

Sea cual sea el mecanismo que causa la aceleración, lo llamamos energía oscura:

La constante cosmológica de Einstein

Un nuevo campo de fuerza (“quintaesencia”)

Modificaciones a la Relatividad General

¿QUÉ SABEMOS SOBRE LA ENERGÍA OSCURA?

- 1) No emite ni absorbe radiación electromagnética**
- 2) No se diluye con la expansión → Presión negativa**
- 3) Su distribución espacial es homogénea. La energía oscura no se acumula de manera significativa, al menos en escalas como los cúmulos de galaxias**

Muy diferente de la materia oscura. Su presión es comparable a su densidad de energía (es tipo energía) mientras que la materia se caracteriza por una presión despreciable.

La energía oscura es un fenómeno difuso, que interacciona de manera extremadamente débil con la materia y de muy baja energía. Por lo tanto será muy difícil producirla en aceleradores. Puesto que no se acumula, el universo en su totalidad es la manera natural (quizá la única) de estudiarla.

Muy probablemente el avance vendrá a través de la mejora en las observaciones

La Constante Cosmológica

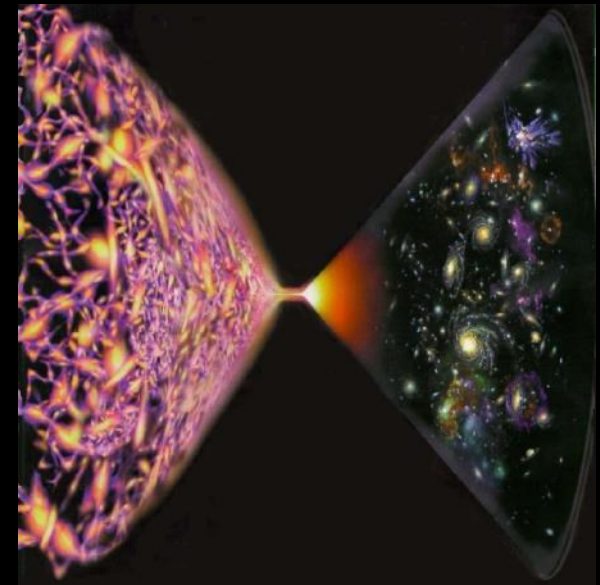
Todas las observaciones actuales son compatibles con que la energía oscura sea la constante cosmológica. Es el candidato más natural, pero también el más misterioso y chocante

Constante cosmológica: Su densidad es constante en el tiempo y obedece una ecuación de estado $p=-\rho$

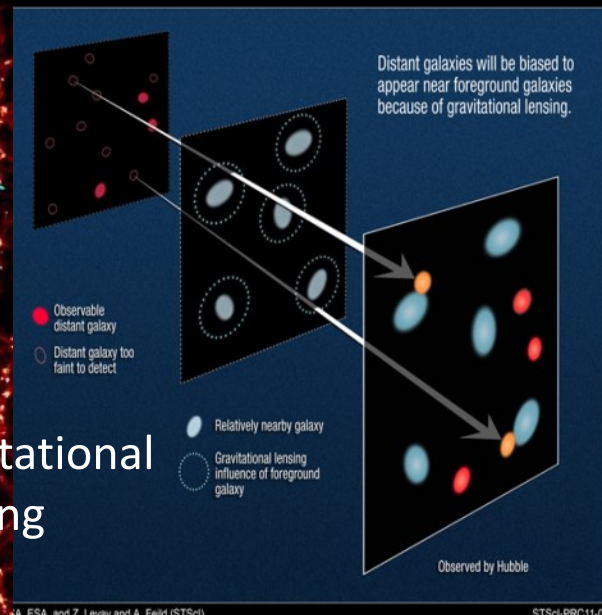
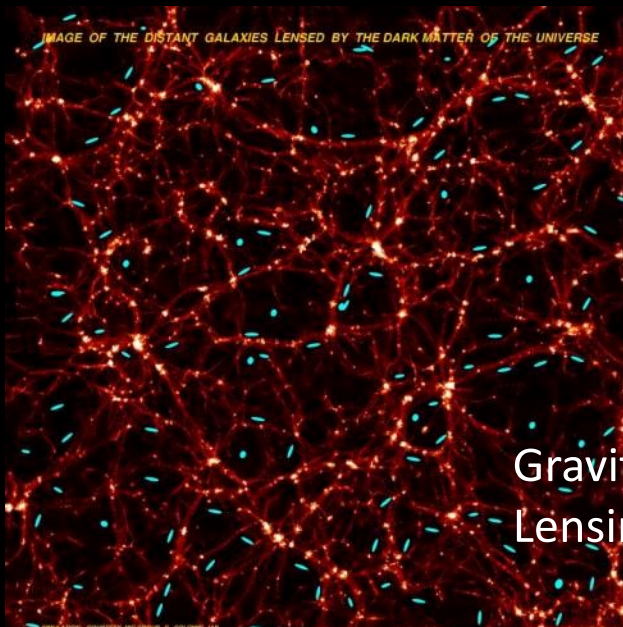
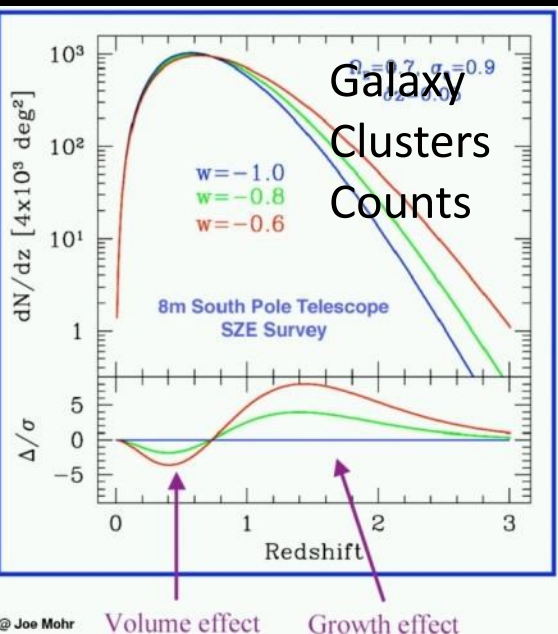
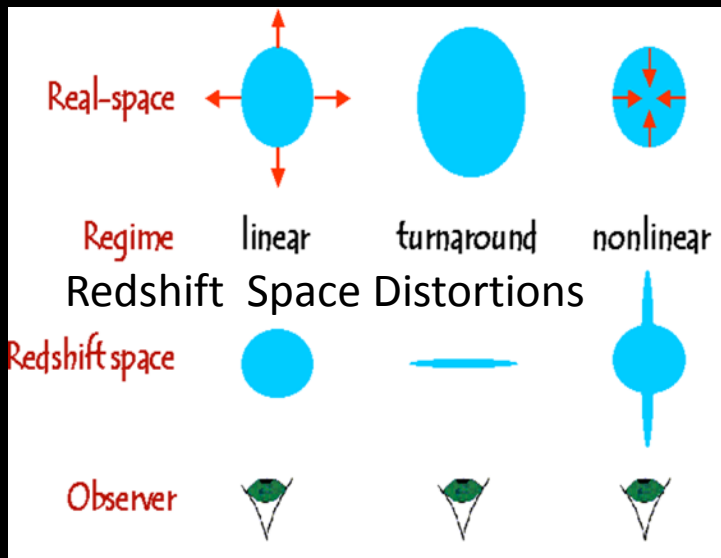
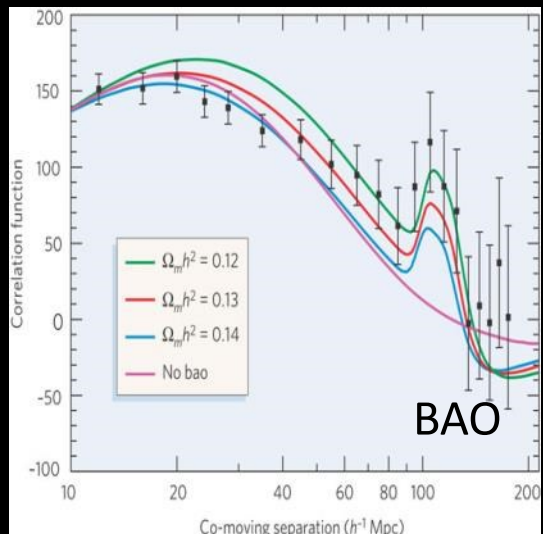
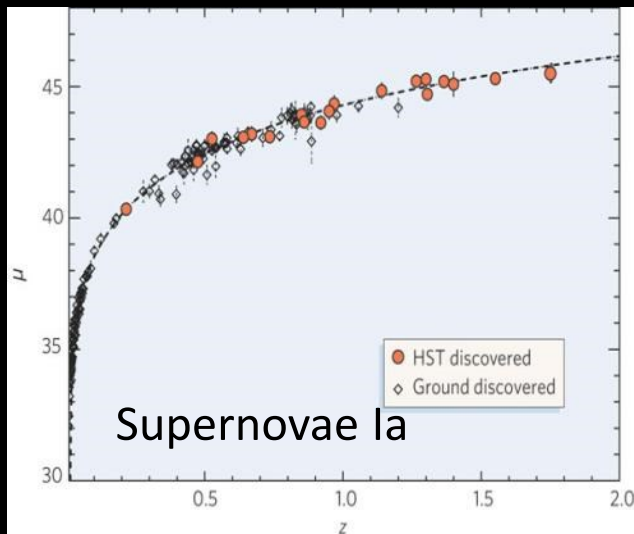
No hay una explicación para Λ a partir de la física de partículas. Si es la energía del vacío:

$$\Omega_{\Lambda} \sim 0.7 \longrightarrow \rho_{\Lambda} \sim (10 \text{ meV})^4$$

Mientras que de la teoría (SM) sería $\rho_{\Lambda} \sim M_{\text{Planck}}^4 \sim 10^{120} \times (10 \text{ meV})^4$

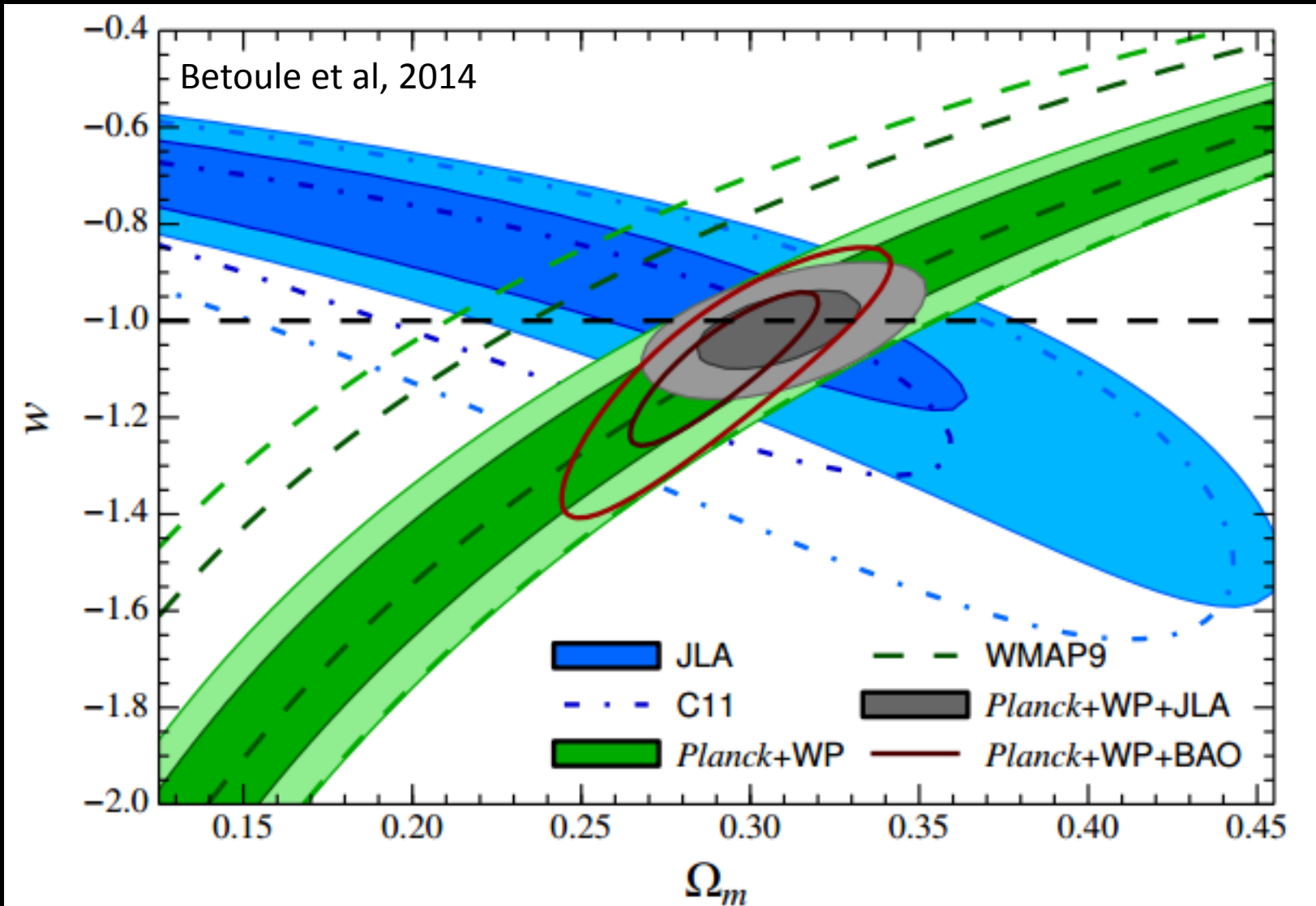


Métodos de estudio de la energía oscura



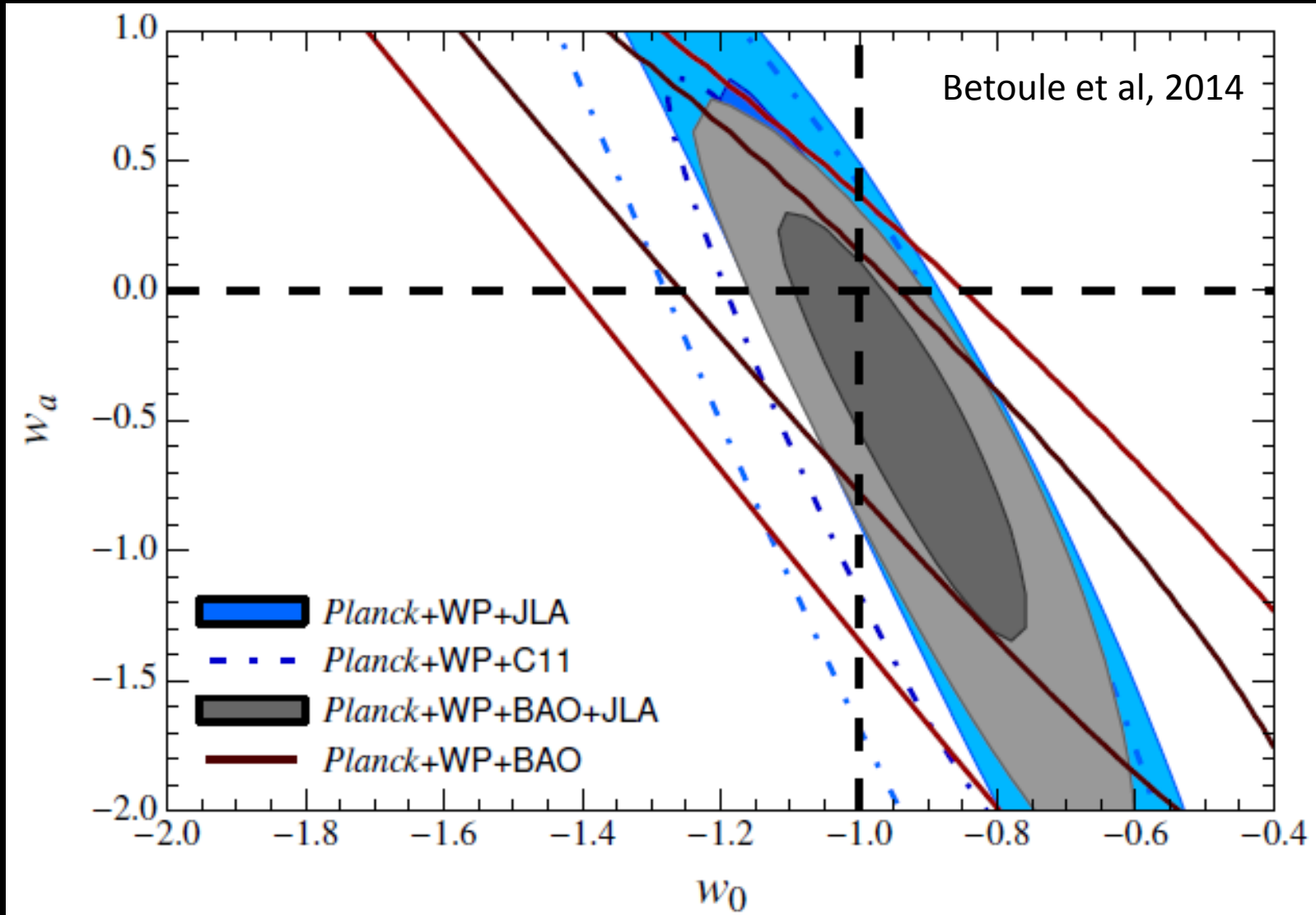
Situación actual

Todas las observaciones son compatibles con que la energía oscura es la constante cosmológica de Einstein, es decir, la energía del vacío



Situación actual

Todas las observaciones son compatibles con que la energía oscura es la constante cosmológica de Einstein, es decir, la energía del vacío



SITUACIÓN ACTUAL

La energía oscura se ha detectado inequívocamente para $z < 1$

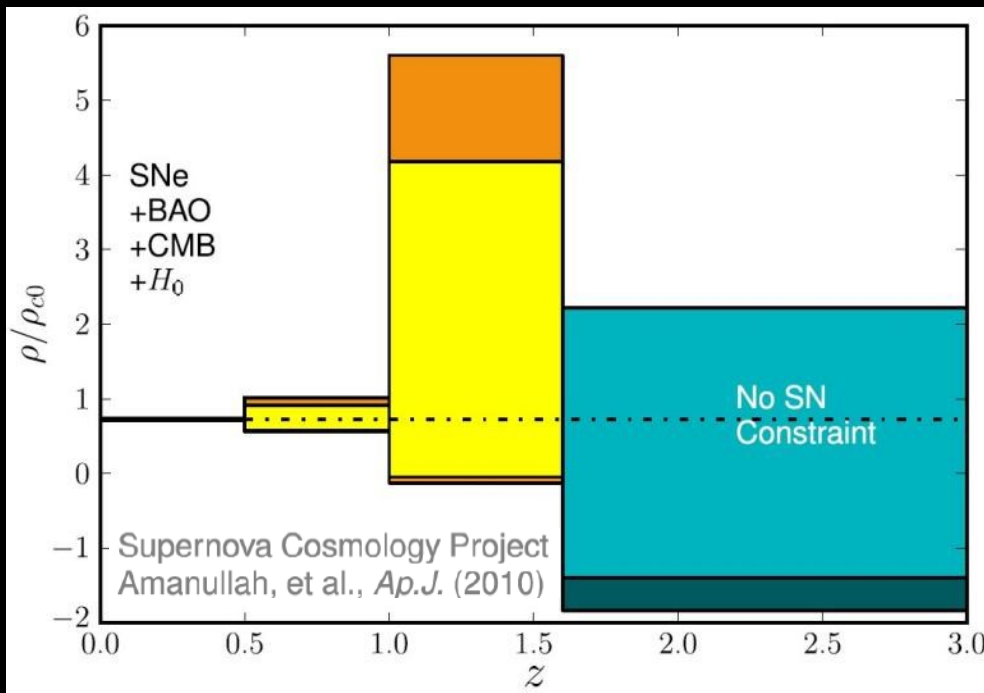
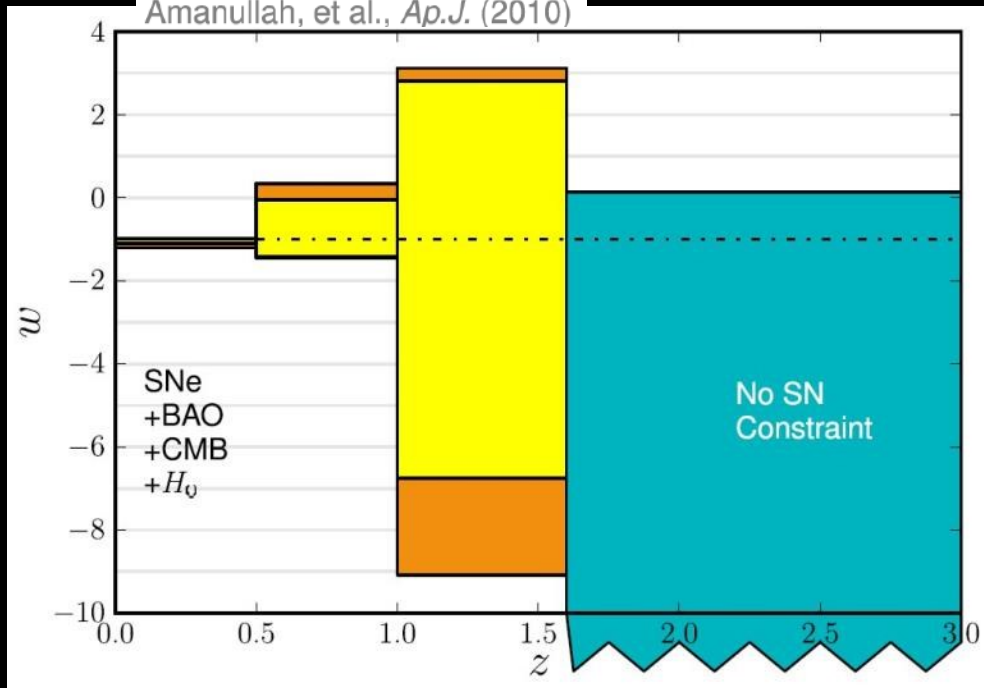
Los datos actuales no son sensibles a $z > 1$

Λ CDM es una excelente descripción de todos los datos.

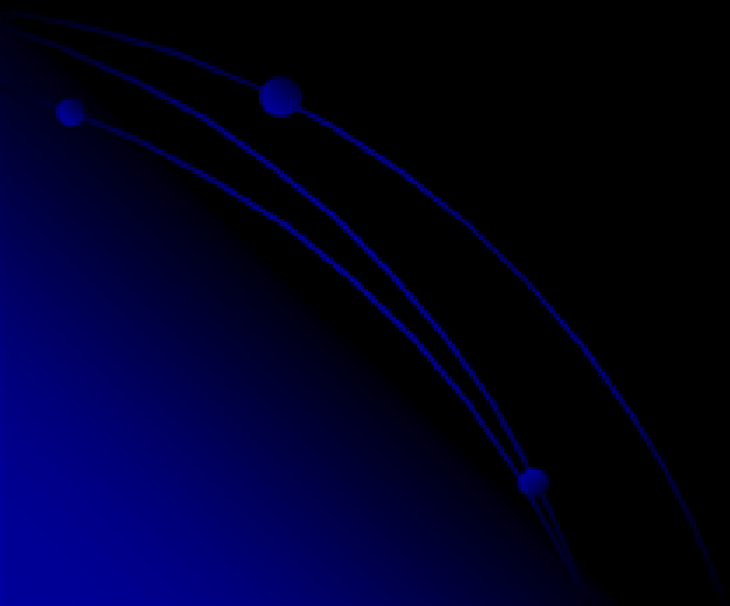
Hay todavía mucho trabajo por delante para estudiar la evolución con el desplazamiento al rojo

SE NECESITAN DATOS NUEVOS Y MÁS PRECISOS: GRANDES CARTOGRAFIADOS DE GALAXIAS

Supernova Cosmology Project
Amanullah, et al., *Ap.J.* (2010)



El origen del universo



Bariogénesis: ¿Por qué no hay antimateria?

El universo está compuesto de materia. Sin embargo, todas las interacciones entre partículas que medimos en el laboratorio son simétricas entre materia y antimateria

El número de bariones del universo, que se obtiene de la BBN, es mucho menor que el número de fotones de la CMB,

$$n_B/n_\gamma = (6.1 \pm 0.3) \times 10^{-10}$$

Los bariones son un pequeño exceso tras la aniquilación con los antibariones

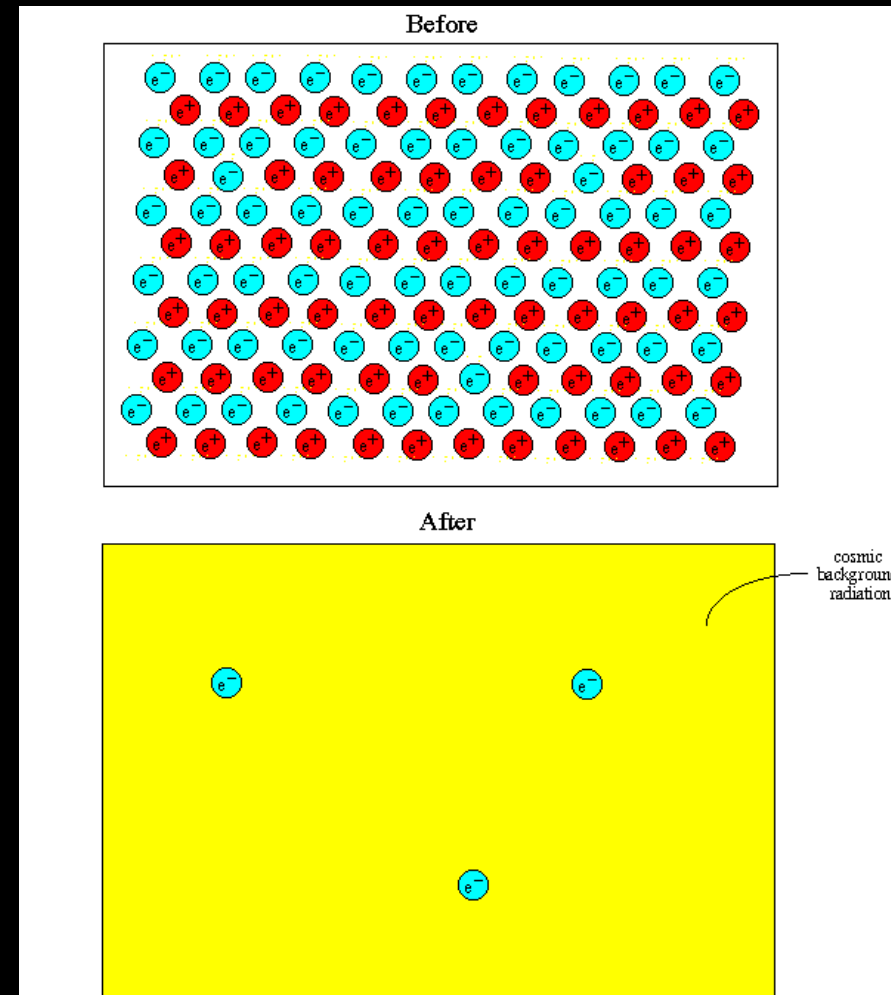
Condiciones de Sakharov:

Violación de la conservación del número bariónico

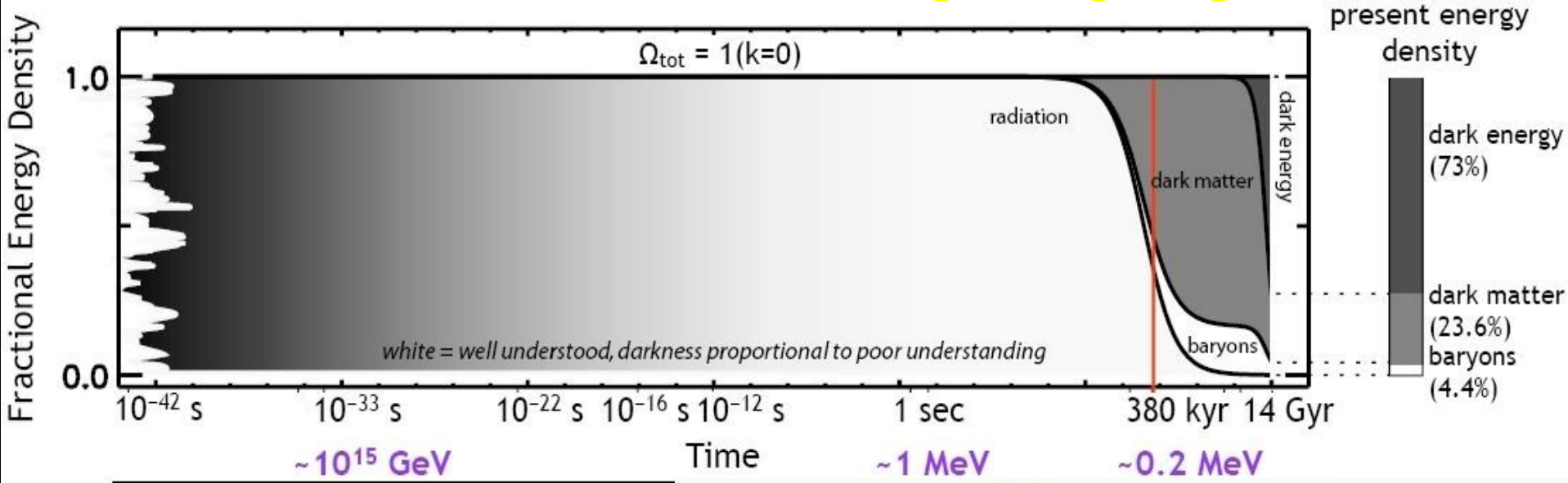
Violación de C y CP

No equilibrio termodinámico

Estas condiciones se verifican en el Modelo Estándar. Pero la violación de CP no es suficiente. La bariogénesis exige nueva física



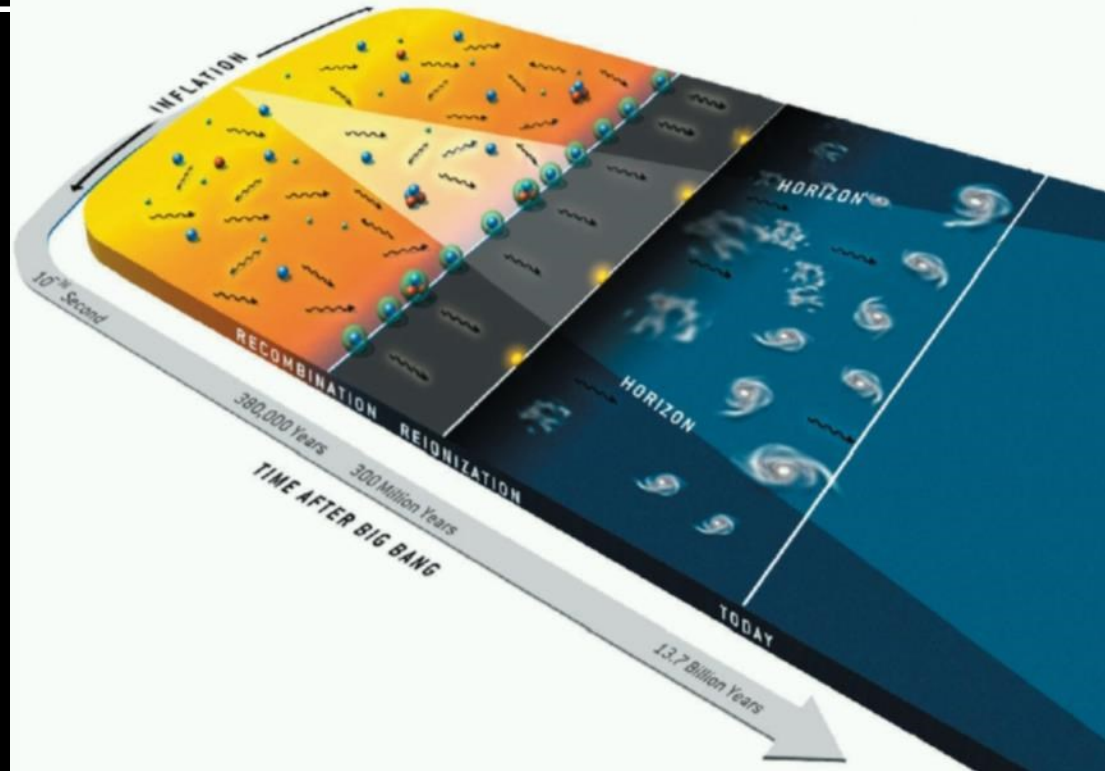
La inflación cósmica: El Bang del Big Bang



El tercer pilar de la cosmología es la inflación cósmica

Resuelve algunos de los problemas del Big Bang clásico: Homogeneidad y planitud

Sus detalles aun se desconocen, pero es la mejor descripción del universo temprano

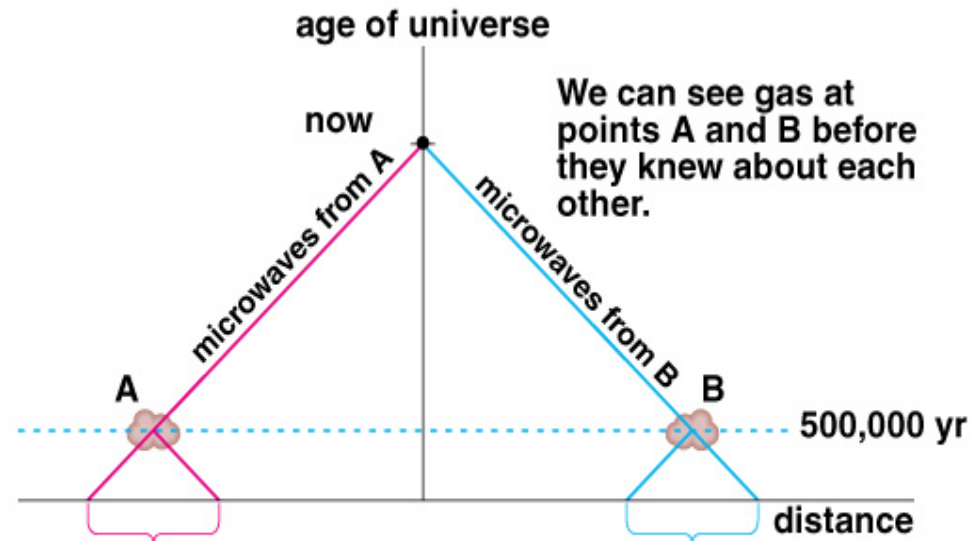
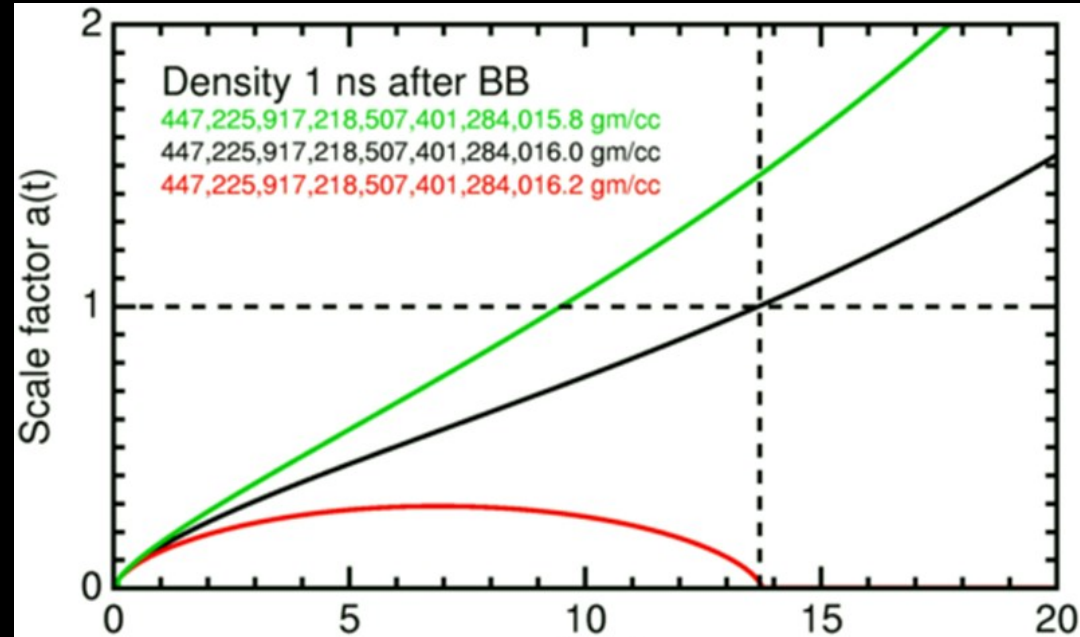


Los problemas del horizonte y la planitud

¿Por qué el universo es euclídeo?

Este es un valor inestable que lleva a un ajuste increíble en el inicio del universo

¿Por qué el universo es tan homogéneo? Las regiones distantes nunca estuvieron en contacto causal entre sí, ¿cómo pueden estar a la misma temperatura?

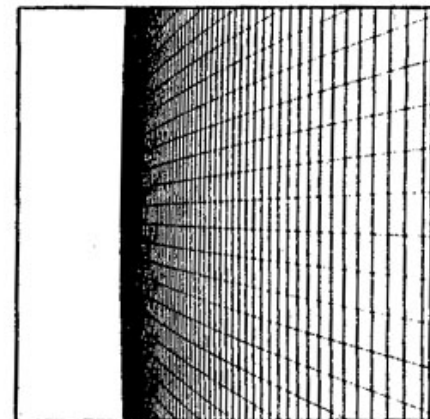
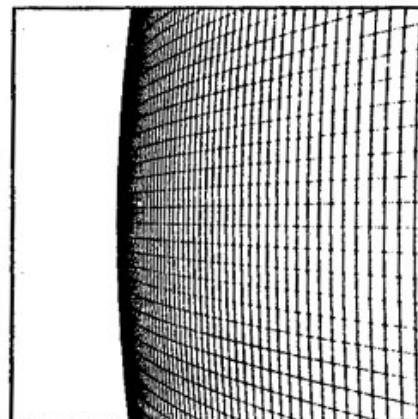
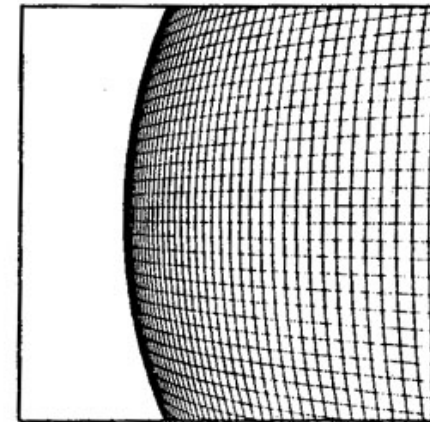
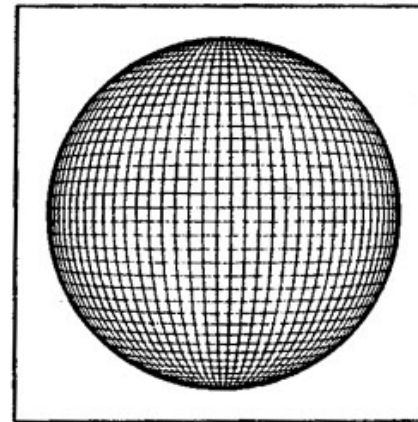
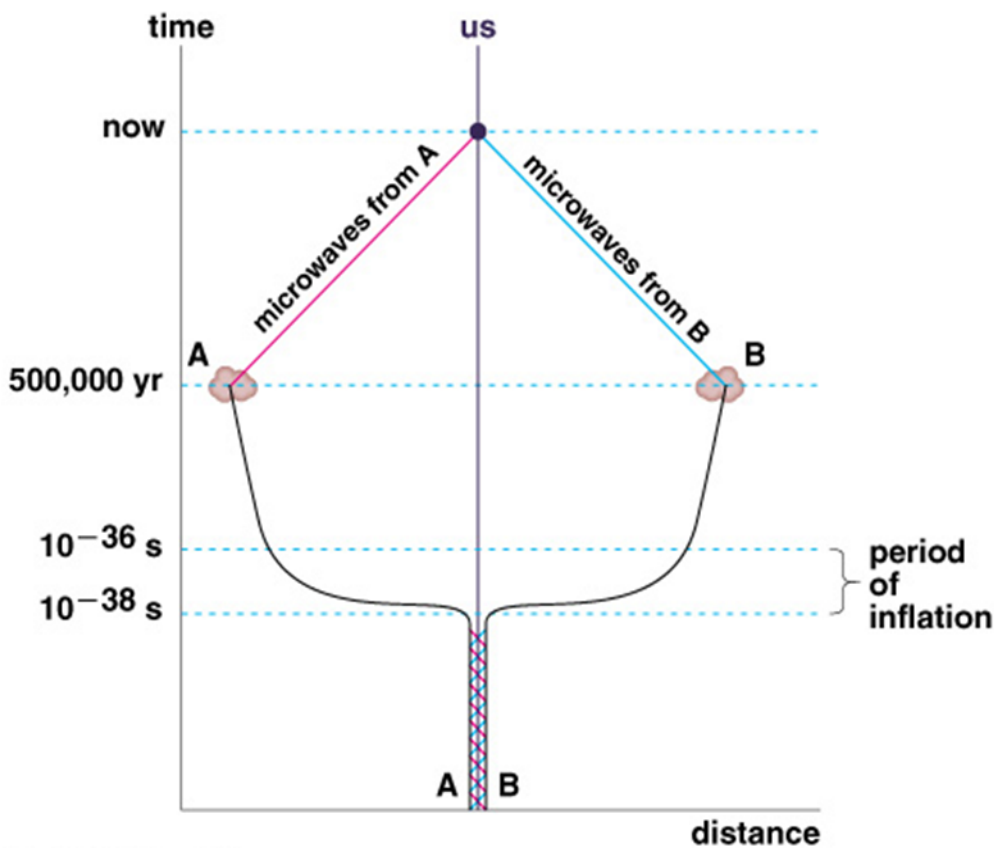


Gas at point A has received signals from this part of the universe.

Gas at point B has received signals from this part of the universe.

La inflación al rescate

Un período de crecimiento exponencial al inicio (la inflación) resuelve ambos problemas y además hace algunas predicciones sobre cómo debe ser el universo que se pueden verificar



La inflación en un minuto

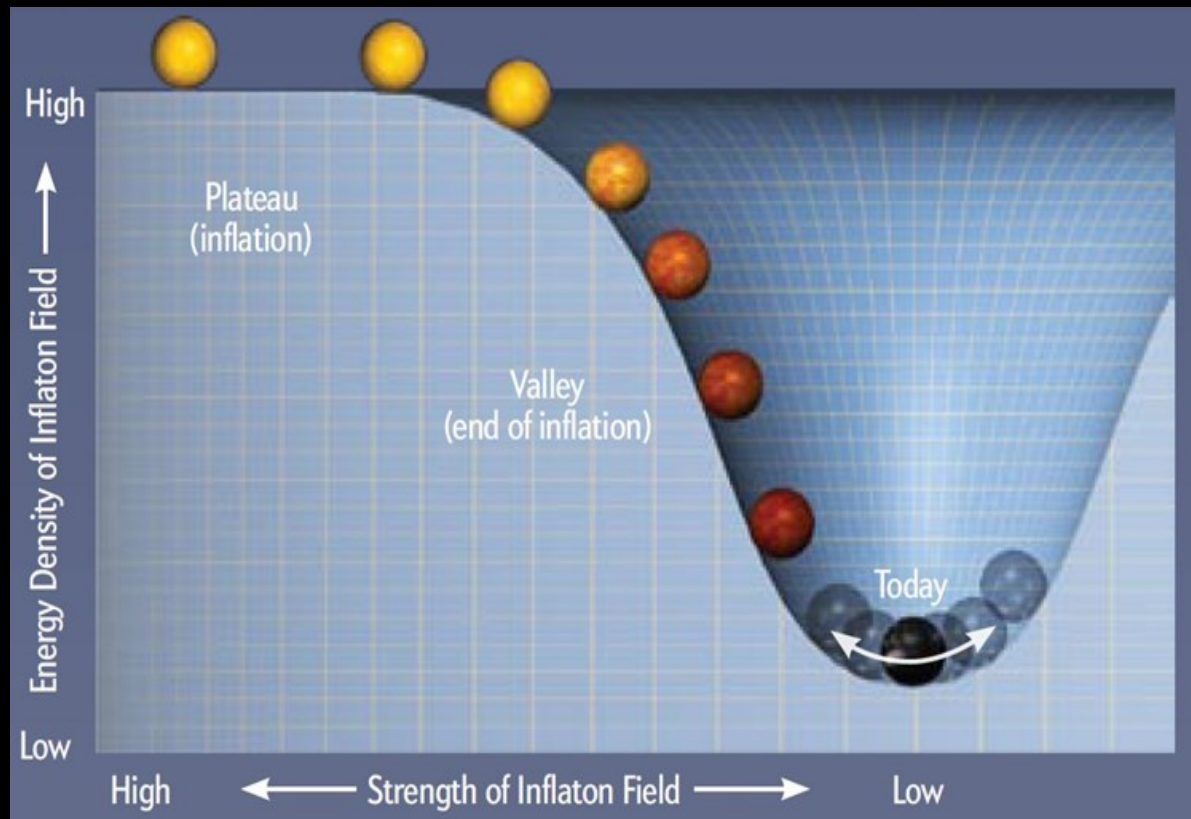
El universo empieza muy pequeño... Quizás como una pequeña fluctuación en la espuma espaciotemporal.

Un campo inestable (el inflatón), llena el espacio

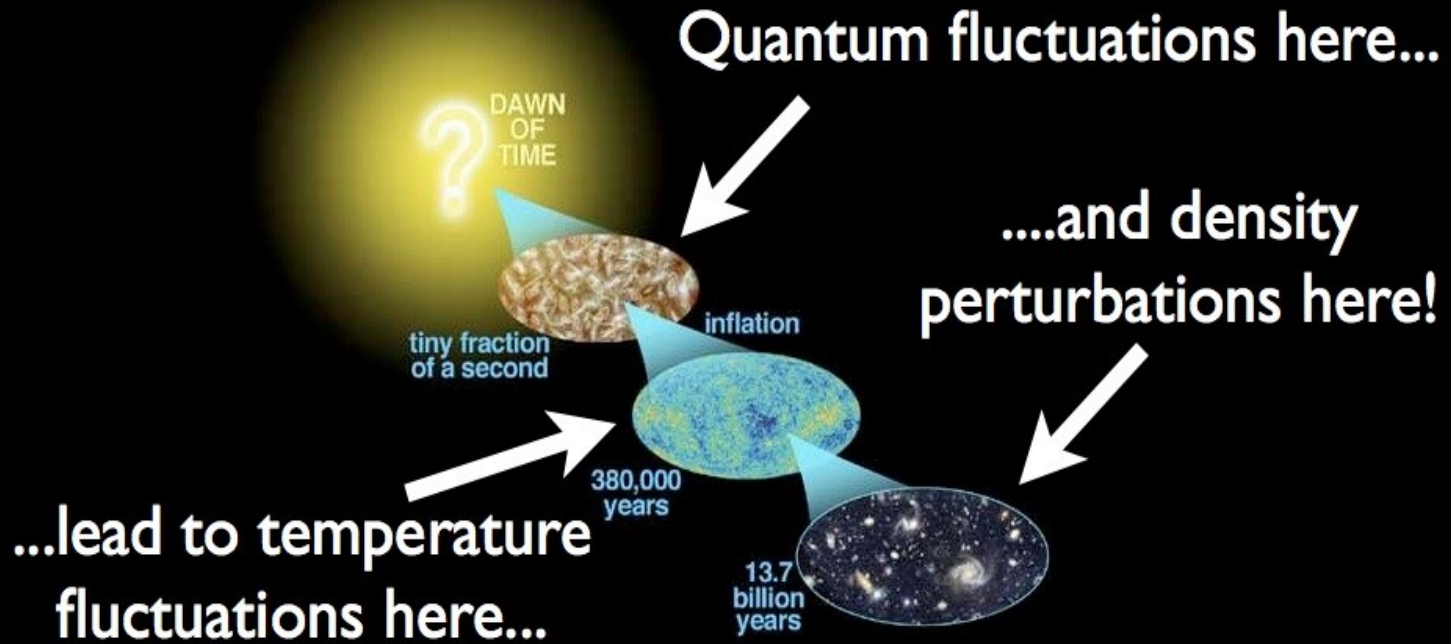
Es muy especial: ¡Produce repulsión gravitacional! Explosión.

El campo es inestable y se desintegra terminando la inflación tras 10^{-35} s

La energía acumulada en el inflatón, que se libera al oscilar en torno al mínimo, produce toda la materia que vemos hoy en día en el universo en forma de un plasma muy denso y muy caliente



La inflación cósmica



La inflación explica la formación de estructuras en el universo. Las inhomogeneidades iniciales se deben a fluctuaciones cuánticas durante el periodo inflacionario, amplificadas por la expansión desaforada.

¡Las mayores estructuras que observamos hoy en día son el resultado de fluctuaciones cuánticas que ocurrieron en escalas microscópicas!

Conclusiones

Λ CDM, la teoría del Big Bang actual, está confirmada por una enorme cantidad de observaciones. Se basa en:

La Teoría de la Relatividad General

El Principio Cosmológico

Física de partículas en el universo temprano

Exige nueva física. El 95% del contenido del universo son entes exóticos y desconocidos

Energía oscura (68%)

Materia oscura (27%)

Inflación, bariogénesis y origen del universo