Cosmología moderna, materia oscura y energía oscura

Angel M. Uranga*
Instituto de Física Teórica
UAM/CSIC
angel.uranga@uam.es







Visión actual del Universo



... a comprender sus características principales...



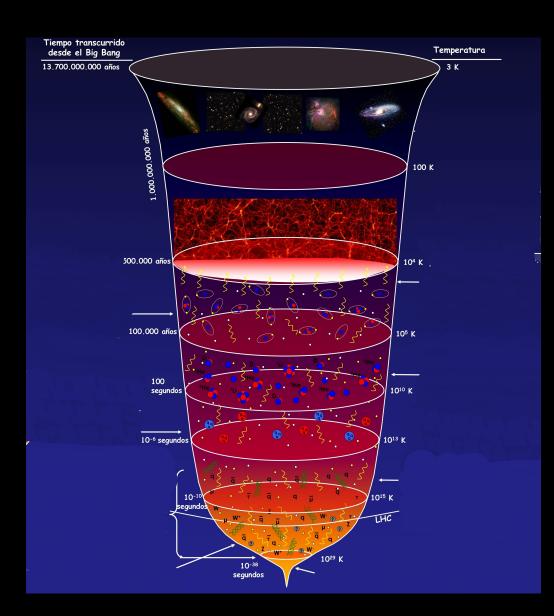


Un Universo en expansión

Conocemos su edad... (13 mil millones de años)

... y sabemos que en su origen (Big Bang) era muchísimo más denso y caliente que ahora.

Pero... ¿sabemos de qué está hecho?

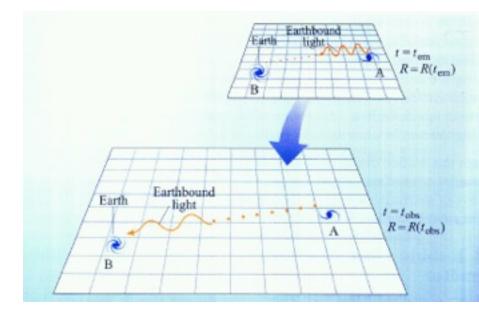


La expansión del Universo caracterizada por el

factor de escala a(t)

Las ecuaciones de Einstein relacionan la densidad promedio "p" y el factor de curvatura espacial "K" con el ritmo de expansión H

$$\left(\frac{\hat{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2}$$



La expansión del Universo caracterizada por el

factor de escala a(t)

Las ecuaciones de Einstein relacionan la densidad promedio "p" y el factor de curvatura espacial "K" con el ritmo de expansión H

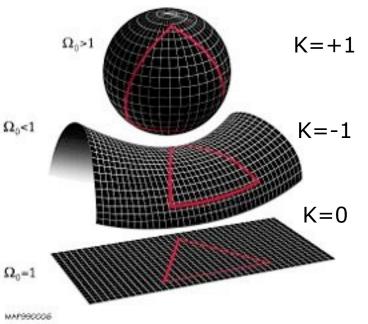
$$\left(\left(rac{\dot{a}}{a}
ight)^2 = rac{8\pi G}{3}
ho - rac{Kc^2}{a^2}$$



La densidad p determina la geometría del Universo La densidad crítica corresponde al valor en el que la geometría del espacio es plana

$$\rho_c = \frac{3}{8\pi G} H^2$$





La expansión del Universo caracterizada por el

factor de escala a(t)

Las ecuaciones de Einstein relacionan la densidad promedio "p" y el factor de curvatura espacial "K" con el ritmo de expansión H

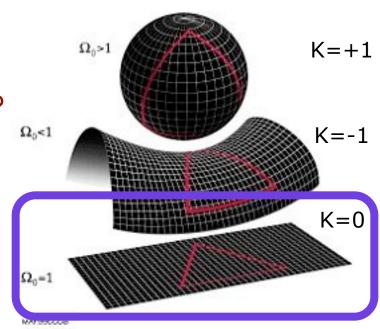
$$\left(\frac{\hat{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2}$$

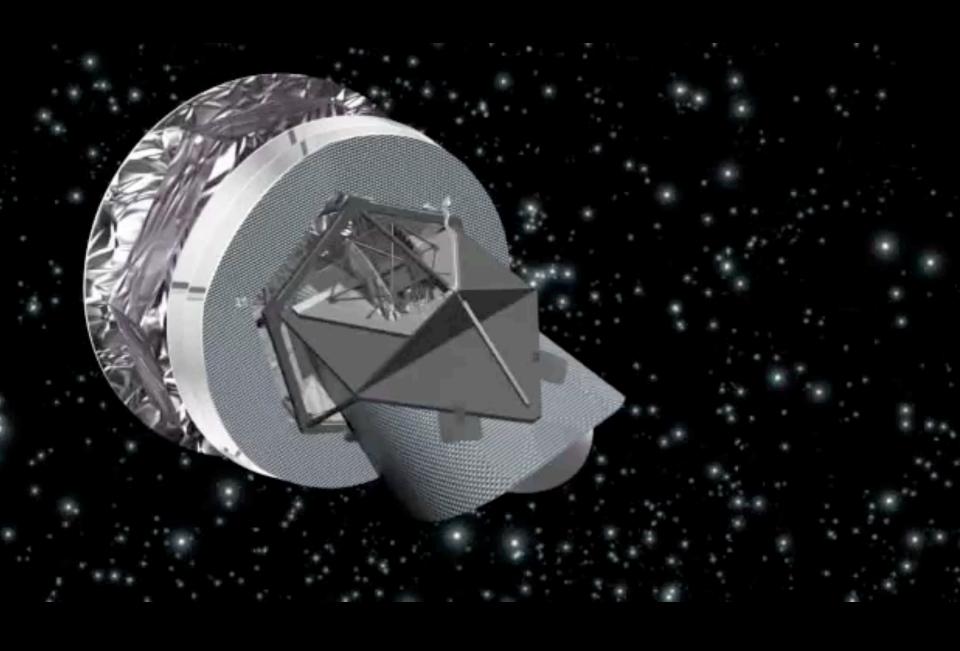


Densidad crítica

La densidad p determina la geometría del Universo La densidad crítica corresponde al valor en el que la geometría del espacio es plana

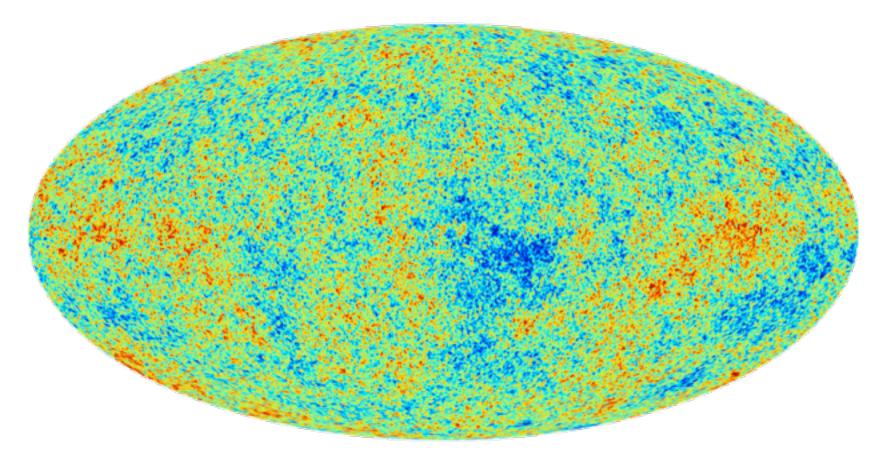
$$\rho_c = \frac{3}{8\pi G} H^2$$





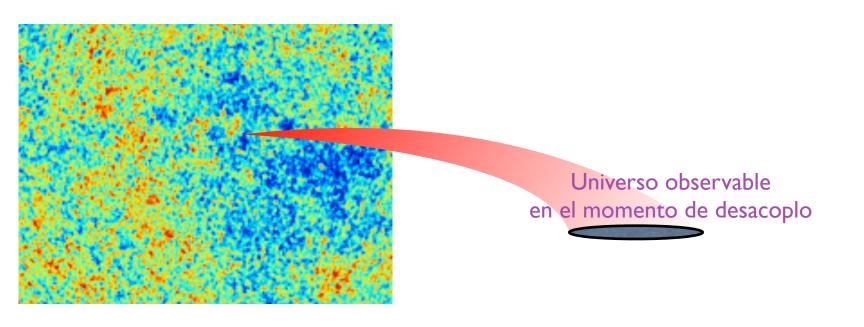
https://www.youtube.com/watch?v=2RTSfbBOa9Q

Podemos obtener la curvatura de los datos del **fondo de radiación de microondas**

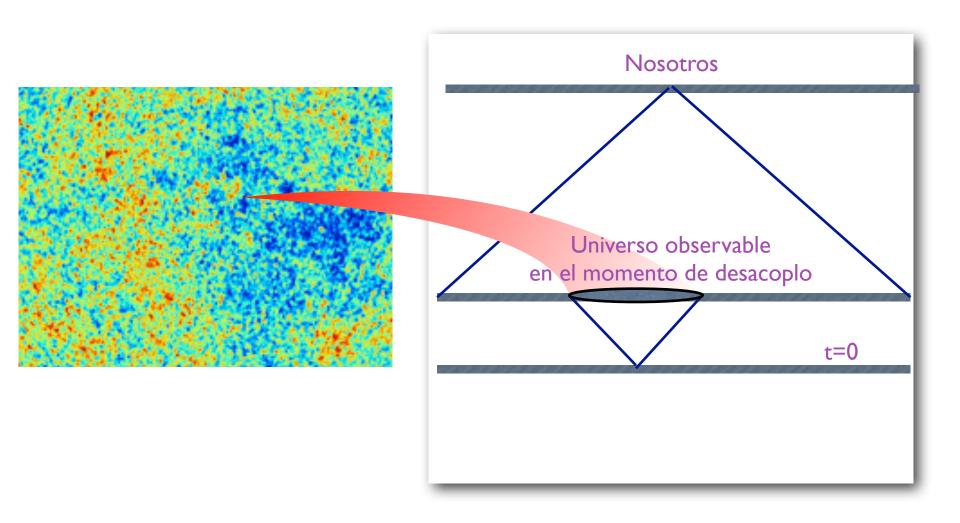


Es un mapa de temperaturas, pero también de ondas de densidad del plasma primitivo en el momento de la Recombinación

La escala característica está fijada por el tamaño del horizonte (del Universo observable) en aquel momento, 380.000 años

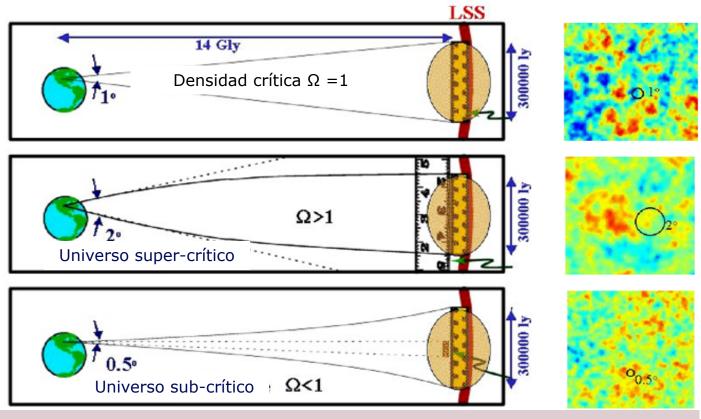


La escala característica está fijada por el tamaño del horizonte (del Universo observable) en aquel momento, 380.000 años



Fondo de radiación de microondas

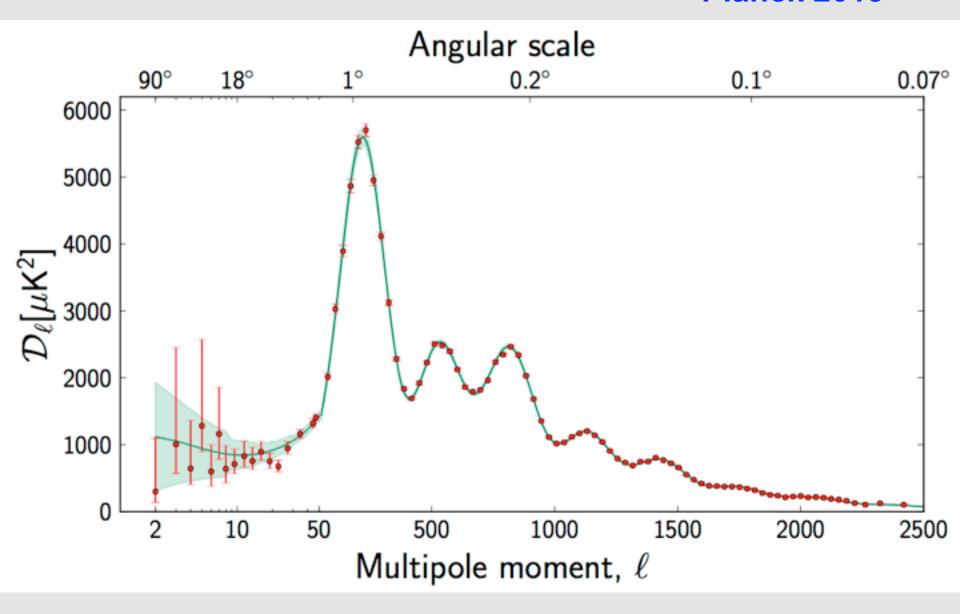
El análisis de las inhomogeneidades revela la geometría, la historia y la composición del Universo



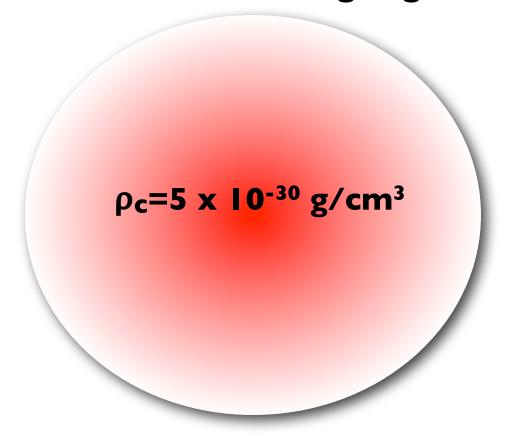
El tamaño aparente de la escala de anisotropía depende de Ω_{tot}

Los datos muestran que el Universo tiene la densidad crítica Ω_{tot} =1.02 ±0.02 y su geometría es plana

Planck 2013



Universo espacialmente plano densidad de energía igual a la crítica



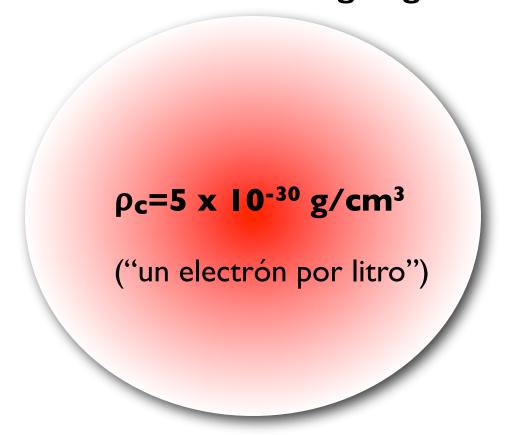
Universo espacialmente plano densidad de energía igual a la

 $\rho_c = 5 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$

("un electrón por litro")



Universo espacialmente plano densidad de energía igual a la



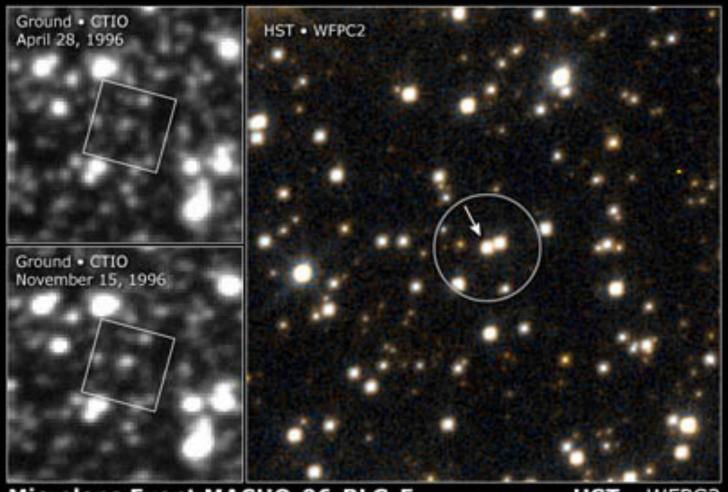


Pero... ¿de qué está lleno el Universo realmente?





Materia ordinaria: estrellas, gas, polvo, radiación, neutrinos, ... agujeros negros, MACHOs,...



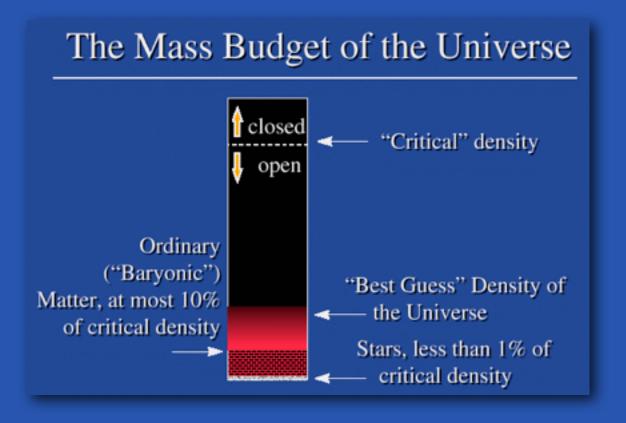
Microlens Event MACHO-96-BLG-5

NASA and D. Bennett (Notre Dame University) • STScI-PRC00-03

HST • WFPC2

Materia ordinaria: estrellas, gas, polvo, radiación, neutrinos, ... agujeros negros, MACHOs,...

Compone sólo el 5% de la densidad de energía del Universo



El Lado Oscuro del Universo

Existen varias componentes en el contenido del Universo

Denotamos cada uno por la fracción de la densidad crítica que describen

$$\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} \sim 5\%$$

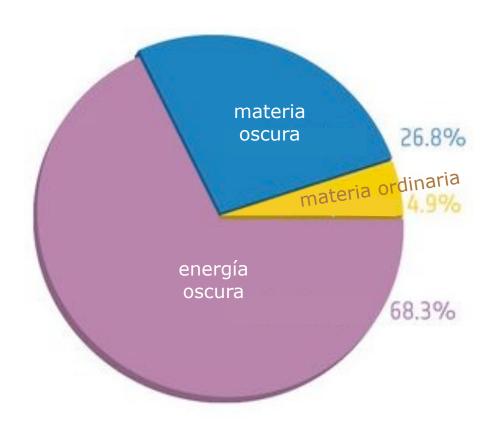
Hay un 95% que corresponde a componentes que no emiten luz, oscuras

$$\Omega_m + \Omega_{\rm DM} + \Omega_{\rm DE} = 100\%$$



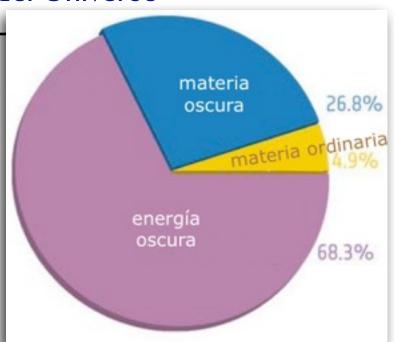
Composición del Universo

Los datos de multitud de observaciones muestran el siguiente reparto de la ddensidad de energía del Universo



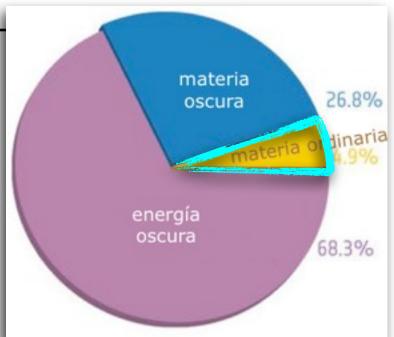
Multitud de observaciones confirman este modelo, y la composición actual del Universo

- Materia bariónica, aprox. 5% Materia conocida, átomos, etc
- Materia oscura, aprox. 25%
 Materia que no emite luz
 Se detecta su efecto gravitatorio
 Posiblemente partículas neutras muy pesadas
- Energía oscura, aprox. 70%



Multitud de observaciones confirman este modelo, y la composición actual del Universo

- Materia bariónica, aprox. 5% Materia conocida, átomos, etc
- Materia oscura, aprox. 25%
 Materia que no emite luz
 Se detecta su efecto gravitatorio
 Posiblemente partículas neutras muy pesadas
- Energía oscura, aprox. 70%



Multitud de observaciones confirman este modelo, y la composición actual del Universo

- Materia bariónica, aprox. 5%
 Materia conocida, átomos, etc
- Materia oscura, aprox. 25%
 Materia que no emite luz
 Se detecta su efecto gravitatorio
 Posiblemente partículas neutras muy pesadas
- Energía oscura, aprox. 70%



Multitud de observaciones confirman este modelo, y la composición actual del Universo

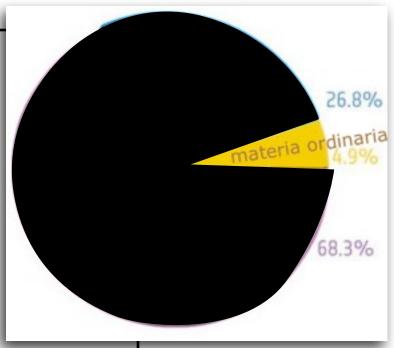
- Materia bariónica, aprox. 5% Materia conocida, átomos, etc
- Materia oscura, aprox. 25%
 Materia que no emite luz
 Se detecta su efecto gravitatorio
 Posiblemente partículas neutras muy pesadas
- Energía oscura, aprox. 70%



Multitud de observaciones confirman este modelo, y la composición actual del Universo

- Materia bariónica, aprox. 5% Materia conocida, átomos, etc
- Materia oscura, aprox. 25%
 Materia que no emite luz
 Se detecta su efecto gravitatorio
 Posiblemente partículas neutras muy pesadas
- Energía oscura, aprox. 70%

Energía del vacío, NO de partículas Genera una expansión acelerada del Universo ¿Constante cosmológica de Einstein?



⇒ ¡El 95% del contenido del Universo es un misterio!



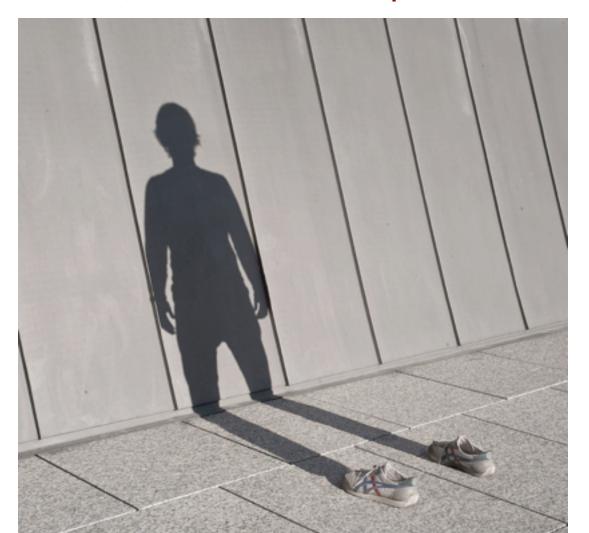
Materia Oscura

Materia Oscura

85% de la densidad de **materia** del Universo (25% energía) Si no se ve...

Materia Oscura

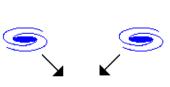
85% de la densidad de **materia** del Universo (25% energía) Si no se ve... ¿Cómo sabemos que está ahí?

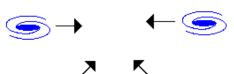


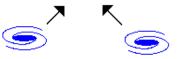
Materia oscura

Indicios tempranos, F. Zwicky, 1933











El efecto gravitacional requiere más masa de la visible Masa de la materia visible=10% masa gravitatoria total Propuso la existencia de masa invisible, oscura Vera Rubin, 1975

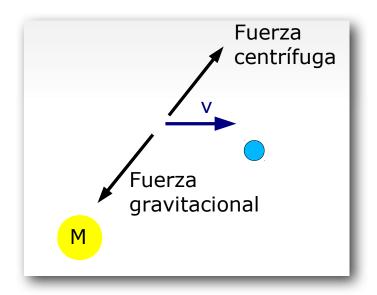


"Curvas de rotación en galaxias"



Materia Oscura

Ley de la Gravitación Universal de Newton



$$G\frac{mM}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

La velocidad de rotación es función de la masa y la velocidad

$$v = \sqrt{G \frac{M}{r}}$$

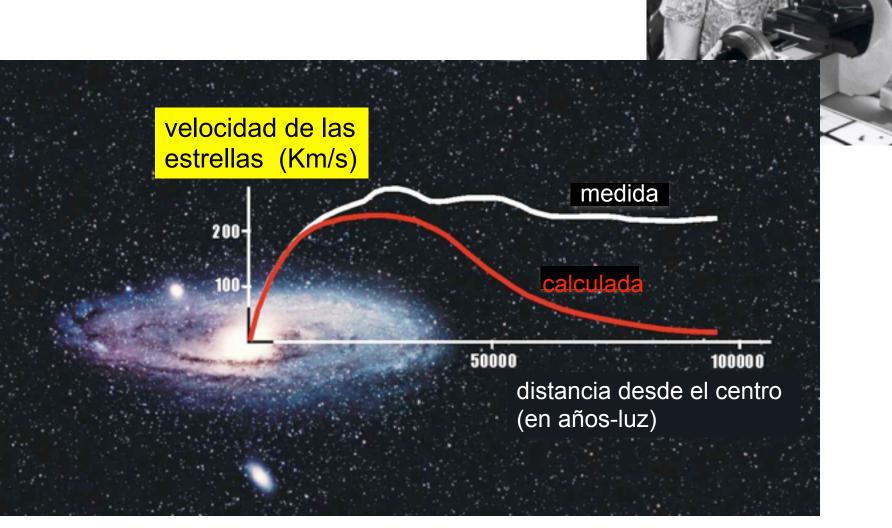






 $v = \sqrt{G \frac{M}{r}}$





Estas observaciones se han hecho para numerosas galaxias y no pueden ser entendidas como otras contribuciones (por ejemplo, gas)

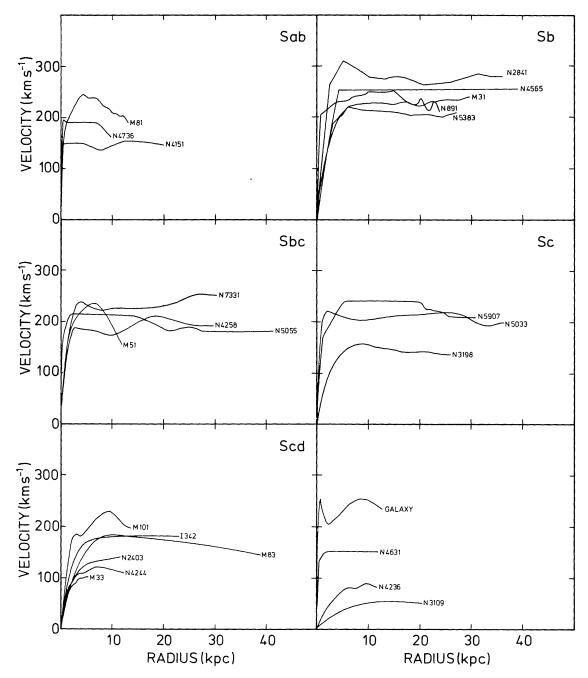
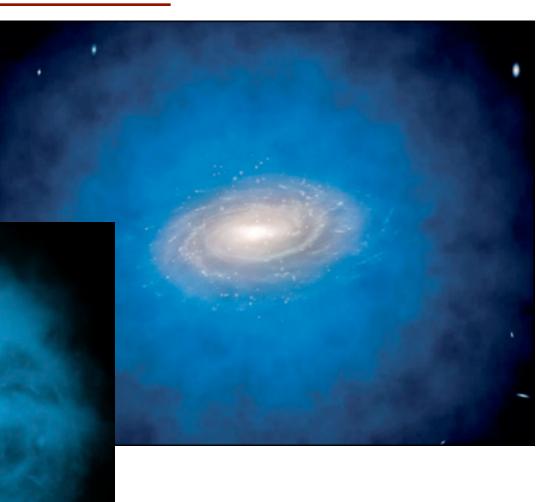
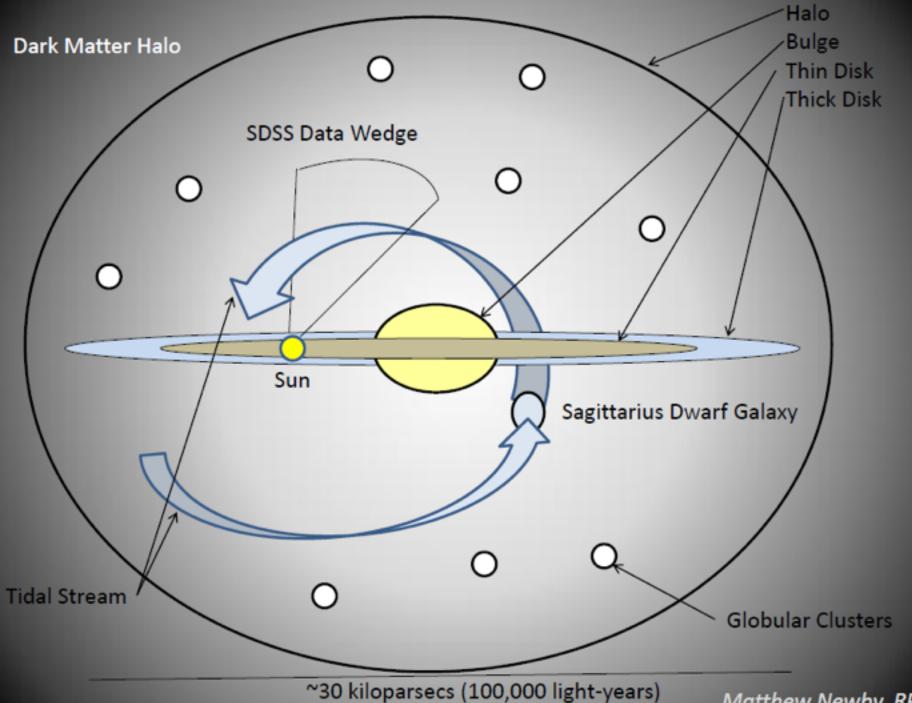


Figure 2 Rotation curves of 25 galaxies of various morphological types from Bosma (1978).

Halos de materia oscura alrededor de las galaxias

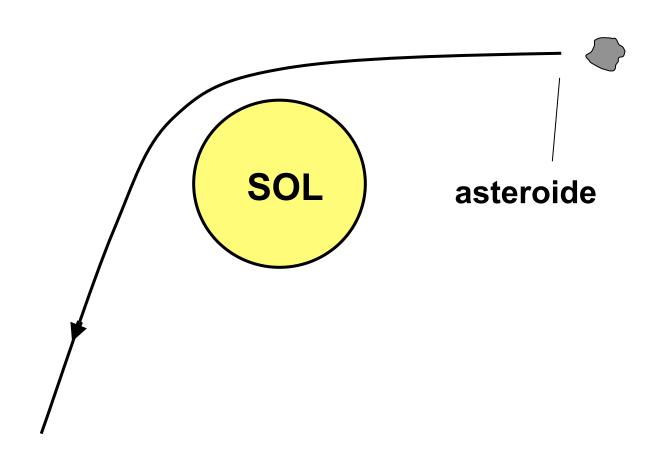


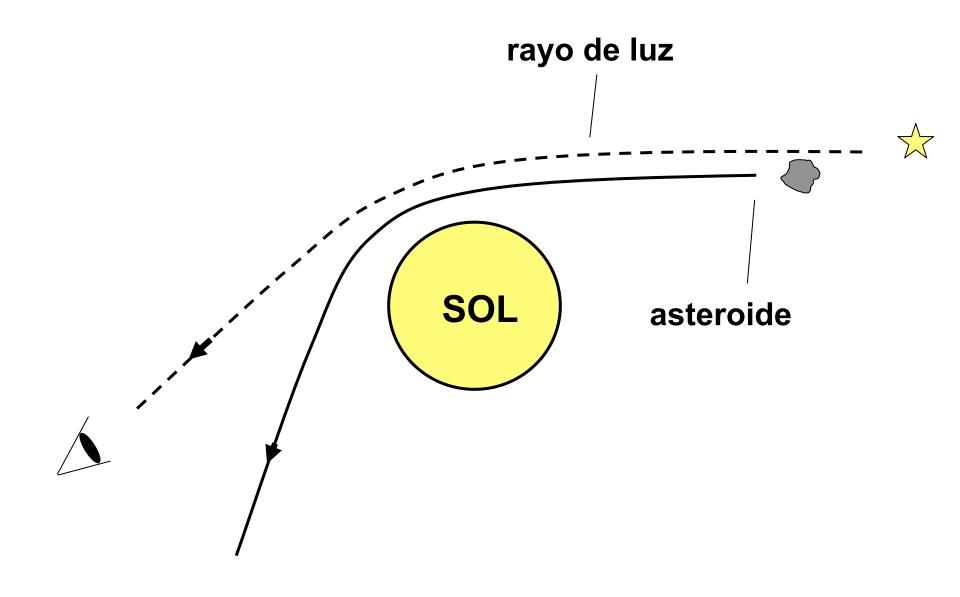


Lentes gravitacionales





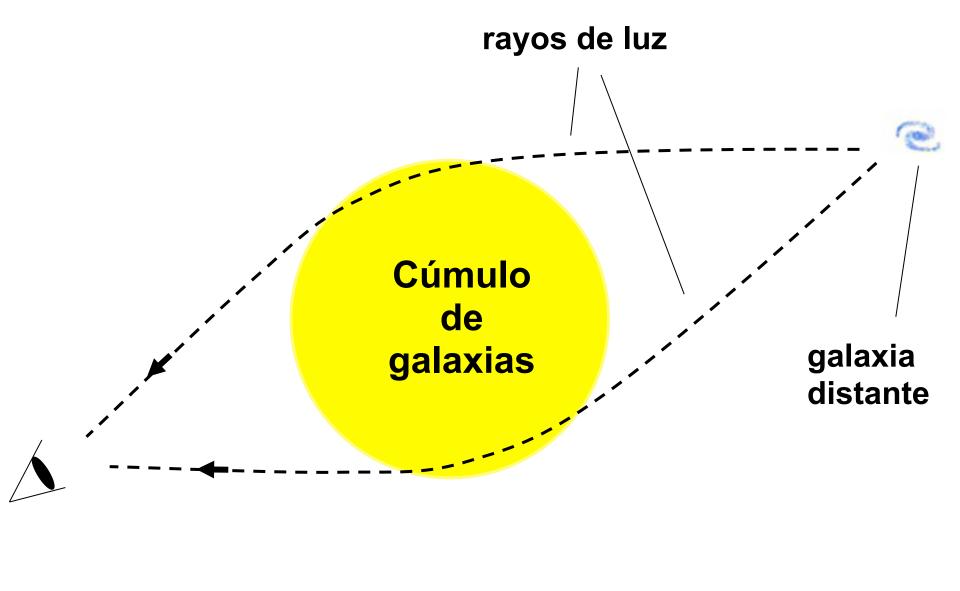


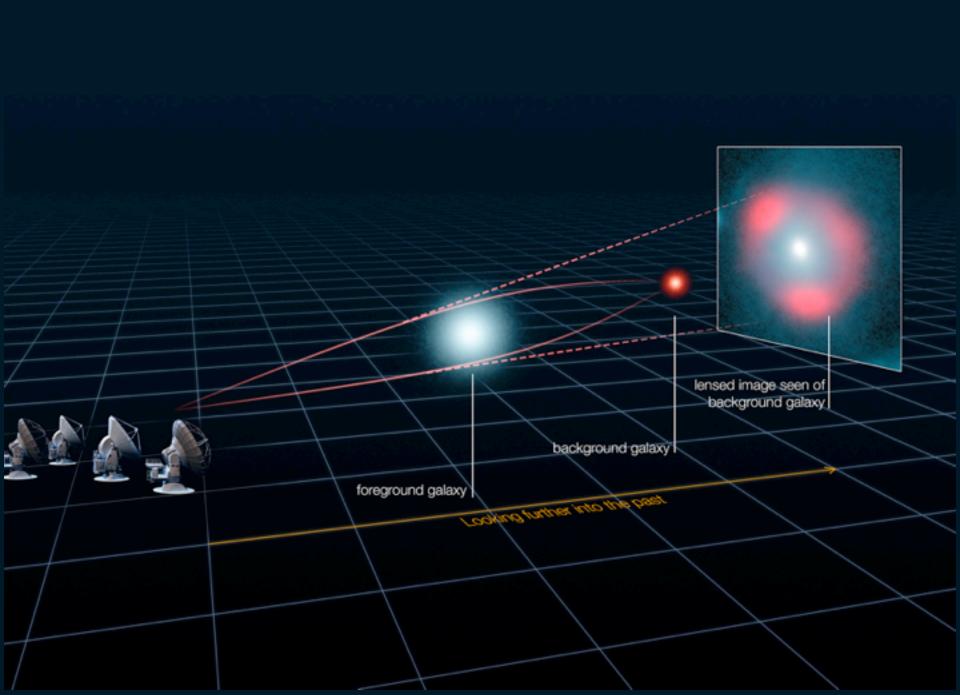






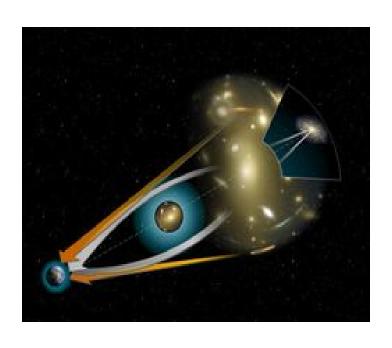


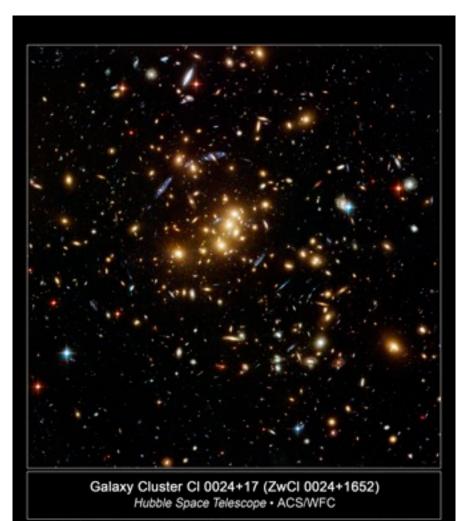




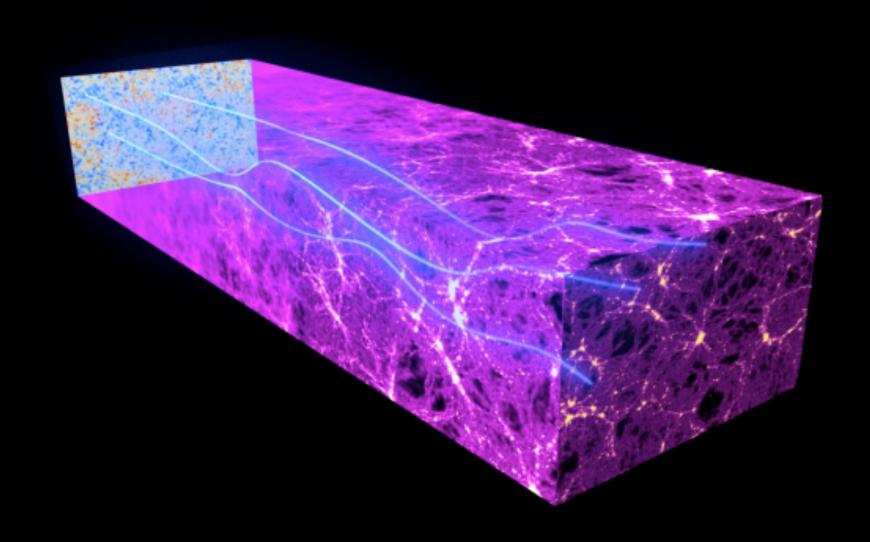
Lentes gravitacionales

La imagen de objetos luminosos se distorsiona por efecto gravitacional de materia oscura en la trayectoria de la luz





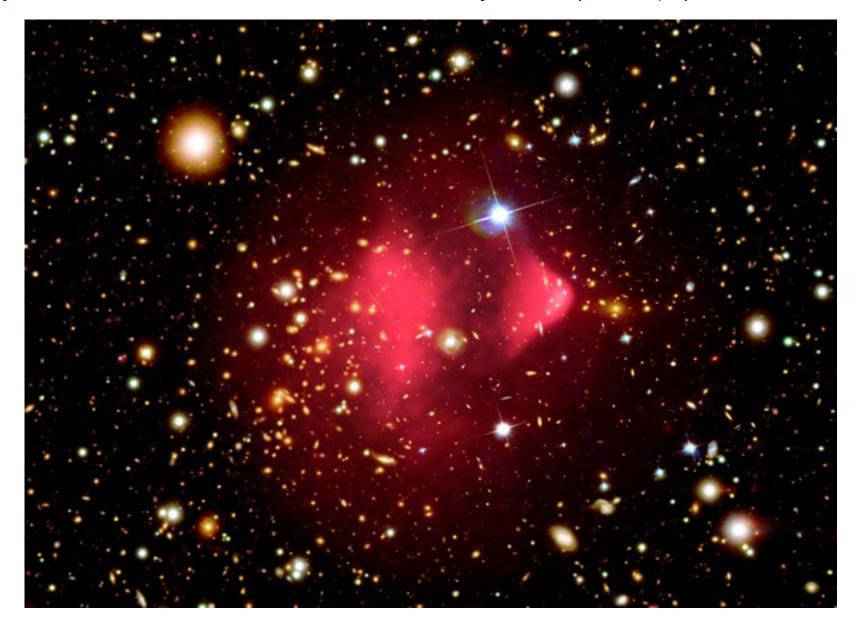
El efecto de lente en el CMB pueden usarse para medir la densidad de materia oscura.



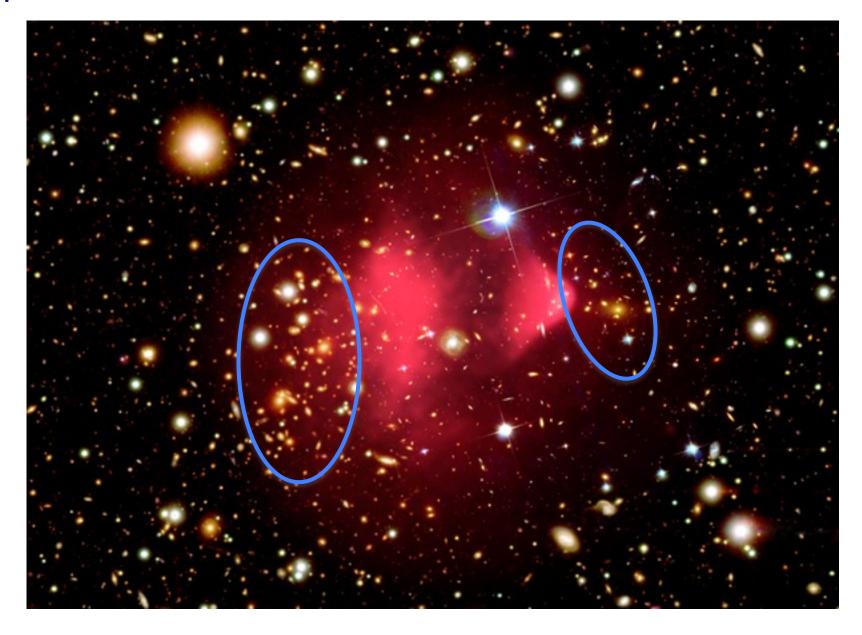
"Bullet cluster" / "Cúmulo bala"

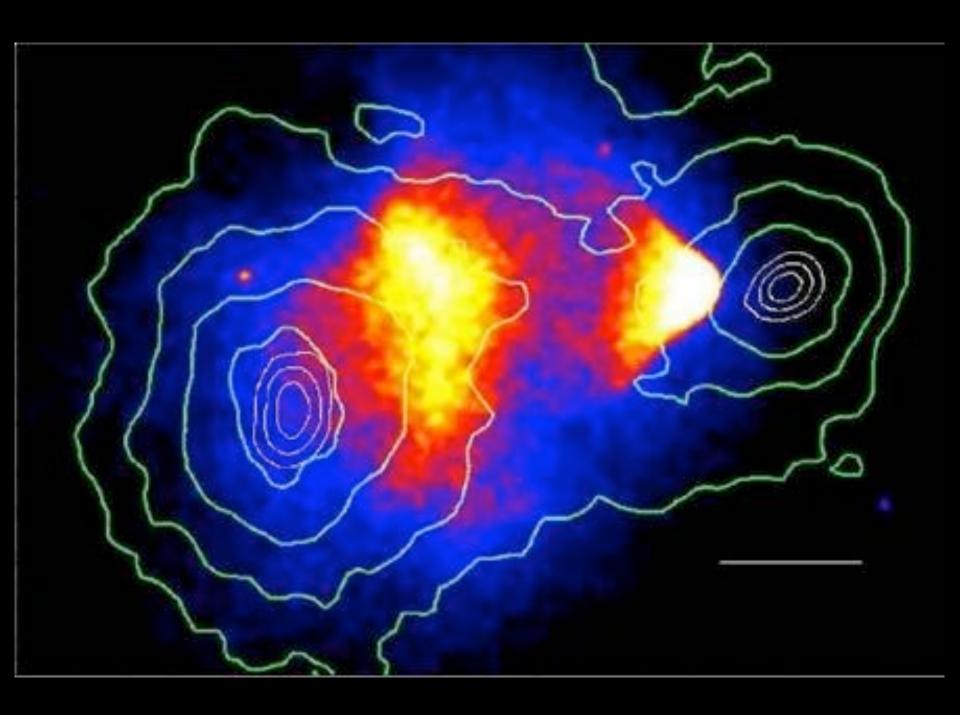


Colisión de dos cúmulos de galaxias, la materia luminosa se espachurra con fuerte emisión de rayos X (en rojo)

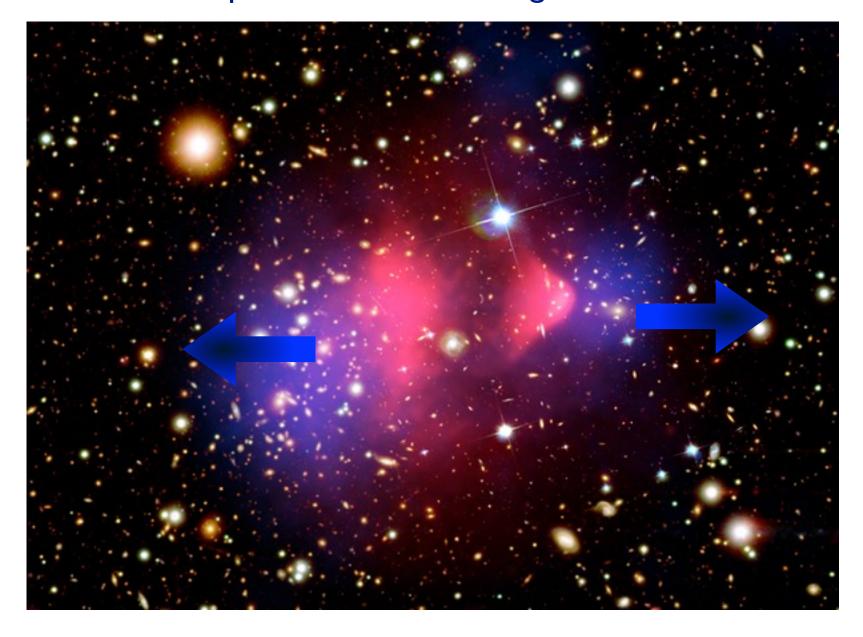


El efecto de lente señala dos regiones de materia oscura, separadas de las de materia luminosa

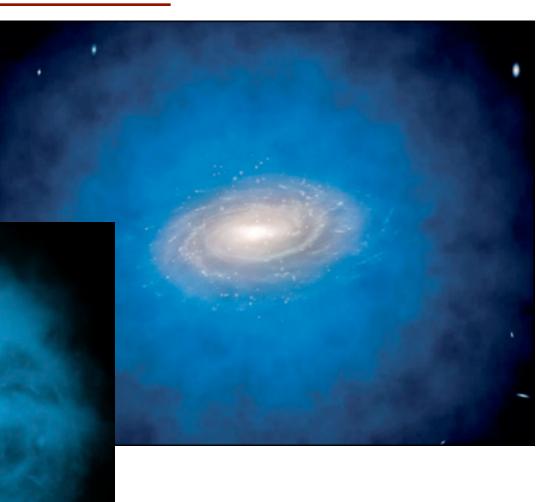




En la colisión, la materia luminosa se espachurra, mientras que la materia oscura, poco interactuante, sigue su camino...



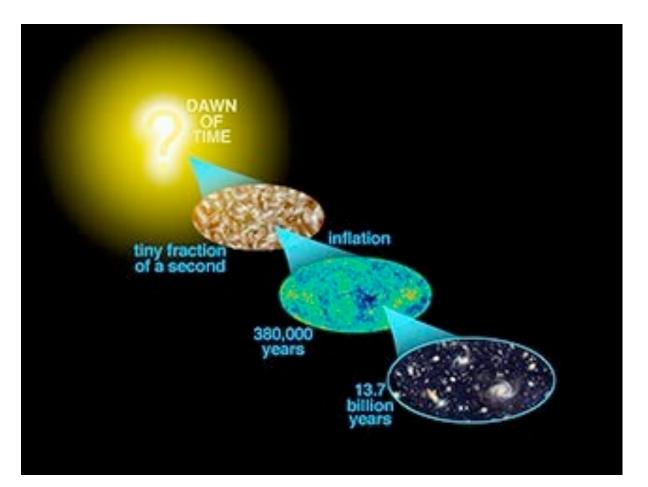
Halos de materia oscura alrededor de las galaxias

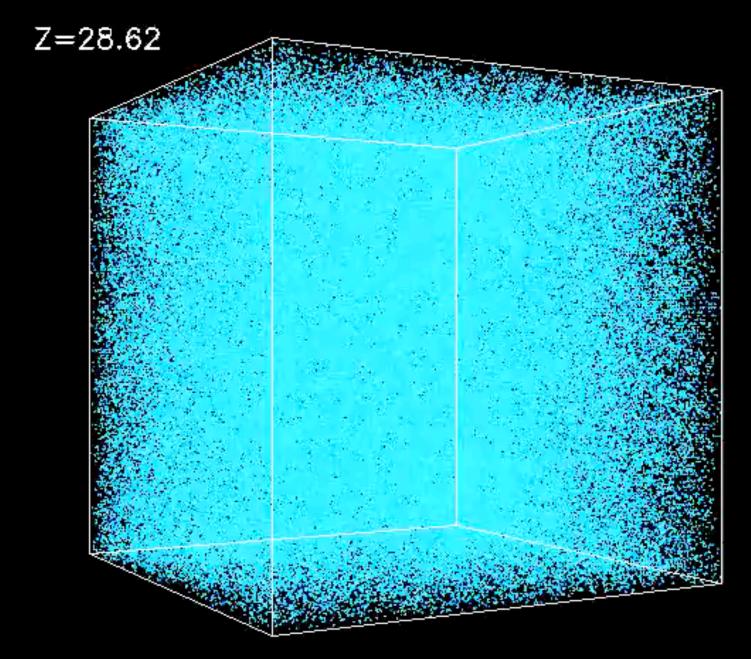


Se puede medir mediante el efecto de lente gravitatoria



Simulaciones de crecimiento de grandes estructuras. La materia oscura debe ser incluida como semilla de crecimiento. Distribución de materia oscura en el Universo

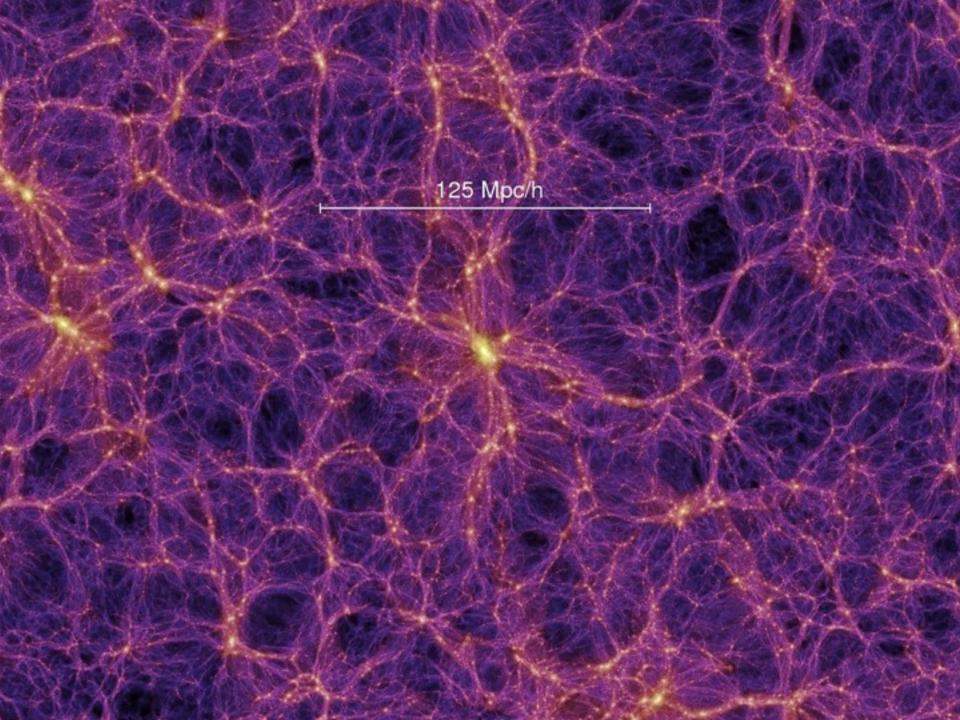


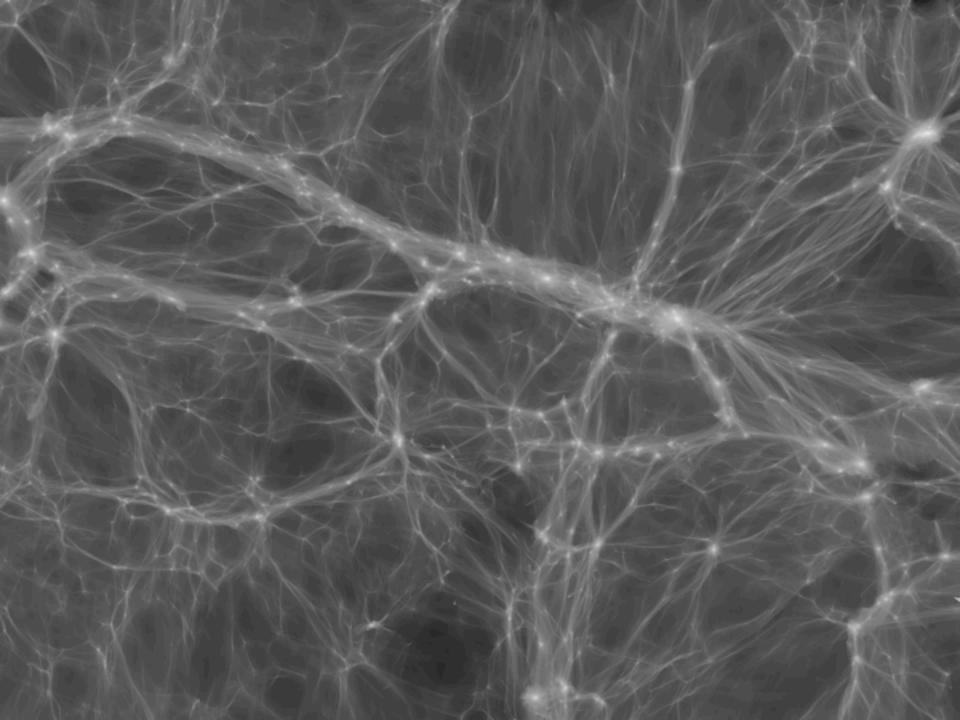


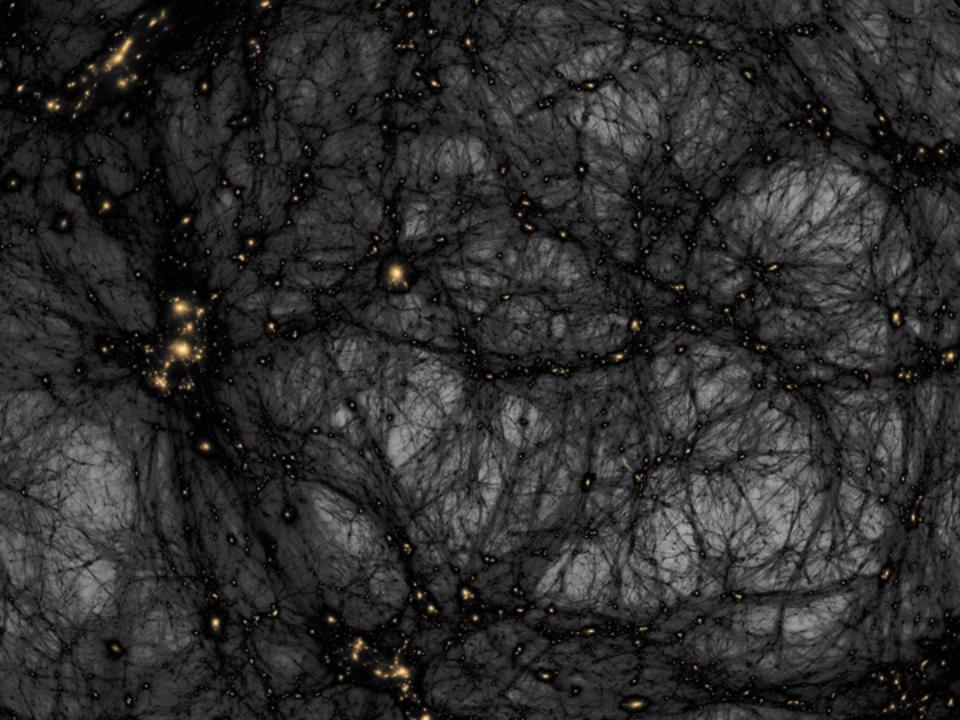
https://www.youtube.com/watch?v=8C_dnP2fvxk



(crucial incluir materia oscura y energía oscura)







¿Qué es la materia oscura?



Conocemos muchas de sus propiedades

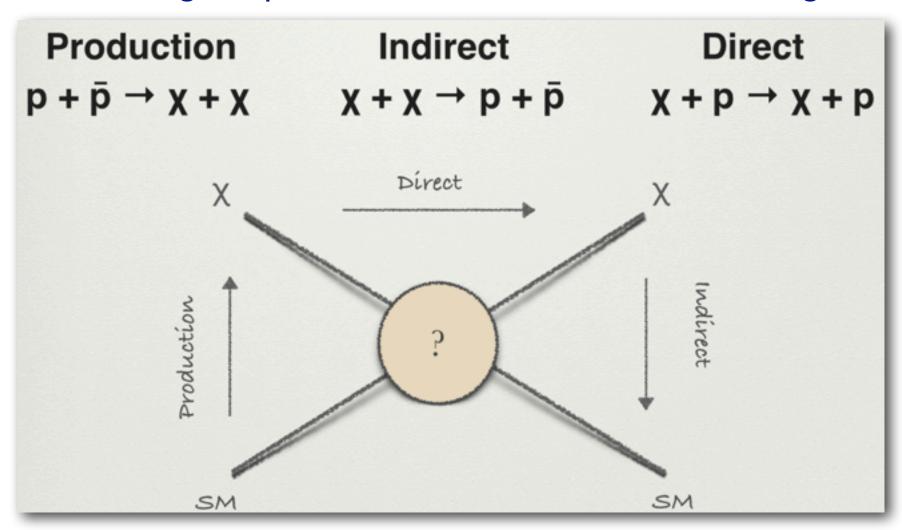
No corresponde con ninguna de las partículas conocidas

¡Un nuevo tipo de partícula!

Su detección / identificación sería un progreso enorme en Física de Partículas y Cosmología

Búsquedas de materia oscura

Tres estrategias a partir de tres maneras de mirar un diagrama

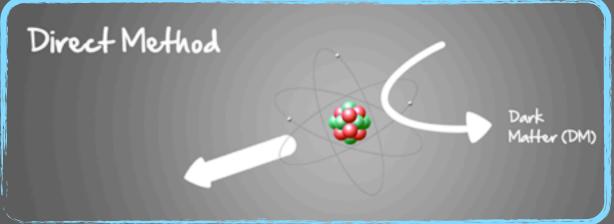


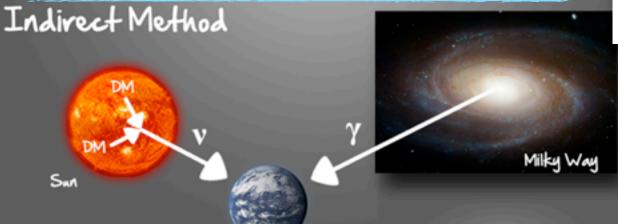
Dark Matter search strategies Direct Method direct detection Indirect Method production at colliders Milky Way SHA Production at the Large Hadron Collider

thermal freeze-out (early Univ.) indirect detection (now)

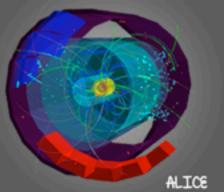
ALICE

Dark Matter search strategies





Production at the Large Hadron Collider



thermal freeze-out (early Univ.)
indirect detection (now)

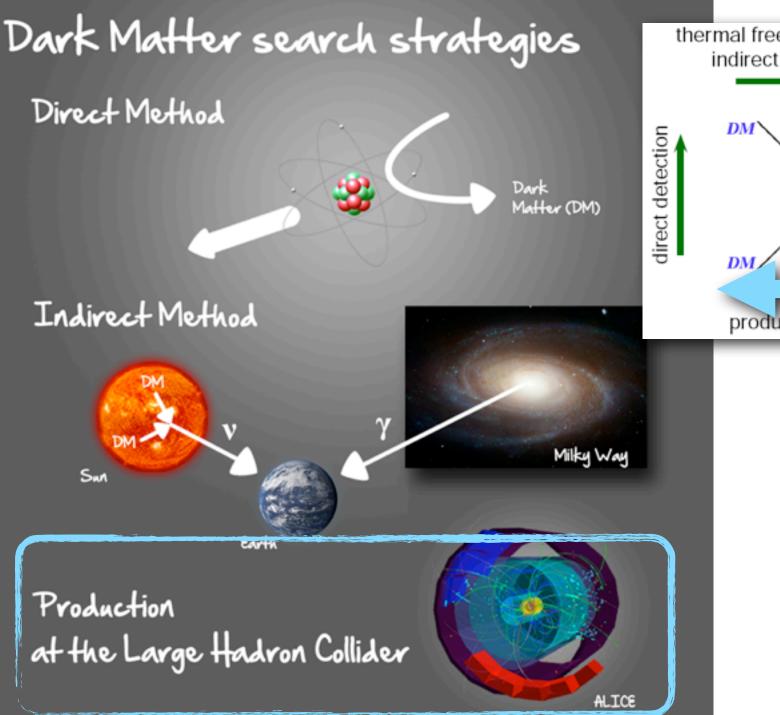
SM

production at colliders

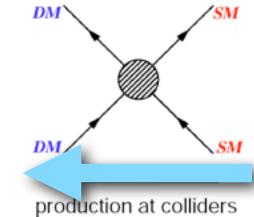
Dark Matter search strategies Direct Method direct detection Indirect Method Milky Way Earth Production at the Large Hadron Collider **ALICE**

thermal freeze-out (early Univ.) indirect detection (now)

production at colliders



thermal freeze-out (early Univ.)
indirect detection (now)



Producción en el LHC

¿Un nuevo tipo de materia? Nuevas partículas

Necesitamos **NUEVA FÍSICA** más allá del Modelo Estándar de Partículas elementales para explicar la naturaleza de la materia oscura.

Muchas posibilidades **teóricas**:

- Axiones
- Supersimetría
- Dimensiones Extra

 (el universo podría tener más de 4 dimensiones)
- Etc



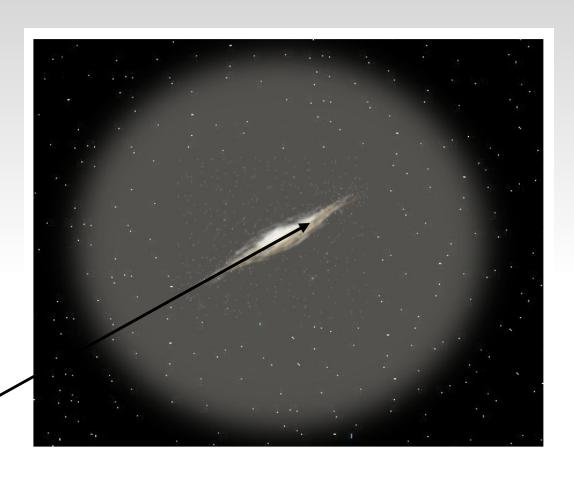
Algunas de estas teorías podrían estudiarse con aceleradores de partículas como el **LHC** (Large Hadron Collider)

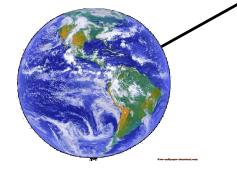
Búsquedas directas

Las galaxias están rodeadas de un "halo" esférico de materia oscura

La materia oscura es responsable del **90%** de la masa de la galaxia.

iEstamos rodeados de materia oscura!

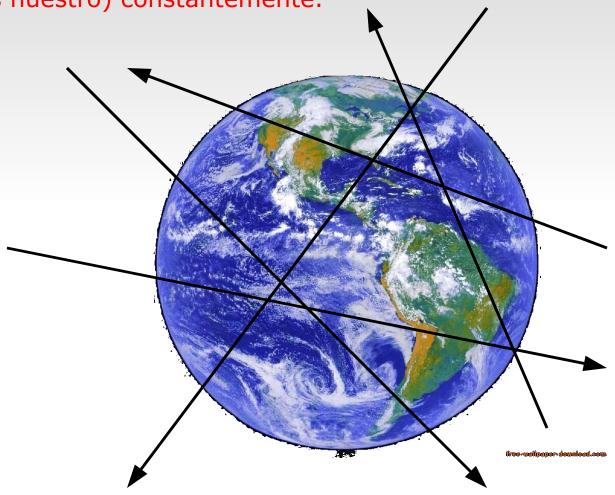




¿Cómo la podemos detectar? BÚSQUEDAS DIRECTAS

Partículas de materia oscura "cruzan" a través de la Tierra (y a

través nuestro) constantemente.



¿Cómo la podemos detectar? BÚSQUEDAS DIRECTAS

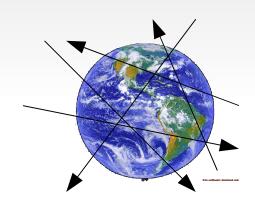
Partículas de materia oscura "cruzan" a través de la Tierra (y a través nuestro) constantemente.

Usando medidas de la velocidad de rotación podemos calcular la densidad de materia oscura en la Via Láctea

$$\rho_{\text{Dark Matter}} = 5 \times 10^{\text{-24}} \text{ g cm}^{\text{-3}}$$

Las partículas de materia oscura tienen una velocidad media de

$$v = 300 \text{ km s}^{-1}$$

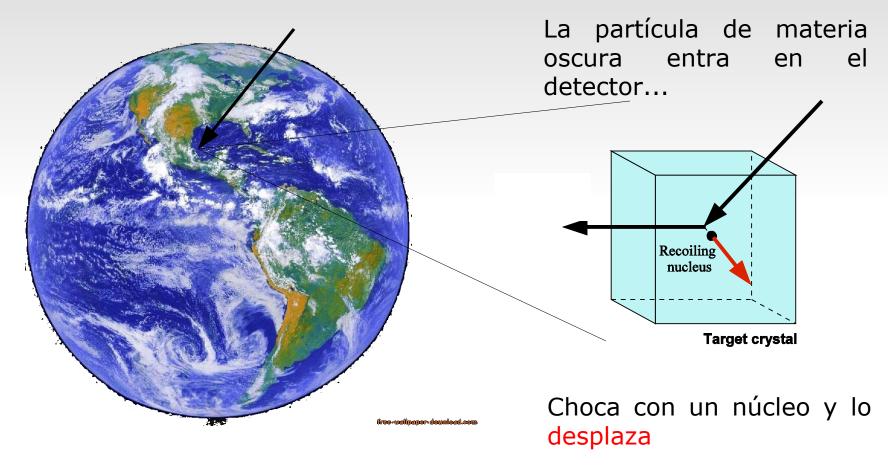


iAproximadamente unas **10 000 000 000** partículas de materia oscura nos han atravesado (a cada uno) durante esta charla!

Pero no las notamos....

¿Cómo la podemos detectar? **BÚSQUEDAS DIRECTAS**

Podemos emplear **detectores muy sensibles** para buscar estas partículas



Varios detectores en todo el mundo

Estas partículas interaccionan tan poco que los experimentos qienen que estar aislados de otros tipos de partículas...

iHan de estar bajo tierra para protegerse de los rayos cósmicos!



Los experimentos se "blindan" frente a rayos cósmicos



En su interior, cristales de Yoduro de Sodio detectan retrocesos nucleares emitiendo luz

ANAIS, Laboratorio Subterráneo de Canfranc

Estas partículas interaccionan tan poco que los experimentos qienen que estar aislados de otros tipos de partículas...

iHan de estar bajo tierra para protegerse de los rayos cósmicos!



Los experimentos se "blindan" frente a rayos

cósmicos



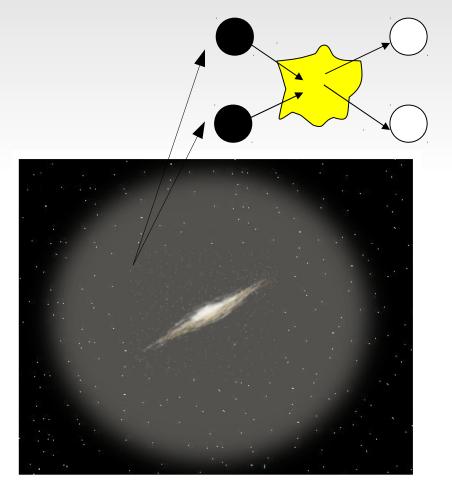
El blindaje ha de ser extremadamente "radiopuro" (p.ej. Plomo arqueológico)

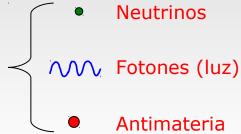
ANAIS, Laboratorio Subterráneo de Canfranc

Búsquedas indirectas

Otra posibilidad... BÚSQUEDAS INDIRECTAS

Las partículas de materia oscura colisionan entre ellas y se aniquilan dando lugar a otras partículas (que intentamos detectar)





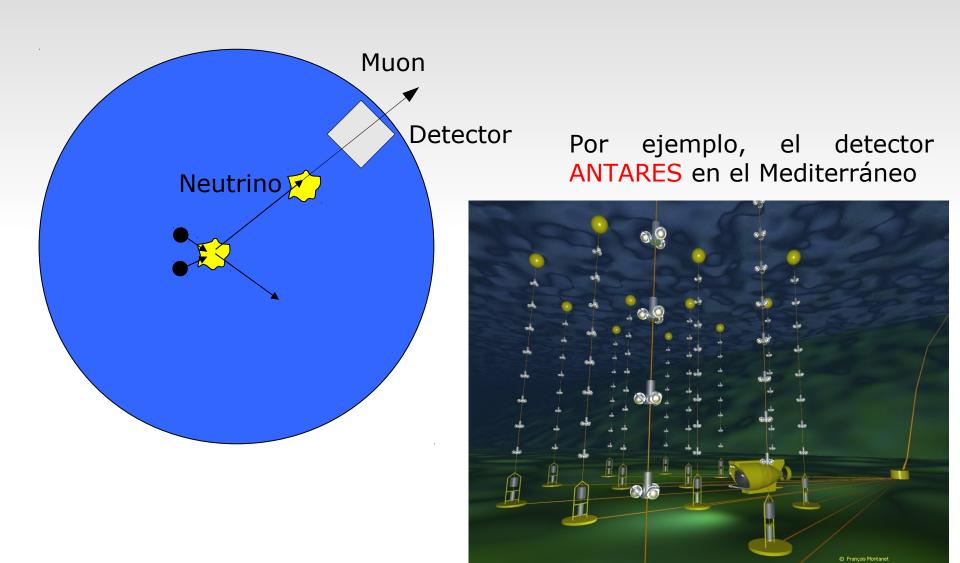
<u>Diversos experimentos:</u>

Detectores de neutrinos

Detectores de Rayos cósmicos

Telescopios (para rayos gamma)

La aniquilación de materia oscura dentro de la Tierra puede producir **neutrinos**, que interaccionan con la roca y producen muones



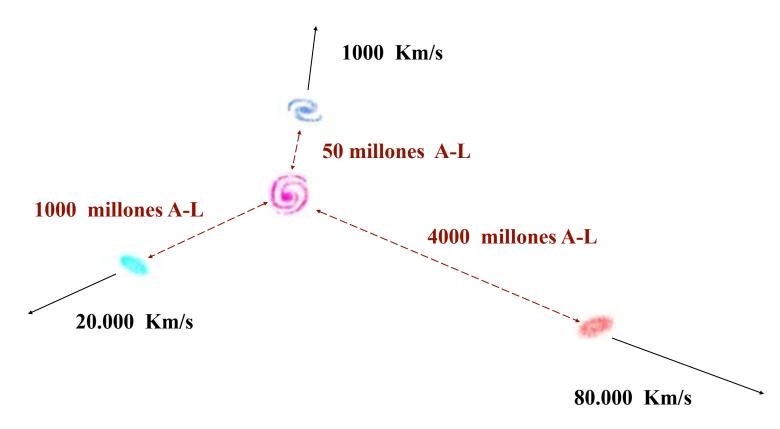
Distancias en Cosmología

La energía oscura es la componente responsable de la aceleración de la expansión del Universo.

Se detecta midiendo con precisión la evolución del ritmo de expansión (`constante' de Hubble) con el tiempo

La velocidad de alejamiento es PROPORCIONAL a la distancia

`constante' de Hubble ≈ 20 Km/s / Millón de años-luz



Distancias en Cosmología

La energía oscura es la componente responsable de la aceleración de la expansión del Universo.

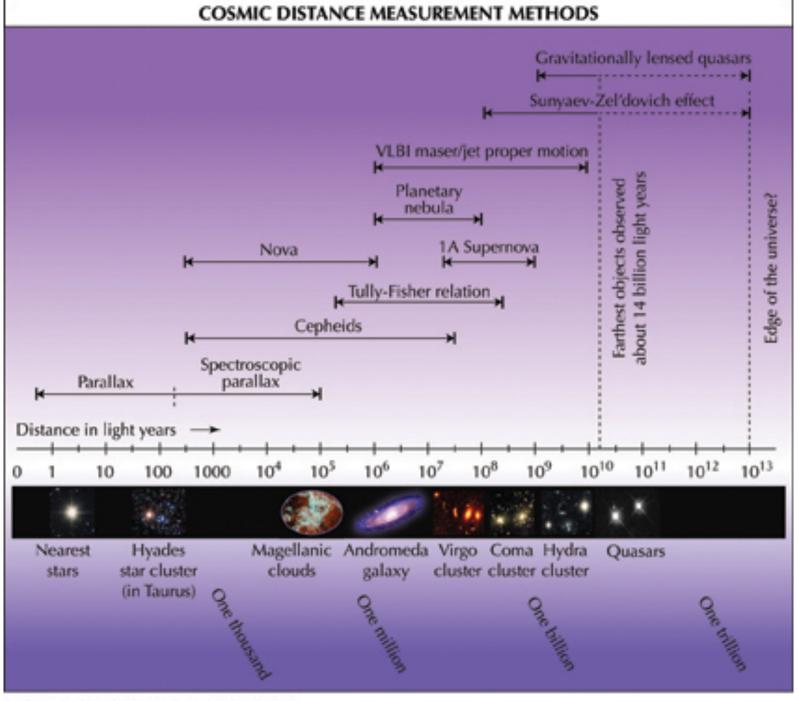
Se detecta midiendo con precisión la evolución del ritmo de expansión (`constante' de Hubble) con el tiempo

Es fácil determinar las velocidades de alejamiento, mediante el corrimiento al rojo por efecto Doppler

Es más complicado obtener medidas lo más precisas posible de las **distancias** a las que se encuentran los objetos

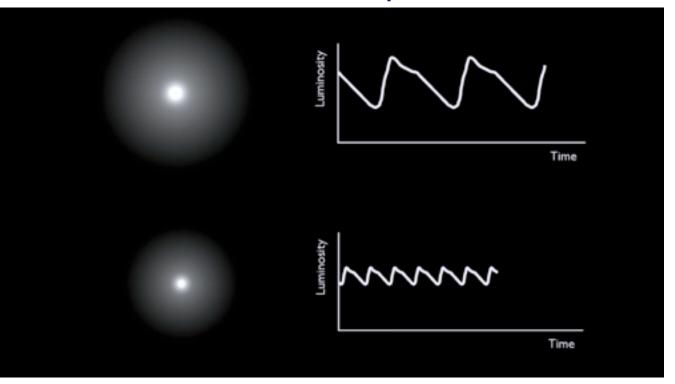
Distancias en Cosmología





Variables Cefeidas

Relación directa entre el periodo de variabilidad y la luminosidad





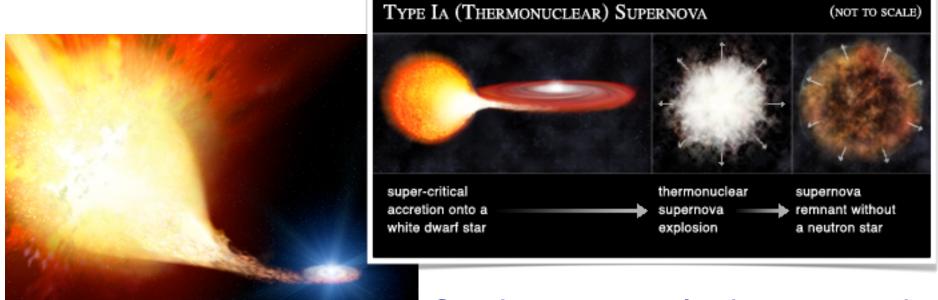
Henrietta Swan Leavitt

Distancias a las galaxias más cercanas

http://henrietta.iaa.es/el-diario-secreto-de-henrietta-sleavitt

Supernovas IA

Enana blanca que acreta material de su compañera hasta rebasar la masa límite, colapsar, y explotar como supernova.



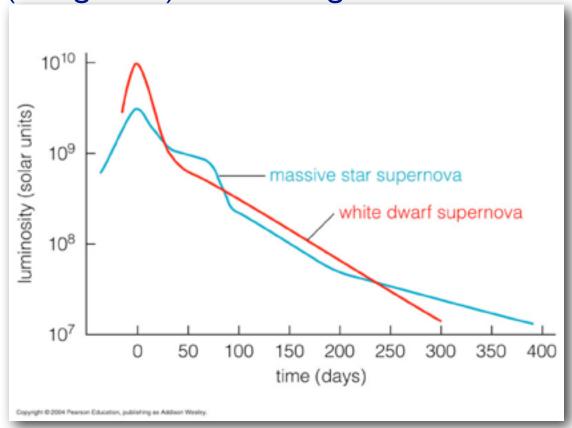
Condiciones iniciales bien conocidas, luminosidad total bien conocida.

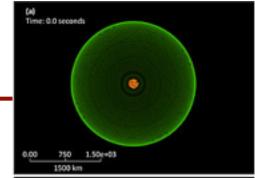
Permiten estudiar distancisa de galaxias mucho más lejanas

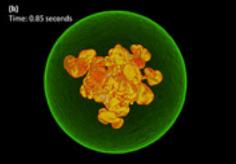
Supernovas IA

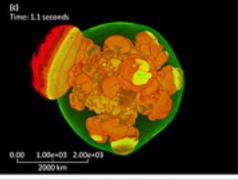
Explosión en unos pocos segundos

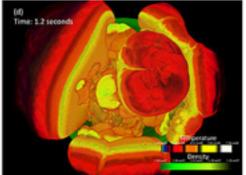
Brilla como 10.000.000.000 de soles (una galaxia) durante algunas semanas





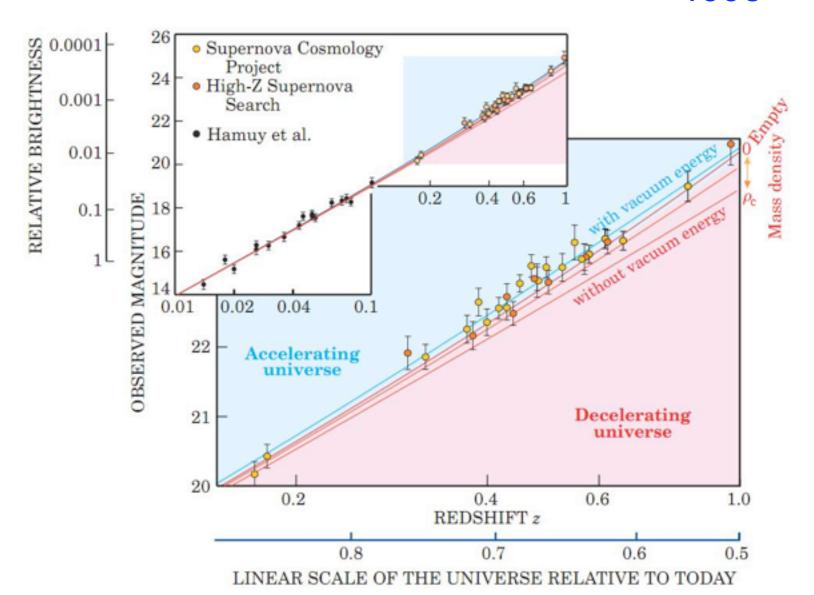




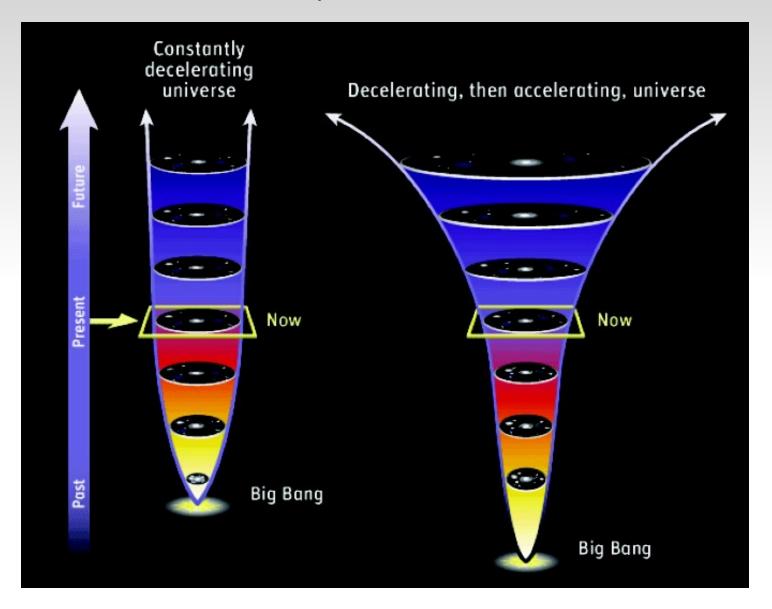


Experimentalmente, se utiliza la luz de supernovas para determinar la velocidad de galaxias lejanas

El espectro de cierto tipo de Supernovas es concido y su velocidad (relativa a nosotros) puede determinarse estudiando el corrimiento Doppler de la luz que emiten



El universo se expande de forma acelerada



18 December 1998 Vol. 282 No. 5397 Pages 2141–2336 \$7 THE ACCELERATING UNIVERSE Breakthrough of the Year AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE

Supernovas

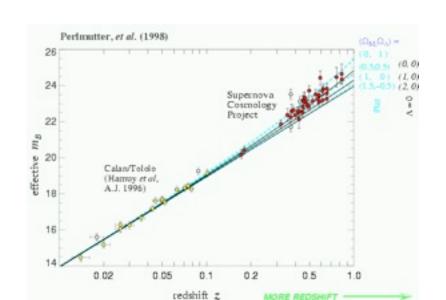


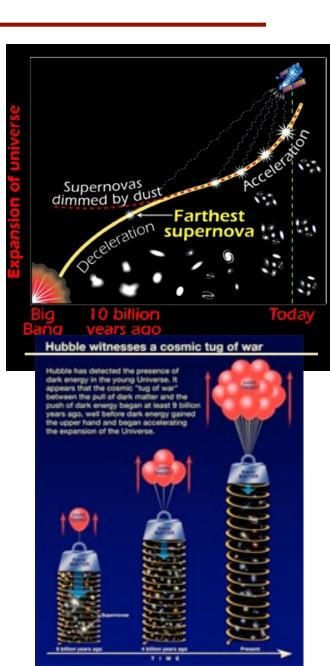
$$\rho_{\Lambda} \simeq 70\% \rho_{\text{total}}$$

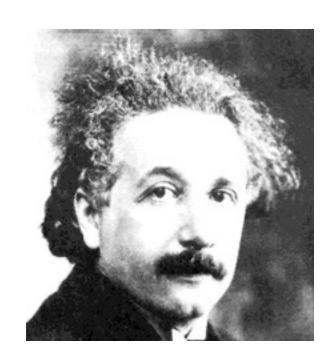
¡compatible con las otras determinaciones!

Medida de la expansión de Hubble

- El Universo ha pasado de una fase de deceleración a una fase de expansión acelerada
 - Implica la existencia de una densidad de energía con repulsión gravitacional Energía oscura
- La posibilidad más sencilla es una energía del vacío iuna constante cosmológica! (Einstein):







Albert Einstein

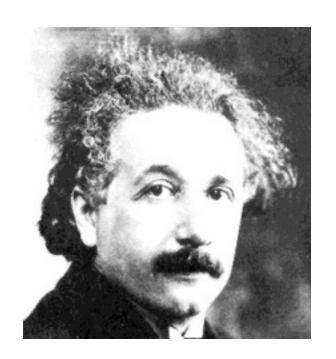
(1879-1955)

$$E = m c^2$$

(1905)

$$\mathbf{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \mathbf{g}_{\mu\nu} \mathbf{R} = \mathbf{T}_{\mu\nu}$$

(1916)



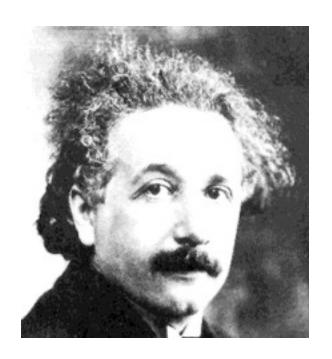
Albert Einstern Constante Cosmológica

(1879-1955)

$$E = m c^2$$

(1905)

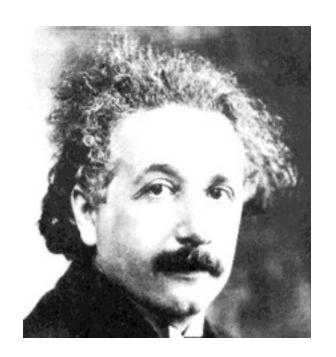
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = T_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \Lambda$$
(1916)



Albert Einstern Constante Cosmológica

(1879-1955)

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



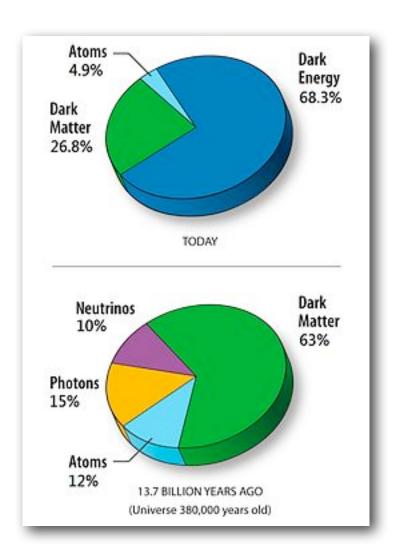
Albert Einstern Constante Cosmológica

(1879-1955)

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

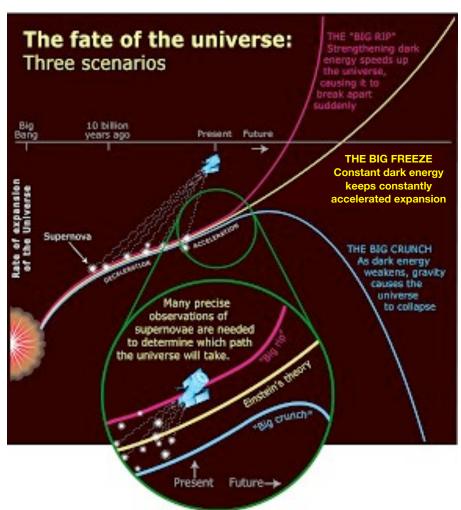
NB: El reparto energético del contenido del Universo va cambiando con su evolución

- La densidad de materia se diluye
- La densidad de energía oscura **no** se diluye



La evolución de la energía oscura determina el destino final del Universo





La evolución de la energía oscura determina el destino final del Universo

Big Freeze

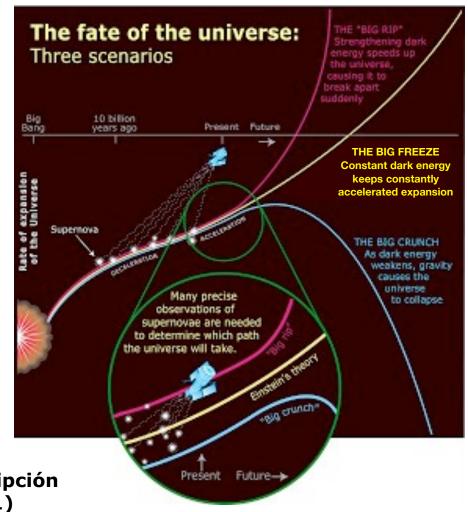
energía oscura constante

Big Crunch

si la energía oscura desaparece

Big Rip

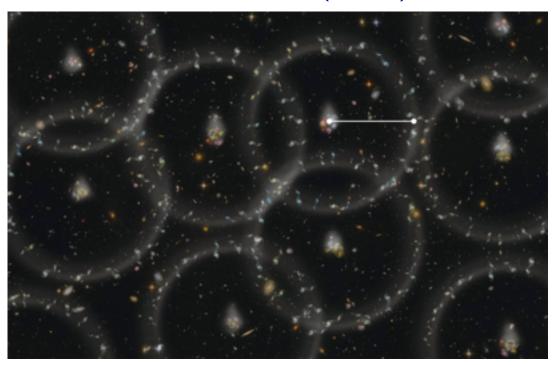
si la energía oscura aumenta





(Advertencia: esto corrige la descripción de la densidad crítica de la charla 1)

Se puede estudiar midiendo la expansión con mayor precisión Oscilaciones acústicas bariónicas (BAO)

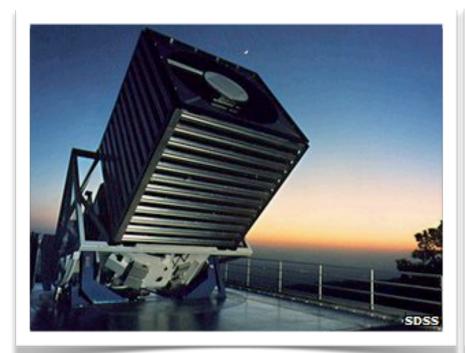


La distribución de galaxias y quásars tiene una escala característica, que se puede usar como "regla estandar" para medir a redshift z=2 o más

Distancias en Cosmología



Varios experimentos

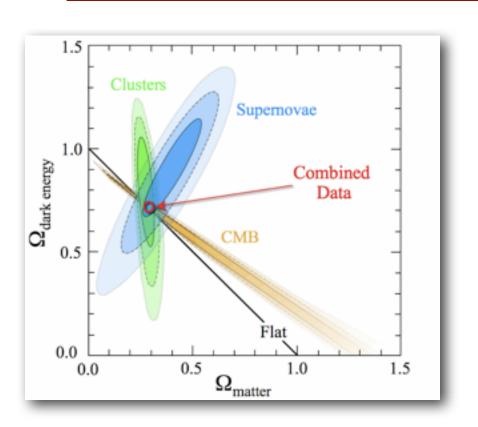


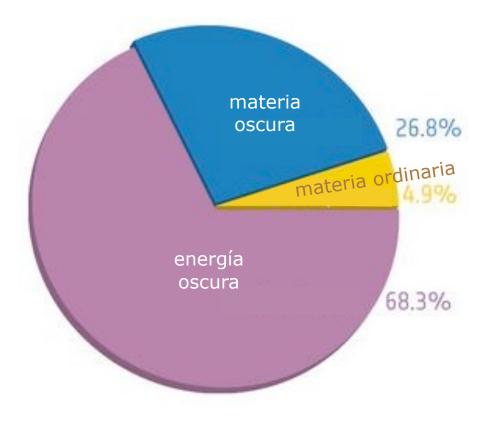




DES (Dark Enery Survey)

Composición del Universo

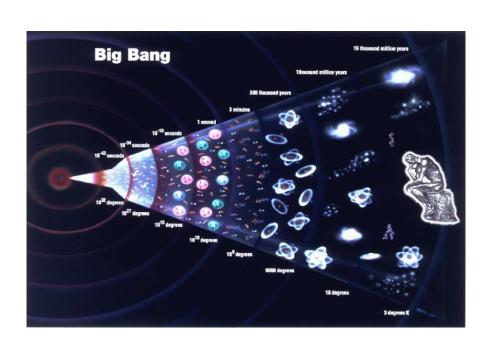


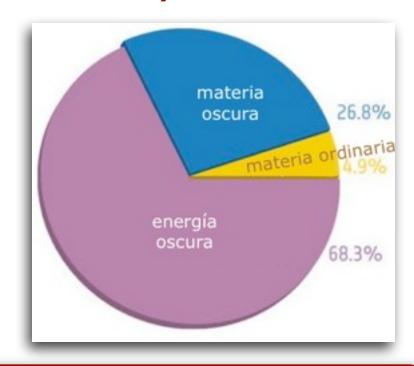


$$\Omega_m = 5\%$$
, $\Omega_{\rm DM} = 25\%$, $\Omega_{\rm DE} = 70\%$

El modelo cosmológico

(ACDM, "concordance model")





Una proeza del intelecto humano Describe la estructura y evolución del Universo conocido en escalas de espacio y tiempo que abarcan 10 órdenes de magnitud

Intrincada mezcla de lo infinitamente grande y lo infinitamente pequeño

¿El "final de la Física"?

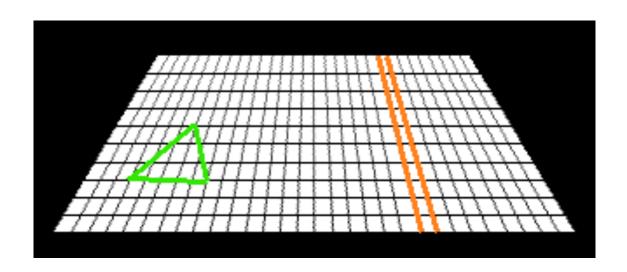
¿O nuevos comienzos?

¿Cómo empezó el Big Bang?



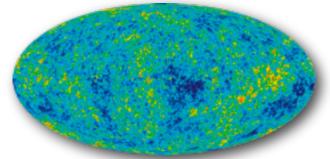
Problema de "planitud"

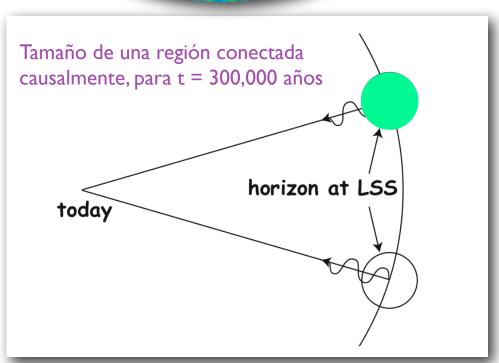
¿Por qué el Universo es muy aproximadamente espacialmente plano?

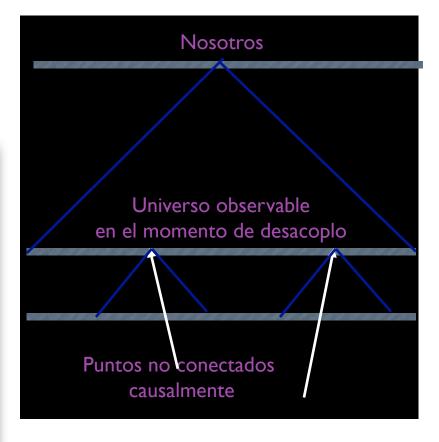


Problema del horizonte

¿Por qué el Universo es tan homogéneo incluso en regiones que no han estado conectadas causalmente?

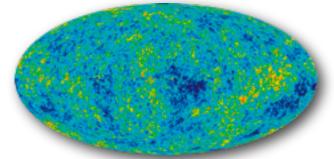


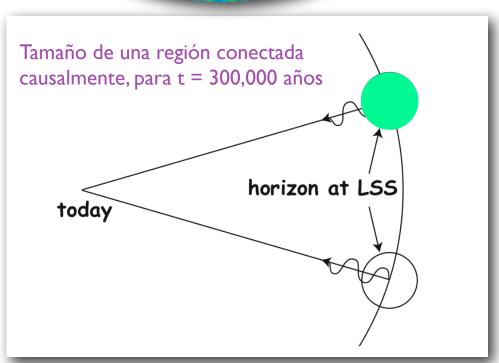


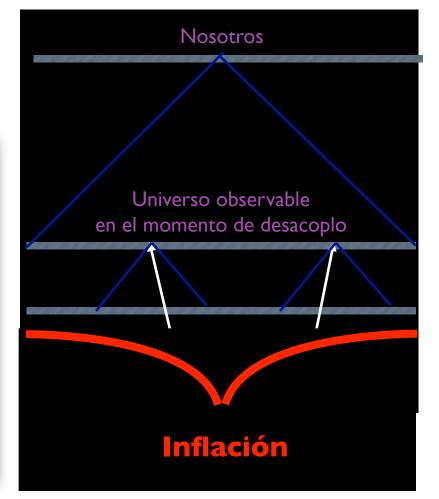


Problema del horizonte

¿Por qué el Universo es tan homogéneo incluso en regiones que no han estado conectadas causalmente?







¿Qué paso al principio? ¿Por qué todo se aleja de todo a partir del Big Bang?

Inflación: El Universo experimentó una expansión exponencial,

de 10⁻³⁴ segundos, inducida por la energía oscura del potencial de un campo escalar, denominado "inflatón"



Alan Guth

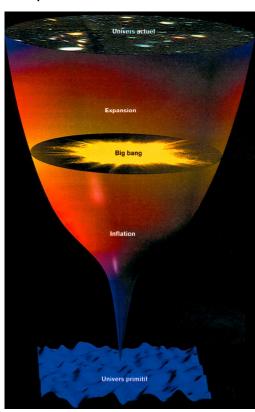


Andrei Linde

Explica un Universo plano y conectado causalmente

Además predice correctamente el espectro de

fluctuaciones del CMB



¿Qué paso al principio? ¿Por qué todo se aleja de todo a partir del Big Bang?

Inflación: El Universo experimentó una expansión exponencial,

de 10⁻³⁴ segundos, inducida por la energía oscura del potencial de un campo escalar, denominado "inflatón"

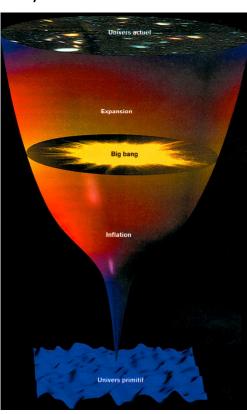


Alan Guth



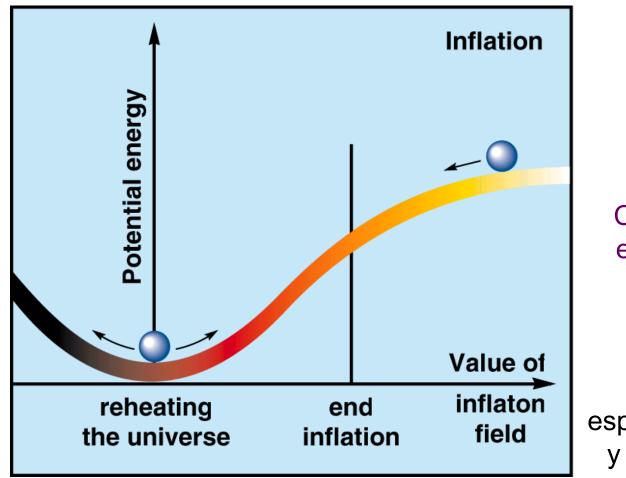
Andrei Linde

¿Quién es el inflatón y cuál es su física?



La inflación está alimentada por la energía potencial de un campo escalar fuera de su mínimo.

Actúa como una densidad enorme de energía oscura.



Densidad constante

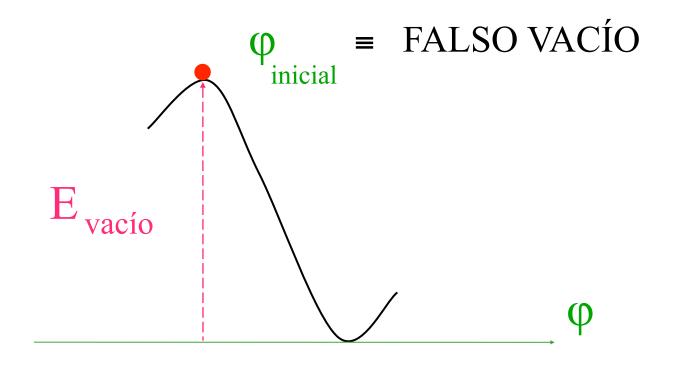


Crecimiento exponential



Secciones espaciales planas y homogéneas

UNIVERSO INFLACIONARIO

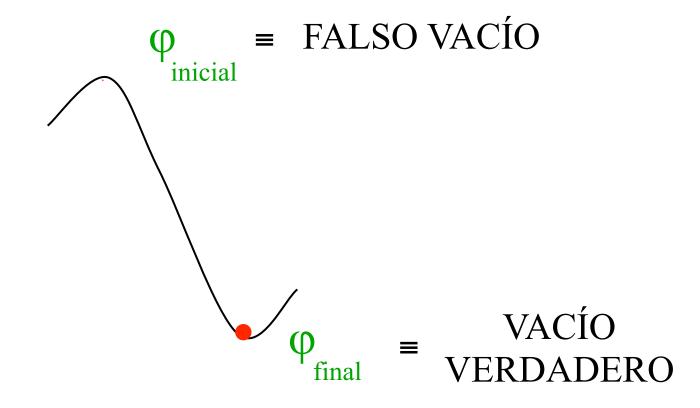




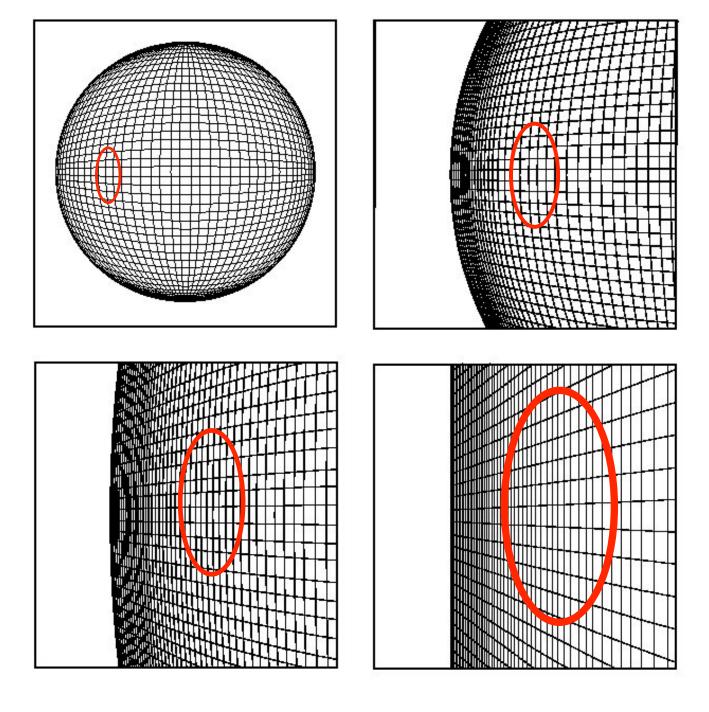
Expansión Vertiginosa

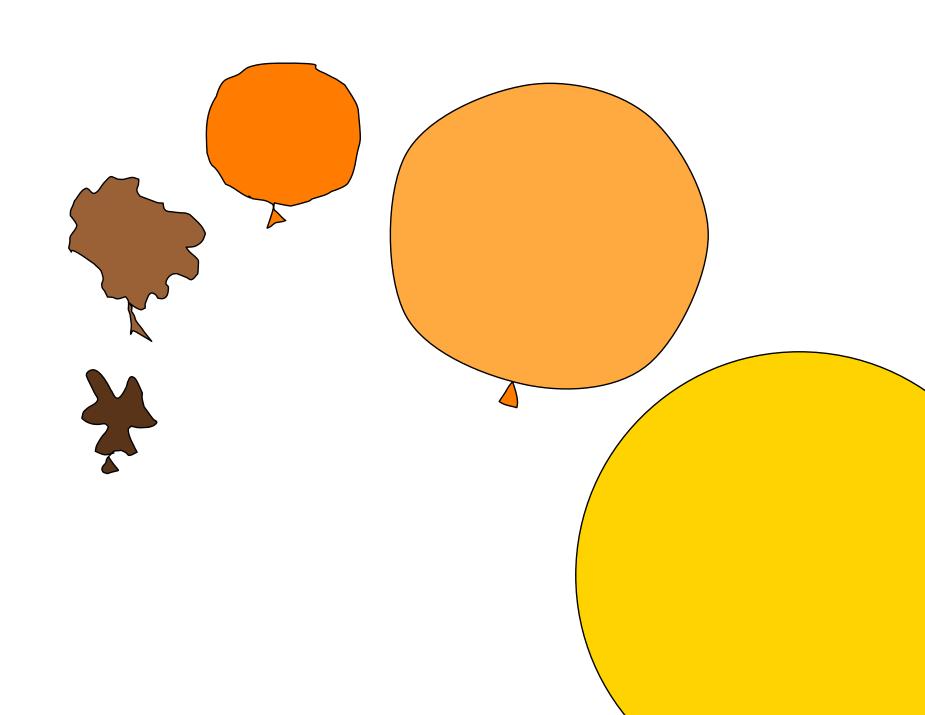
INFLACIÓN

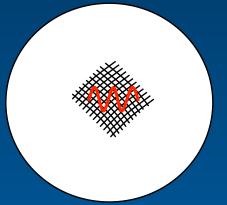
UNIVERSO INFLACIONARIO



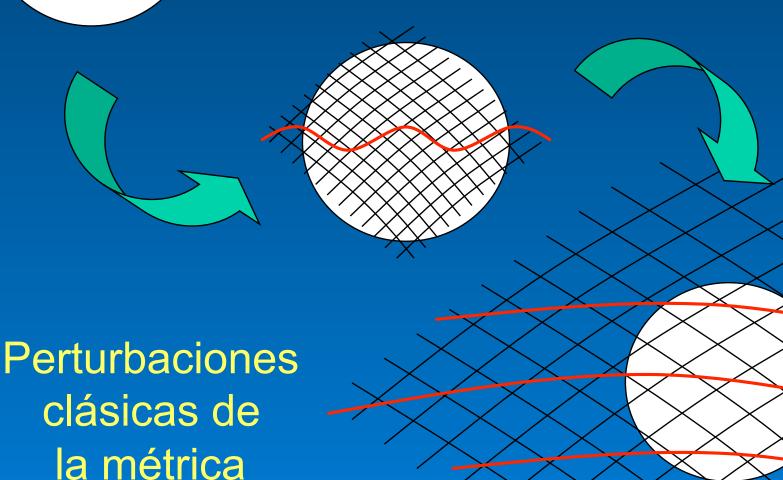
La energía almacenada se libera en forma de creación de una sopa caliente de partículas y radiación: Big Bang





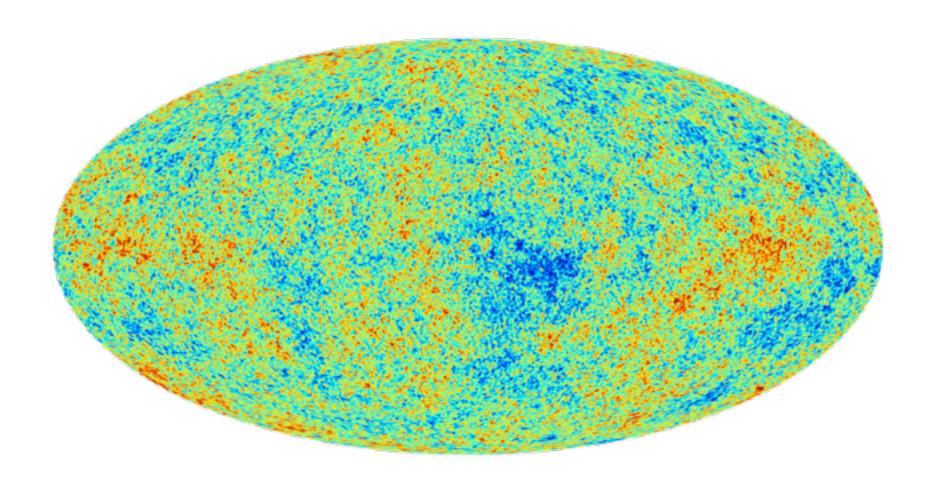


Fluctuaciones cuánticas dentro del horizonte



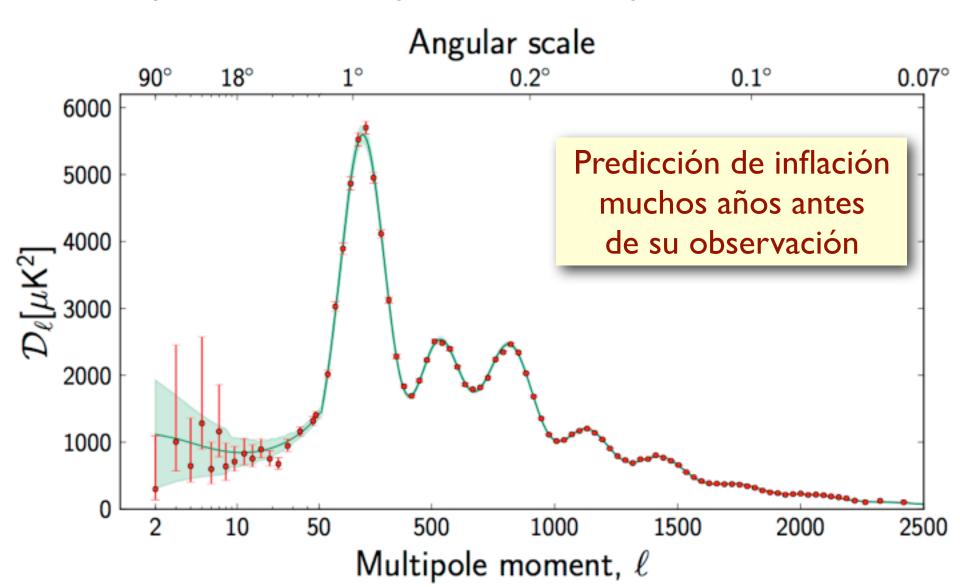
La expansión convierte las fluctuaciones cuánticas en variaciones macroscópicas.

Anisotropías del universo primitivo, con impronta en el CMB



La expansión convierte las fluctuaciones cuánticas en variaciones macroscópicas.

Anisotropías del universo primitivo, con impronta en el CMB



Consecuencias de Inflación

BIG BANG

Inflación

Fluctuaciones cuánticas

10⁻³⁵ segundos después del Big Bang

380.000 años después del Big Bang Anisotropías del fondo de radiación

microondas

Formación Estructura

Ondas gravitacionales

13.800 Millones años después del Big Bang

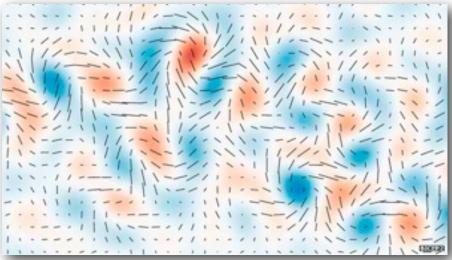
Inflación y fondo de radiación de microondas

El telescopio BICEP2 en el Polo Sur y el satélite Planck de la ESA han estudiado la posibilidad de detección del efecto de ondas gravitacionales en el CMB

Su origen sería el periodo de **inflación cósmica**, sucedido a los 10⁻³⁴ segundos Permitiría extraer información del Universo en esa época.

Si finalmente se detectan esencialmente nos remontarían al origen del Big Bang

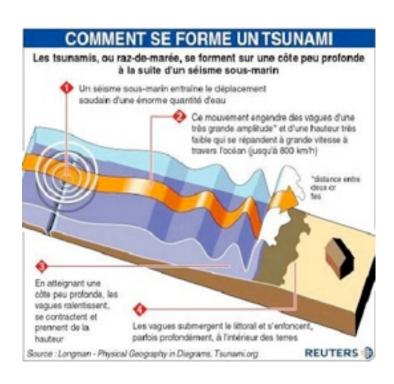




Analogía

Las observación de las olas de un tsunami al alcanzar tierra nos permiten reconstruir el terremoto submarino que las ha causado.

- Inflación / Big Bang : Terremoto submarino
- "B-modes" en la formación del CMB: Olas sobre el epicentro
- Observación hoy día: Observación de olas en la costa





¿Y qué pasó antes de la inflación?



El Universo podría ser el resultado de una fluctuación cuántica



Alan Guth



Andrei Linde



Una pequeña burbuja de vacío cuántico se expande rápidamente hasta ocupar todo el Universo

El Universo podría ser el resultado de una fluctuación cuántic



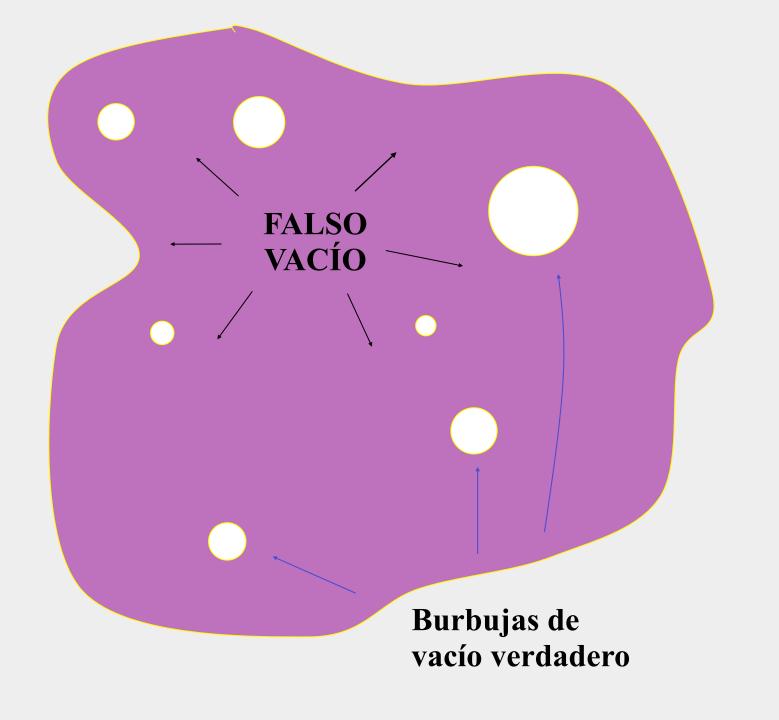


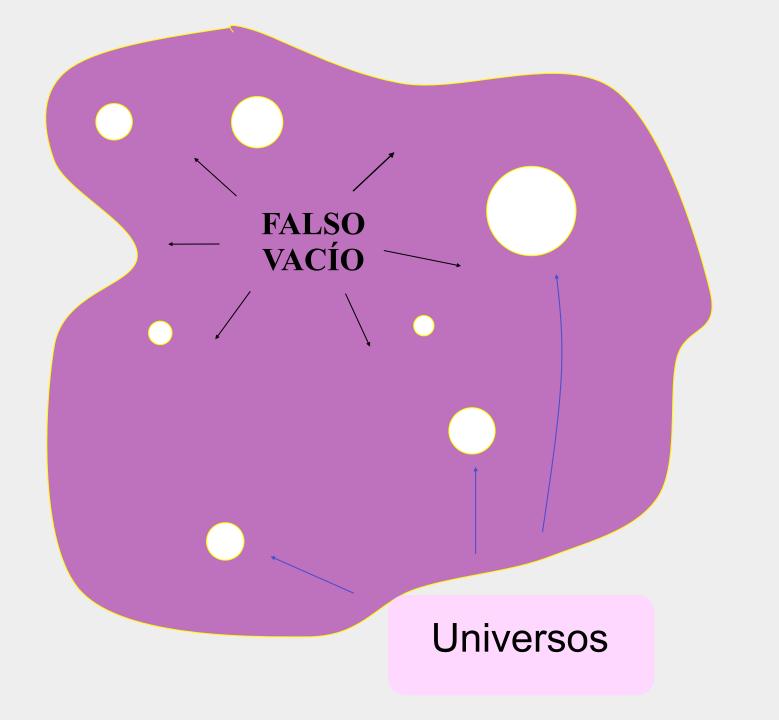


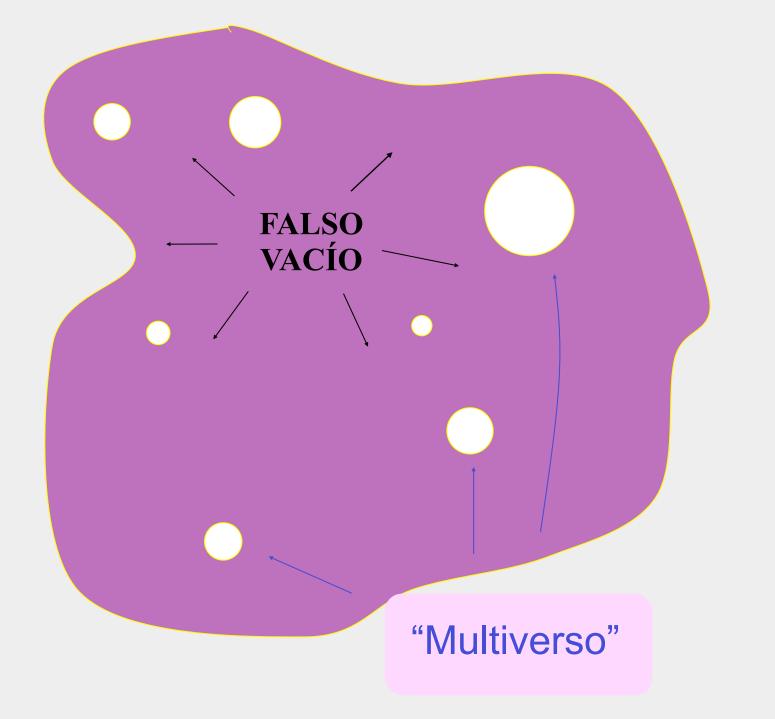
Andrei Linde



Una pequeña burbuja de vacío cuántico se expande rápidamente hasta ocupar todo el Universo







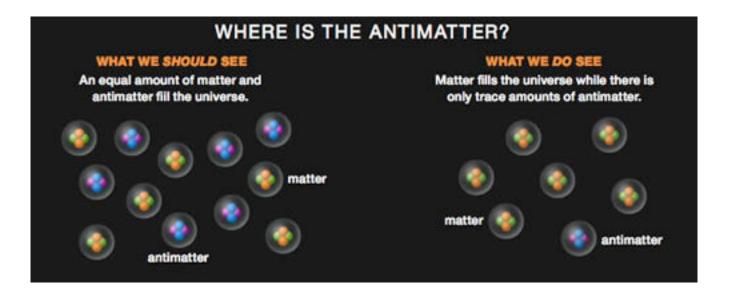


¿Y por qué hay materia y no antimateria?



Asimetría materia-antimateria

Materia y antimateria tienen propiedades casi idénticas Si al principio había tanta materia como antimateria ... ¿por qué no hay galaxias, etc de antimateria en el Universo?



Nucleosíntesis requiere una cantidad neta de bariones: $n_y/n_b=10^9$

Bariogénesis

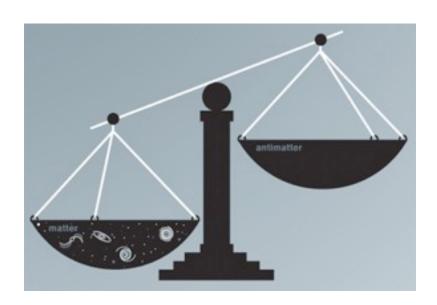
¿Qué pasó con la antimateria en el Universo?

Universo primitivo:

igual número de partículas y antipartículas, en equilibrio térmico con la radiación, por creación-aniquilación

La gran aniquilación:

El Universo se enfría, gran aniquilación de partículas y antipartículas



Los supervivientes:

Antes de la aniquilación, se genera un exceso de partículas Una partícula extra por cada mil millones de pares Tras la gran aniquilación, una partícula por cada mil millones de fotones

¿Cómo se generó este exceso de materia?

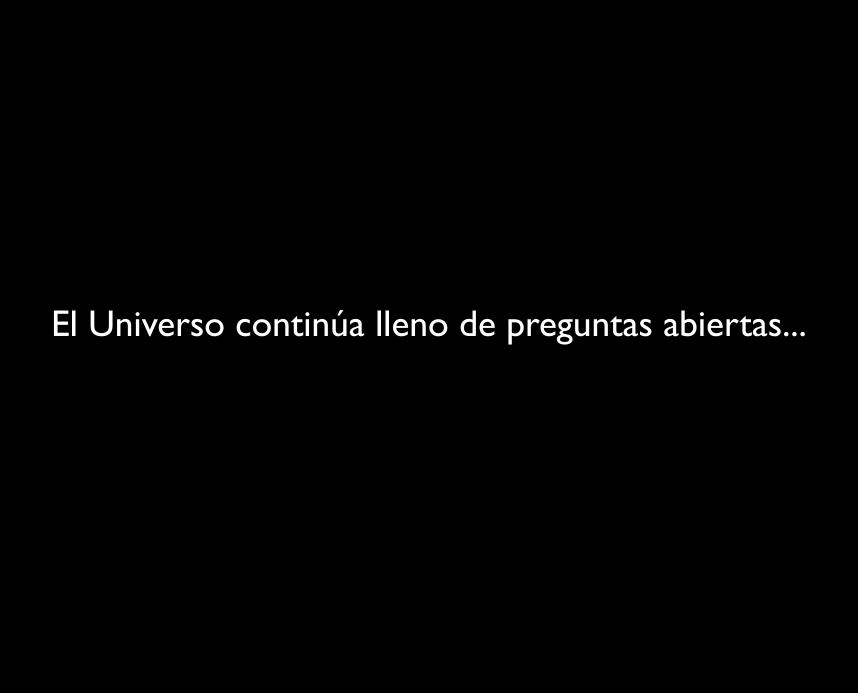
Violación de CP (simetría materia-antimateria)

Presente en el Modelo Estándar, pero no de forma suficiente para generar la asimetría materia-antimateria en el Universo

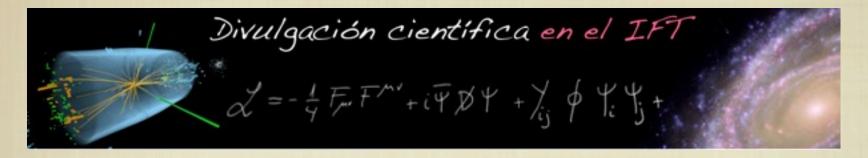
¿Nuevos procesos que no conservan CP? ⇒ Se buscarán en LHC







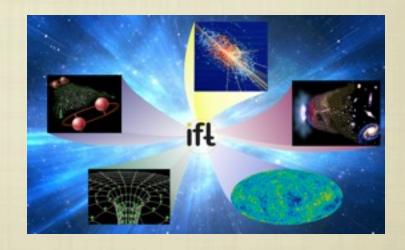
Para más información...



http://projects.ift.uam-csic.es/outreach/index.php/es/

Igualmente, http://www.ift.uam-csic.es/ y click en "Divulgación"

- vídeos, artículos, charlas
- "pregunta a un científico"
- Google hangouts
- y más...





THANK YOU!

