

# EL ORIGEN Y LA EVOLUCIÓN DEL UNIVERSO

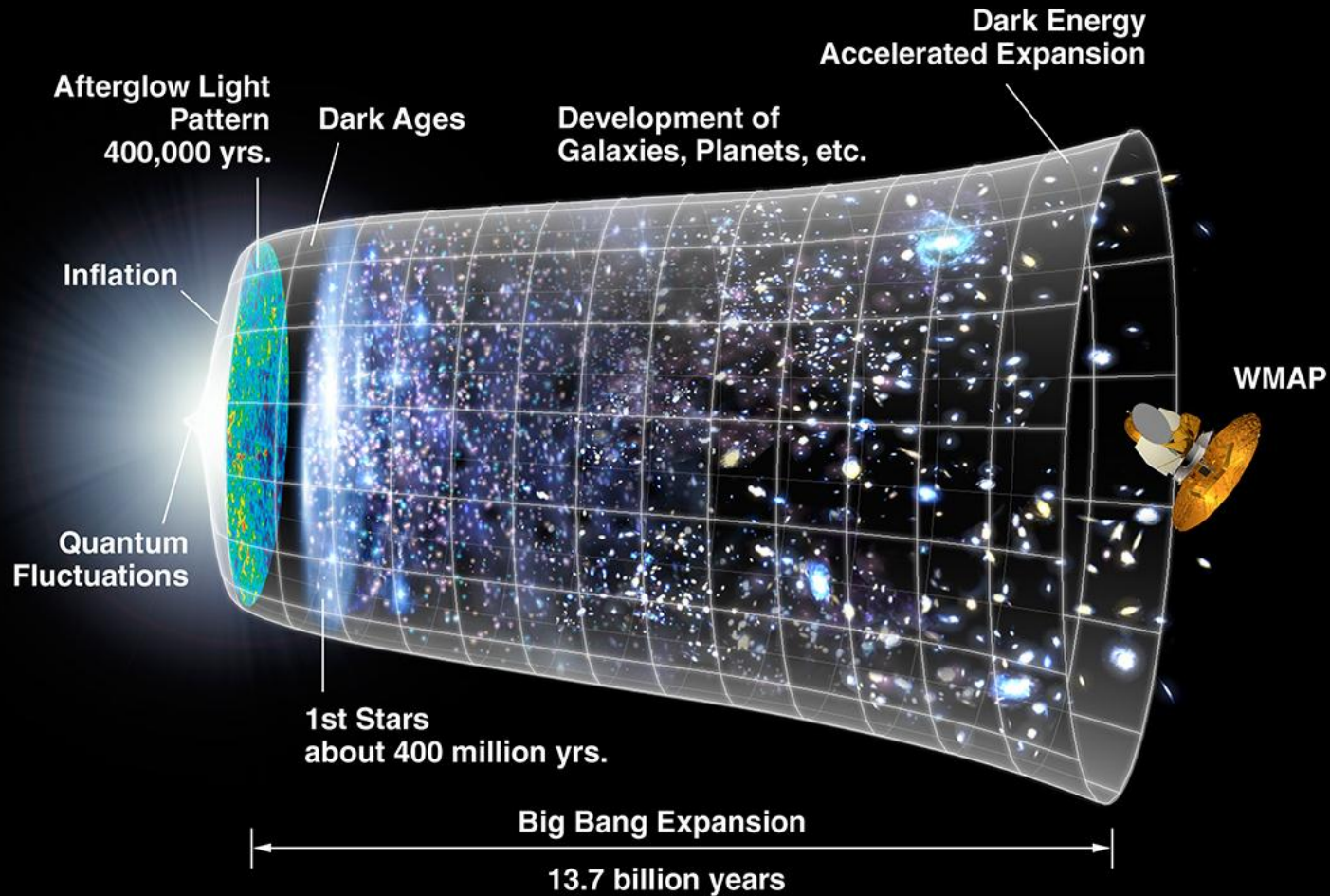
## El Big Bang hoy

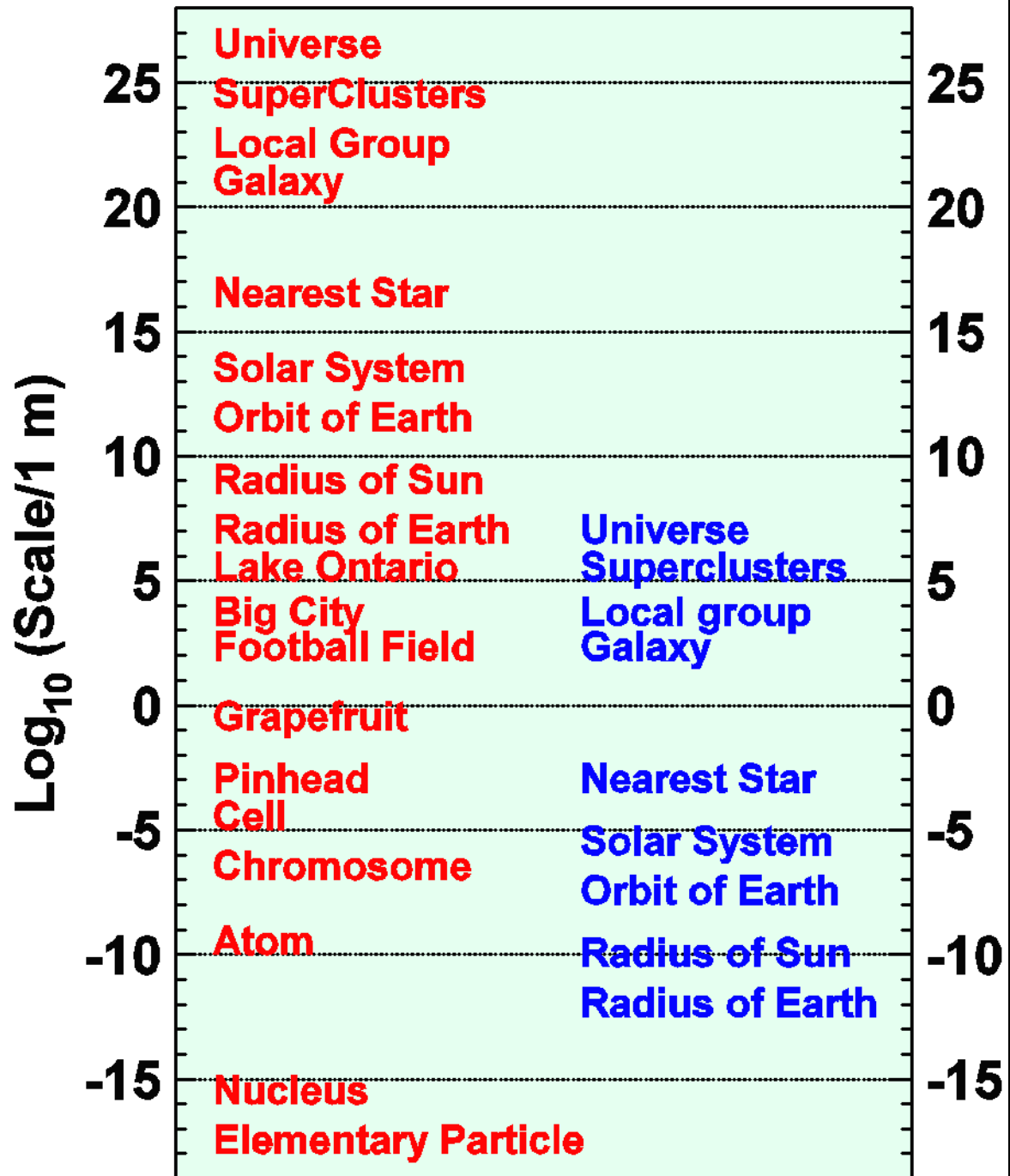
# ÍNDICE

- **Introducción**
- **Cosmología: La ciencia del universo**
- **Materia oscura**
- **Energía oscura**
- **El origen del universo**
- **Conclusión**



# COSMOLOGÍA: LA CIENCIA DEL UNIVERSO





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



Known from telescopes looking back in time, physical models

Geologic record, fossils, genetic drift



The Big Bang

Milky Way disk forms

Solar System and life

Photo-synthesis

Multicellular life, sex



# Calendario cósmico a la Carl Sagan, de wikipedia

December 1st	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14 Sponges
15	16	17 Fish	18	19	20 Land plants	21 Insects
22	23 Reptiles	24	25 Dinosaurs	26 Mammals	27 Pangaea splits	28 Birds, flowers
29 Dinosaurs at top of food chain	30 Dinosaurs go extinct, mammals diversify and return to the sea	31	Human evolution	10:15 AM	Ape / gibbon divergence	
				8:10 PM	Human / chimpanzee divergence	
				10:48 PM	<i>Homo erectus</i> evolves	
				11:54 PM	Anatomically modern humans evolve	
				11:58 PM	Modern humans migrate out of Africa	
				11:59 PM	Neanderthals die out, megafauna stressed	

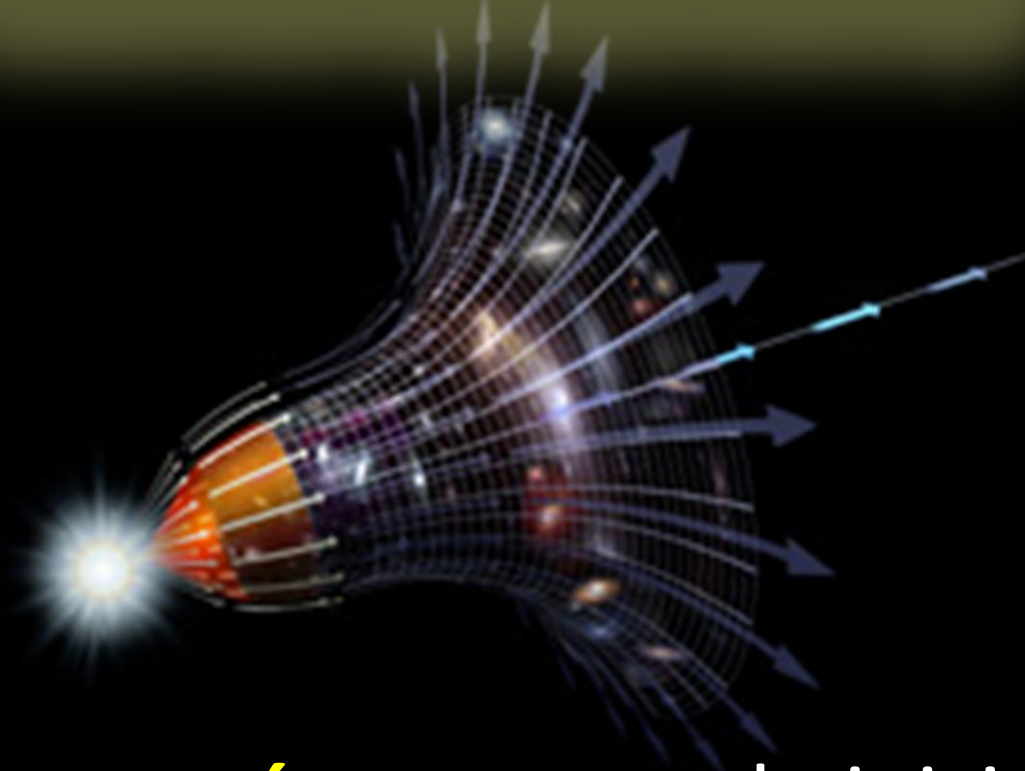
Known from radiocarbon dating, DNA extraction from remains

Written record



IDEA FUNDAMENTAL:

# 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

$\Lambda$ 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.

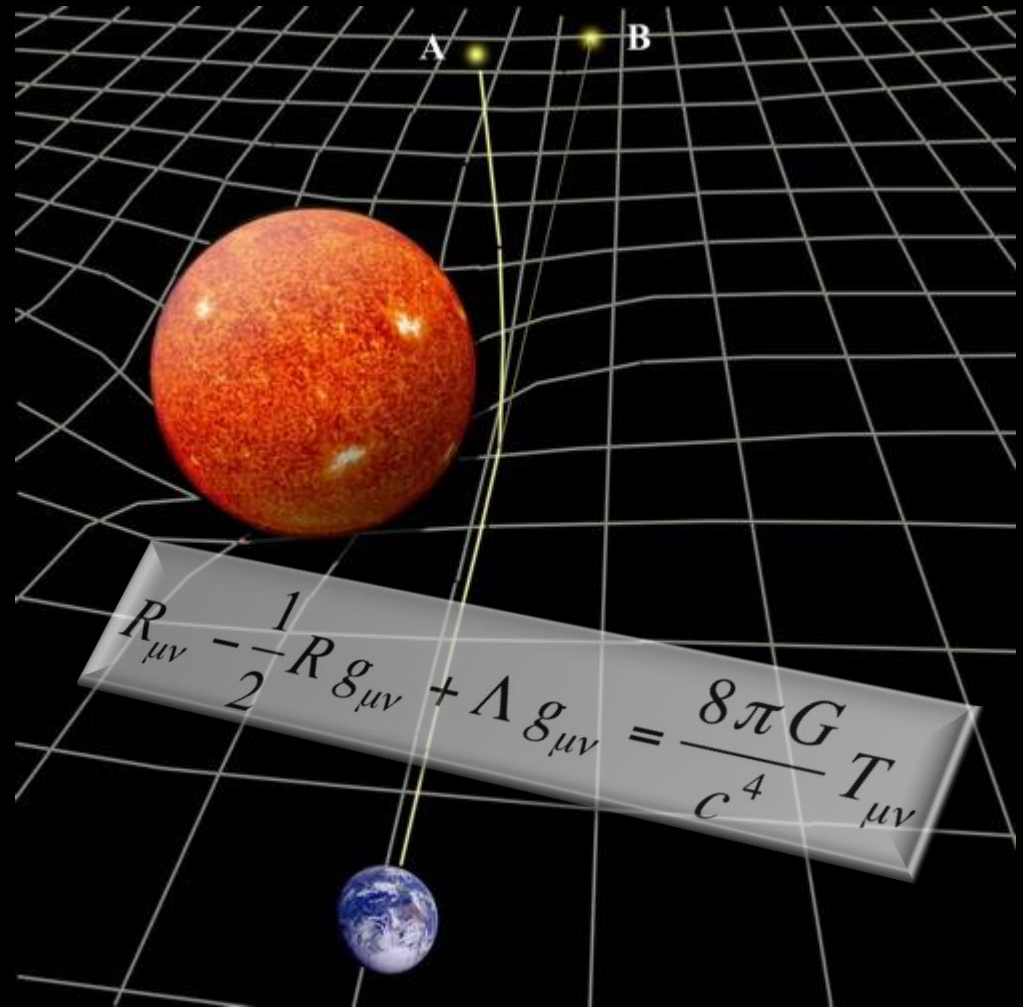
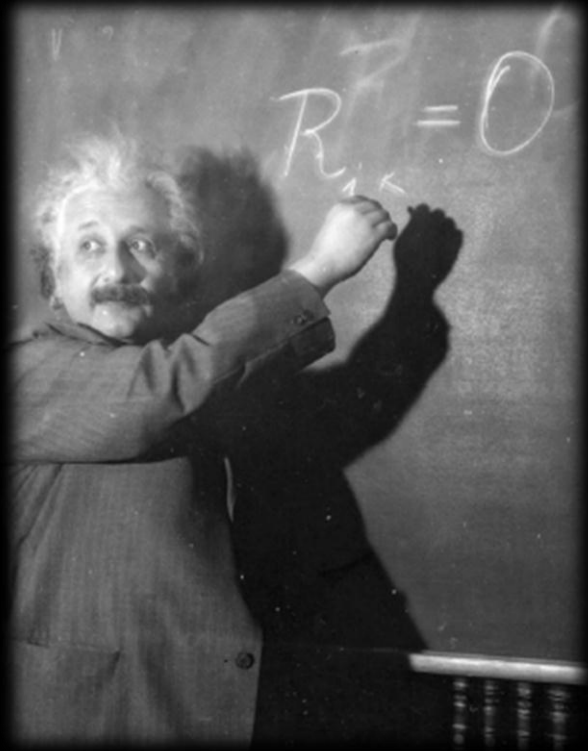
**Solamente se verifica cuando tomamos regiones de un tamaño de alrededor de 100 Mpc o mayores, pero no para distancias más pequeñas**

**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***



# Al aplicar el principio cosmológico a las ecuaciones de Einstein:

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

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

$$S_0(r) = r$$

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

*a*: scale factor of the universe  
*R*: Radius of curvature (constant)  
*t*: proper time  
*r*: comoving distance

Métrica de FLRW  
Friedmann-Lemaitre-  
Robertson-Walker

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

3 posibles geometrías:

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

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

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

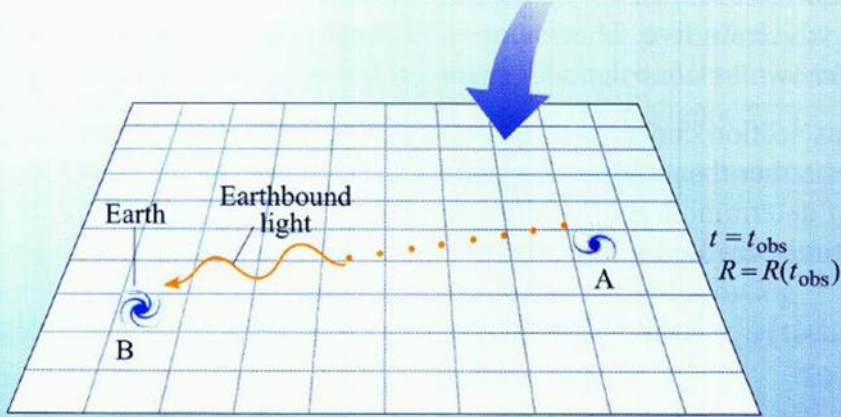
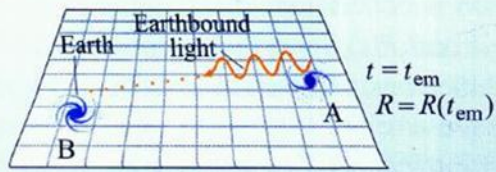
Factor de escala: Cómo se expanden las distancias con el tiempo

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

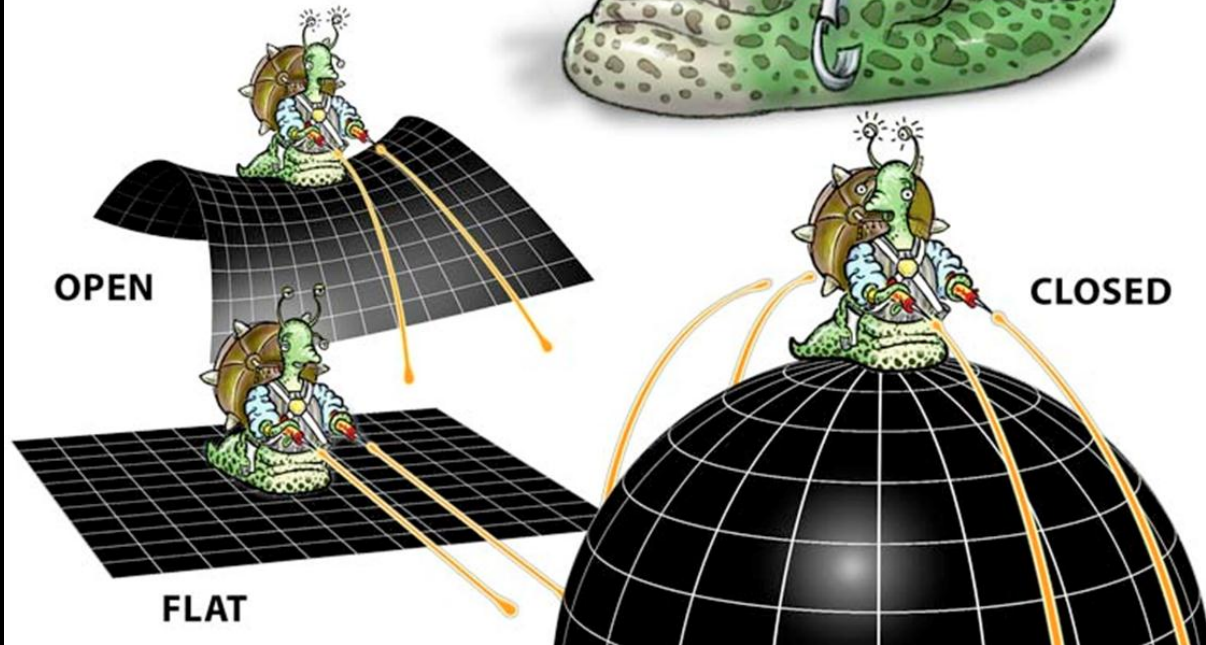
Coordenadas comóviles: Permanecen constantes en una expansión homogénea e isótropa



# 3 posibles geometrías



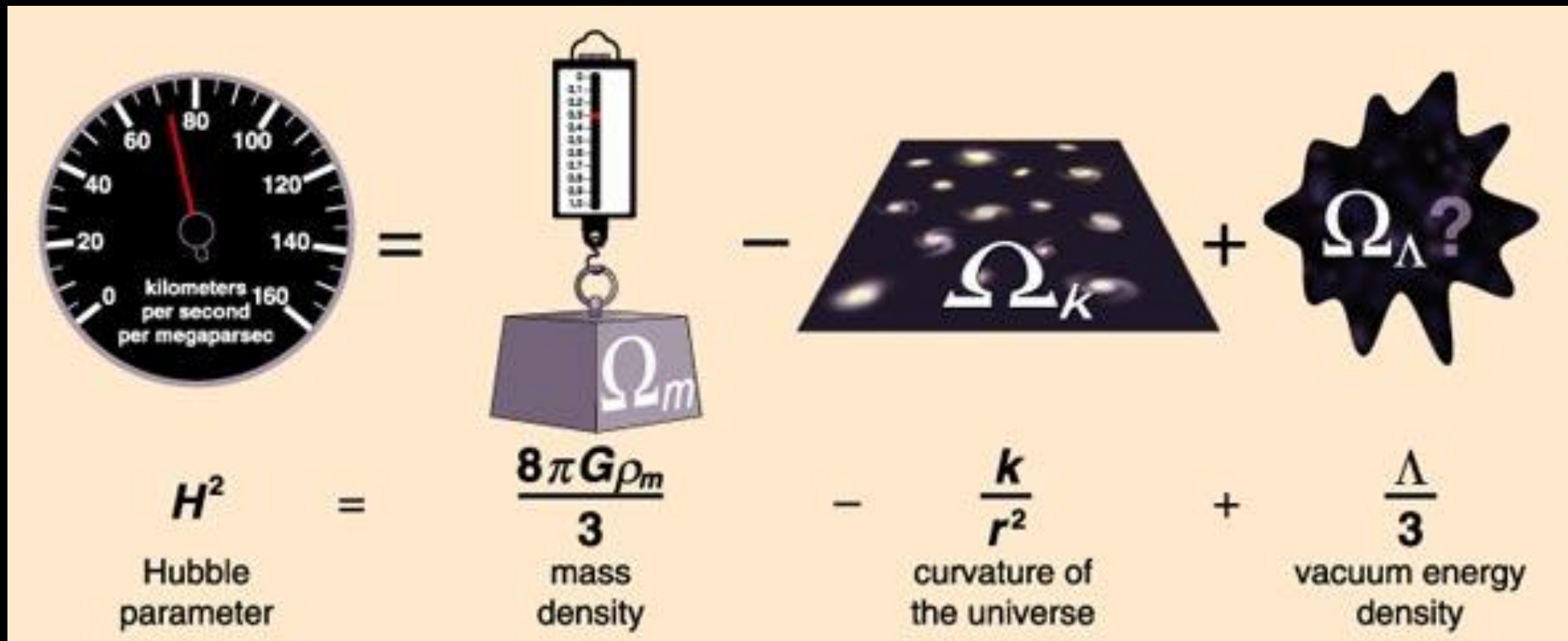
Las coordenadas comóviles se expanden con el universo



# Parámetro de Hubble $H$ y densidad crítica $\rho_c$

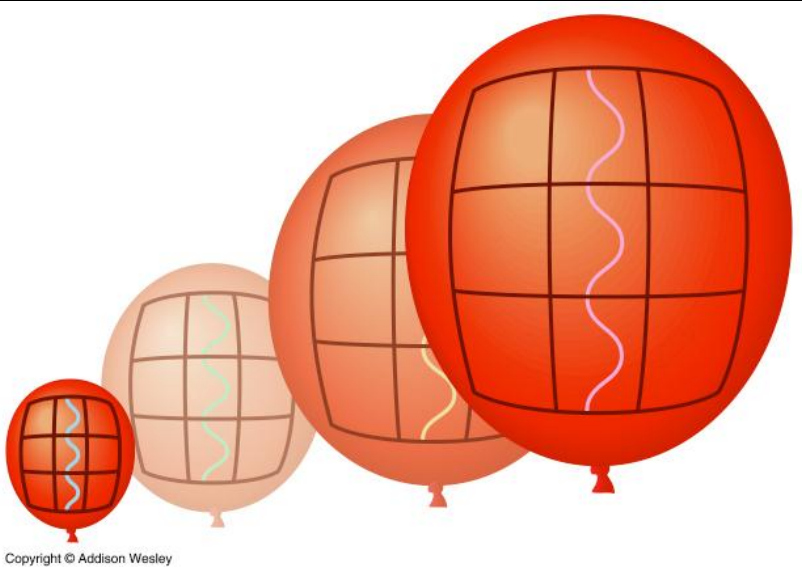
$$H = \dot{a} / a$$

$$\rho_c = 3H_0^2 / 8\pi G$$



La tasa de expansión del universo está relacionada con las densidades y el factor de escala

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**

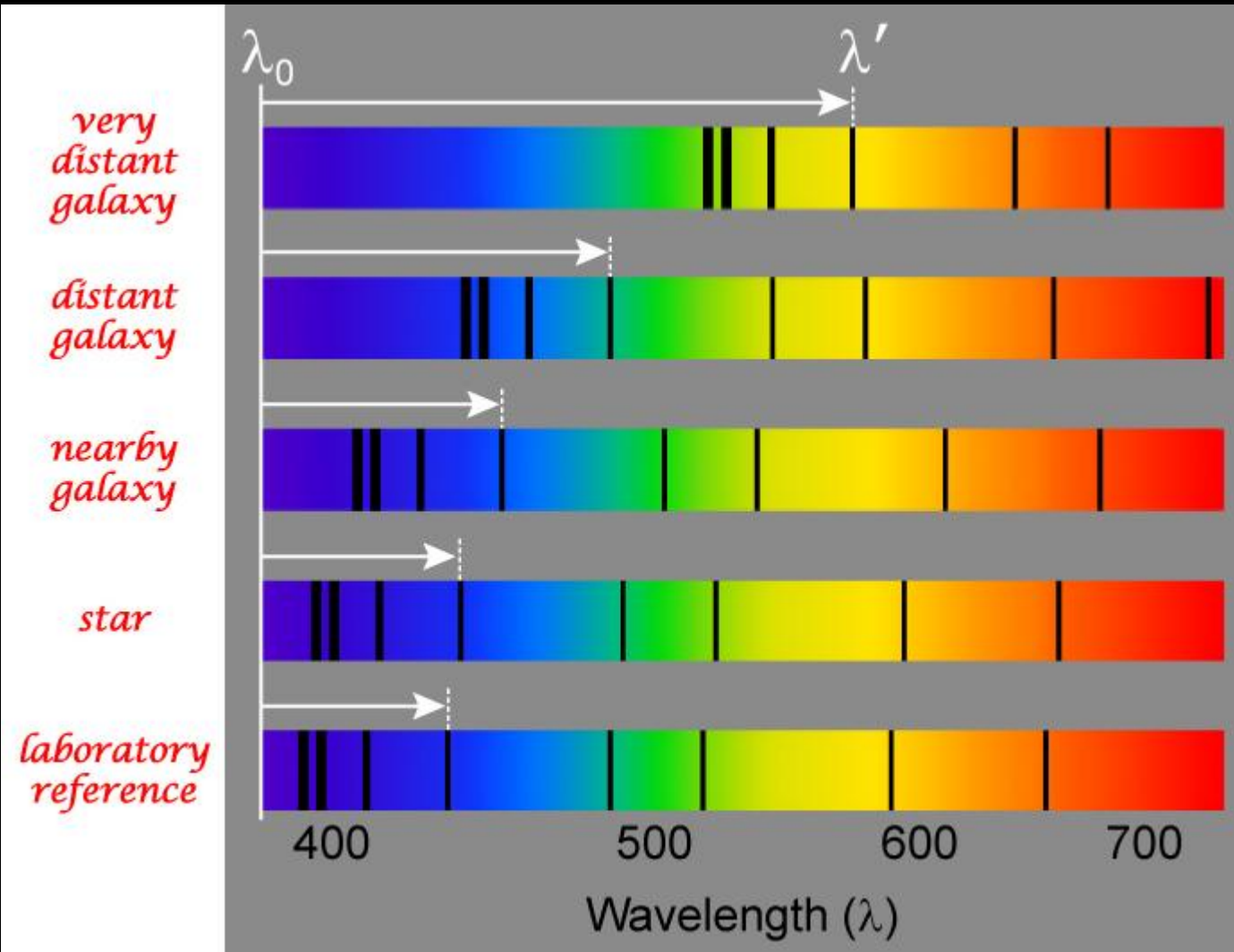
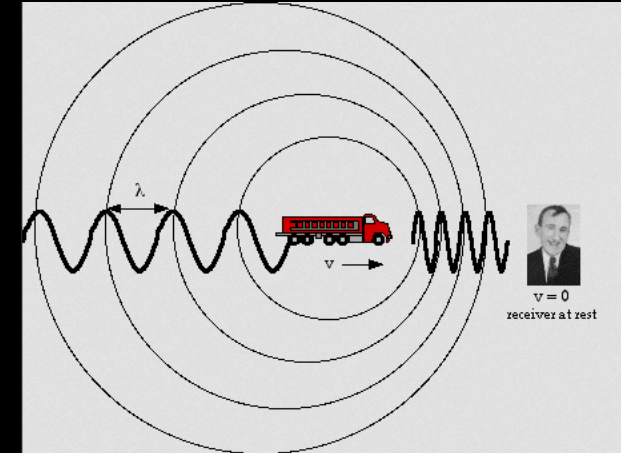
$$\frac{\lambda_e}{a(t_e)} = \frac{\lambda_o}{a(t_0)}$$

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



# El Desplazamiento al rojo, z

Las líneas espectrales de los cuerpos celestes se ven desplazadas respecto a su posición medida en el laboratorio.



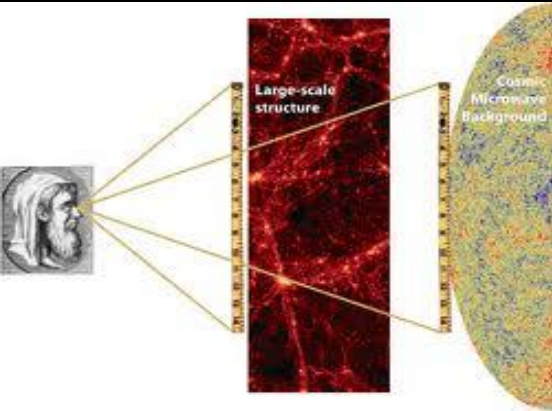
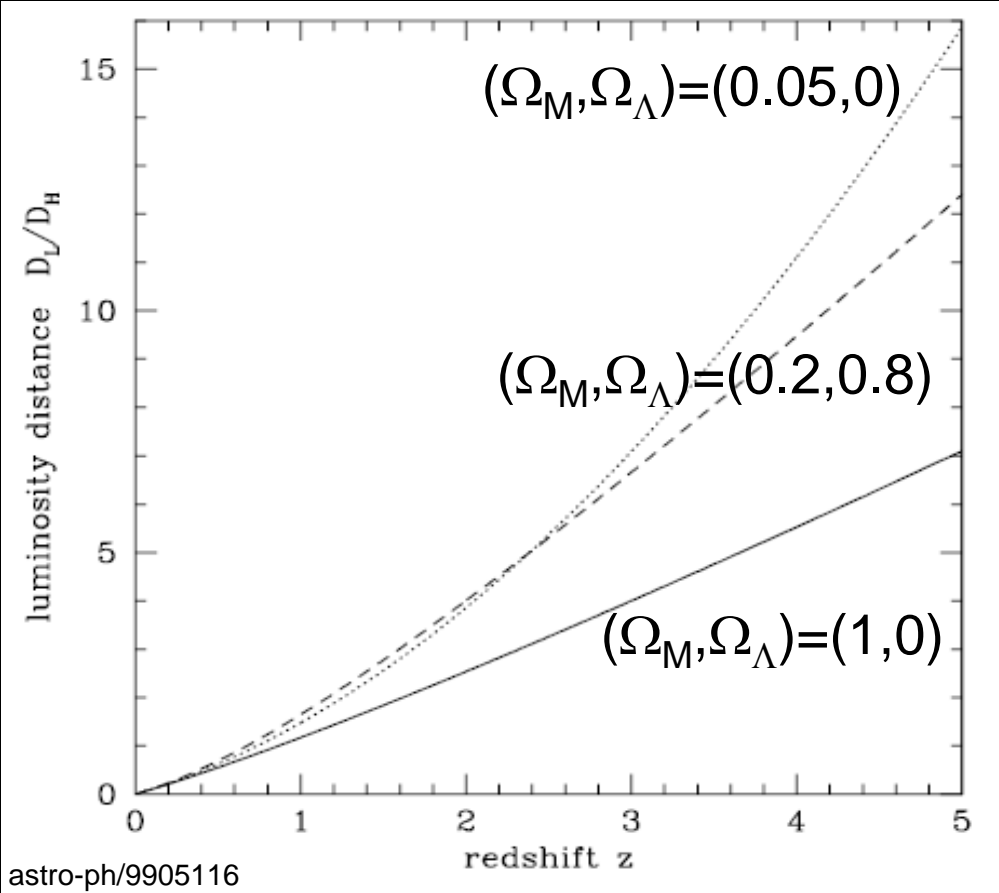
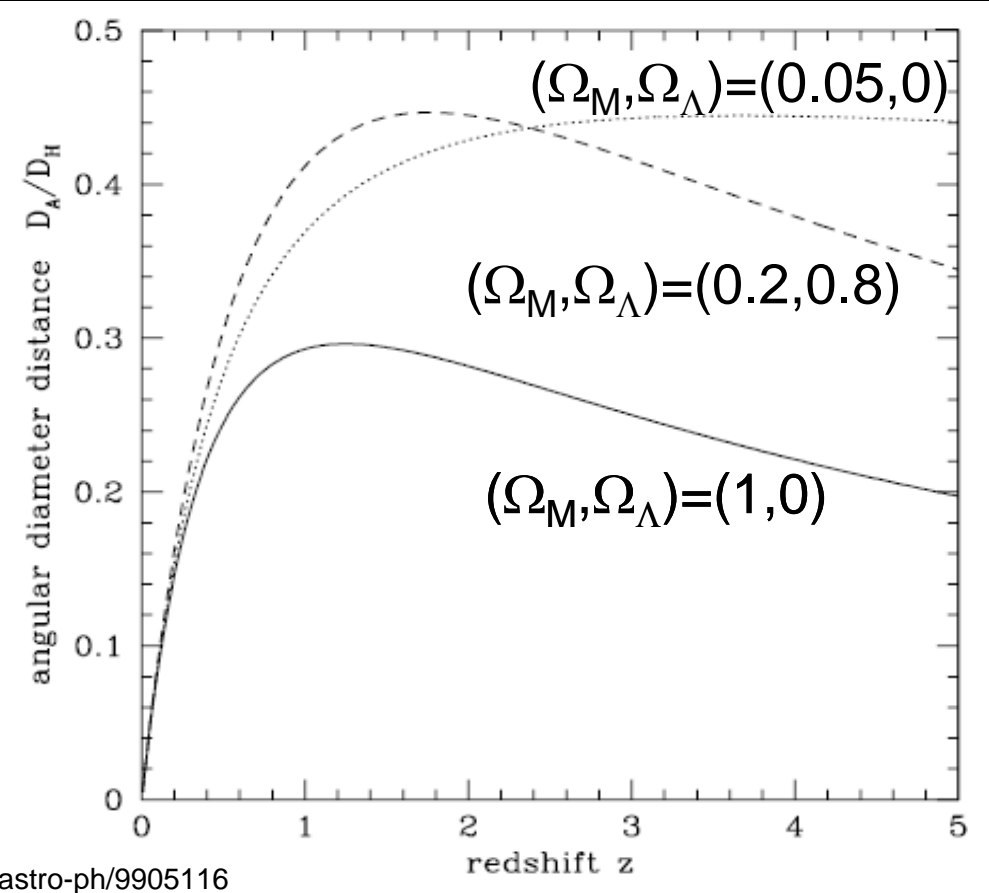
$$z = (\lambda_o - \lambda_e) / \lambda_e$$

Las líneas de todas las galaxias lejanas se ven desplazadas al rojo. Las galaxias se alejan.

**Cosmología:**  
**Distancia . vs. z**

# Distancia diámetro angular

# Distancia luminosidad



**REGLAS ESTÁNDAR**

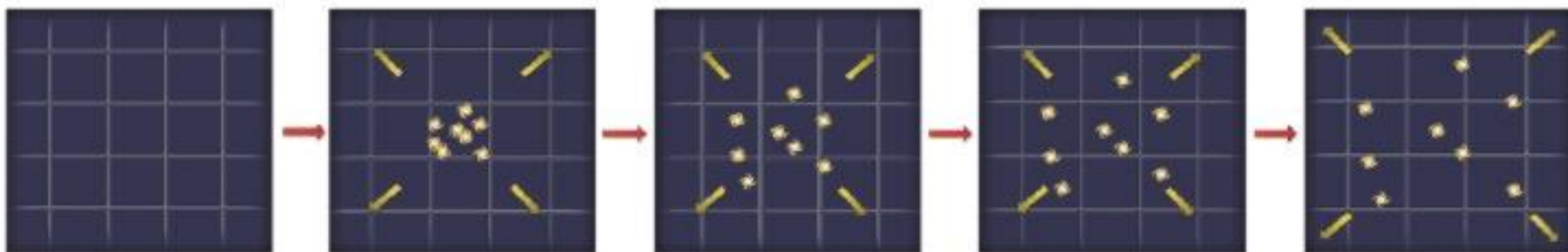


**CANDELAS ESTÁNDAR**

# WHAT KIND OF EXPLOSION WAS THE BIG BANG?

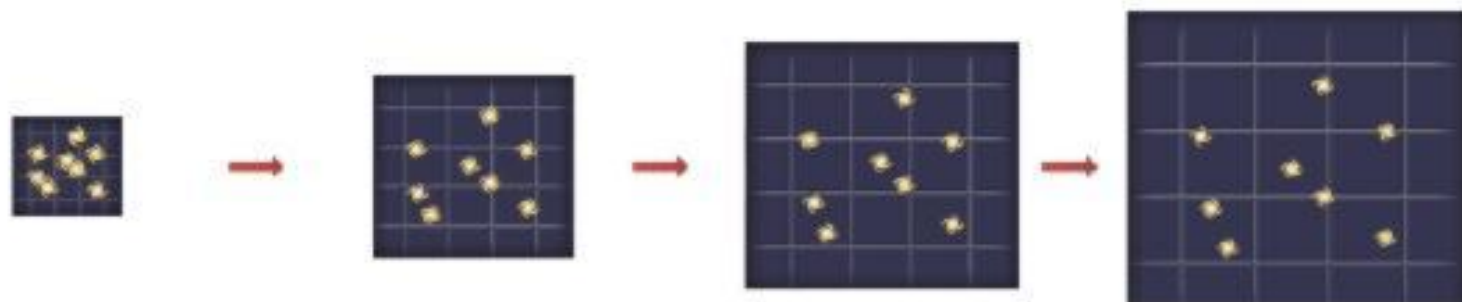
**WRONG:** The big bang was like a bomb going off at a certain location in previously empty space.

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.



# El modelo estándar de la cosmología: El Big Bang

Los objetos se alejan porque el espacio se expande, pero los objetos no se hacen más grandes

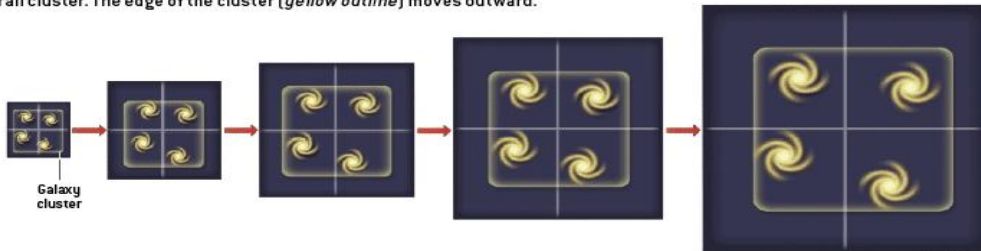
La expansión es consecuencia del Big Bang

La velocidad de expansión depende del contenido en materia-energía del universo

## DO OBJECTS INSIDE THE UNIVERSE EXPAND, TOO?

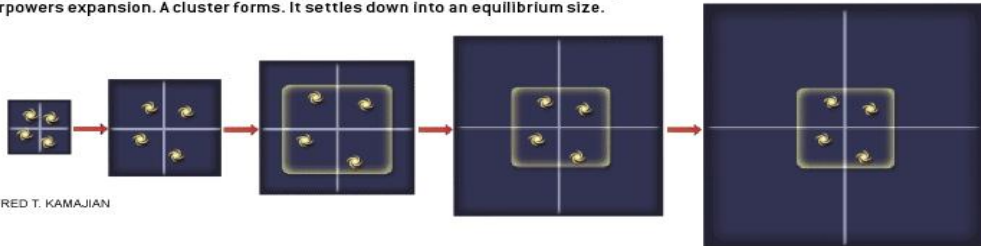
**WRONG:** Yes. Expansion causes the universe and everything in it to grow.

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.

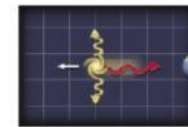


ALFRED T. KAMAJIAN

## WHY IS THERE A COSMIC REDSHIFT?

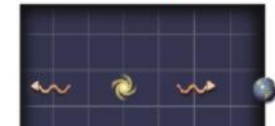
**WRONG:** Because receding galaxies are moving through space and exhibit a Doppler shift.

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).



ALFRED T. KAMAJIAN

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

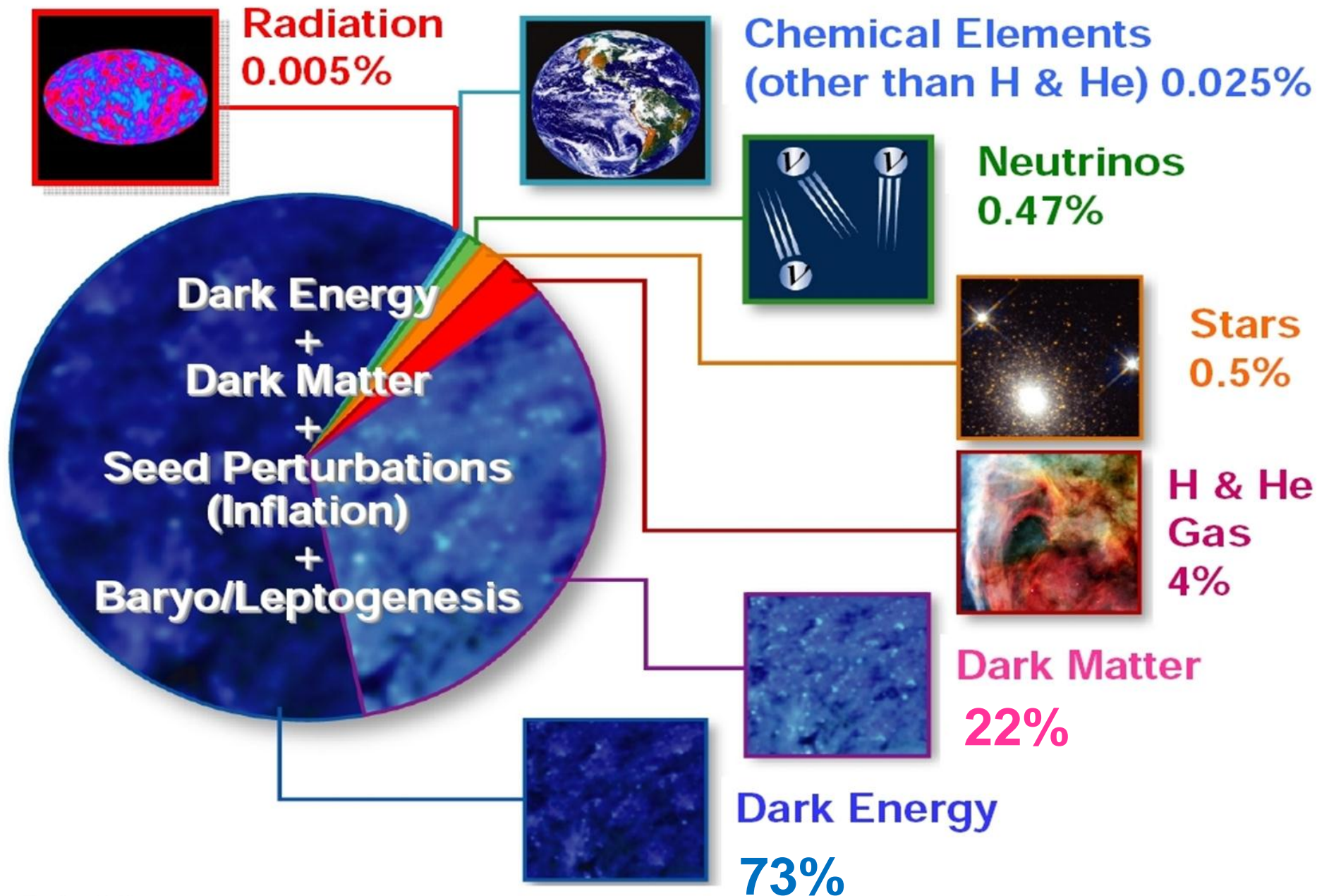


Galaxies hardly move through space, so they emit light with nearly the same wavelength in all directions (top). The wavelength gets longer during the journey, because space is expanding. Thus, the light gradually reddens (middle and bottom). The amount of redshift differs from what a Doppler shift would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

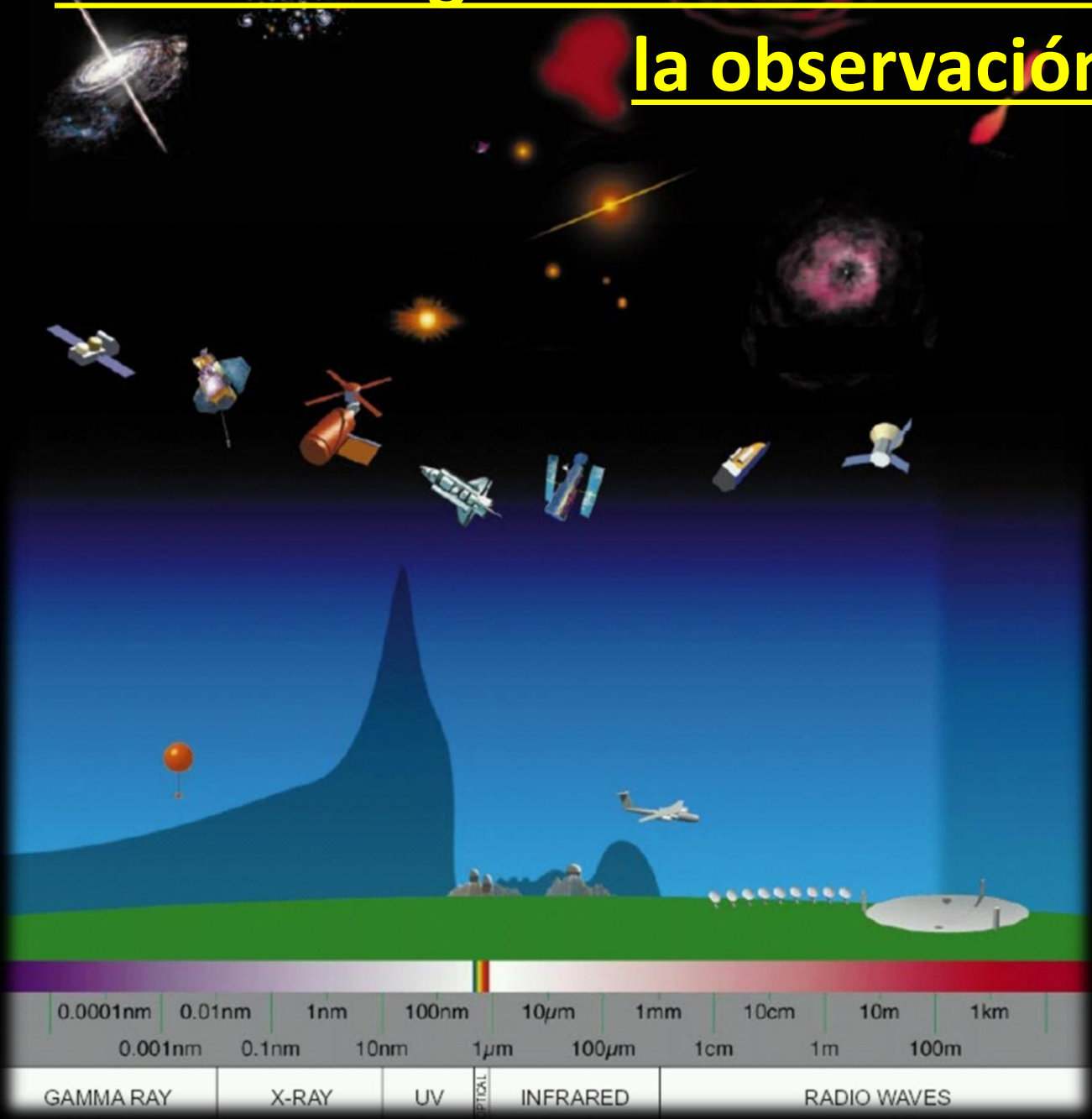


**¿Qué es lo que se observa?**





# La cosmología moderna es una ciencia basada en la observación



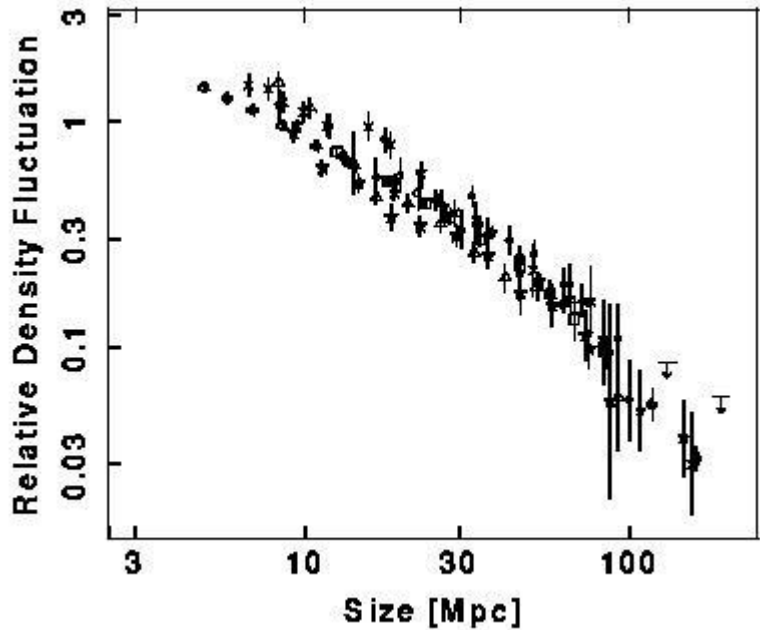
Potentes telescopios tanto en tierra como en el espacio

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

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



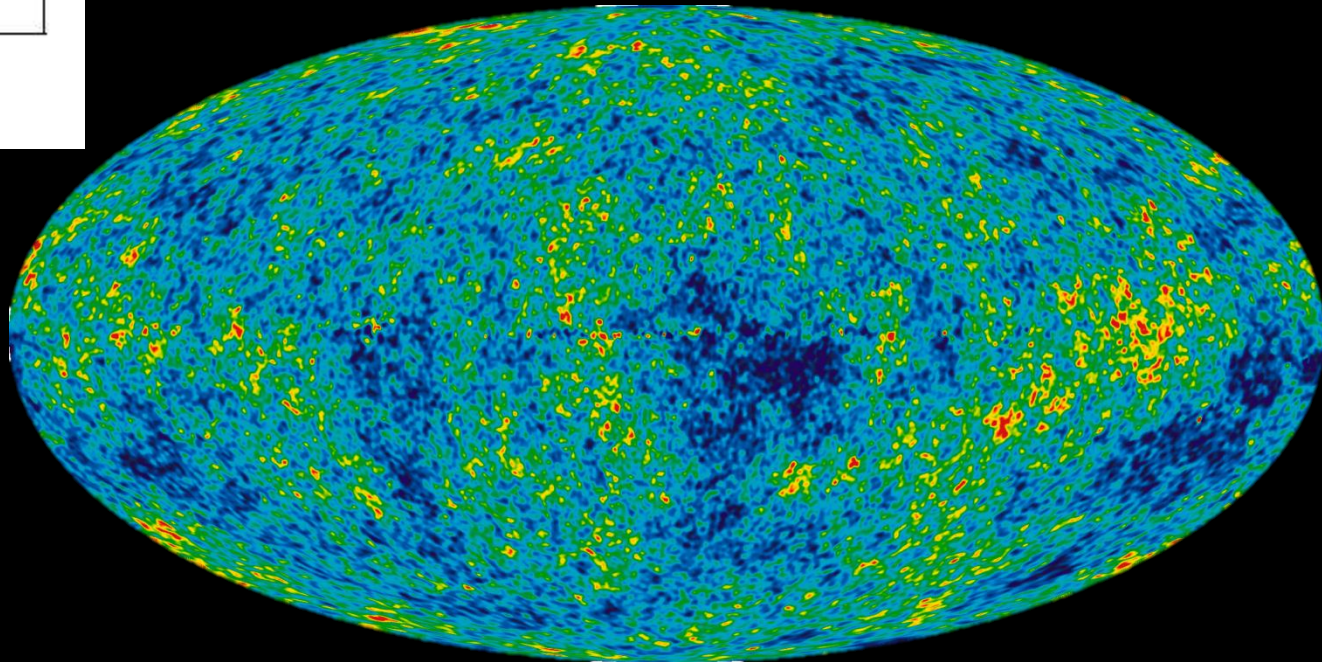
# Verificación observacional del principio cosmológico



**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

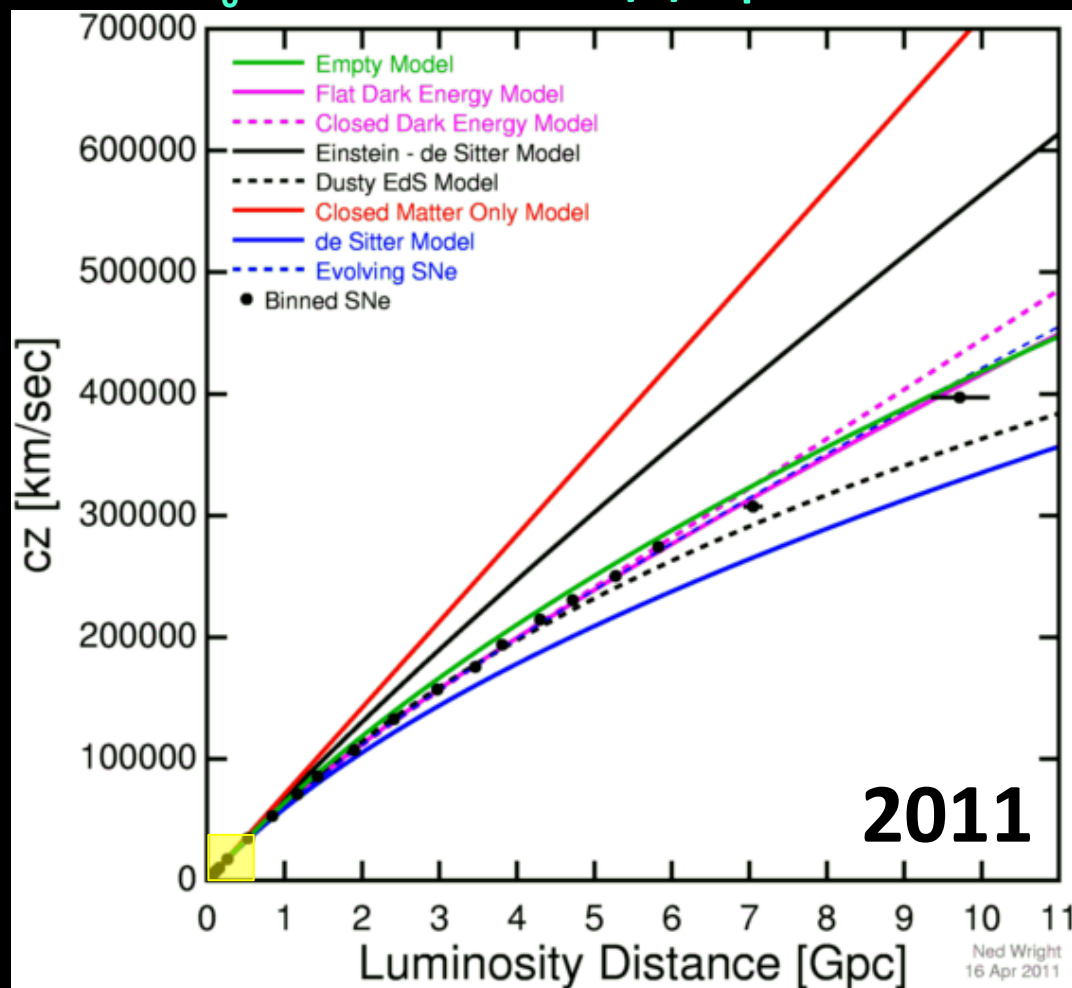
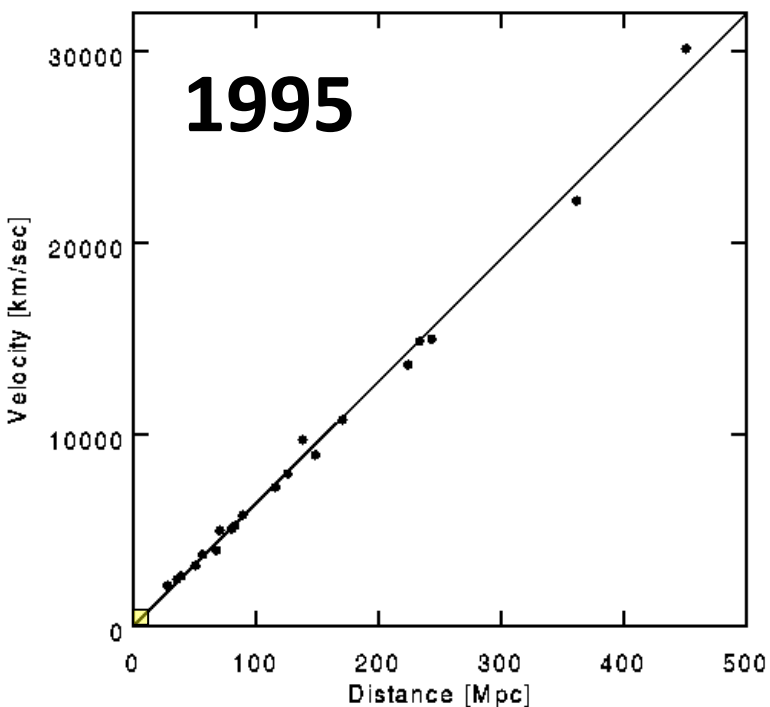
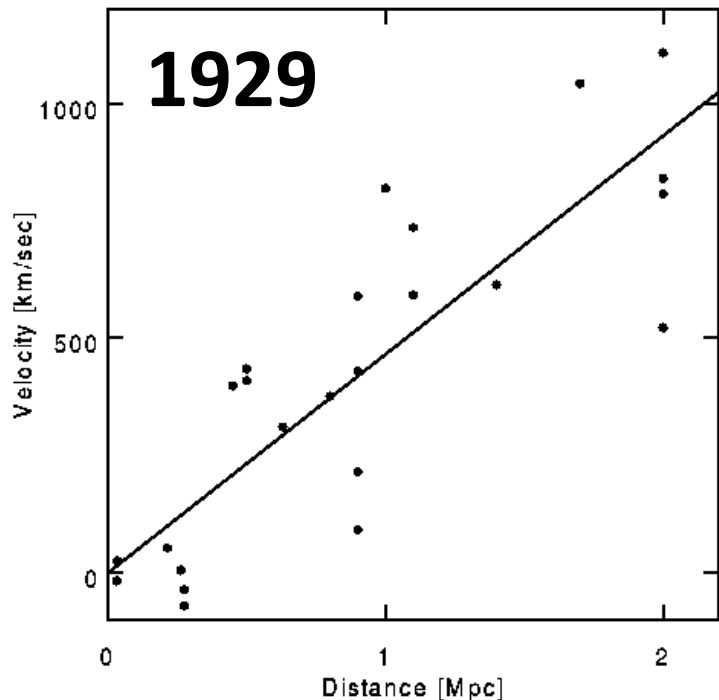
**Isotropía:** Comprobada con una precisión de 1 parte en 100000 gracias a la radiación de fondo



# Expansión: La ley de Hubble

La constante de Hubble nos da la velocidad de expansión del universo. Su medida ha mejorado muchísimo gracias a las nuevas tecnologías. El mejor valor actual es:

$$H_0 = 74.3 \pm 2.1 \text{ km/s/Mpc}$$

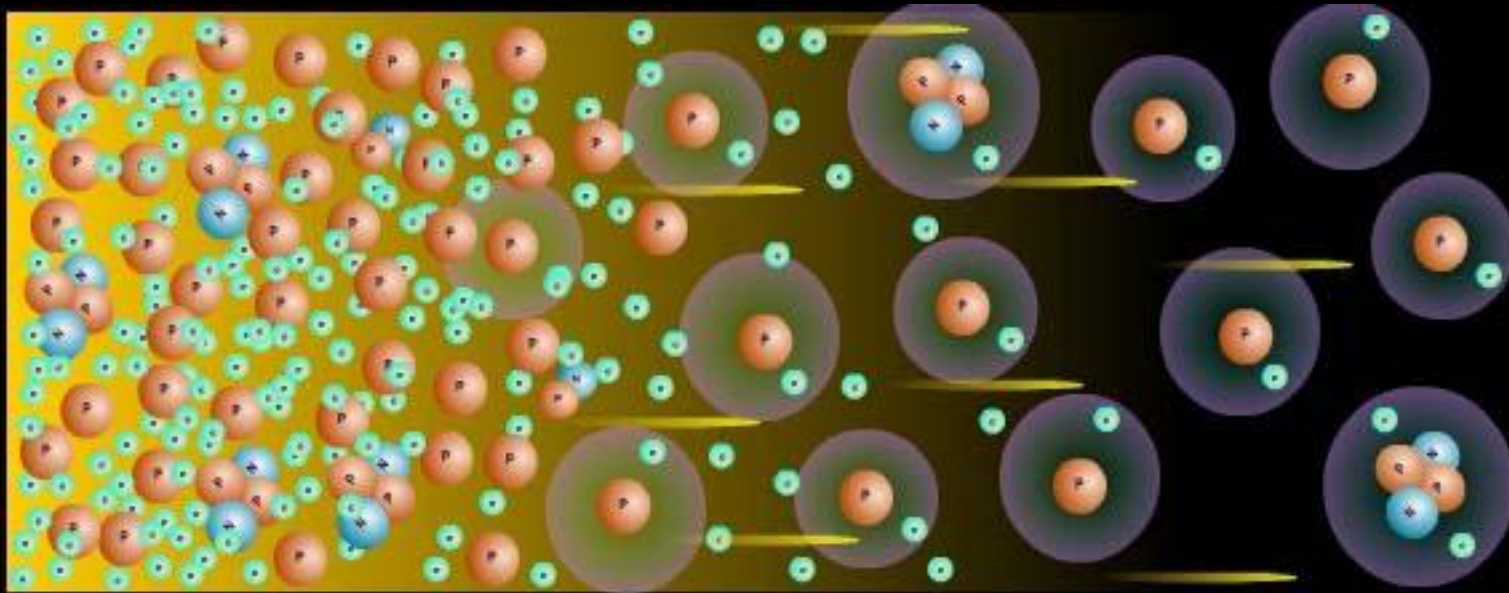


# LA RADIACIÓN DE FONDO DE MICROONDAS

Una de las predicciones decisivas del Big Bang

Procede del desacoplo materia-radiación en el universo primitivo

**Se produjo cuando el universo tenía 380000 años. Es decir, de hace unos...!!!  
13600 millones de años!!! (Si el universo fuera una persona de 80 años, la CMB  
sería una foto de cuando tenía 13 meses!)**



**Se descubrió en 1965 por Penzias y Wilson (NOBEL)**

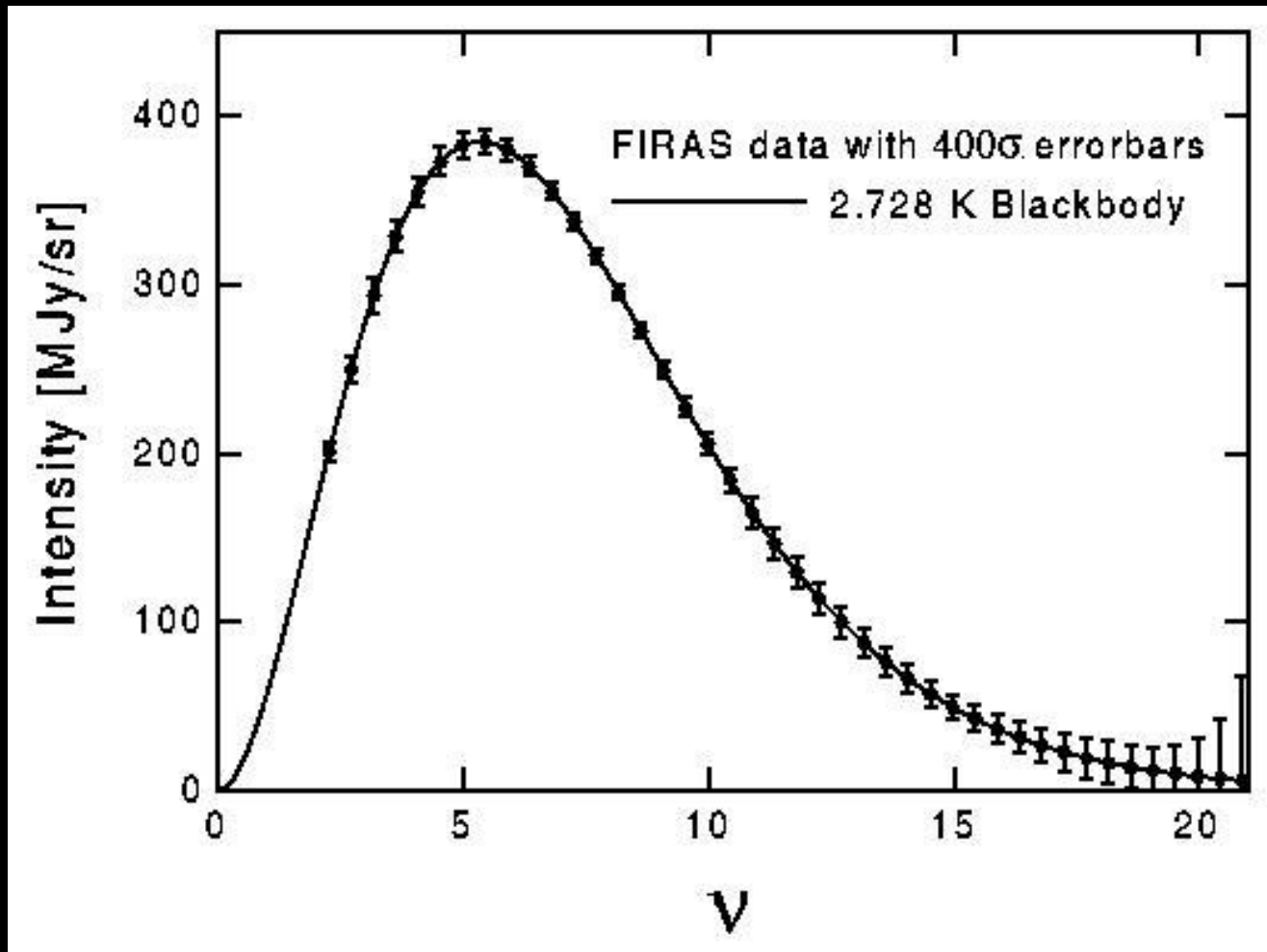
**Se confirmó que no era completamente uniforme en 1992 por COBE (NOBEL). Sus pequeñas anisotropías son la huella del origen de todas las estructuras que vemos ahora (Galaxias, estrellas, humanos...)**



# 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 debido a la expansión

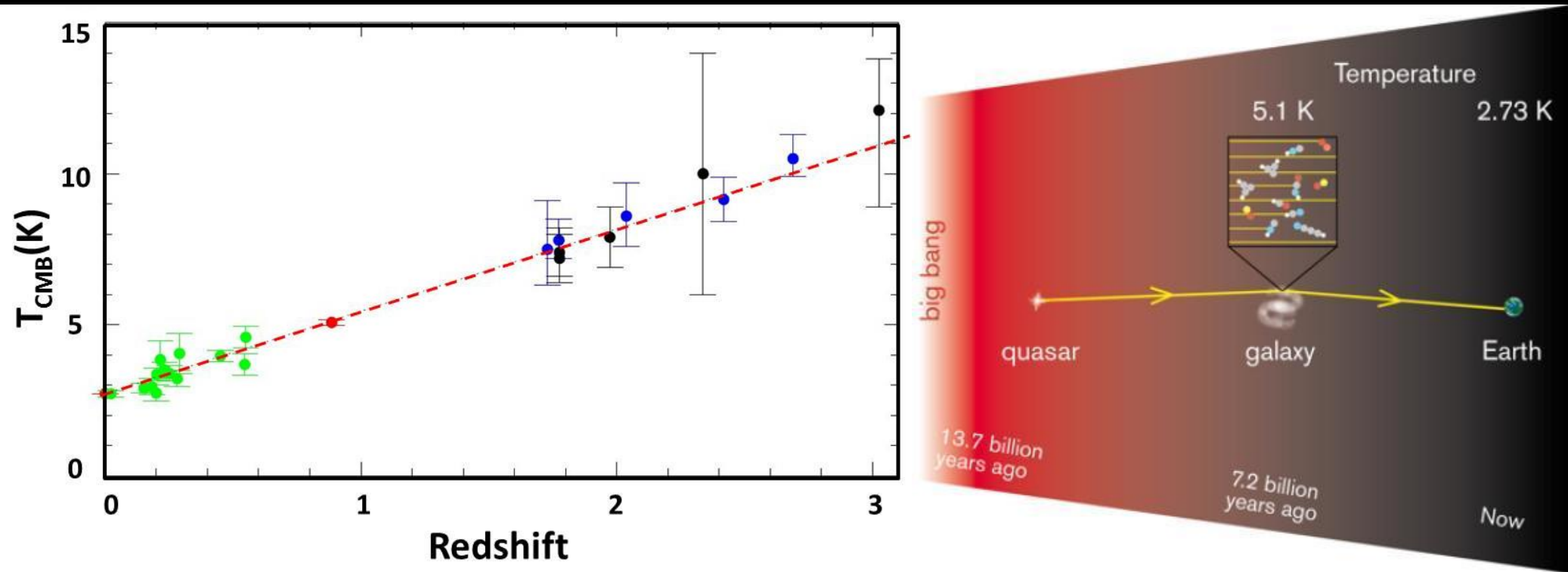
Espectro de cuerpo negro a  $2.72548 \pm 0.00057$  K



# La radiación de fondo de microondas (CMB)

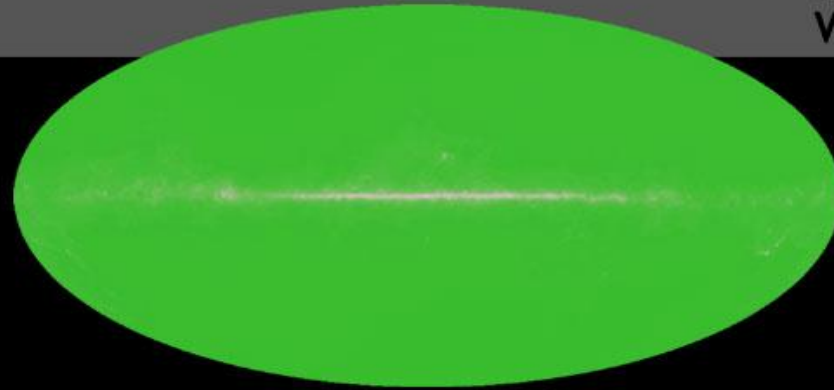
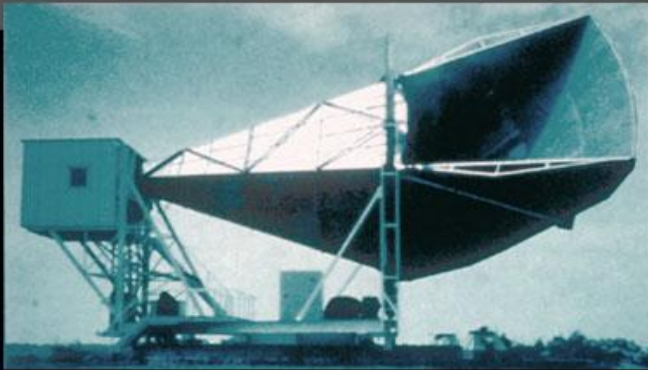
El universo era más caliente en el pasado

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



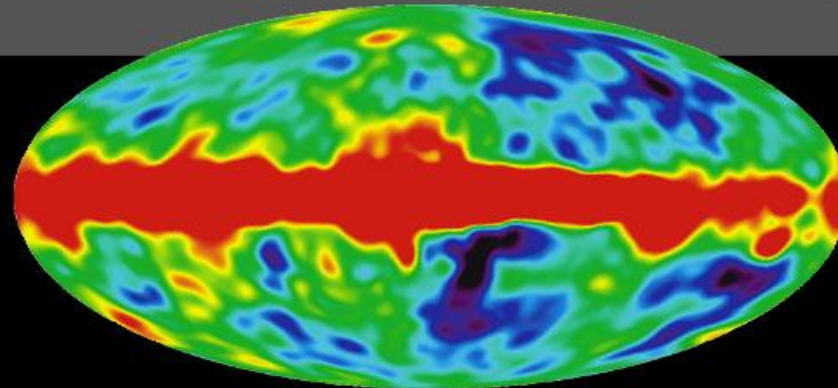
1965

Penzias and  
Wilson



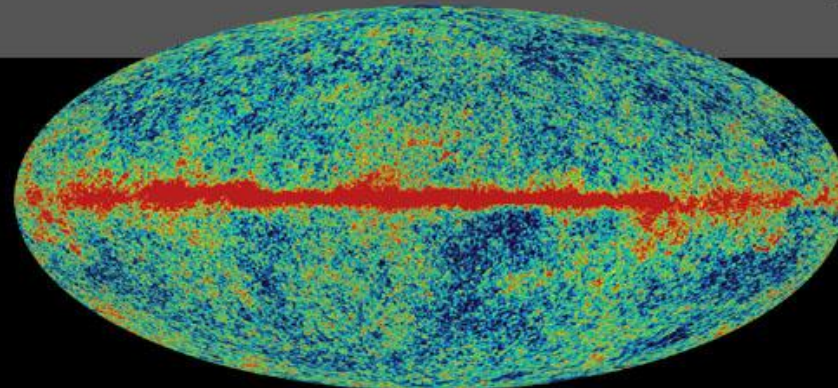
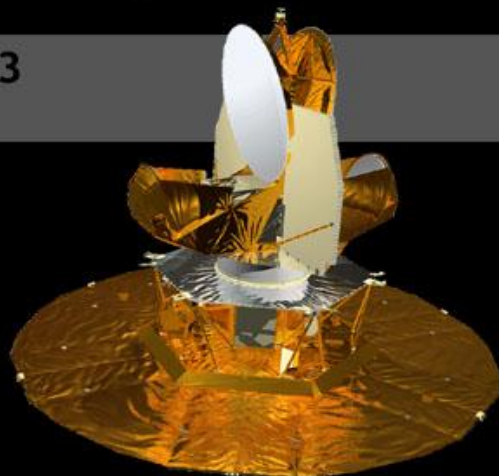
1992

COBE



2003

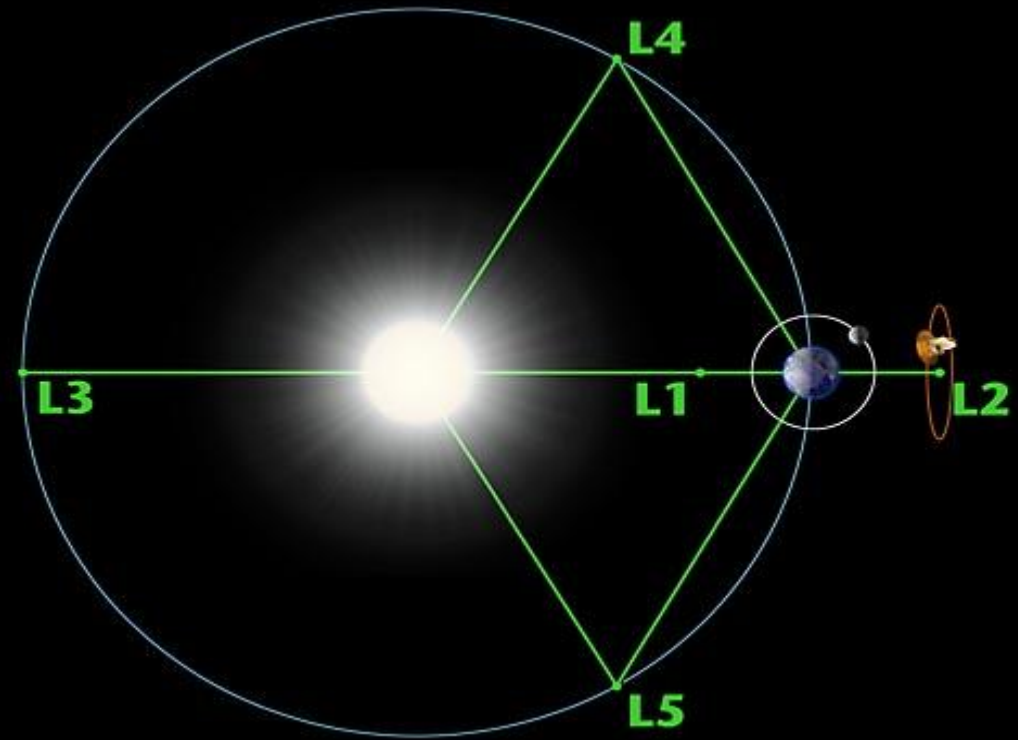
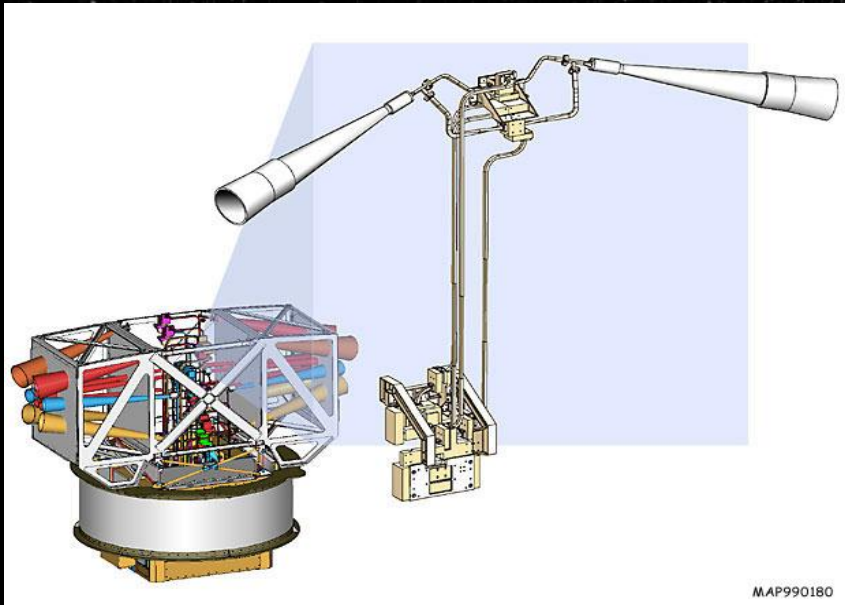
WMAP



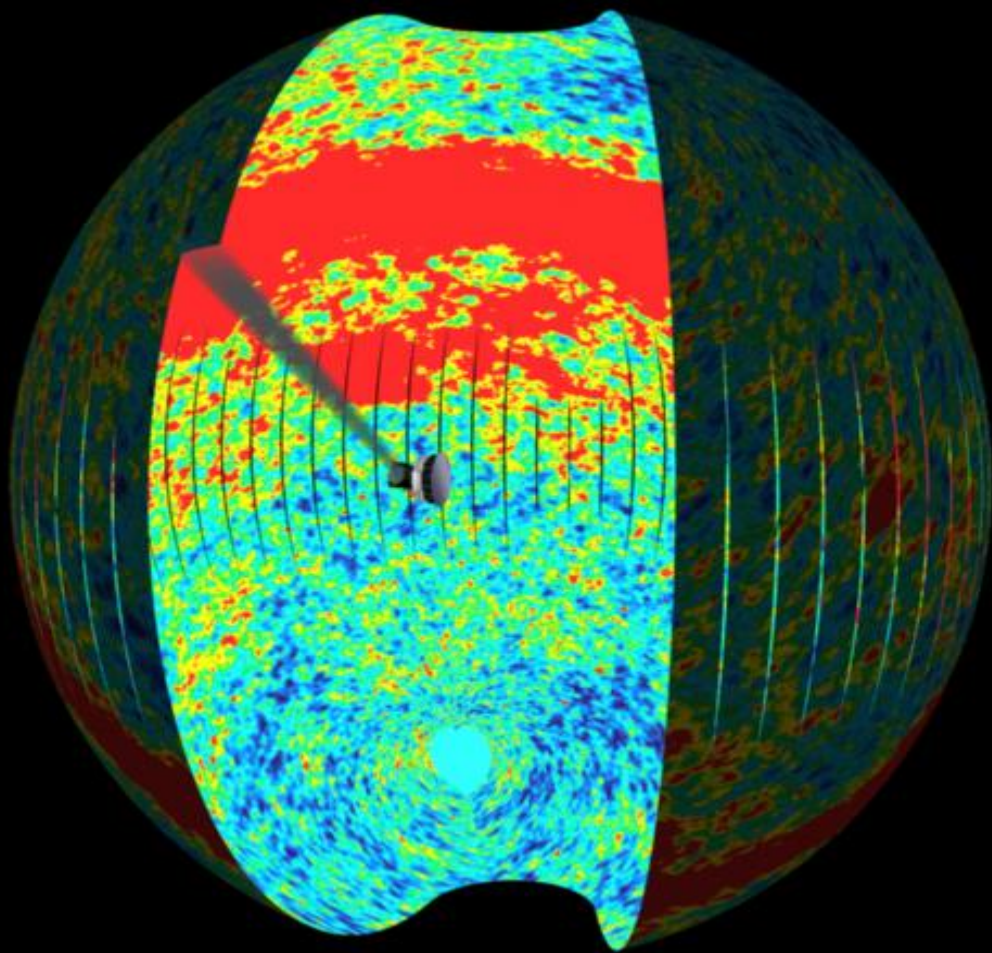


# WMAP estuvo funcionando desde 2001 hasta 2010 en punto lagrangiano L2 del sistema Tierra-Sol

Ha producido las medidas más precisas hasta la fecha en cosmología, que han permitido situar la teoría cosmológica sobre bases observacionales sólidas

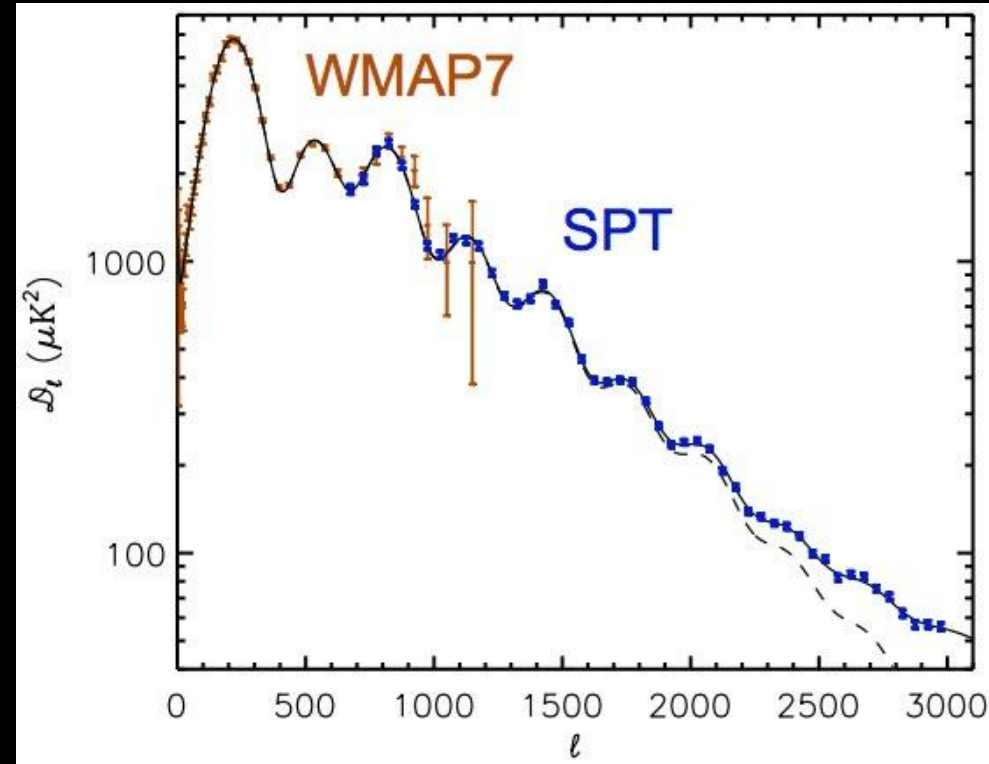
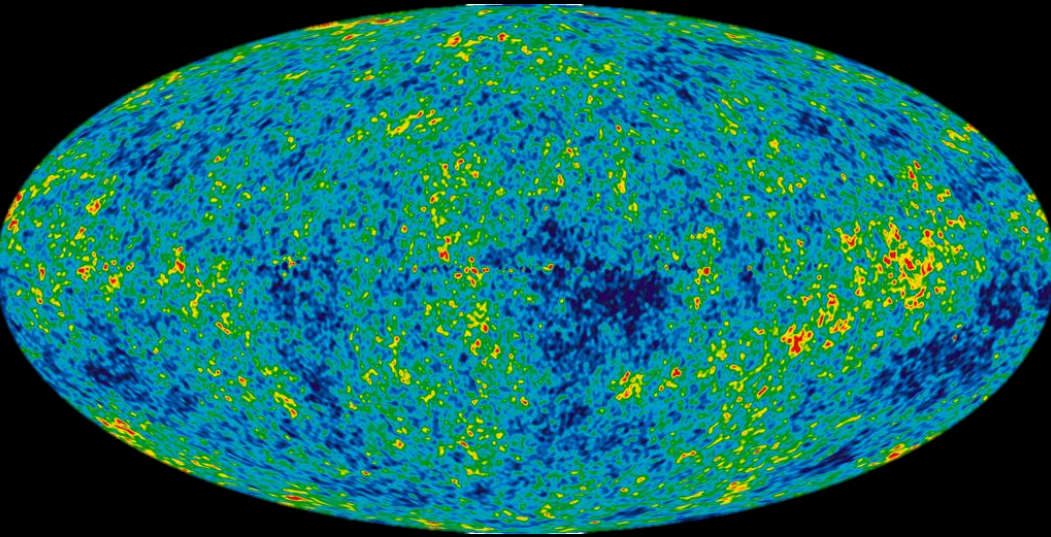


**La próxima medida vendrá de Planck, que llegó al punto lagrangiano L2 ~7 de julio de 2009. Hará medidas más precisas que WMAP y además es sensible a la polarización de la CMB**





# La radiación de fondo de microondas (CMB)



LA GEOMETRÍA DEL UNIVERSO ES EUCLÍDEA

$$\Omega_k = -0.037 \pm 0.043$$

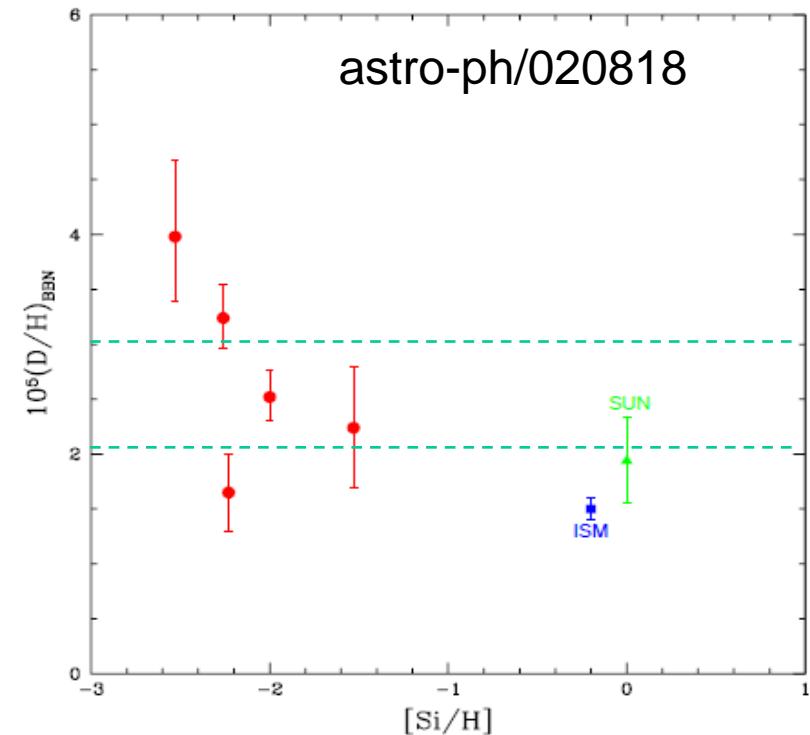
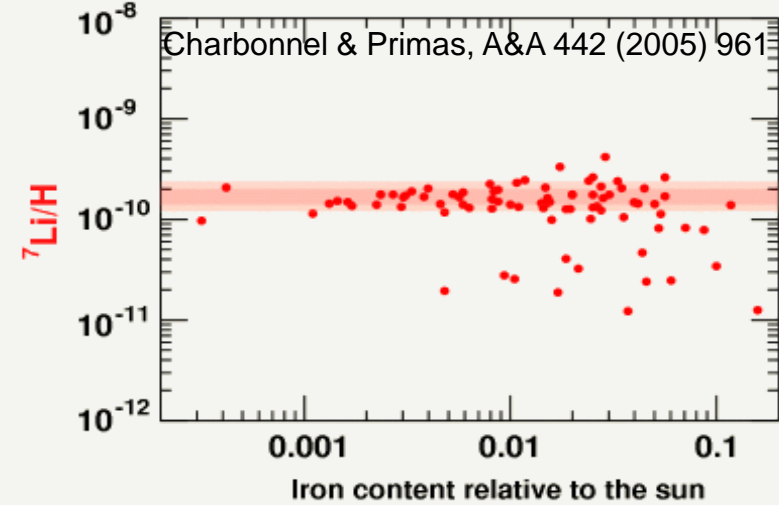
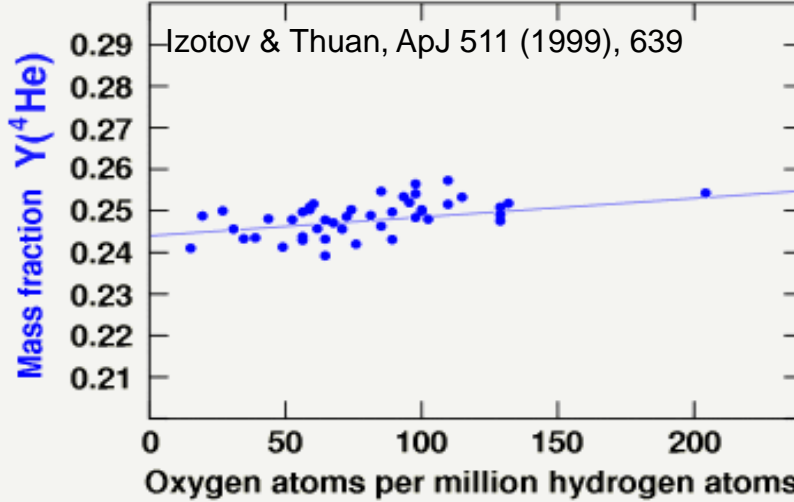
$$= -0.0027 \pm 0.0039$$

Además de muchísimas otras cosas...



# La nucleosíntesis primordial

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



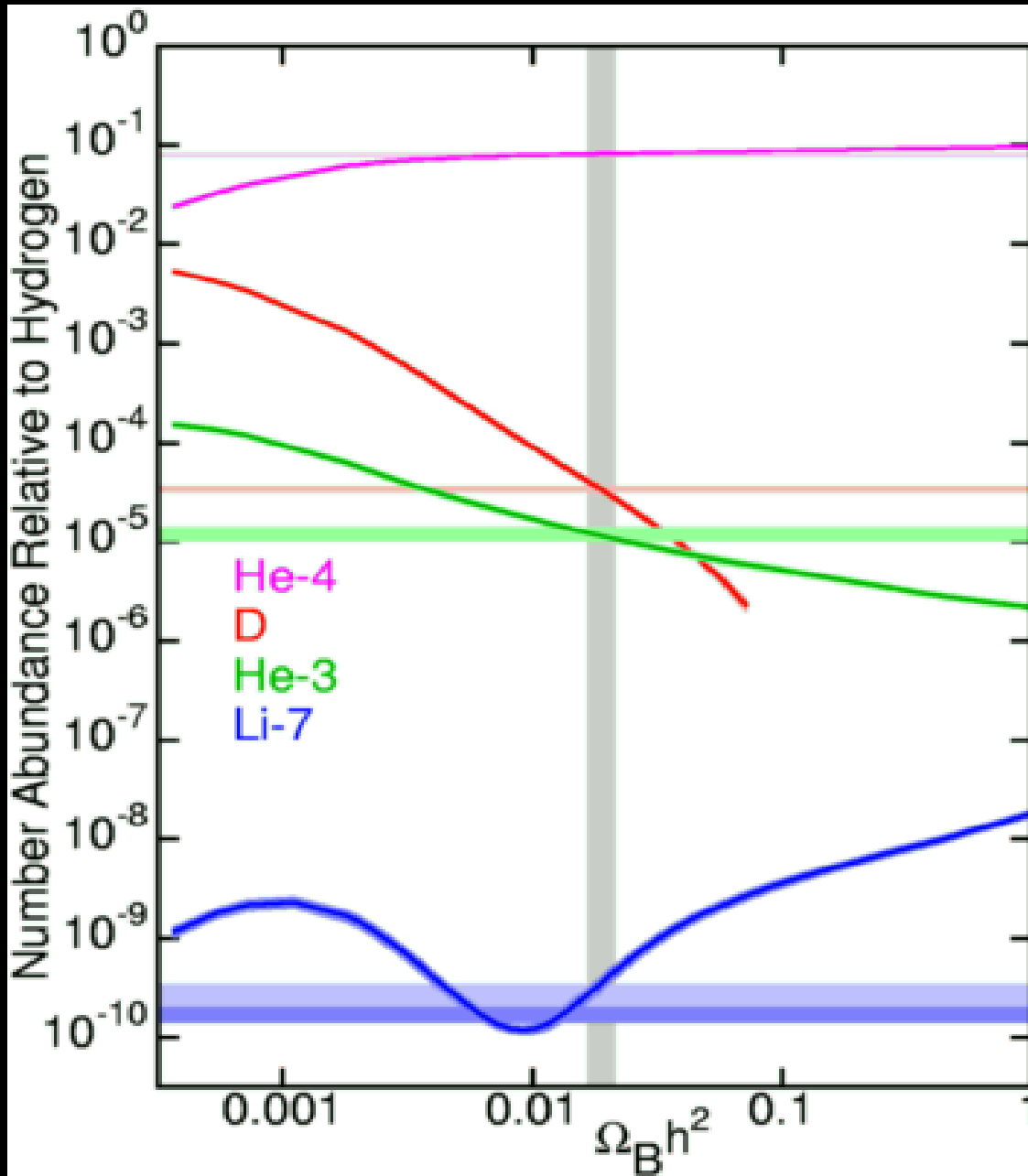
Medir sus abundancias:

D  $\rightarrow$  Líneas de absorción en QSOs

$^4\text{He}$   $\rightarrow$  Regiones HII extragalácticas de baja metalicidad (O/H).

$^7\text{Li}$   $\rightarrow$  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

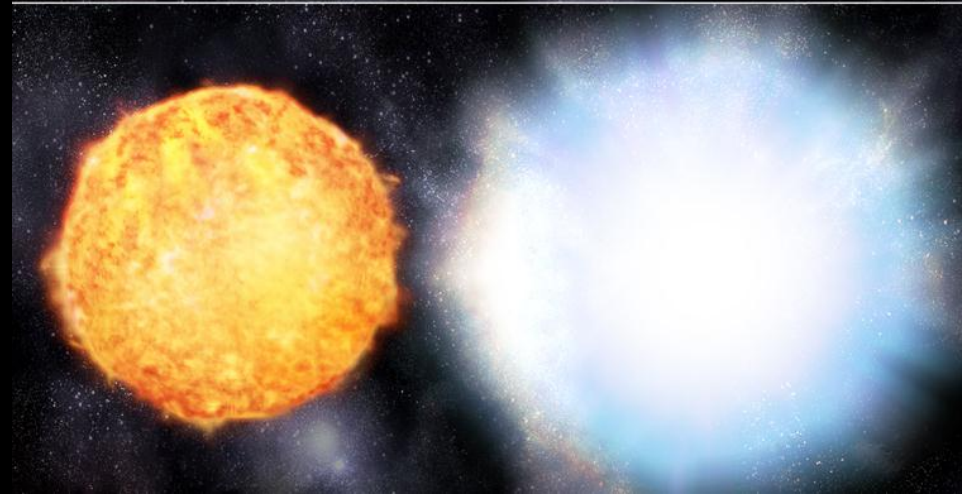
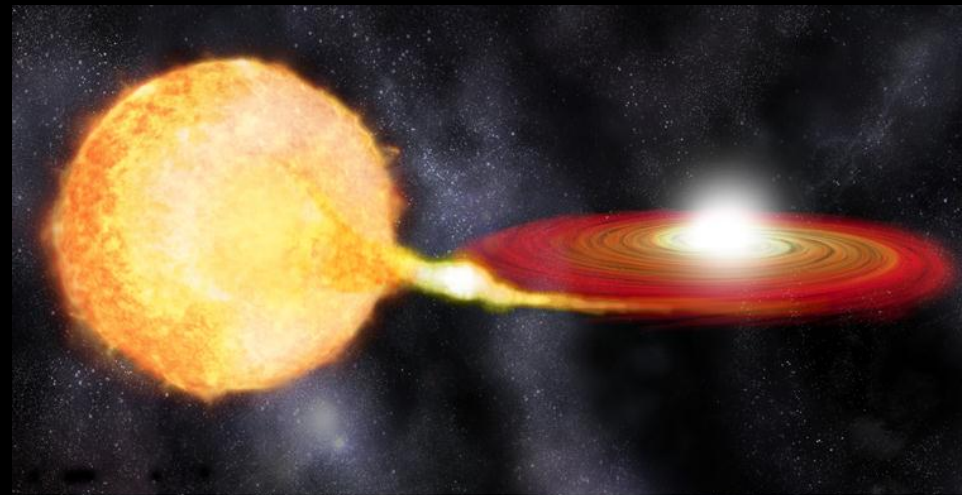
Las supernovas son el resultado de la muerte violenta de estrellas muy masivas. Son extraordinariamente brillantes, por eso se pueden ver a enormes distancias

S<sub>n</sub>Ia

En sistemas binarios gigante roja-  
enana blanca

La enana blanca obtiene masa a  
costa de la gigante

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





# SN 1998aq

NGC 3982  
*A. Riess (STScI)*

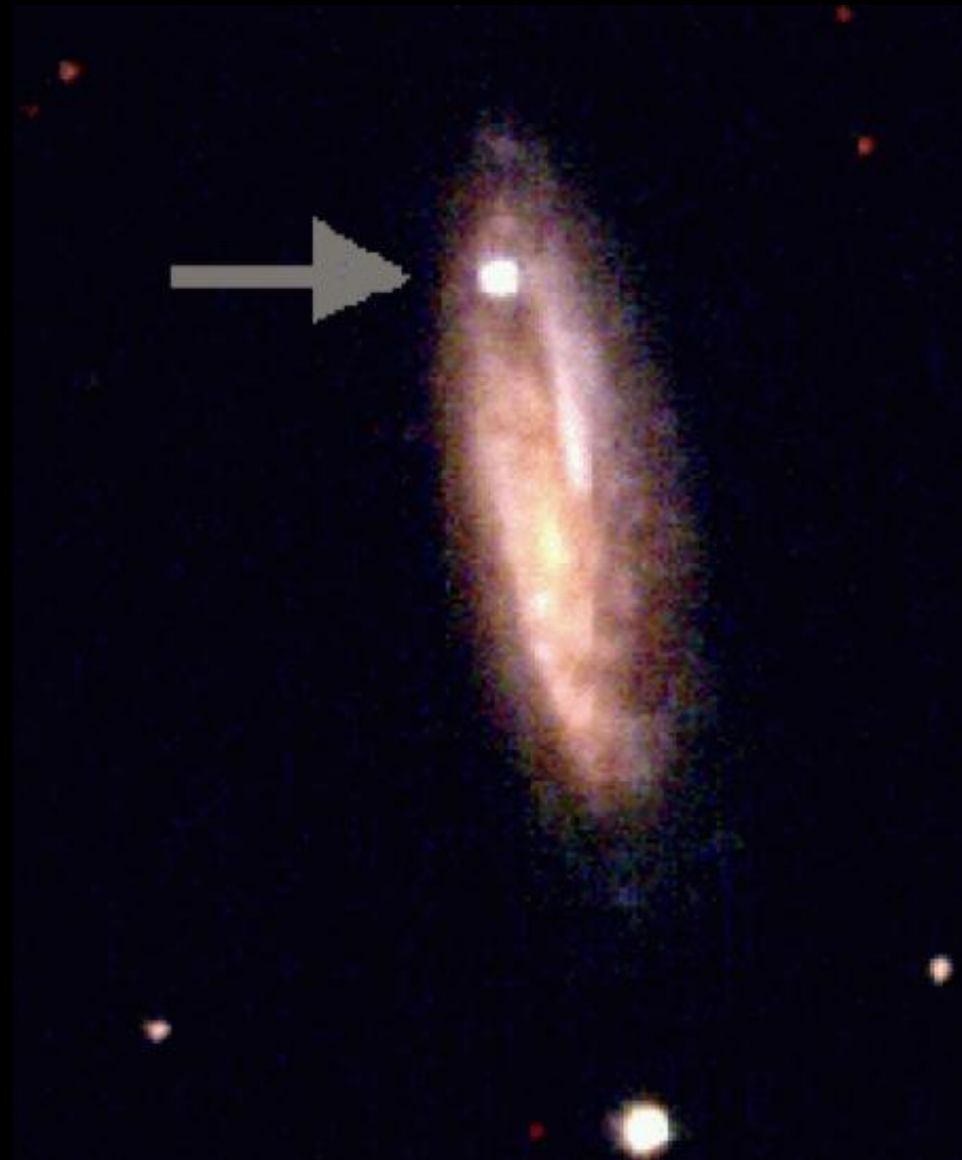
SN1998aq

Ground

HST WFPC2



# SN 1998dh



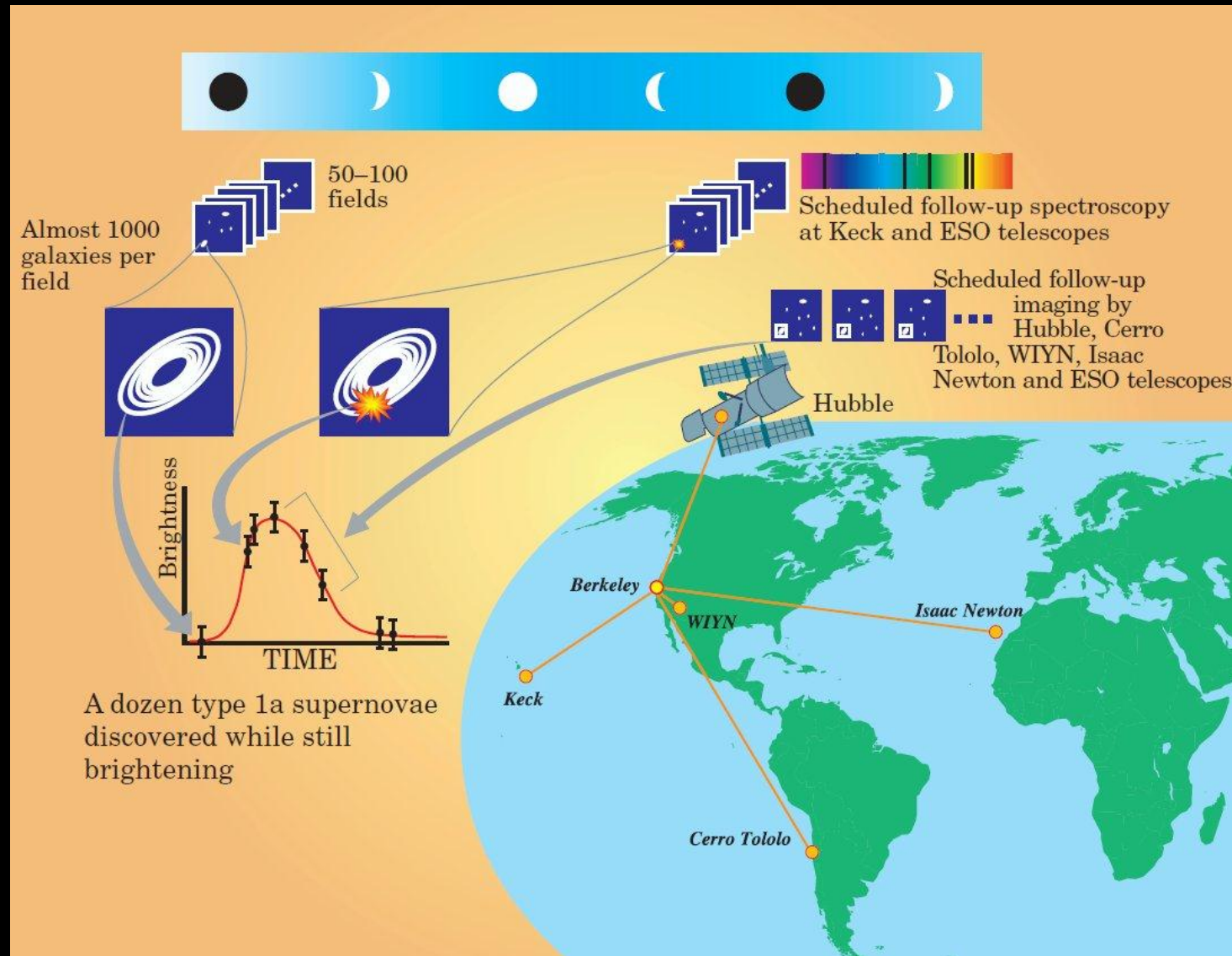
# Las supernovas Ia: energía oscura

Las supernovas Ia son buenos indicadores de distancia (candelas estandarizables) por ser iguales

Estrategia de búsqueda

Mirar sistemáticamente a la misma parte del cielo

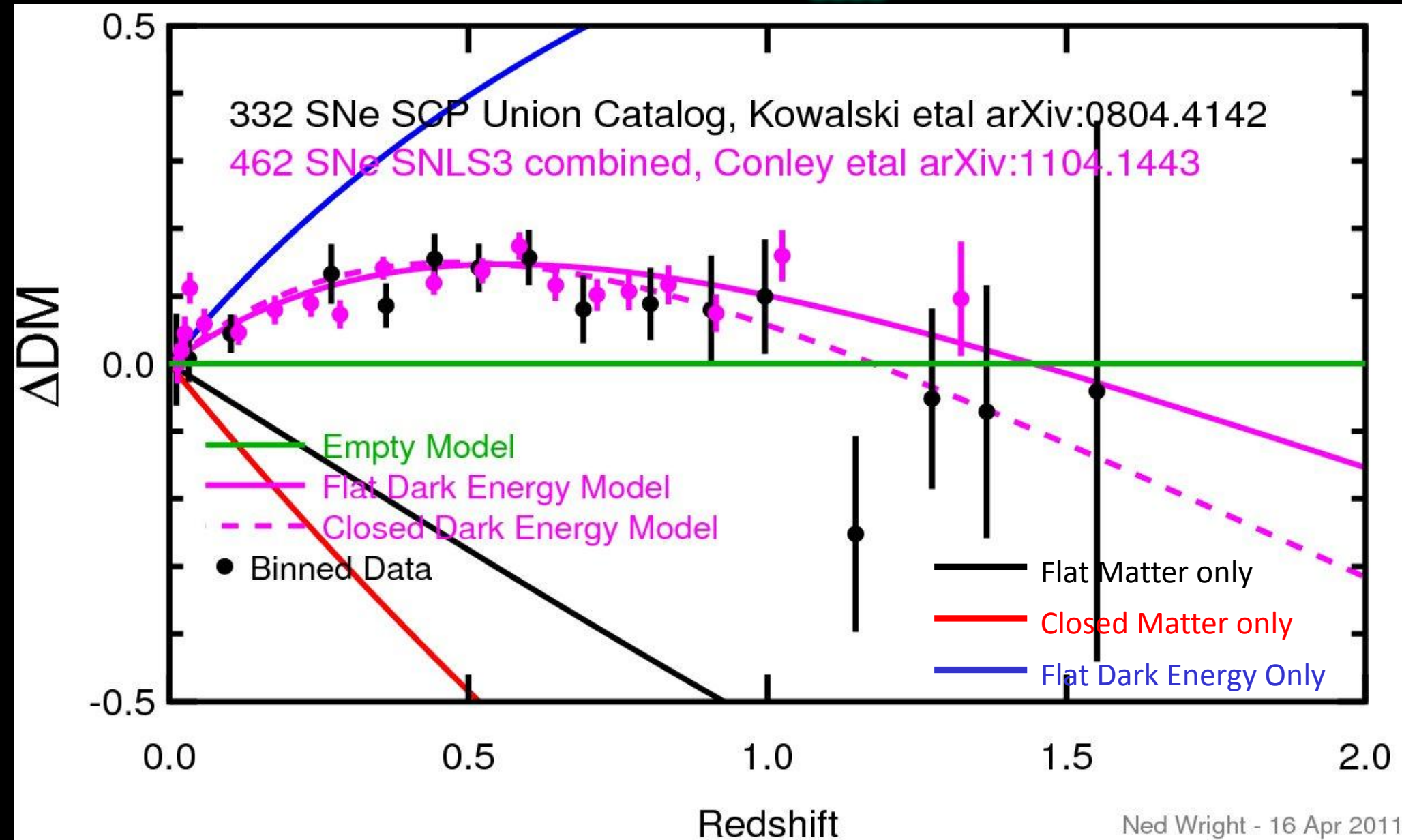
Obtener el espectro y la evolución del brillo





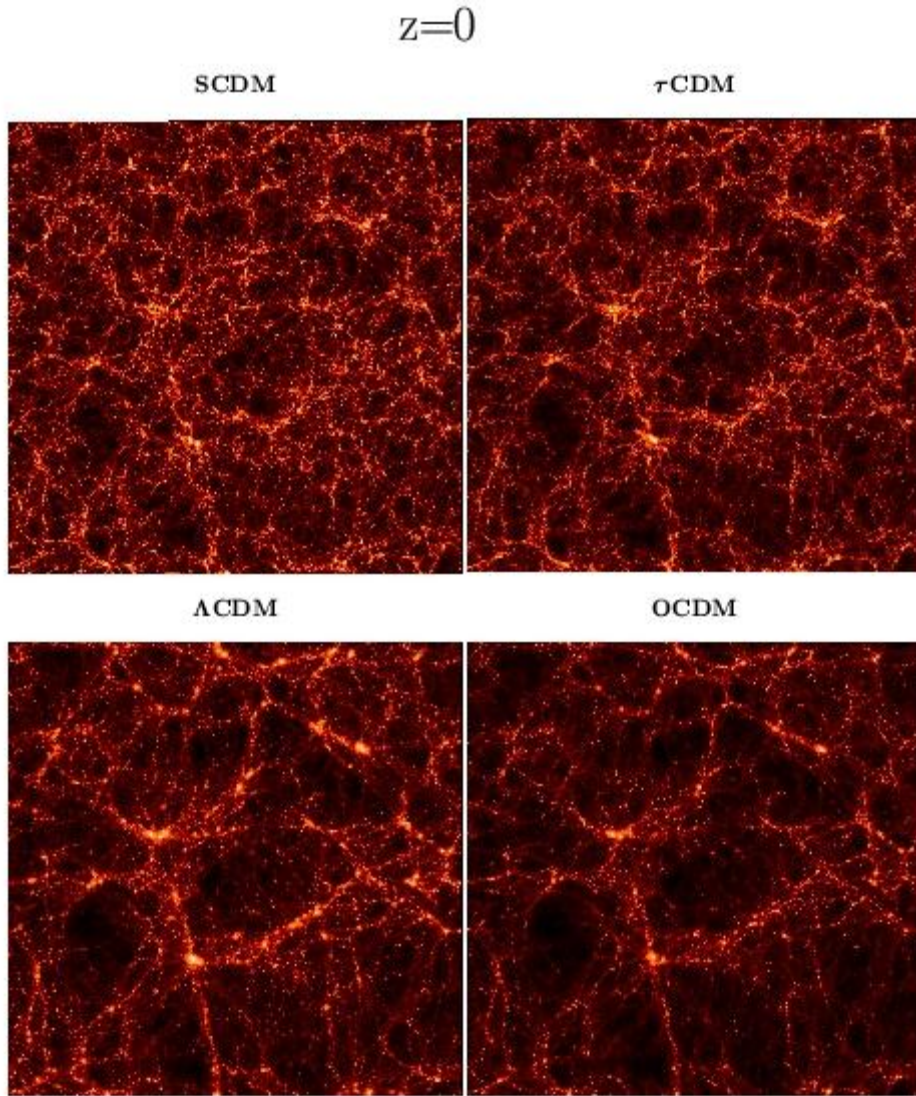
# Las supernovas Ia: energía oscura

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

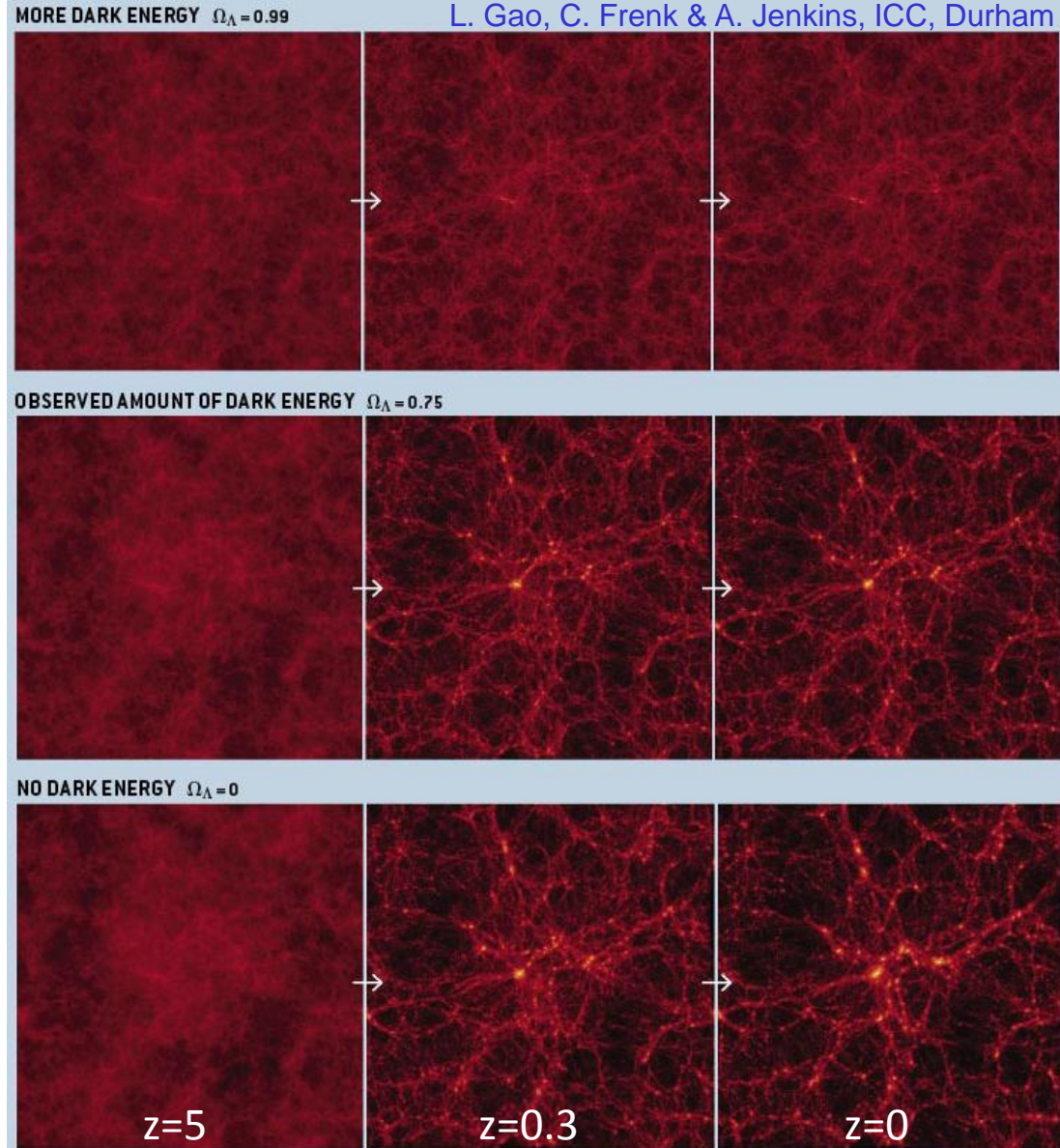


# La estructura a gran escala (LSS) del universo

Diferentes contenidos de materia-energía del universo predicen diferentes niveles de estructura. **Materia y energía oscuras son necesarias**



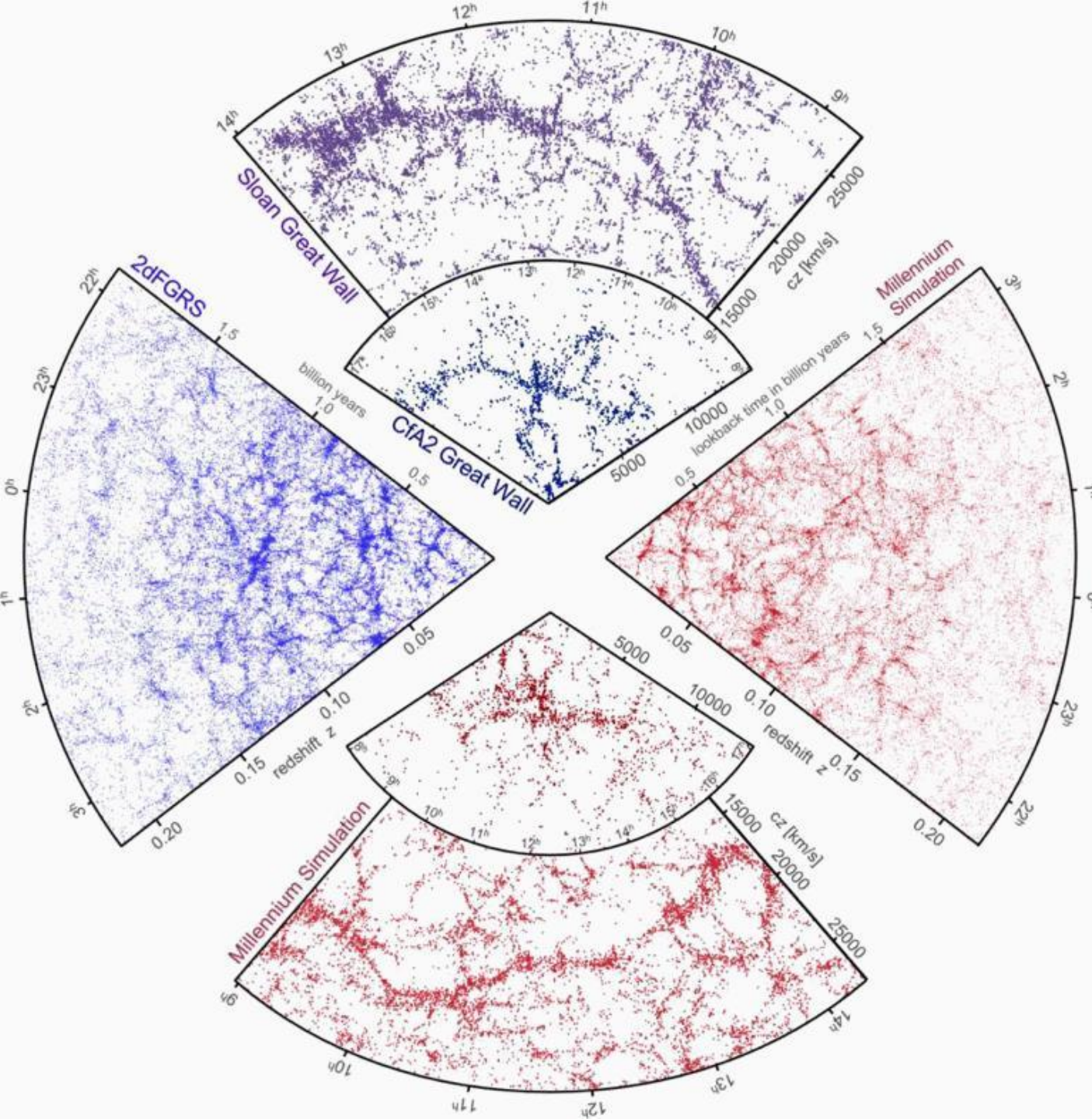
The VIRGO Collaboration 1996





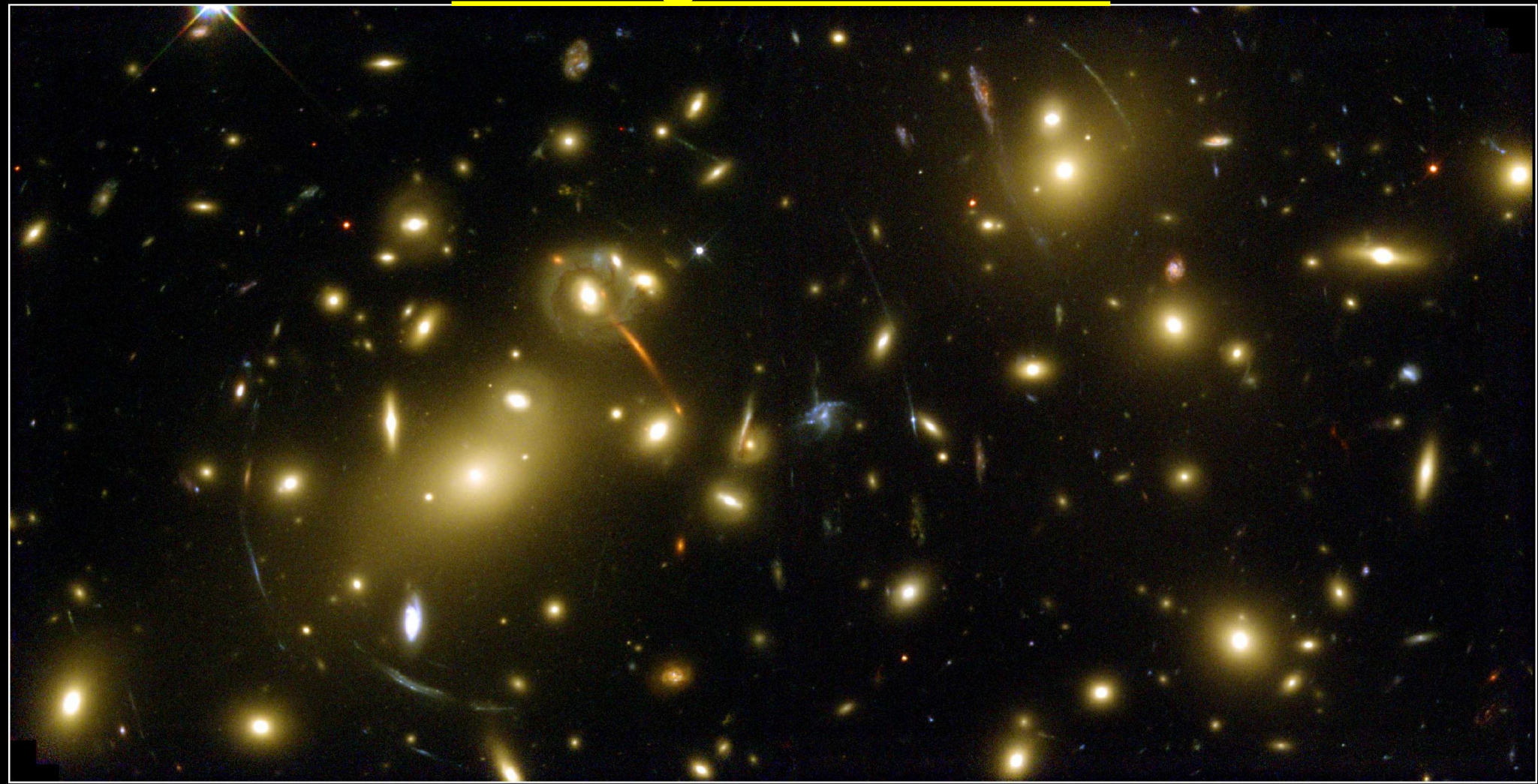
# La estructura a gran escala (LSS) del universo

El Big Bang con un  $\sim 73\%$  de energía oscura y un  $\sim 27\%$  de materia total (normal y oscura), es capaz de describir la formación de estructuras en el universo





# Lentes gravitacionales



**Galaxy Cluster Abell 2218**  
Hubble Space Telescope • WFPC2

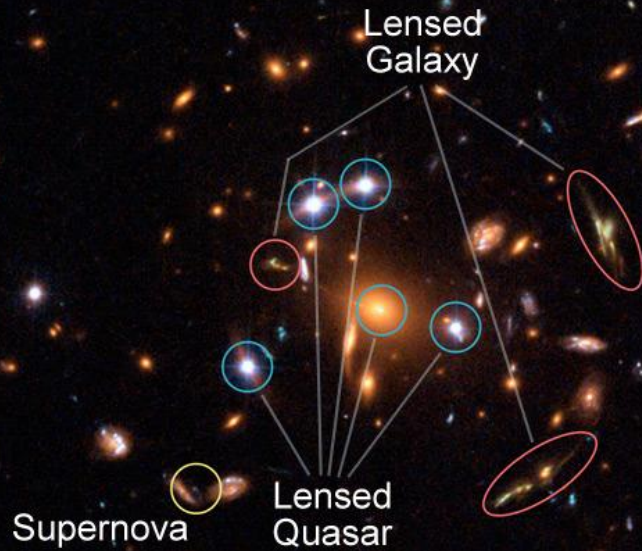


# Lentes gravitacionales

La deformación de las imágenes depende de la masa de los objetos que hacen de lente (incluida la materia oscura), que curvan el espacio a su alrededor

Método muy poderoso para observar la distribución de masa-energía en el universo  
materia y energía oscuras

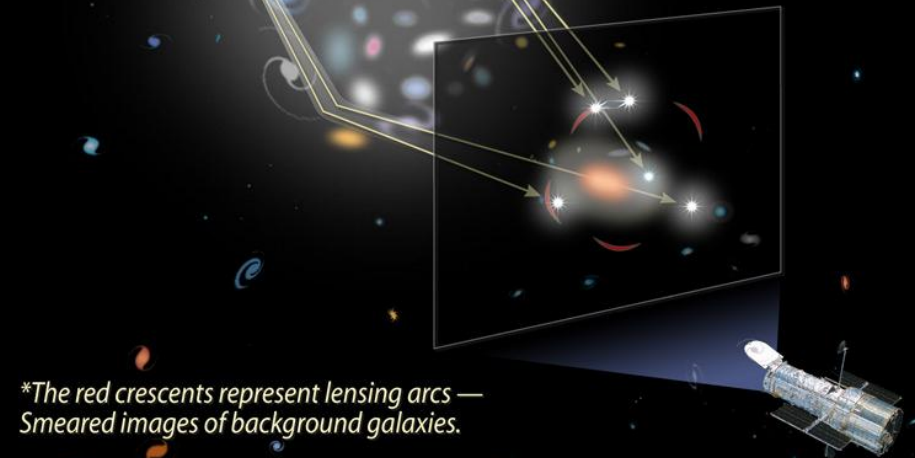
Galaxy Cluster SDSS J1004+4112  
HST ACS/WFC



## Gravitational Lensing Splits Quasar Light into Five Images

Distant quasar with host galaxy

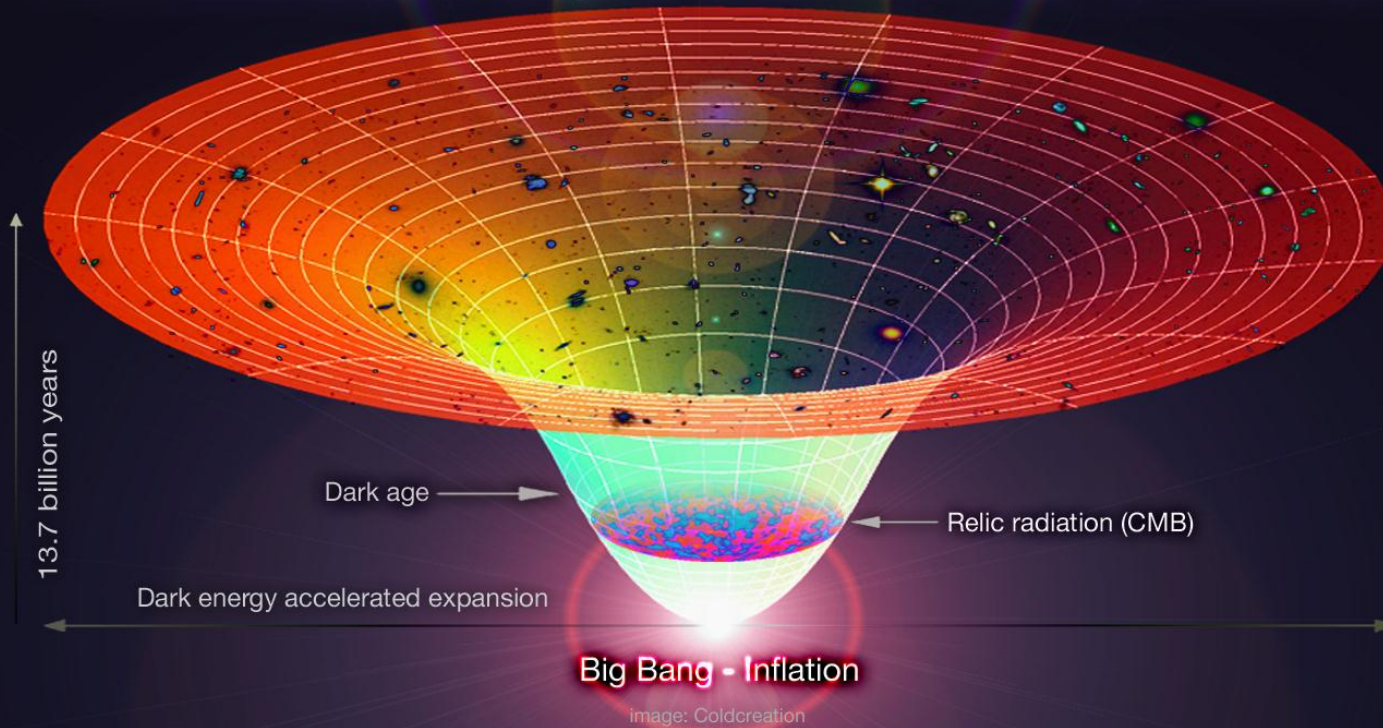
Light emitted from quasar bends around intervening galaxy cluster, producing lensed images\*



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

# El Big Bang hoy: $\Lambda$ CDM

Accelerated Expansion of the Universe



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

El 96% del contenido del universo es de naturaleza desconocida



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



# El Big Bang hoy: $\Lambda$ CDM

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

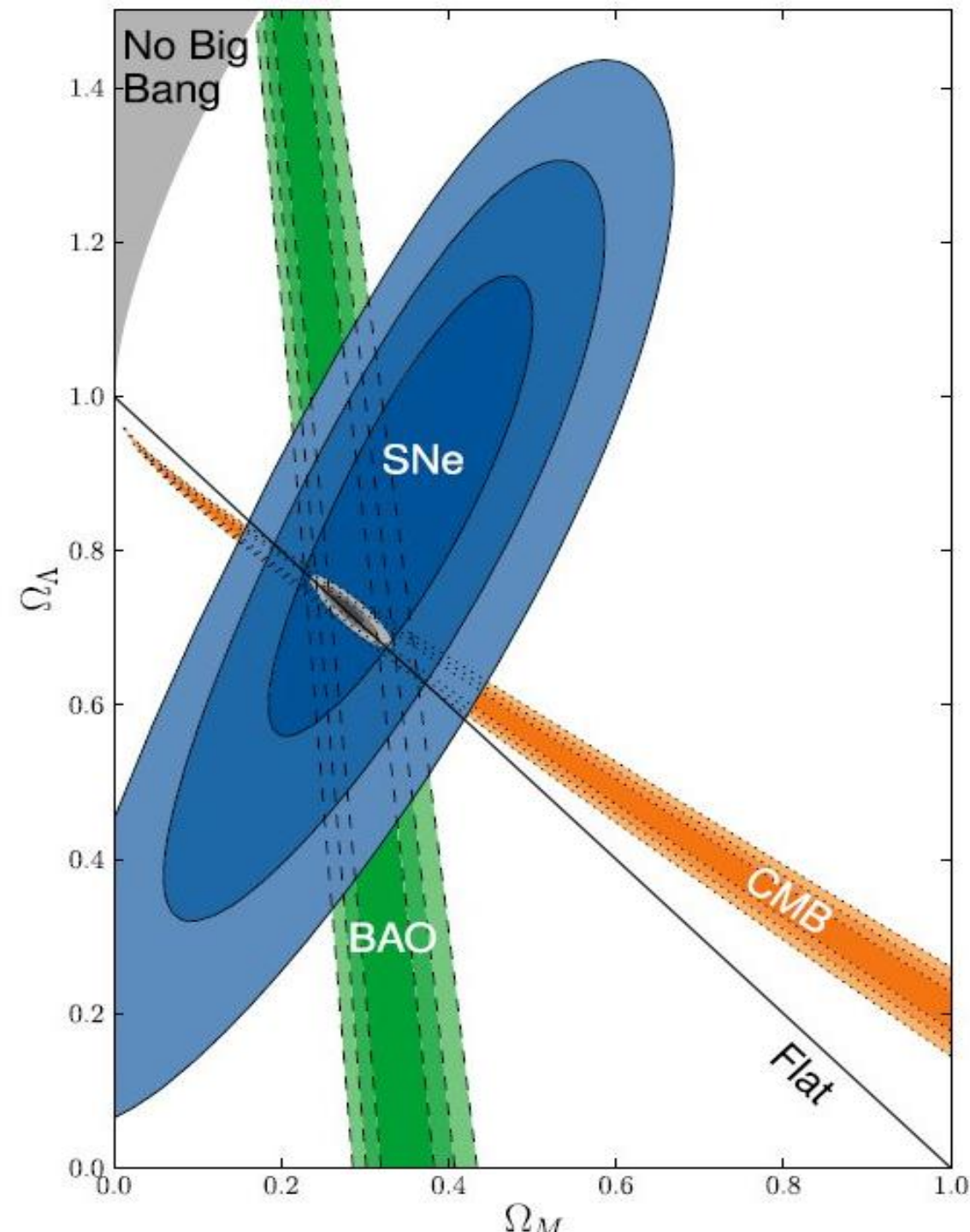
CMB  $\rightarrow \Omega_{\text{TOT}} \sim 1$  (El Universo es **PLANO**)

BBN+CMB  $\rightarrow \Omega_{\text{B}} \sim 0.045 \rightarrow$  La mayor parte del universo es **no-bariónico**

LSS+DINÁMICA  $\rightarrow$  **¡MATERIA OSCURA!** ;  $\Omega_{\text{DM}} \sim 0.225$

Supernovae Ia+LSS+CMB  $\rightarrow$  **¡ENERGÍA OSCURA!** ;  $\Omega_{\text{DE}} \sim 0.73$

- 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
- Materia oscura (rotación/dispersión)
- Energía oscura (expansión acelerada)
- Consistencia de todas las observaciones



La existencia de la energía oscura y de la materia oscura está comprobada con gran significación y de manera precisa

***No en vano el premio Nobel de física 2011 se otorgó a la expansión acelerada del universo aka Energía oscura***

# El Big Bang hoy: $\Lambda$ CDM

Parameter		Current Best Value
Hubble expansion rate	$h$	0.710(25) WMAP7
critical density	$\rho_c$	$1.053\ 75(13) \times 10^{-5} h^2 \text{ (GeV}/c^2) \text{ cm}^{-3}$
baryon density	$\Omega_b$	0.045(3)
pressureless matter density	$\Omega_M$	$0.27 \pm 0.03$
dark energy density (LCDM)	$\Omega_\Lambda$	0.73(3)
dark energy EoS parameter	$w$	$-0.98 \pm 0.05$ (WMAP7+BAO+H0)
CMB radiation density	$\Omega_\gamma$	$4.75(23) \times 10^{-5}$
neutrino density	$\Omega_\nu$	$0.0009 < \Omega_\nu < 0.048$
total energy density	$\Omega_{\text{tot}}$	$1.002 \pm 0.011$ (WMAP7+BAO+H0)
scalar spectral index	$n_s$	0.963(14)
age of the Universe	$t_0$	$13.75 \pm 0.13$ Gyr



# Materia oscura y energía oscura

Entender la naturaleza de la materia oscura y de la energía oscura es uno de los problemas fundamentales de la ciencia actual.

Es un problema fundamental no solamente para la cosmología sino también para la física de partículas.

La estructura, evolución y destino del universo depende críticamente de las propiedades del sector oscuro.

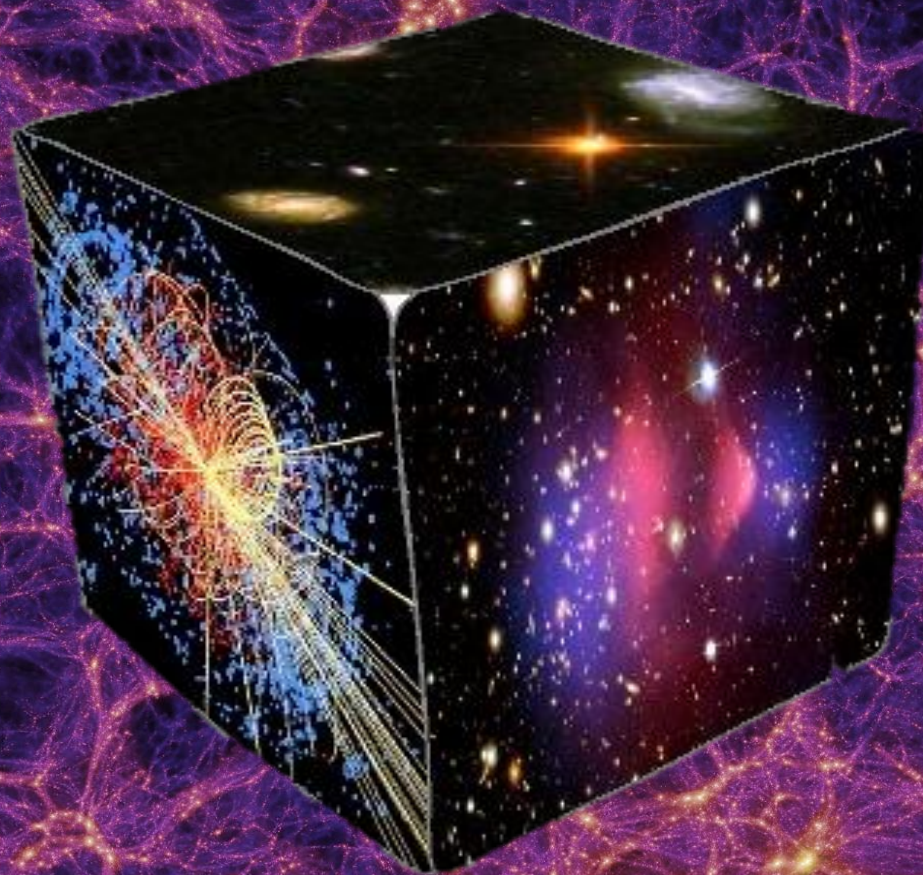
*"You don't know the power of the dark side"*

*Darth Vader, Star wars, episode 6*





# MATERIA OSCURA





# Materia oscura: Evidencias

La existencia de materia oscura se infiere de muchas observaciones, independientes entre si y en escalas muy diferentes.

Las primeras evidencias son de 1930's, y desde entonces no han hecho más que aumentar. Las principales son:

**Curvas de rotación de las galaxias espirales o de dispersión en galaxias elípticas**

**Relación masa-luminosidad en cúmulos de galaxias**

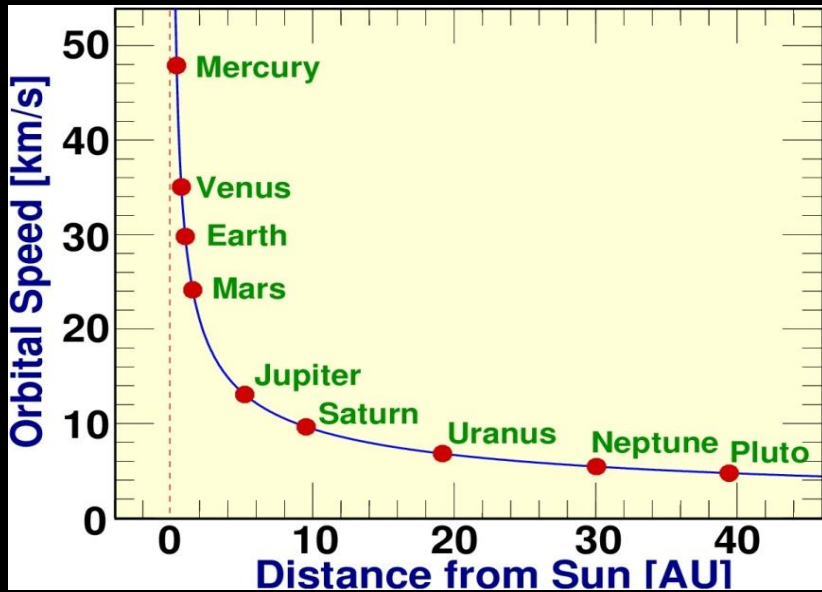
**Lentes gravitacionales**

**Estructura a gran escala del universo**

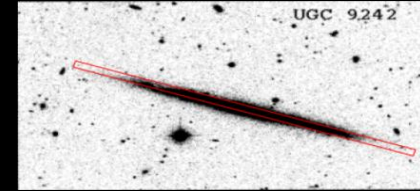
**Abundancias de elementos ligeros: la materia oscura es no-bariónica**



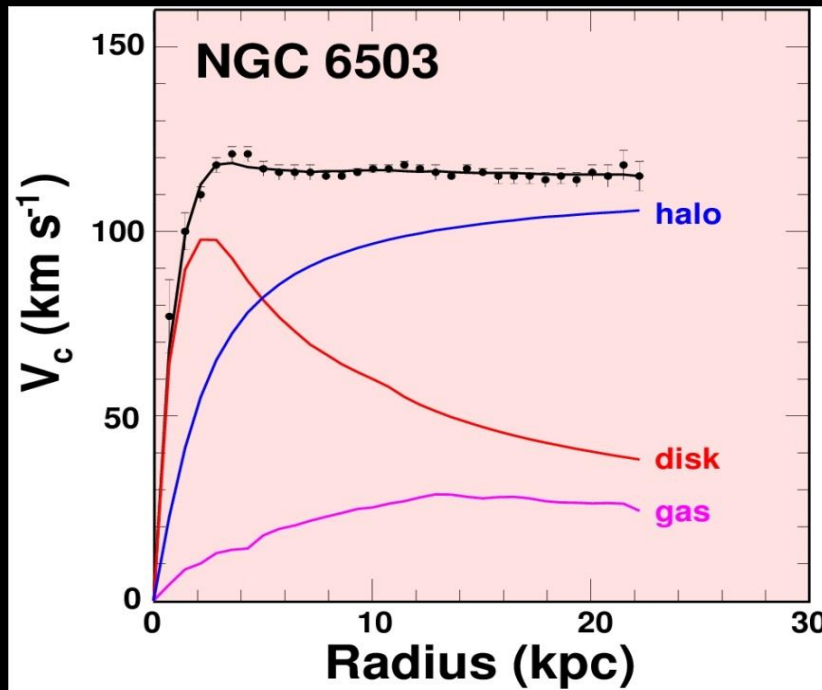
# Evidencias: Curvas de Rotación



Se mide el redshift de diferentes zonas de la galaxia. Un extremo se aleja y otro se acerca.



Las galaxias no siguen la predicción de la gravitación de Newton (o Einstein) que se espera de las estrellas que contienen. Es necesaria materia invisible para mantener la rotación observada.

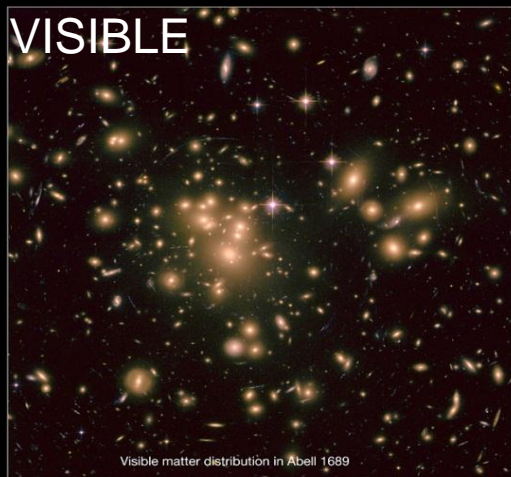
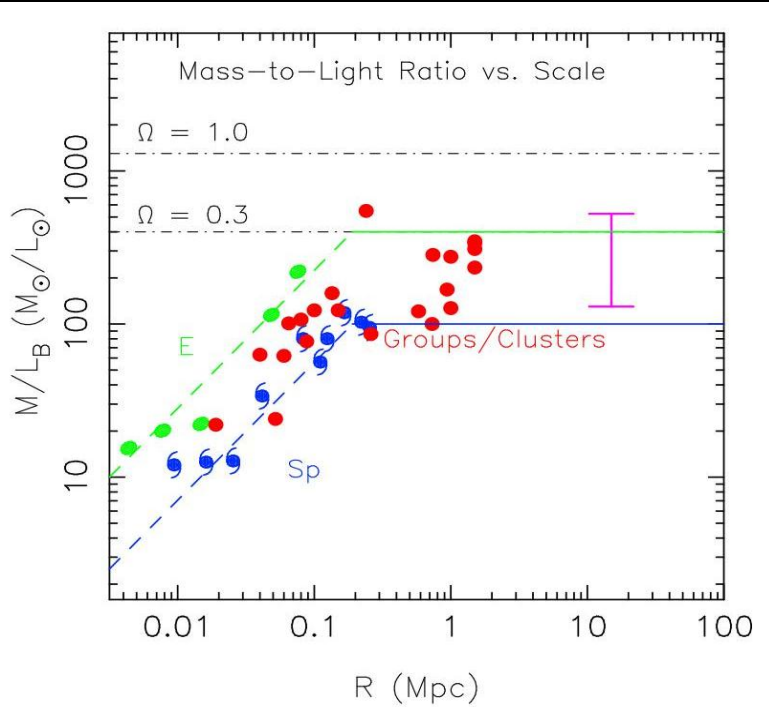


## ¡MATERIA OSCURA!

# Evidencias: razón masa-luminosidad

En los cúmulos de galaxias hay muchísima más masa que la que se ve con la luz que emiten las estrellas.

Masa total del cúmulo:  
Teorema del virial  
Temperatura dentro del cúmulo rayos X)  
Lentes gravitacionales  
Efecto SZ sobre la CMB

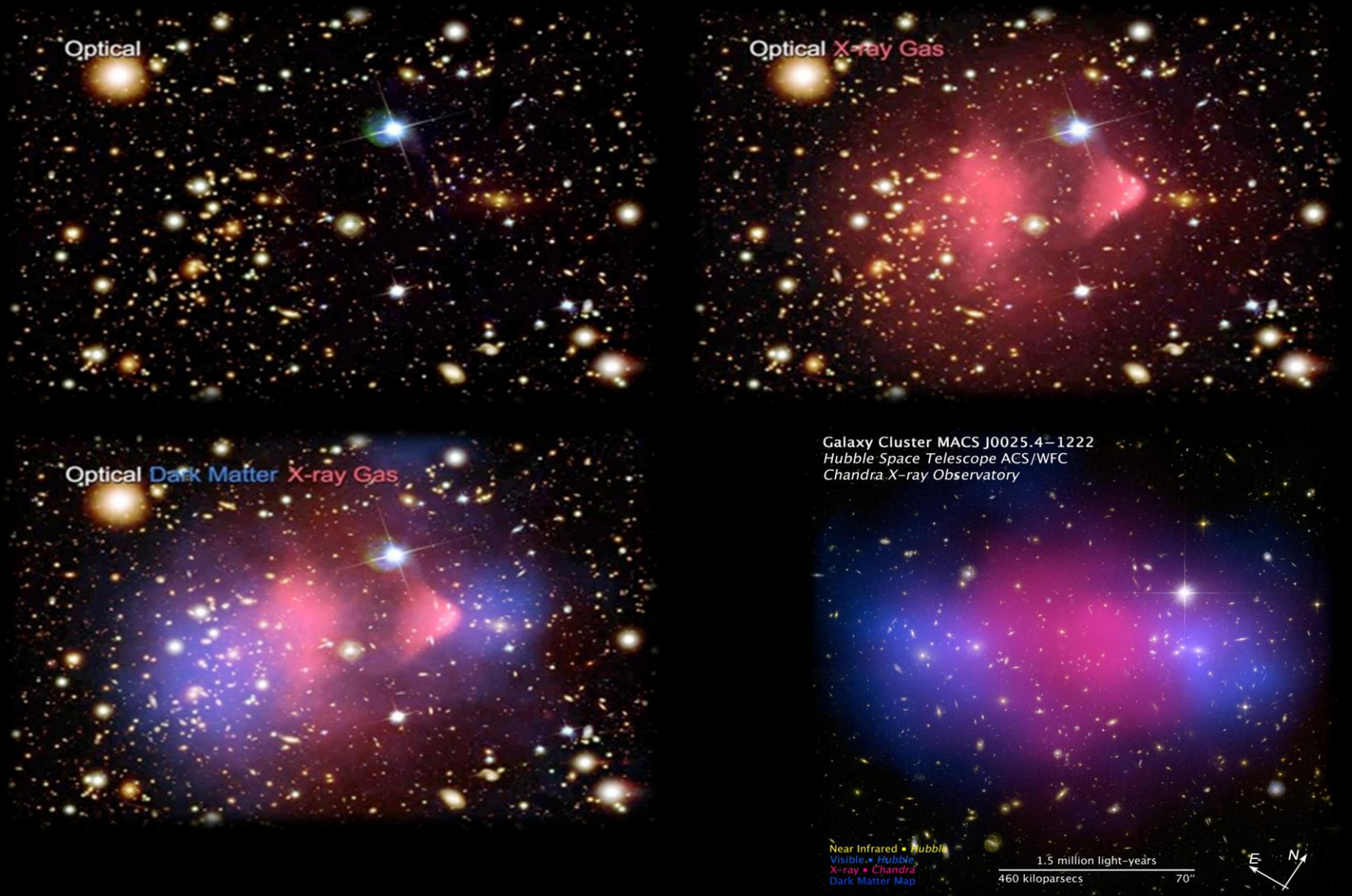


X-RAY

**¡MATERIA OSCURA!**



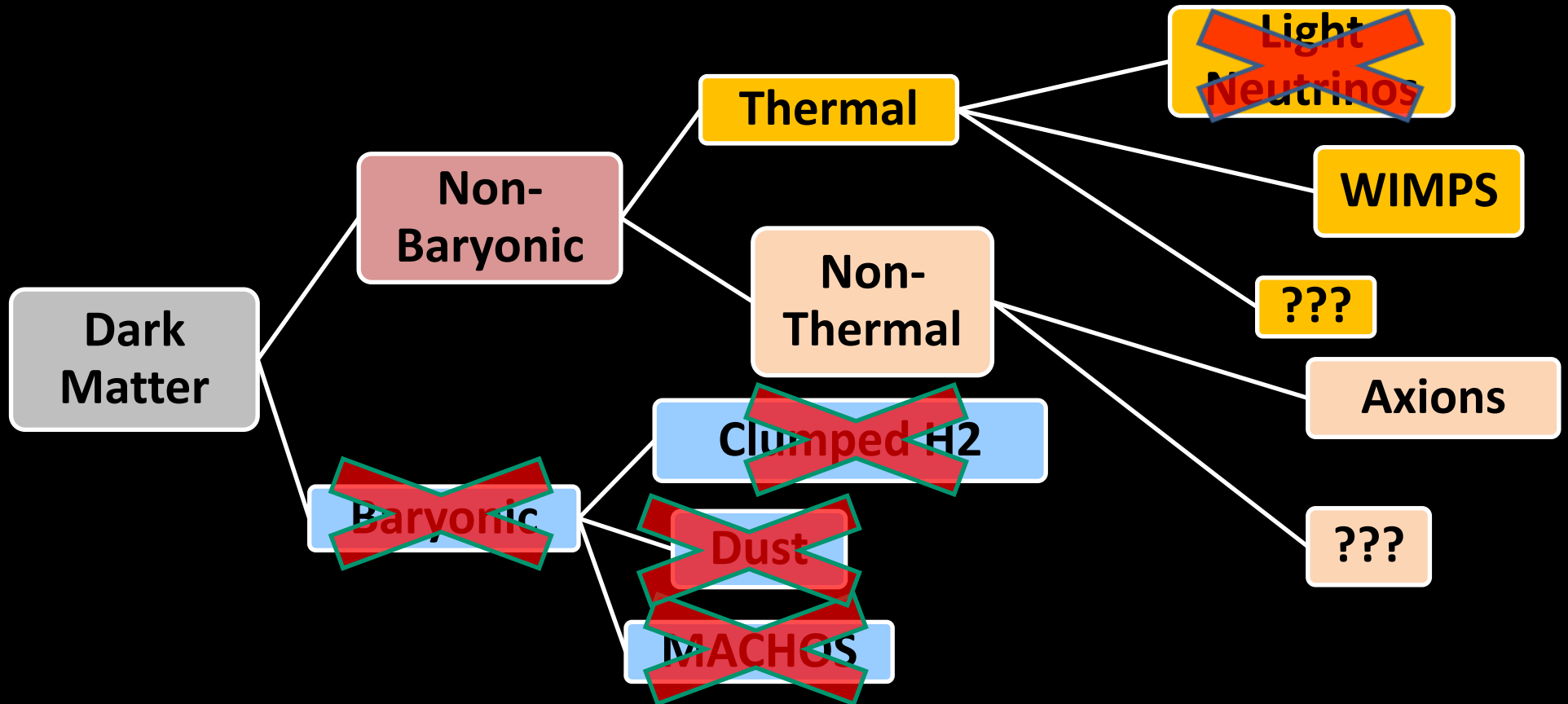
# Masa Total >> Masa Visible ¡MATERIA OSCURA!





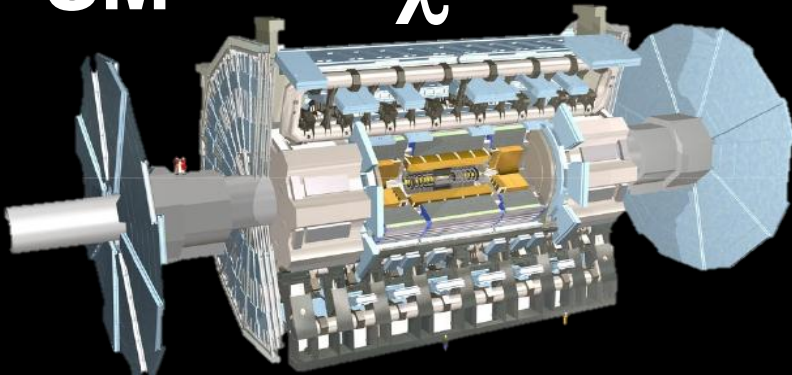
# ¿Qué sabemos de la materia oscura?

Puesto que el crecimiento de estructuras es “bottom-up” (los cúmulos y supercúmulos se están formando todavía), **LA MATERIA OSCURA ES FRÍA**:  
*Partículas no relativistas, estables, neutras y que apenas interaccionan con la materia normal*



# Cómo observar la materia oscura

SM  $\chi$   
SM  $\chi$



**PRODUCCIÓN:**  
Producirla y medirla en colisionadores de partículas (LHC)



$\chi$   $\chi$   
SM SM

## **DETECCIÓN INDIRECTA:**

Medir rayos gamma, neutrinos, positrones, antiprotones, anti-deuterones, etc que se produzcan en la aniquilación de materia oscura

## **DETECCIÓN DIRECTA:**

Medir el scattering de partículas de materia oscura con detectores subterráneos



$\chi$  SM  
 $\chi$  SM

# Situación actual

Enorme evidencia observacional INDIRECTA, a través de su influencia gravitatoria, para la MATERIA OSCURA:

Partículas estables, neutras y no relativistas que forman el  $\sim 22\%$  de la densidad del universo

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

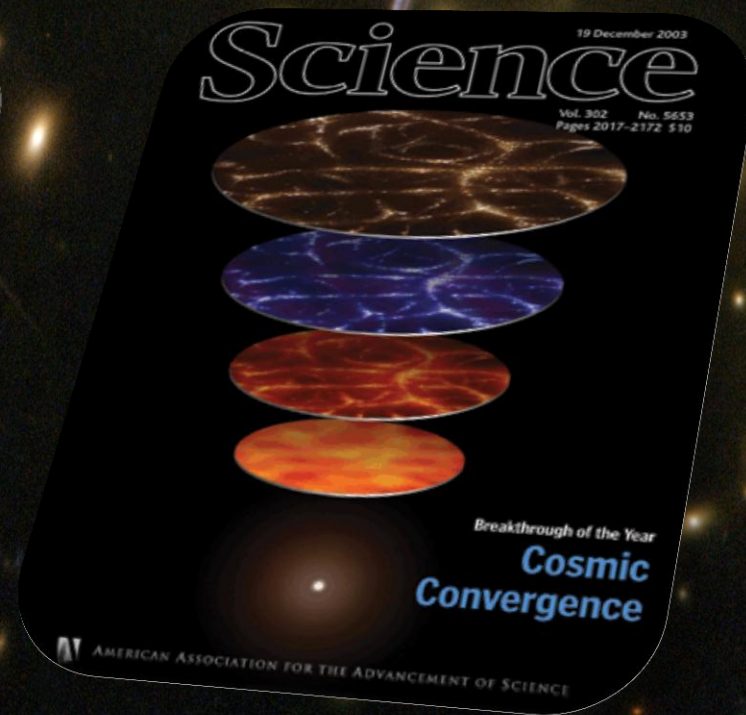
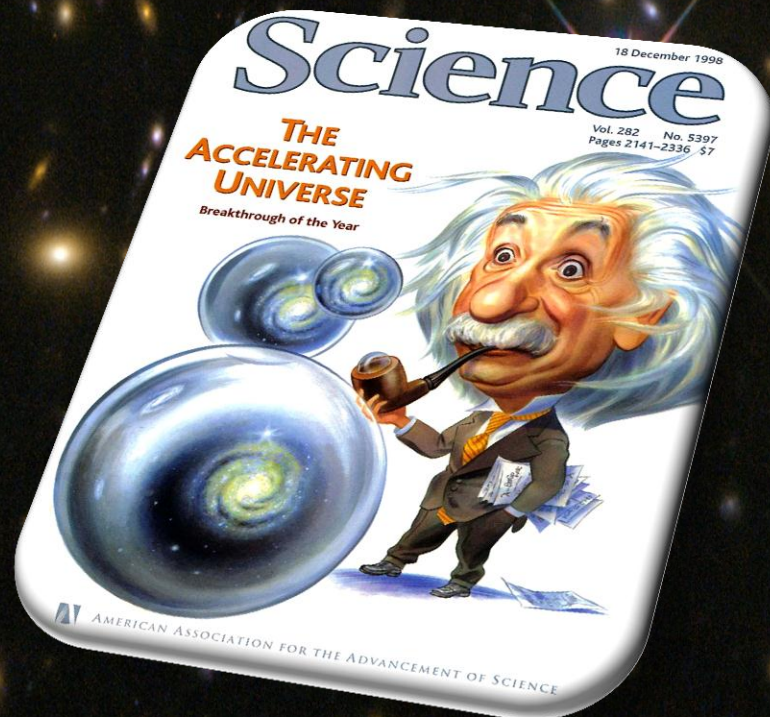
*Si  $m_{WIMP} \sim 100 \text{ GeV}$ , unos 10 WIMPs/año interactúan con un cuerpo humano*

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

**Todavía no se ha observado inequívocamente ninguna señal de materia oscura en ningún detector de partículas**



# 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) Ejerce una presión grande y 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

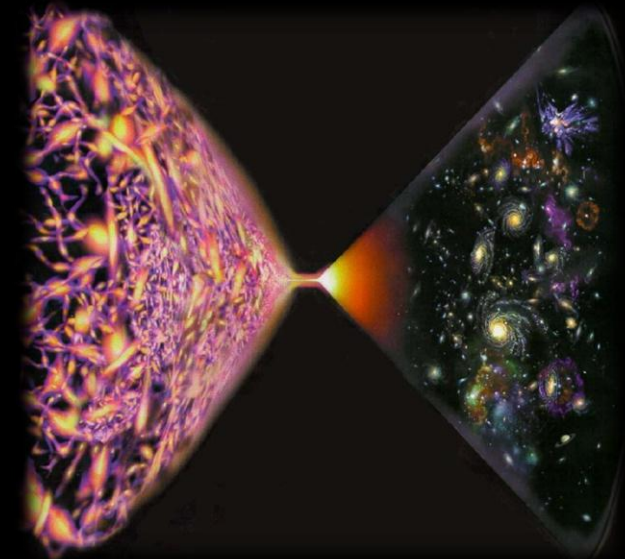
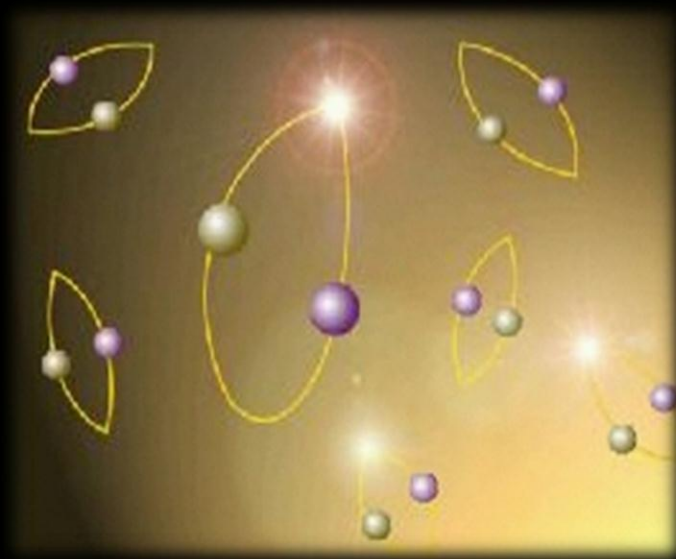
Todas las observaciones actuales son compatibles con que la energía oscura sea la constante cosmológica. Es el candidato más natural, pero también el más misterioso y chocante

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

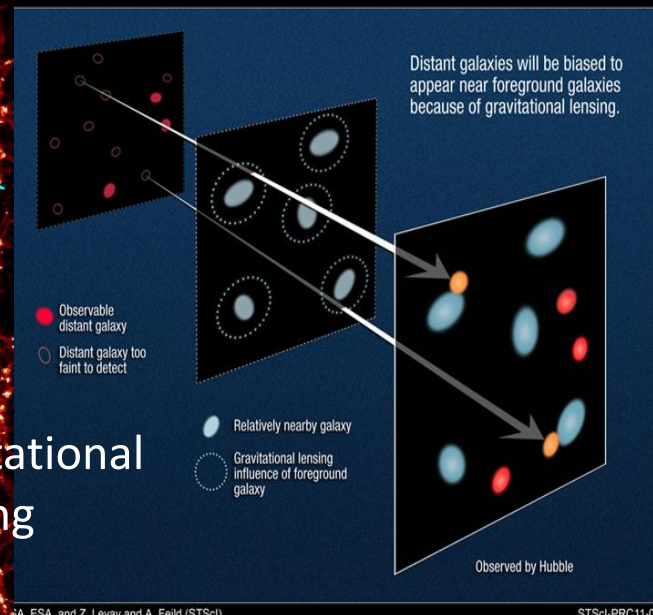
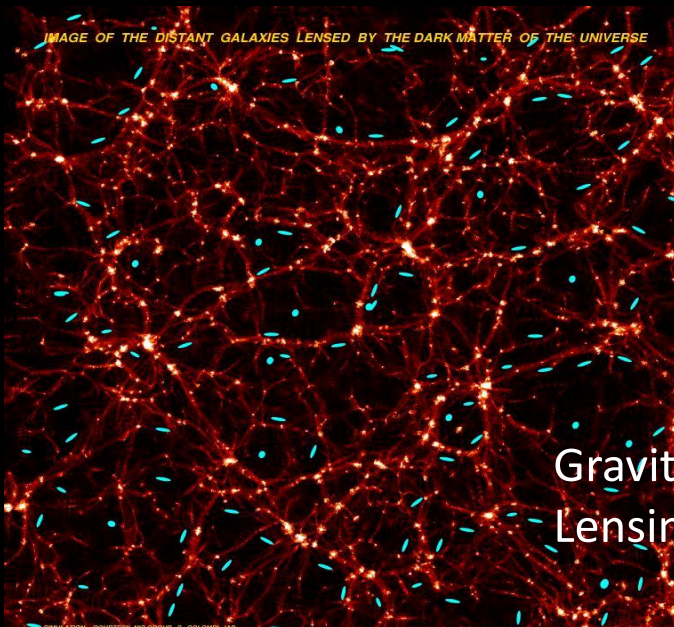
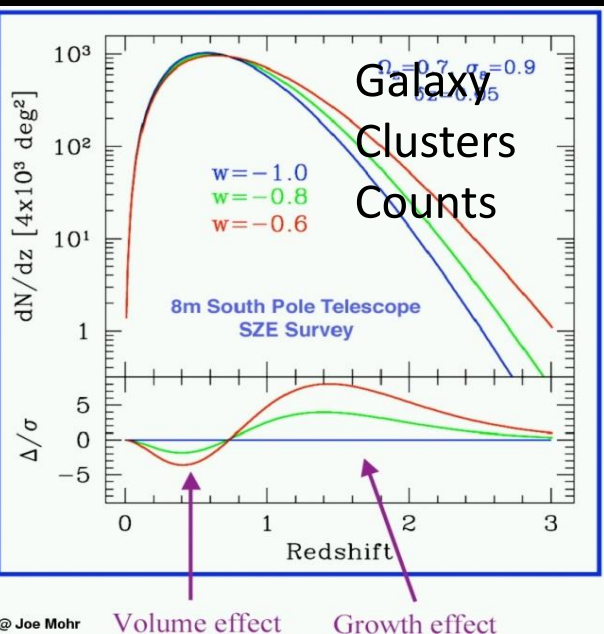
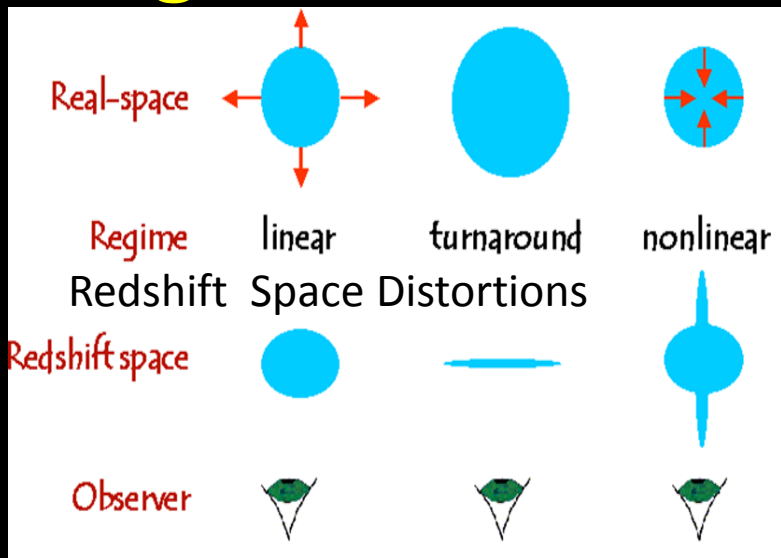
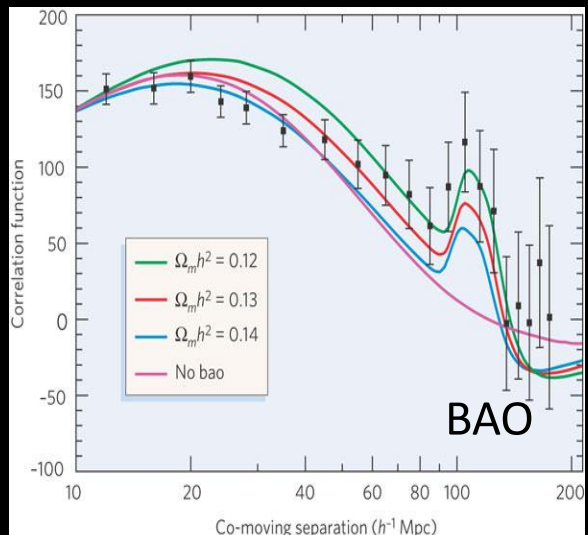
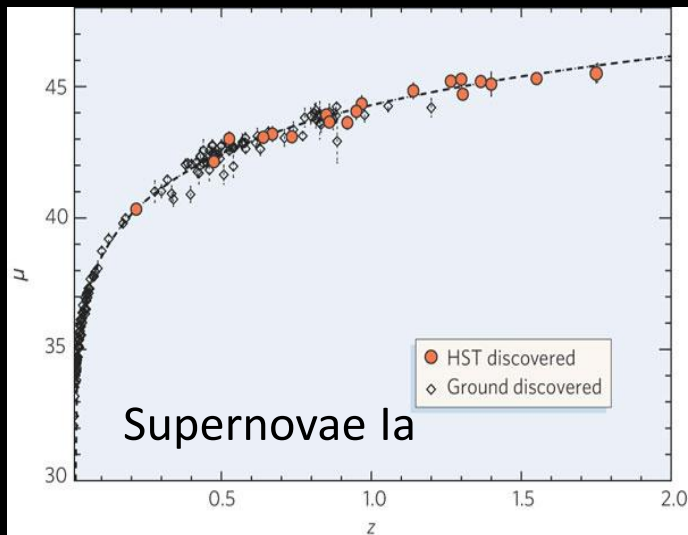
No hay una explicación para  $\Lambda$  a partir de la física de partículas. Si es la energía del vacío:

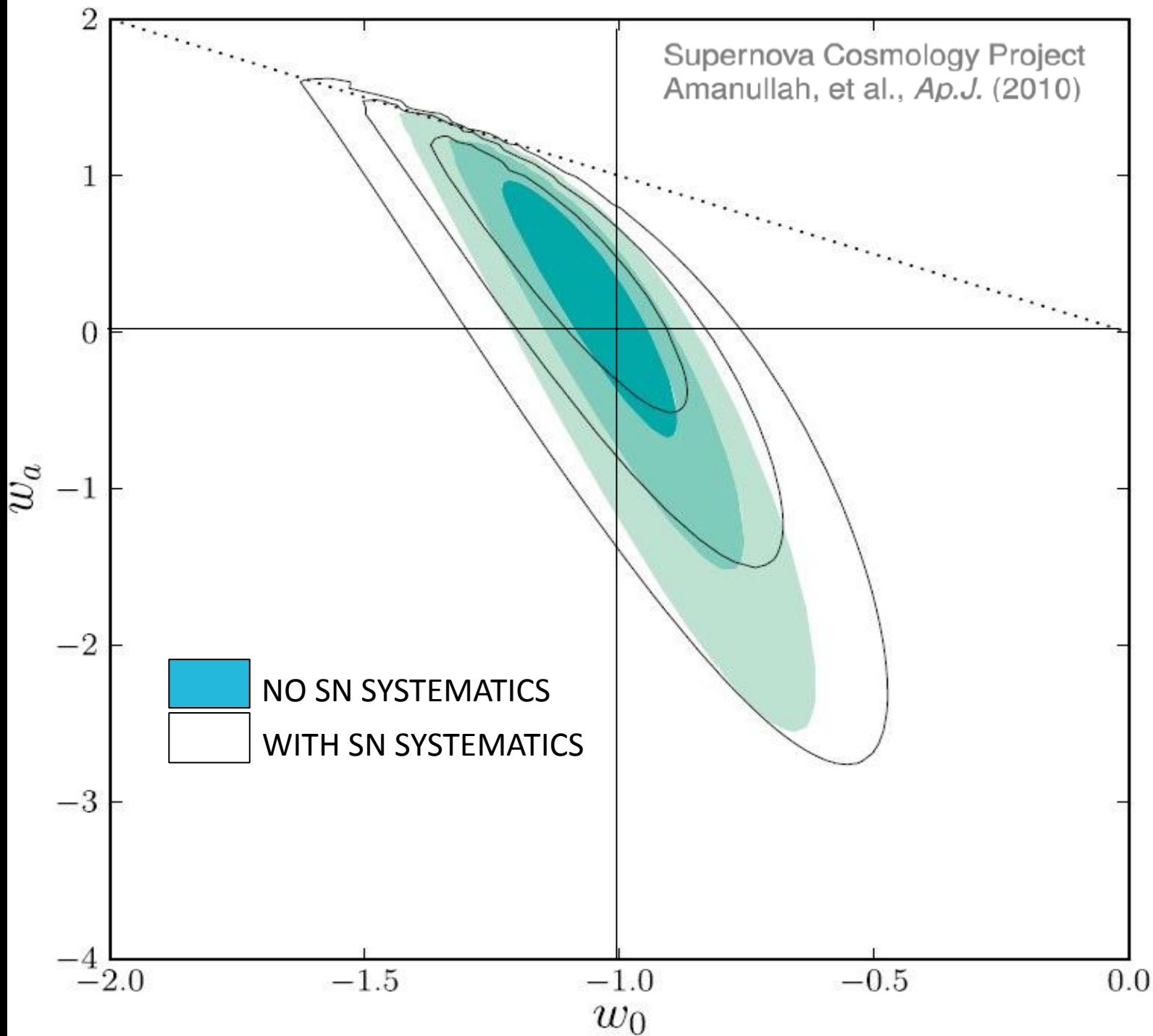
$$\Omega_{\Lambda} \sim 0.7 \longrightarrow \rho_{\Lambda} \sim (10 \text{ meV})^4$$

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



# Métodos de estudio de la energía oscura





## Situación actual

Todas las observaciones indican 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  $z < 1$

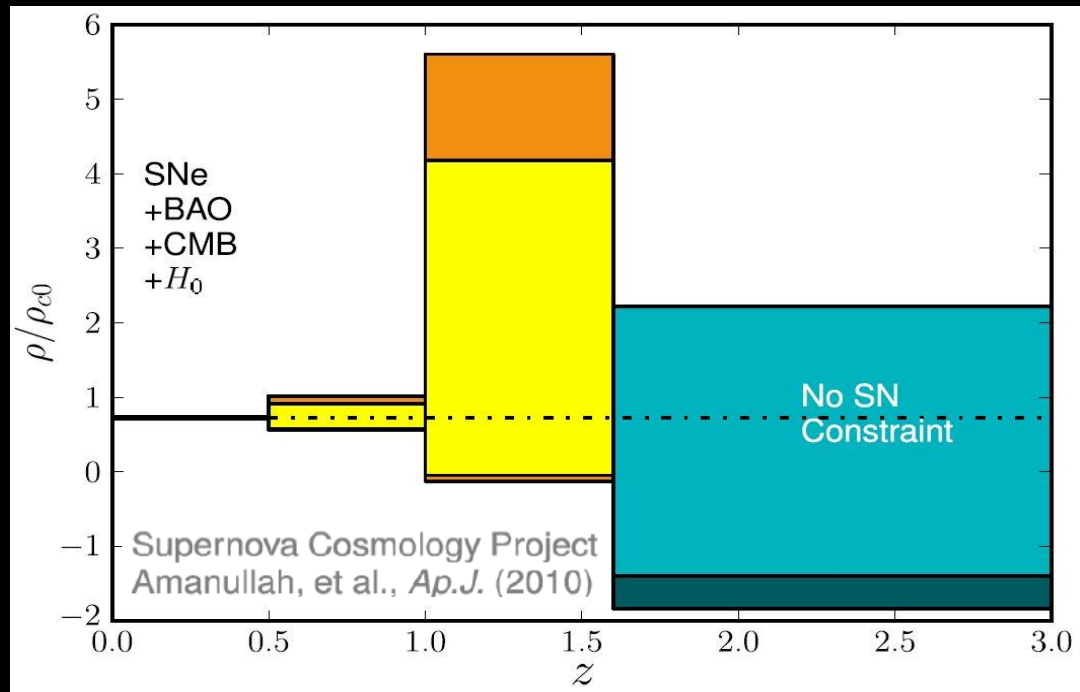
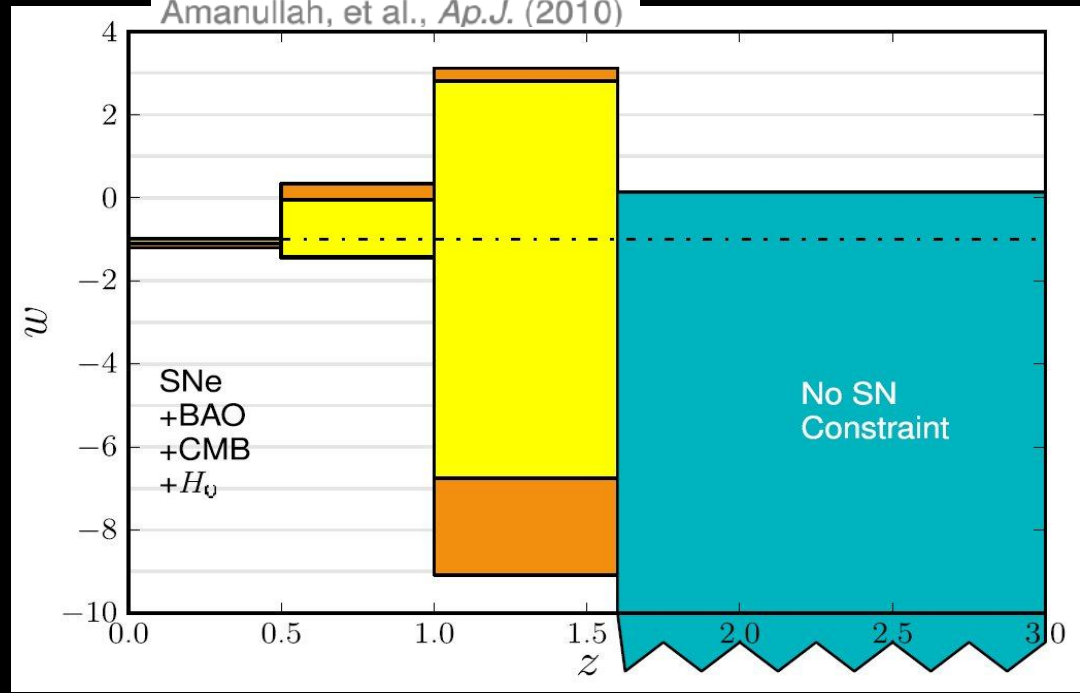
Los datos actuales no son sensibles a  $z > 1$

$\Lambda$ 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)

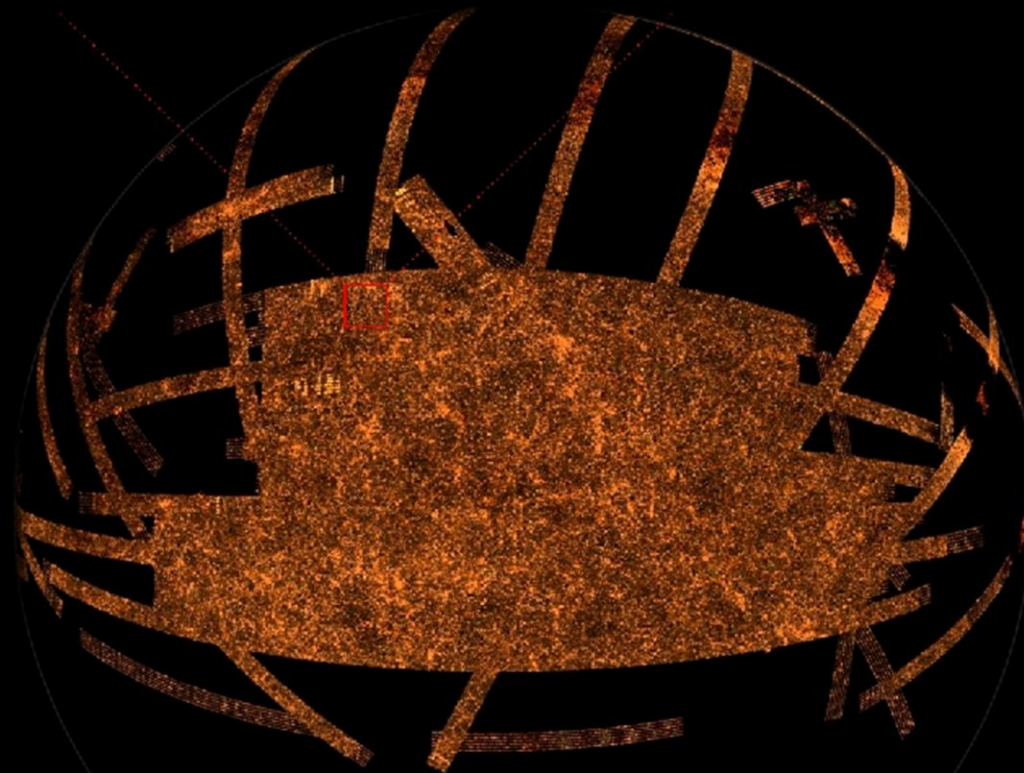


# ALGUNOS PROYECTOS PRESENTES Y FUTUROS

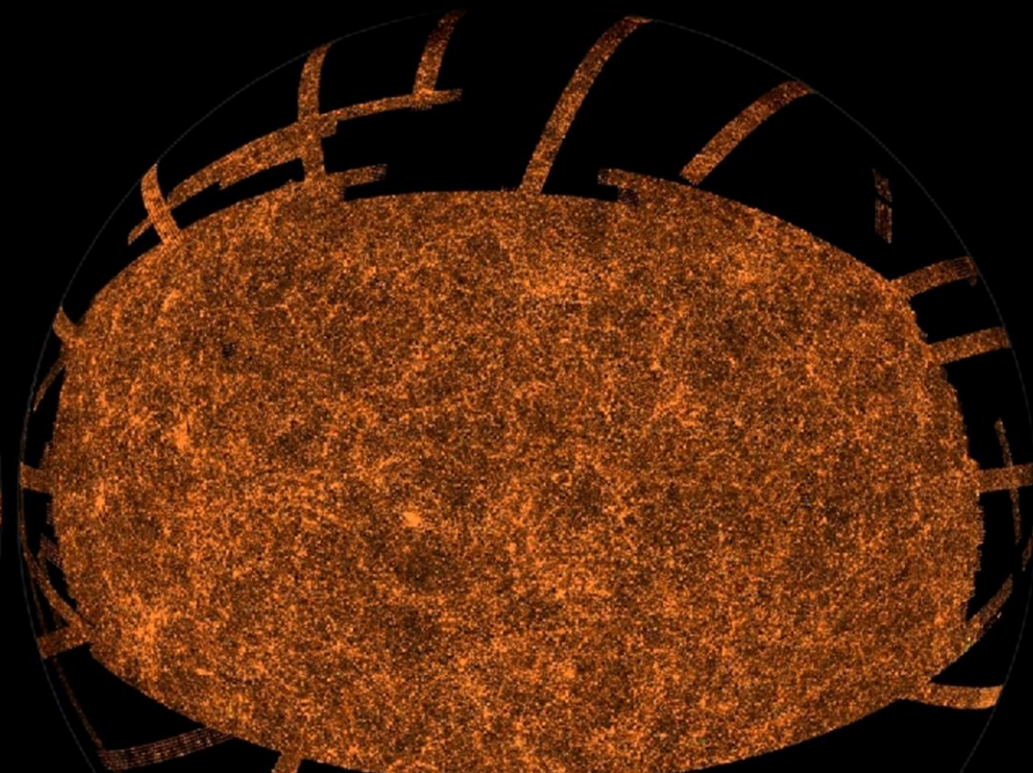
DES, Pan-STARRS, HSC, Skymapper, PAU, LSST, Euclid (EIC)...

WiggleZ, BOSS, BigBOSS, HETDEX, WFMOS/Sumire, Euclid (NIS)...

WMAP, Planck, CMBPol...



*Southern Galactic Cap*



*Northern Galactic Cap*



# Un poco de propaganda sobre los proyectos en los que trabajamos en el CIEMAT:



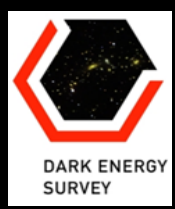
DES (Dark Energy Survey)



PAU (Physics of the Accelerating universe)







# DES Science Reach

## Four Probes of Dark Energy

### Galaxy Clusters

~100,000 clusters to  $z > 1$

Synergy with SPT, VHS

Sensitive to growth of structure and geometry

### Weak Lensing

Shape measurements of 200 million galaxies

Sensitive to growth of structure and geometry

### Baryon Acoustic Oscillations

300 million galaxies to  $z = 1$  and beyond

Sensitive to geometry

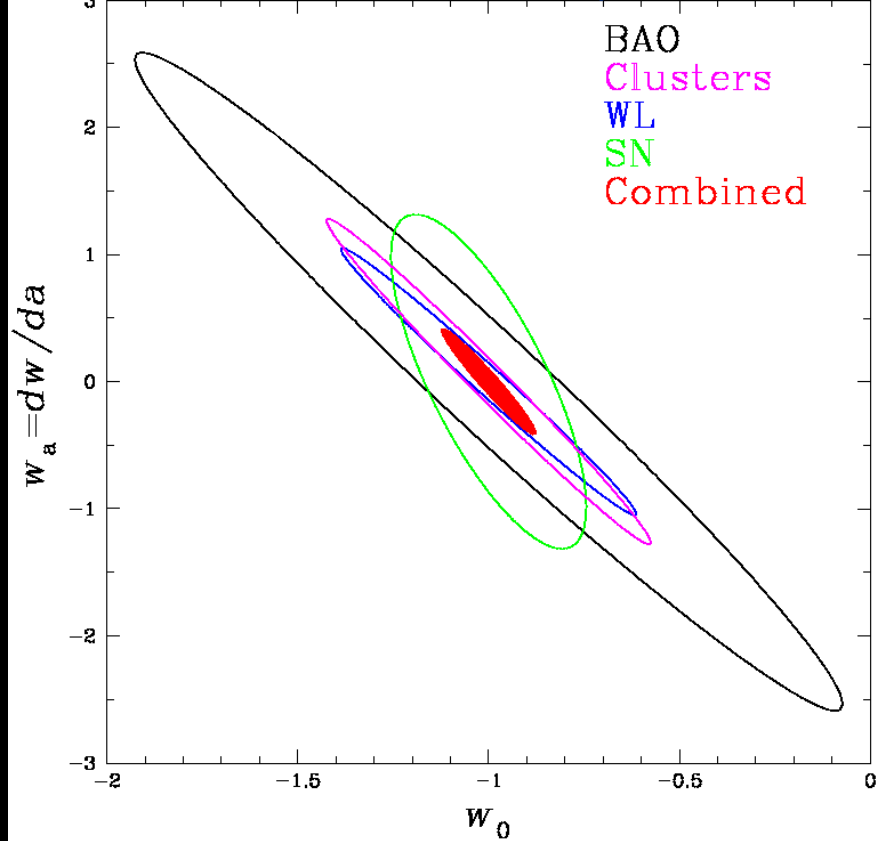
### Supernovae

30 sq deg time-domain survey

~4000 well-sampled SNe Ia to  $z \sim 1$

Sensitive to geometry

Forecast Constraints on DE Equation of State



**Factor 3-5 improvement over  
Stage II DETF Figure of Merit**



DARK ENERGY  
SURVEY

# DES Collaboration

~150 scientists from  
27 institutions

[facebook.com/darkenergysurvey](https://facebook.com/darkenergysurvey)

<http://darkenergysurvey.org>



USA: Fermilab, UIUC/NCSA, University of Chicago, LBNL, NOAO, University of Michigan, University of Pennsylvania, Argonne National Laboratory, Ohio State University, Santa Cruz/SLAC Consortium, Texas A&M University



UK Consortium: UCL, Cambridge, Edinburgh, Portsmouth, Sussex, Nottingham



Germany: Munich



Switzerland: Zurich



Spain Consortium:  
CIEMAT, IEEC, IFAE



Brazil Consortium: Observatorio nacional, CBPF, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Chile: CTIO







Barred spiral galaxy NGC 1365, in the Fornax cluster of galaxies, which lies about 60 million light years from Earth.



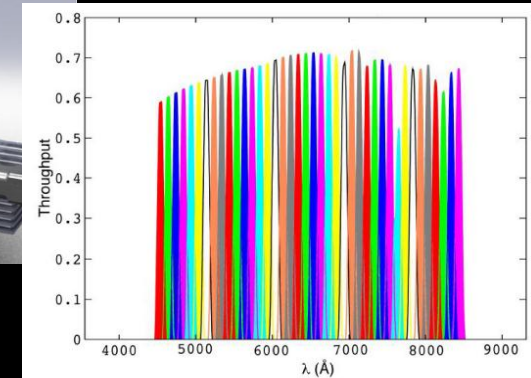
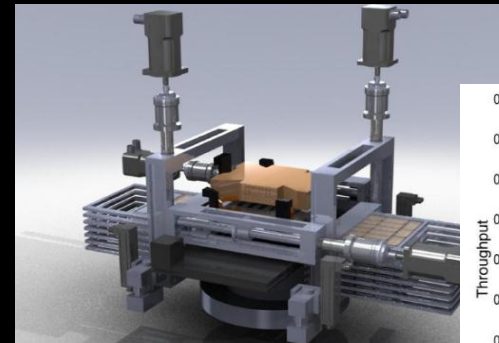
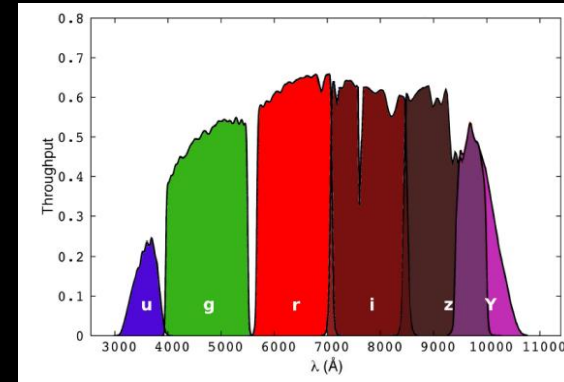
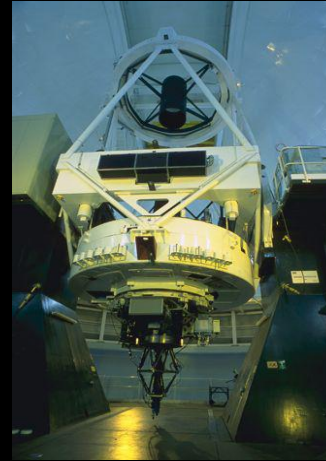
*Credit: Dark Energy Survey Collaboration*





# PAU@WHT: Physics of the Accelerating Universe

- New camera for WHT with 18 2k x 4k CCDs covering 1 deg  $\emptyset$  FoV.
- It can provide low-resolution spectra ( $\Delta\lambda/\lambda \sim 2\%$ , or  $R \sim 50$ ) for >30000 galaxies, 5000 stars, 1000 quasars, 10 galaxy clusters, **per night**.





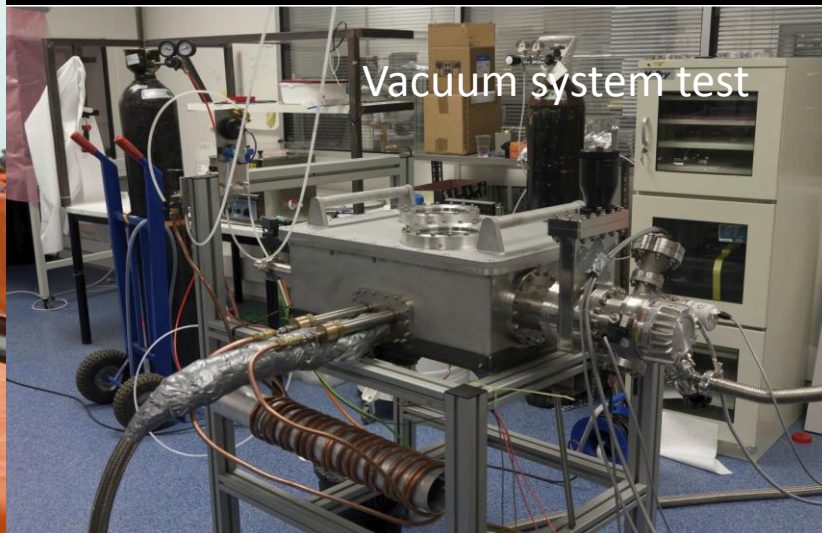
# PAUCam: The Pau Camera

Many pieces already produced. In assembly and testing phase

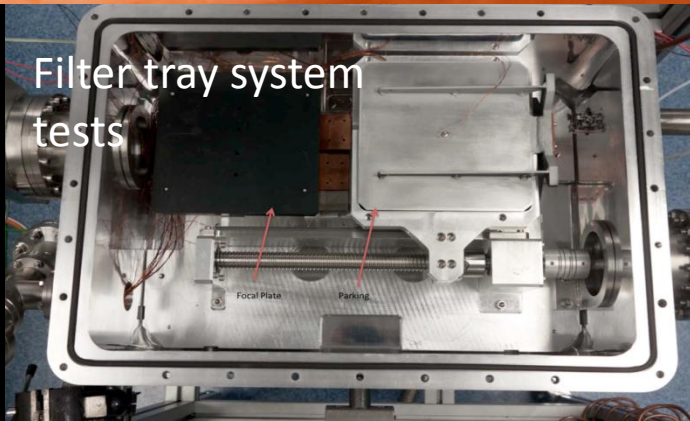
Main body of the camera



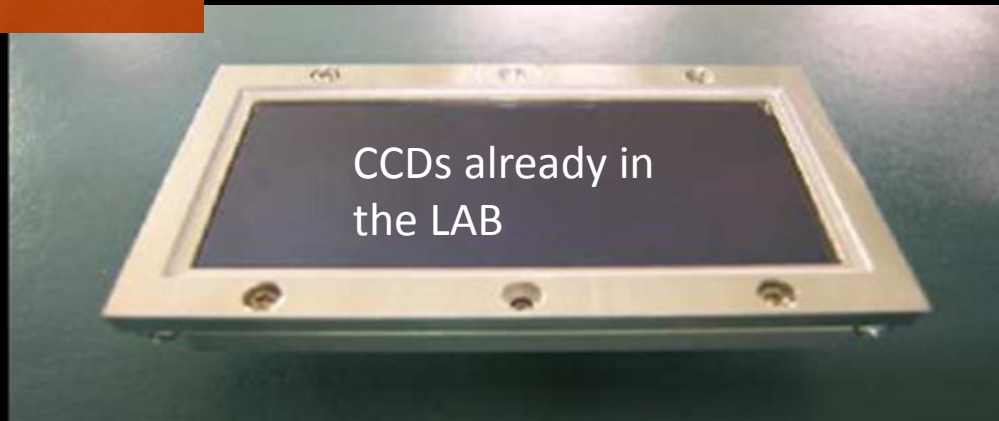
Vacuum system test



Filter tray system tests



CCDs already in the LAB





# PAU@WHT Science Reach

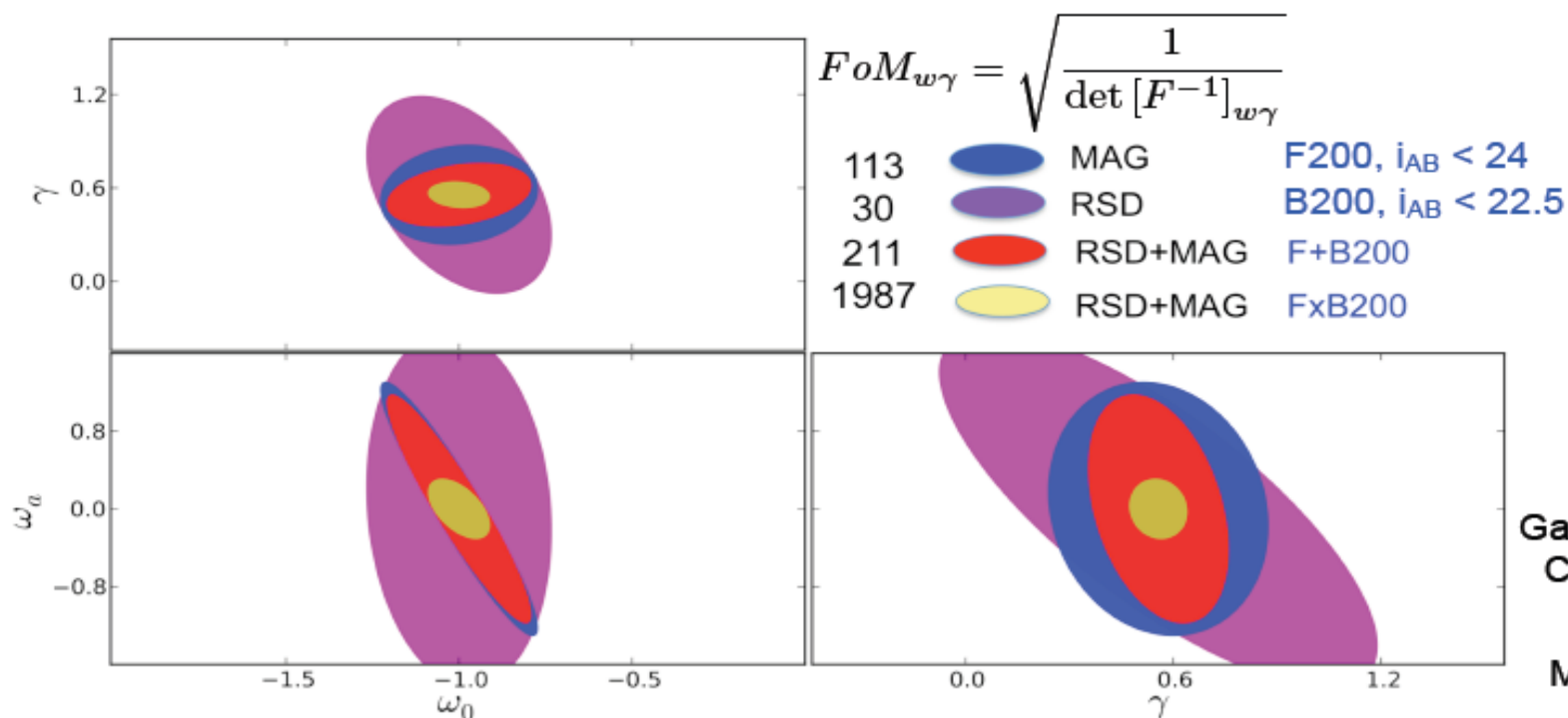
Survey strategy produces two samples

Main science case:

Use near sample for redshift-space distortions

Use far sample for weak lensing magnification

**Combination of RSD and MAG in the same data set → a unique advantage of PAU.**



Gaztañaga, Eriksen, Crocce,  
Castander, Fosalba, Martí,  
Miquel, Cabré

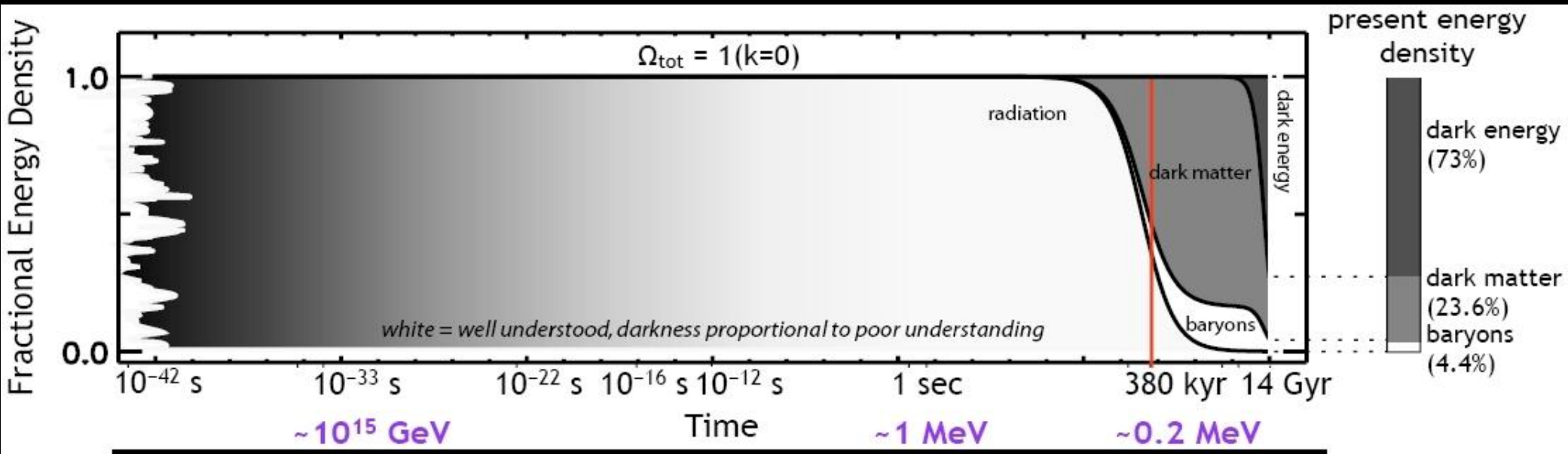
MNRAS 422 (2012) 2904



A visualization of cosmic inflation, showing a grid of space that is being stretched and distorted. The grid lines are dark blue and purple, and the background is a dark, starry space. In the center, there is a bright, glowing orange and red region, representing the Big Bang. The overall effect is one of rapid expansion and distortion of space.

# EL UNIVERSO TEMPRANO: INFLACIÓN. MULTIVERSO Y BIG BANG

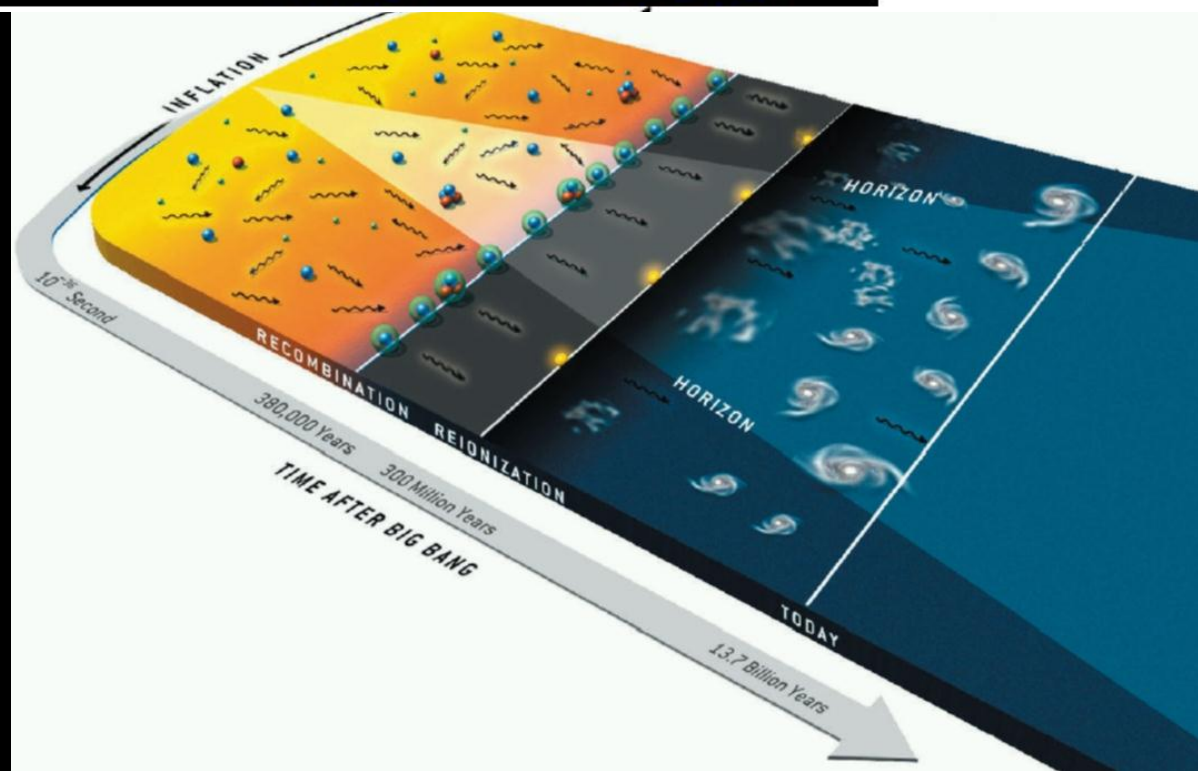
# La inflación cósmica: El Bang del Big Bang



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



# La inflación en un minuto

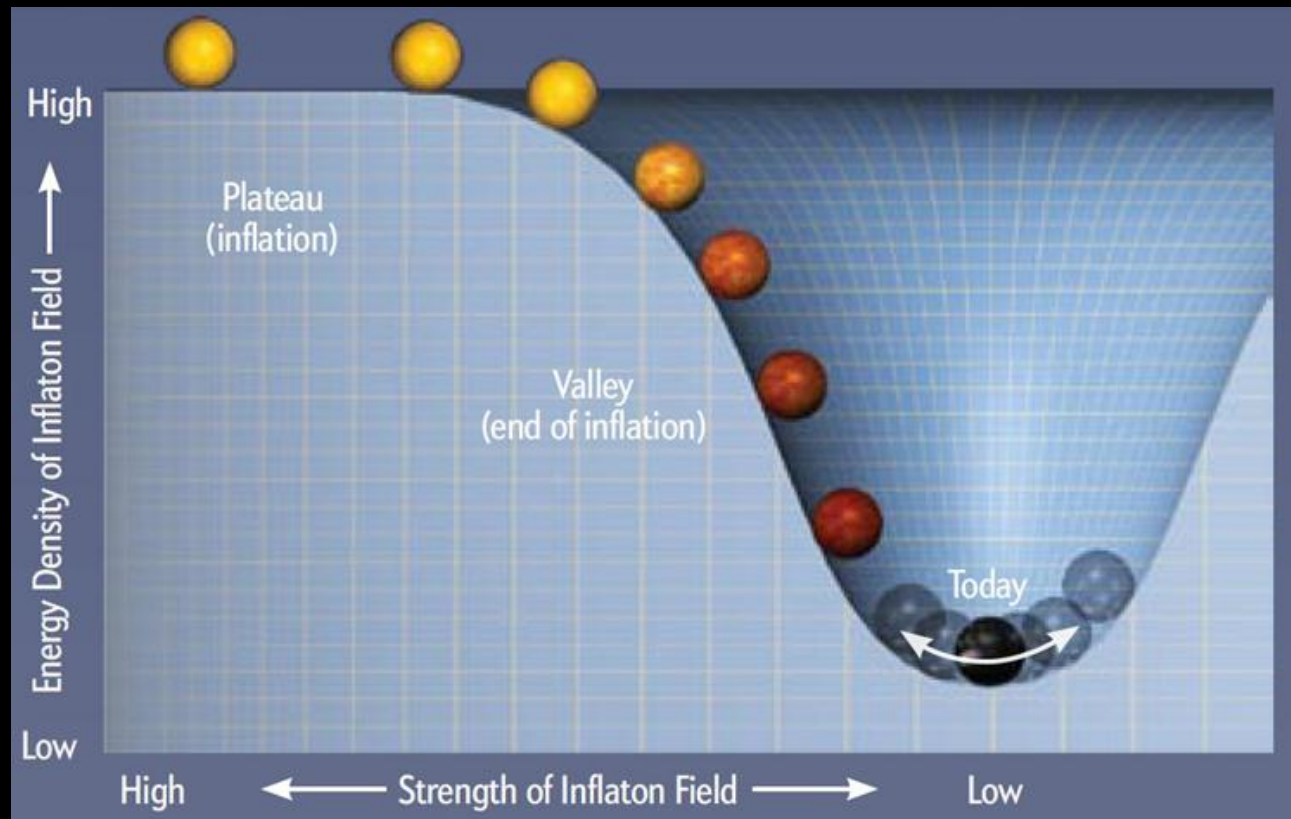
El universo empieza muy pequeño... Quizás como una pequeña fluctuación en la espuma espatiotemporal.

Un campo inestable (el inflatón), llena el espacio de la fluctuación

Es muy especial: ¡Produce repulsión gravitacional! Explosión.

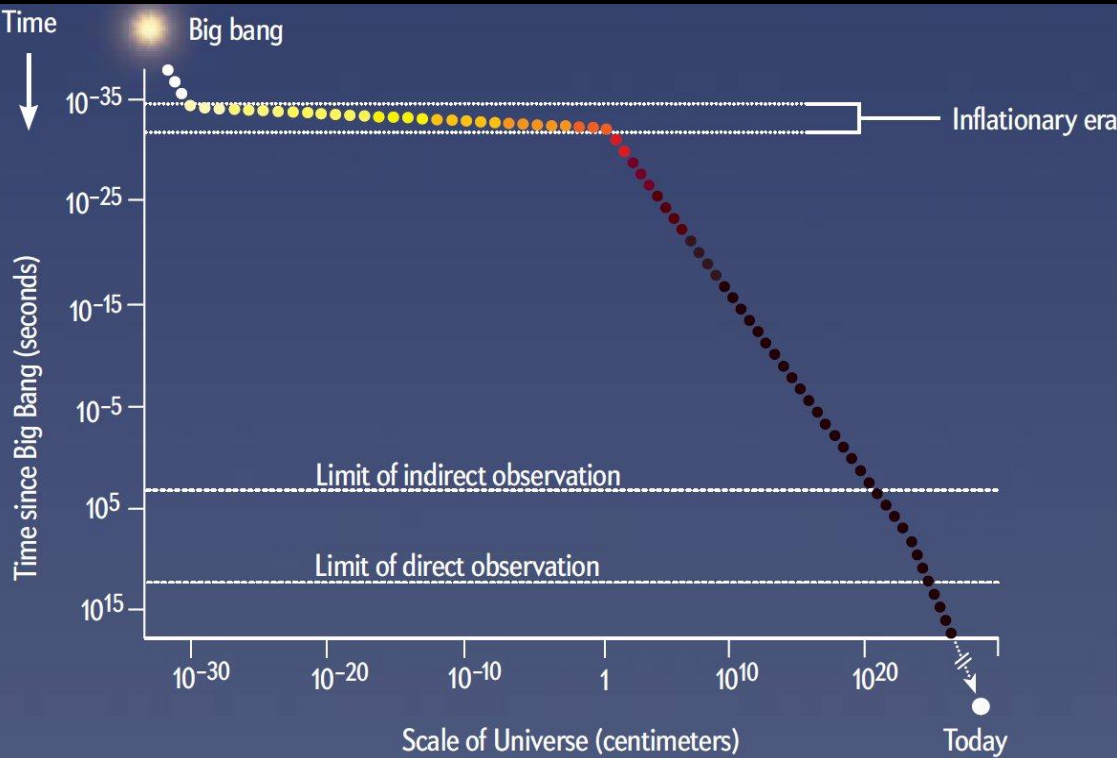
El campo es inestable y se desintegra terminando la inflación tras  $10^{-35}$  s

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



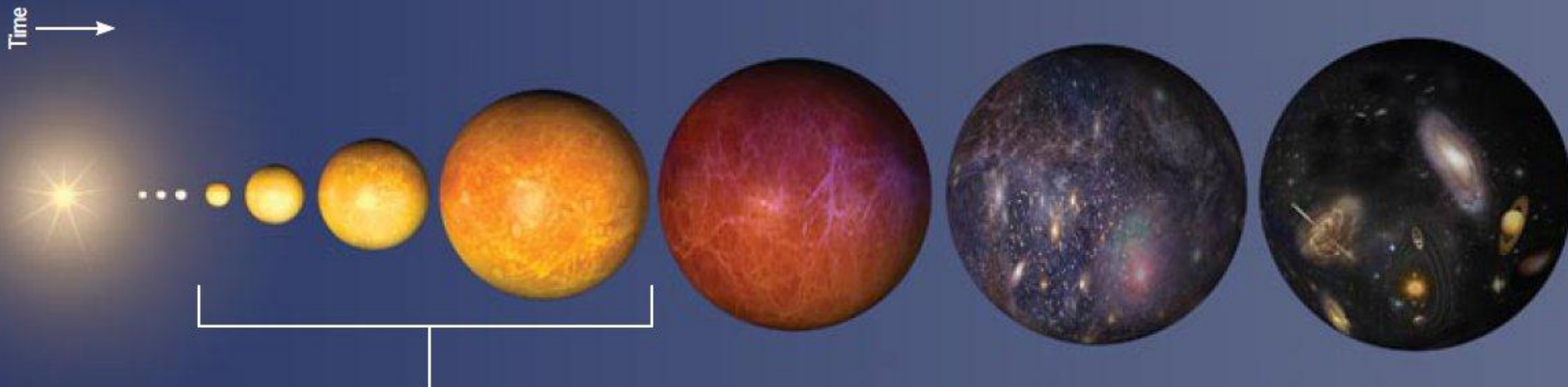


# La inflación en un minuto

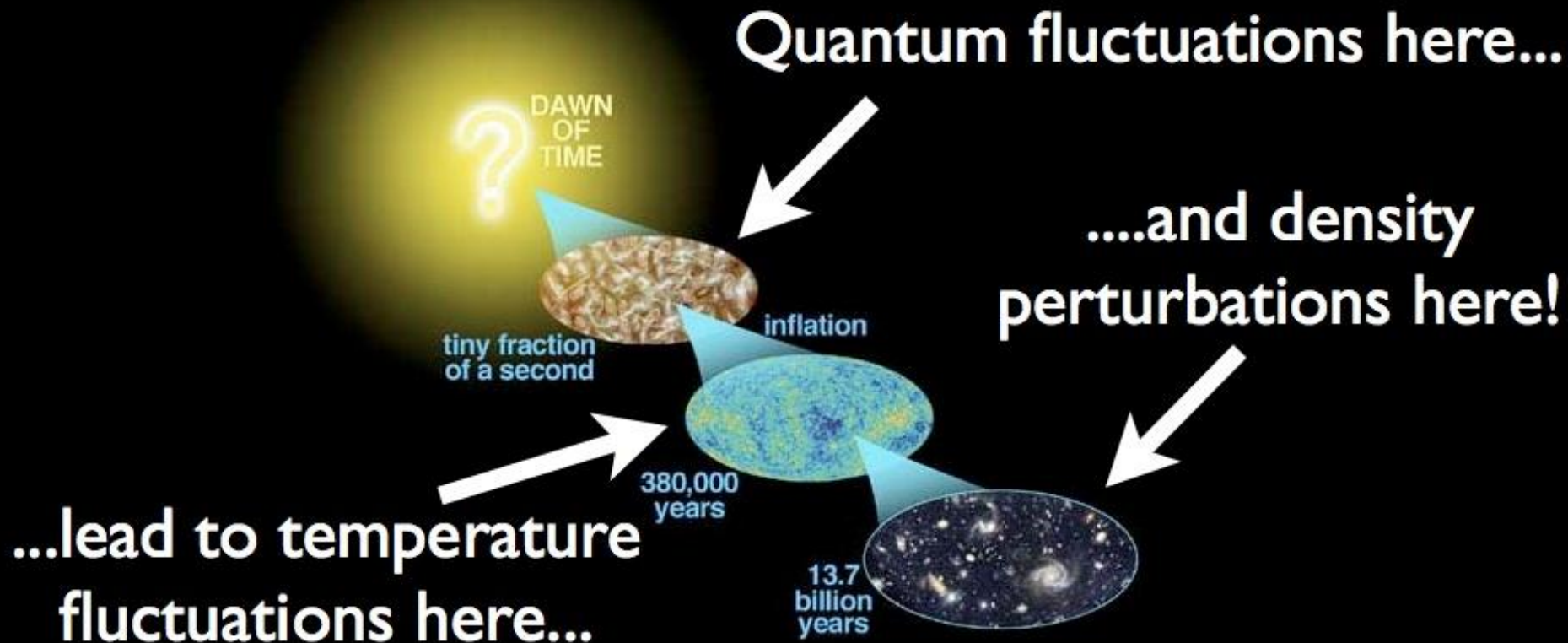


El universo observable es del tamaño de una canica al terminar la inflación

La “sopa primordial” es el punto de partida de la expansión del Big Bang clásico. A partir de este momento el universo se expande y se enfría hasta llegar al día de hoy



# La inflación cósmica



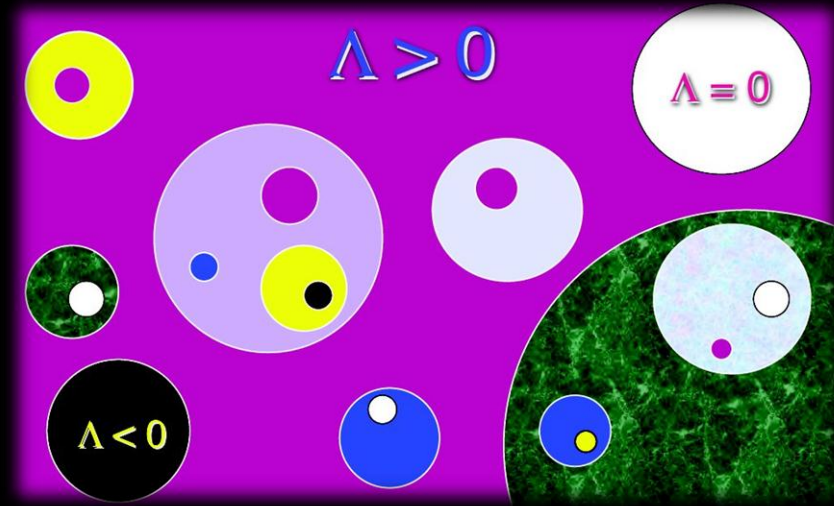
**La inflación explica la formación de estructuras en el universo. Las inhomogeneidades iniciales se deben a fluctuaciones cuánticas durante el periodo inflacionario, amplificadas por la expansión desaforada.**

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

# ¿Universo o Multiverso?

## Inflación eterna

Un número infinito de universos en un fondo en inflación eterna

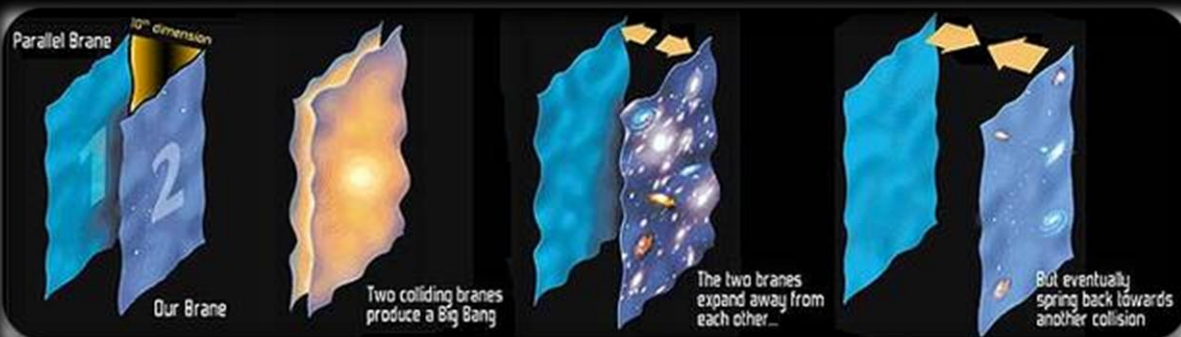


## El paisaje cósmico

Cada universo es un estado del vacío de la teoría de cuerdas

## Universos brana

Subespacios de 4 dimensiones del espacio total de 11 dimensiones

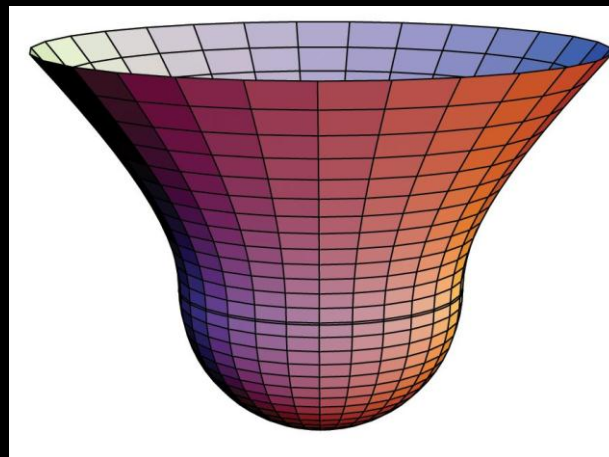




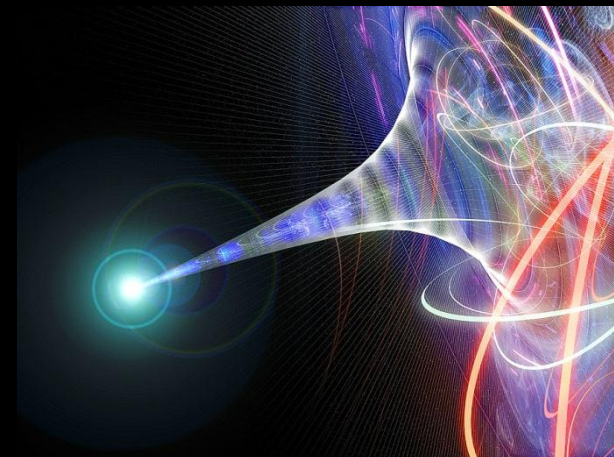
# El origen del Universo. El Big Bang



El universo se crea a sí mismo: máquina del tiempo

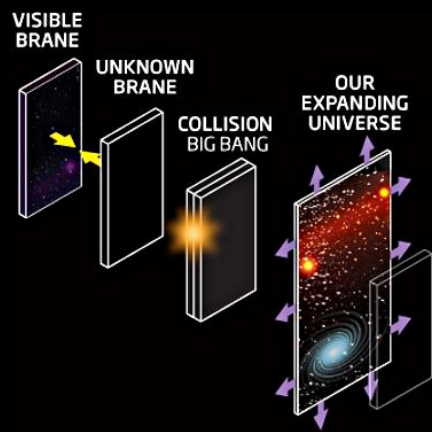


No frontera: Espacio y tiempo se confunden

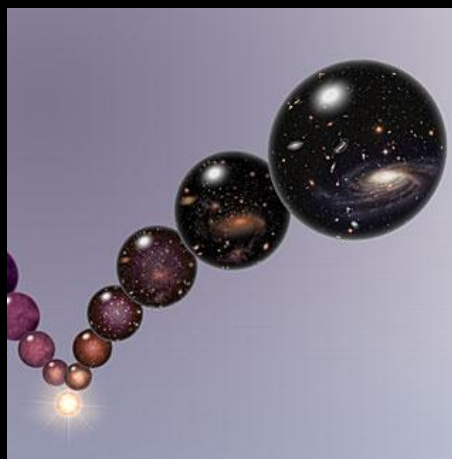


Efecto túnel cuántico a partir de la nada

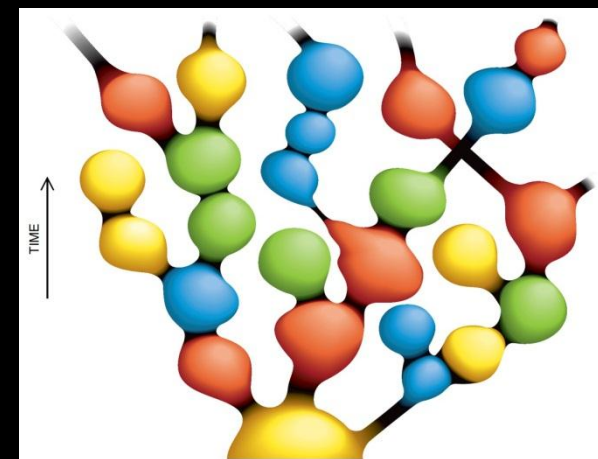
**No se sabe si alguna de estas propuestas es correcta, pero la cuestión está dentro del alcance de la ciencia**



Universo cíclico: Teoría de cuernas y branas



Gran rebote: Cosmología cuántica de bucles



Inflación eterna y universos bebé

# Conclusiones

**La teoría del Big Bang actual,  $\Lambda$ CDM, está basada en una enorme cantidad de observaciones, y se construye con:**

**La teoría de la relatividad general**

**El principio cosmológico**

**La inflación cósmica**

**Exige nueva física. El 96% del contenido del universo son entes exóticos y desconocidos**

**Energía oscura (74%)**

**Materia oscura (22%)**

**El mecanismo de la inflación y el origen del universo**

**Hay un enorme esfuerzo internacional para avanzar en la comprensión de estas cuestiones**

## Cosmología en el CIEMAT:

<http://wwwae.ciemat.es/DES>

<http://wwwae.ciemat.es/PAU>

## Pondré la charla en:

[http://wwwae.ciemat.es/tesis\\_y\\_talks/general.html](http://wwwae.ciemat.es/tesis_y_talks/general.html)

## Información sobre DES y PAU:

<http://www.darkenergysurvey.org>

<http://www.pausurvey.org>

## Si teneis preguntas:

[eusebio.sanchez@ciemat.es](mailto:eusebio.sanchez@ciemat.es)