

Guillermo A. Mena Marugán (IEM).

DEL BIG BANG AL BIG BOUNCE



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

X Semana de la Ciencia,
19 de noviembre de 2010.

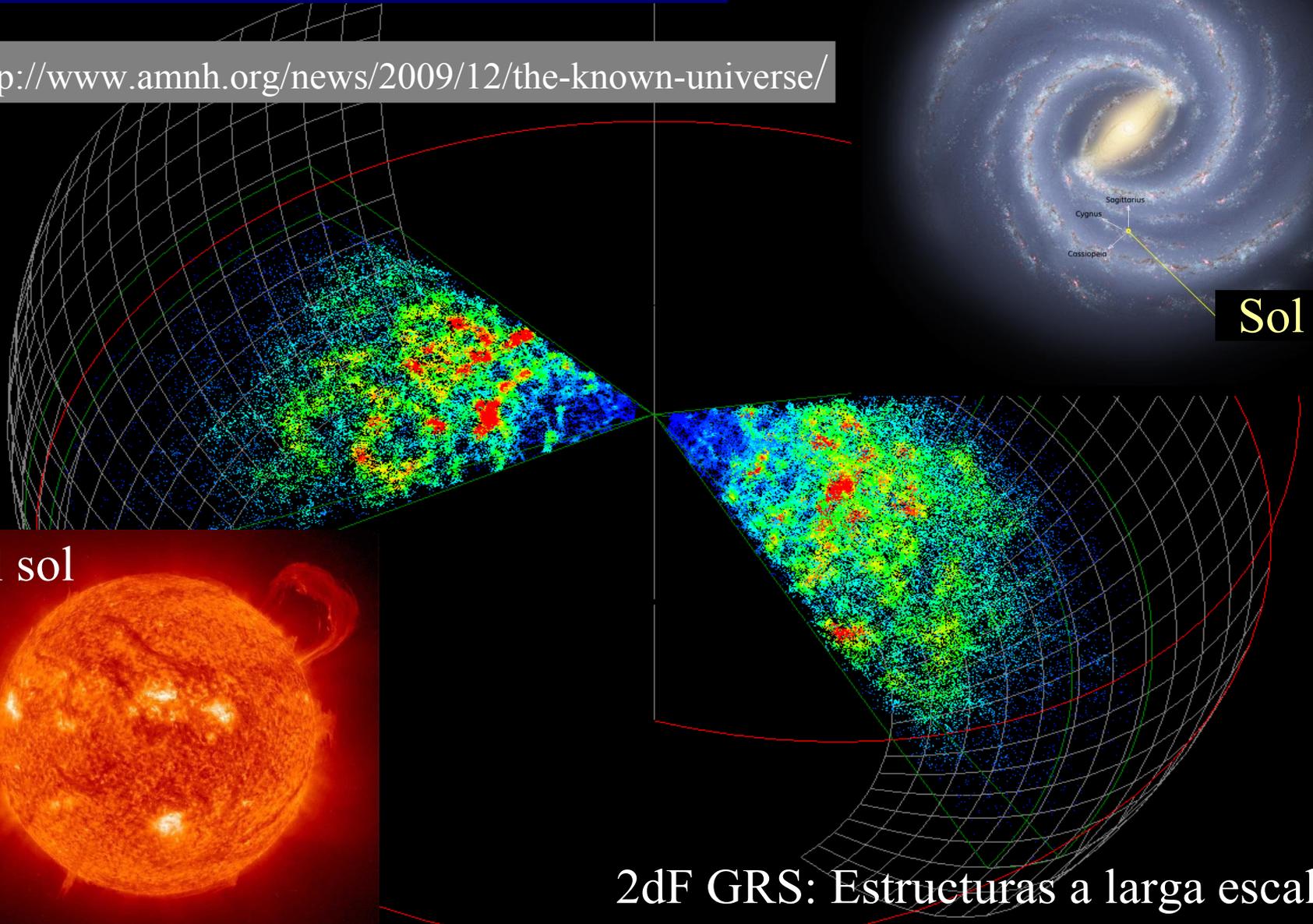
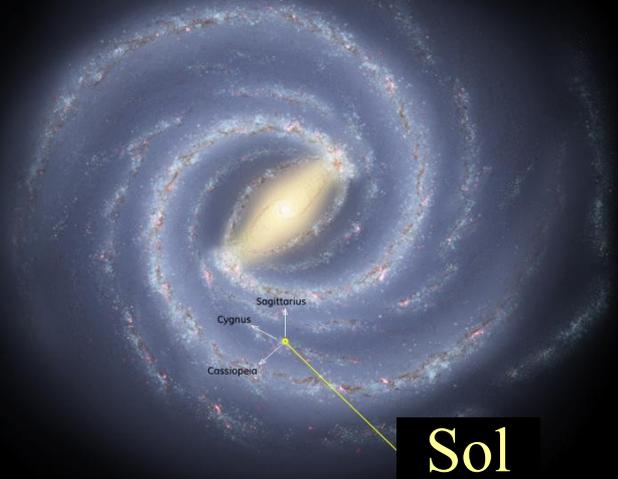


FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

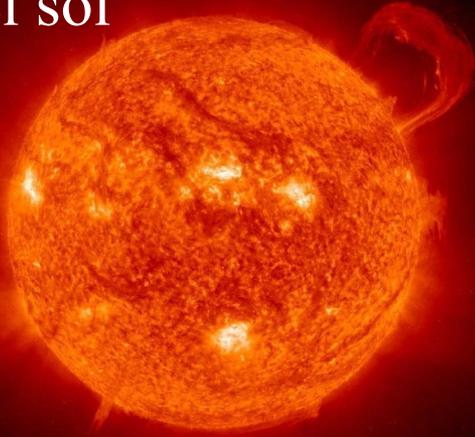
El Universo que observamos

<http://www.amnh.org/news/2009/12/the-known-universe/>

La Vía Láctea



El sol



2dF GRS: Estructuras a larga escala

El Universo que nos rodea

- Las observaciones en distintas bandas de frecuencia se complementan:



IRAS - Infrarrojo



Chandra – Rayos X

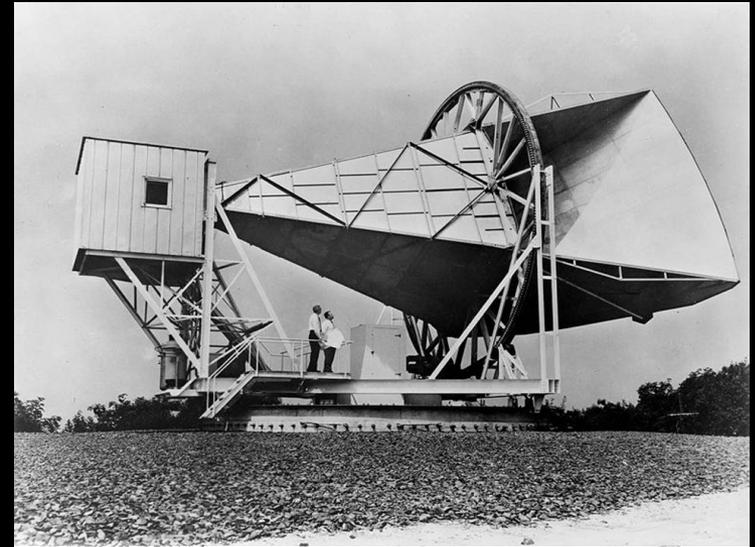


COBE-DMR - Microondas

El fondo de microondas

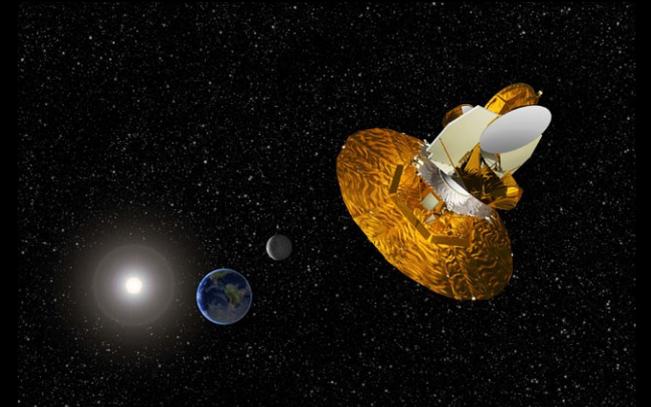
- En 1964, Penzias y Wilson detectaron un fondo de microondas que nos circunda en el Universo. Su temperatura característica es de unos 3 K, igual en todas direcciones.

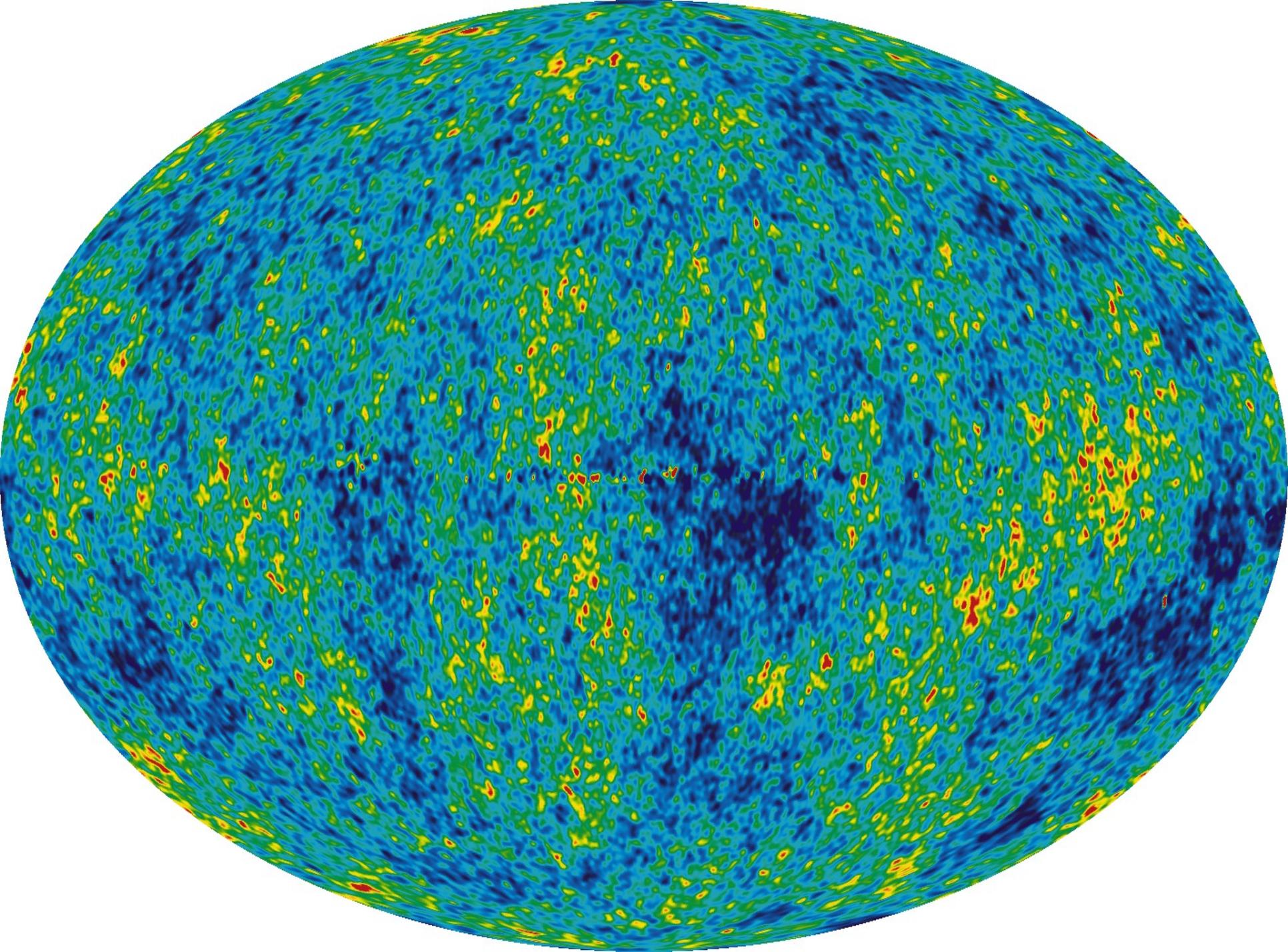
En los últimos decenios, las anisotropías de ese fondo se han medido con gran precisión. Son de una parte en cien mil.



Boomerang

WMAP







- **ISOTROPÍA:** Todas las direcciones son aproximadamente equivalentes.

- **HOMOGENEIDAD:**

- APROXIMADA cuando comparamos regiones de unos 300 millones de años luz (100 Mpc).

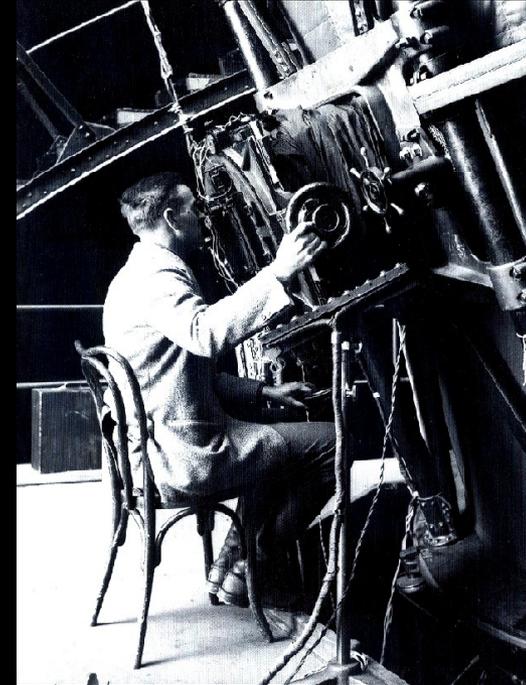
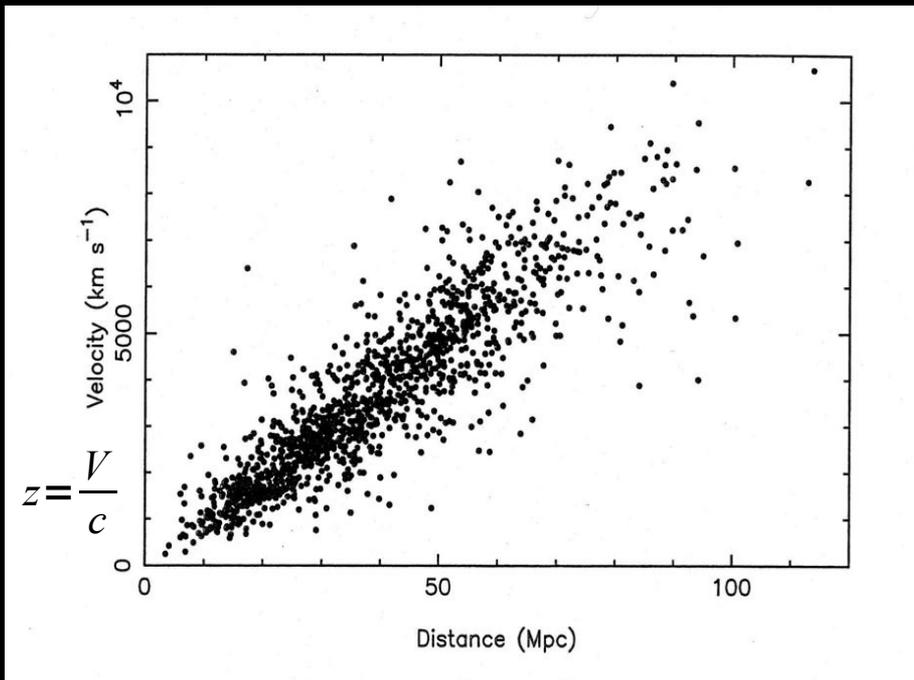
- APROXIMADA si la teoría clásica de la gravedad es cierta, el fondo de microondas es isótropo y el contenido de materia y radiación es “convencional” (Resultado EGS).

- Esto conduce al **PRINCIPIO COSMOLÓGICO:** todos los puntos del Universo (con el movimiento típico de las regiones promedio) son, aproximadamente equivalentes.

- Existen unas estructuras sobreimpresionadas a ese promedio homogéneo, manifestadas en las anisotropías del fondo de microondas.

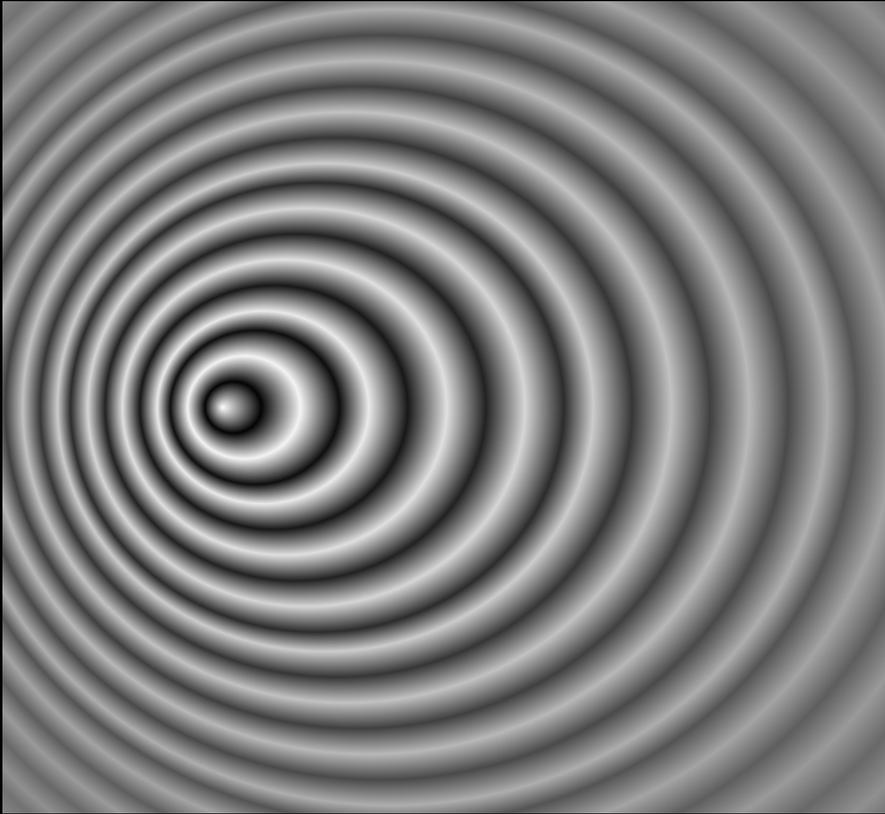
Recesión de Hubble

- Edwin Hubble fue capaz de medir la distancia a cuerpos astrofísicos fuera de la Vía Láctea. Así, demostró que eran extragalácticos.



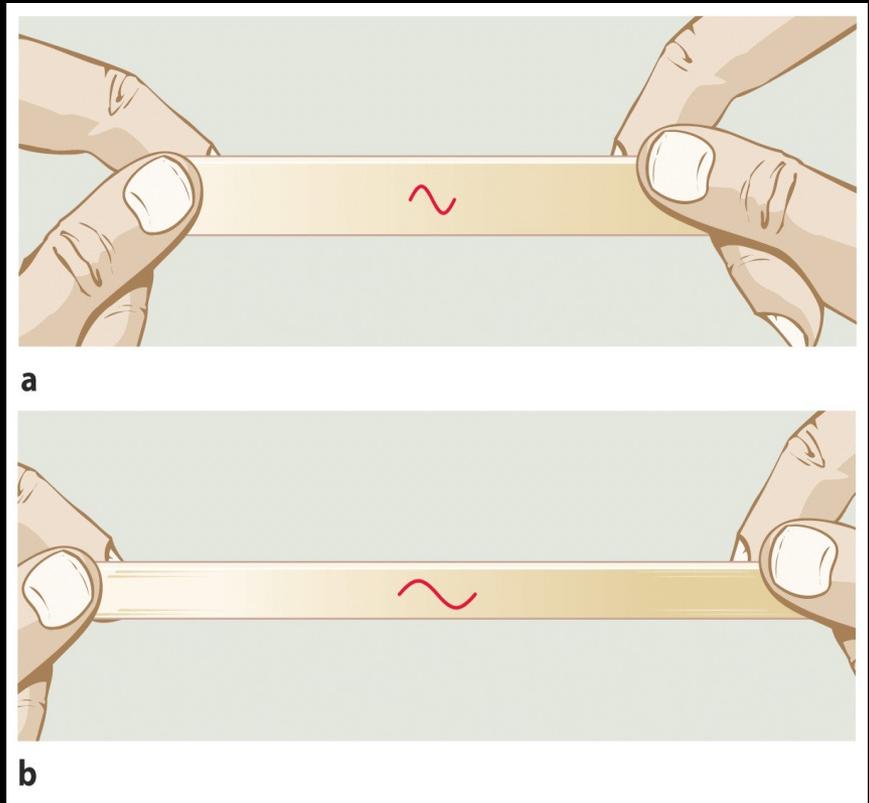
- Observó las líneas de emisión espectroscópica. Presentaban un desplazamiento relativo z aproximadamente proporcional a la distancia a la galaxia.

Ley de Hubble: desplazamiento



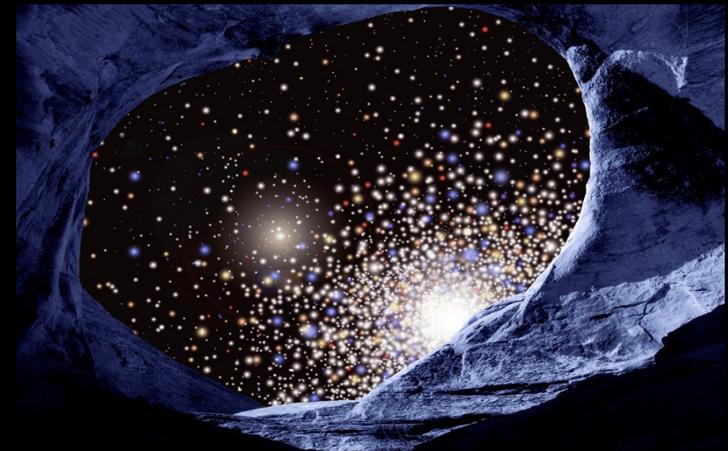
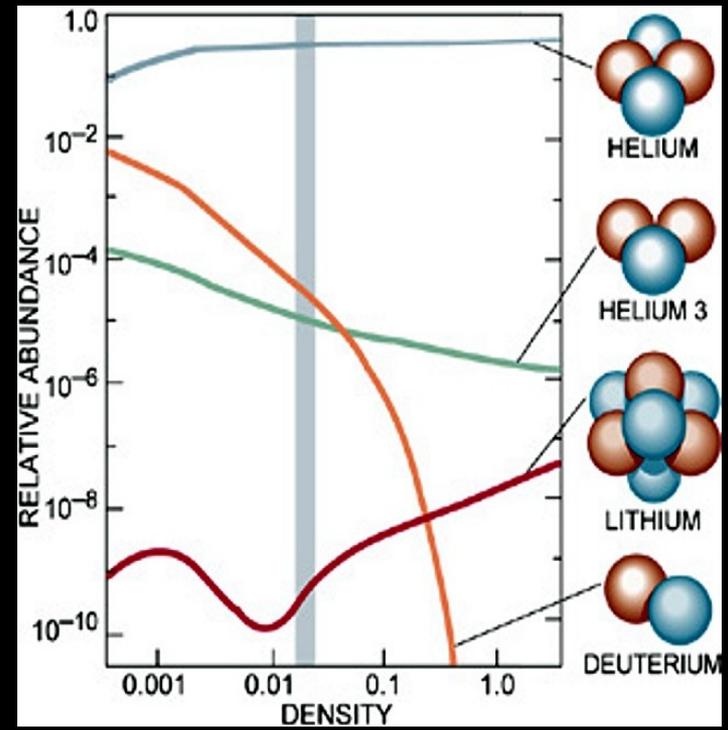
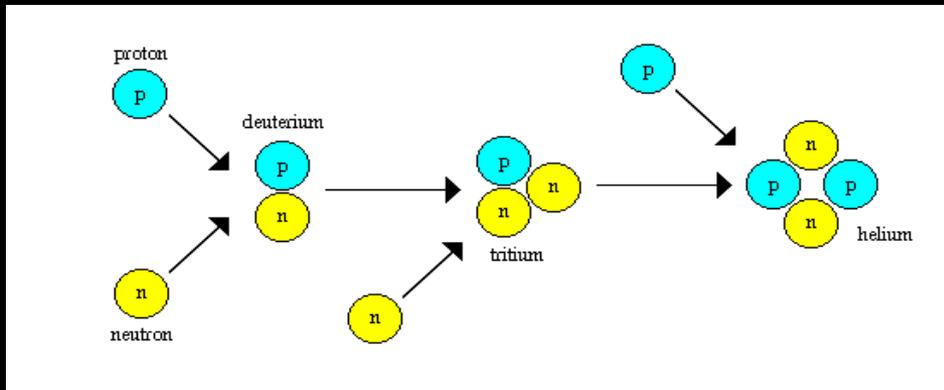
- Algo similar ocurre si lo que varía es la distancia espacial, esto es, si varía el **FACTOR DE ESCALA**.

- Si el emisor y/o el observador de una onda está en movimiento, se desplaza la longitud de onda por efecto Doppler.



Elementos ligeros y edad del Universo

- Los elementos químicos presentes en el Universo son principalmente hidrógeno y, como en un 22% en masa, helio (${}^4\text{He}$). No puede explicarse mediante procesos estelares. Sí suponiendo nucleosíntesis a partir de hidrógeno primordial.



- Estimaciones de la edad del Universo, por ejemplo observando las estrellas más luminosas en *clusters* globulares, la sitúan en el rango de 11-18 miles de millones de años.

LA TEORÍA DEL BIG BANG

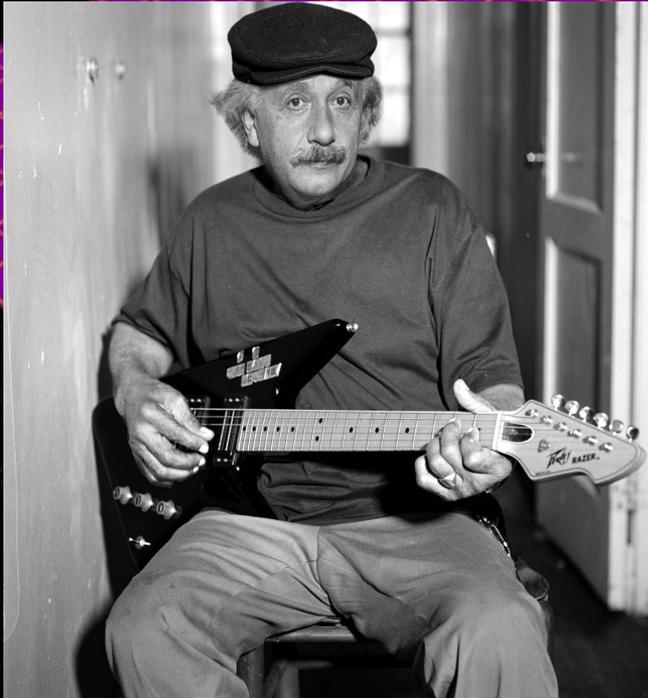
• Si el Universo se expande desde el *principio de los tiempos* pueden explicarse:

- ★ La ley de Hubble de recesión de las galaxias.
- ★ La existencia y forma del fondo cósmico de microondas.
- ★ La abundancia relativa de los elementos ligeros.
- ★ La estructura a gran escala del Universo.
- ★ La edad del Universo.



Big Bang y Relatividad General

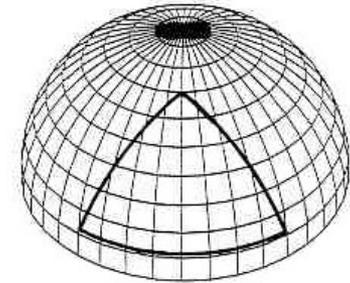
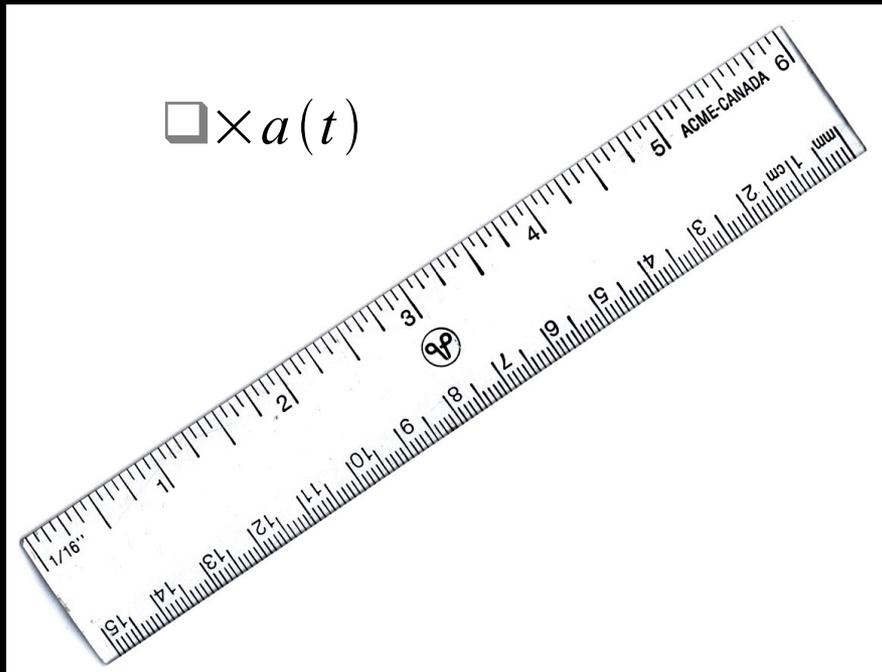
- La Relatividad General de Einstein proporciona un marco natural para explicar esa expansión del Universo. La geometría del espacio y el tiempo y su contenido material son interdependientes.



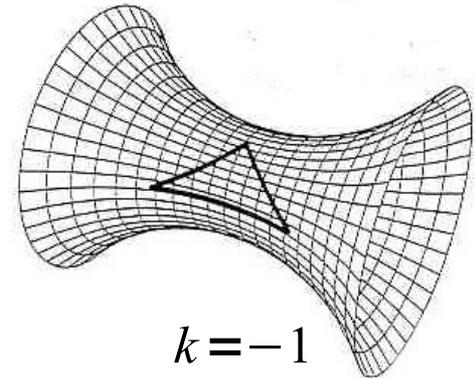
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}.$$

Relatividad General: Universo homogéneo e isótropo

- Para un observador que se mueve como las regiones promedio en un Universo homogéneo e isótropo, basta con considerar un factor de escala, a , que dicta cómo se expanden las distancias espaciales, y un parámetro $k=0,+1$ ó -1 , que fija la geometría espacial.



$k=+1$



$k=-1$

¿Qué no dice la teoría del Big Bang?

- El Universo no proviene de la explosión de un “punto”.



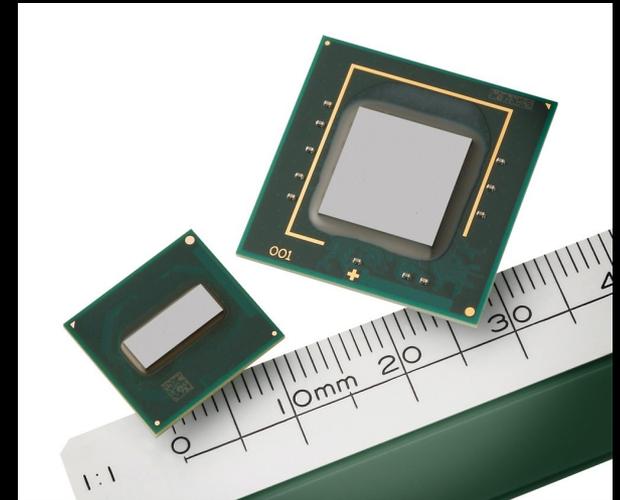
- La expansión es de las distancias. Las escalas atómicas no varían.



$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}},$$

$$z = \frac{a_{obs} - a_{em}}{a_{em}},$$

$$z \approx \frac{\dot{a}}{a} (t_{obs} - t_{em}).$$



Relatividad General: Universo homogéneo e isótropo (2)

- Ecuaciones básicas:

Ec. de Friedmann

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

Ec. de aceleración

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

- ρ y p son la **densidad** y la **presión** del contenido material.

Dependiendo del contenido tenemos, por ejemplo:

→ Materia de tipo polvo: $p=0$.

→ Radiación: $p = \frac{\rho}{3}$.

→ Constante cosmológica (o similar): $p = -\rho$, $\rho = \frac{3}{8\pi G}\Lambda$.

Densidad crítica

- Tenemos un desplazamiento relativo $z \approx \frac{\dot{a}}{a} (t_{obs} - t_{em}) \approx \frac{\dot{a}}{a} \frac{Distancia}{c}$.

- Llamamos “*constante*” de Hubble a $H = \frac{\dot{a}}{a}$.

- Definimos la *densidad crítica* $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$.

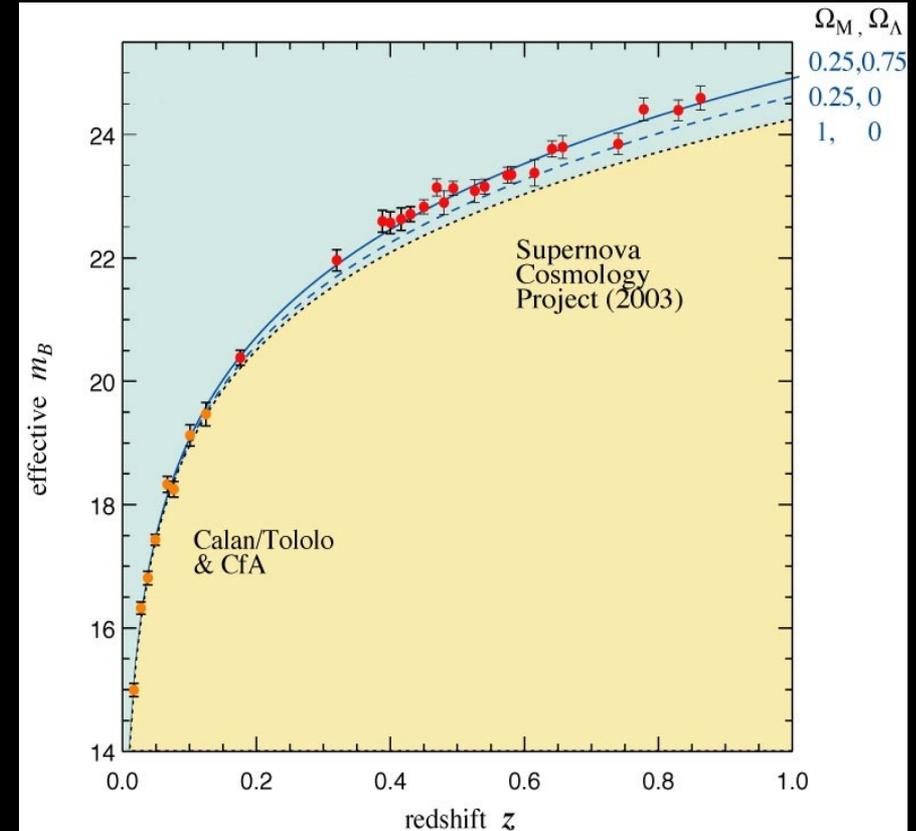
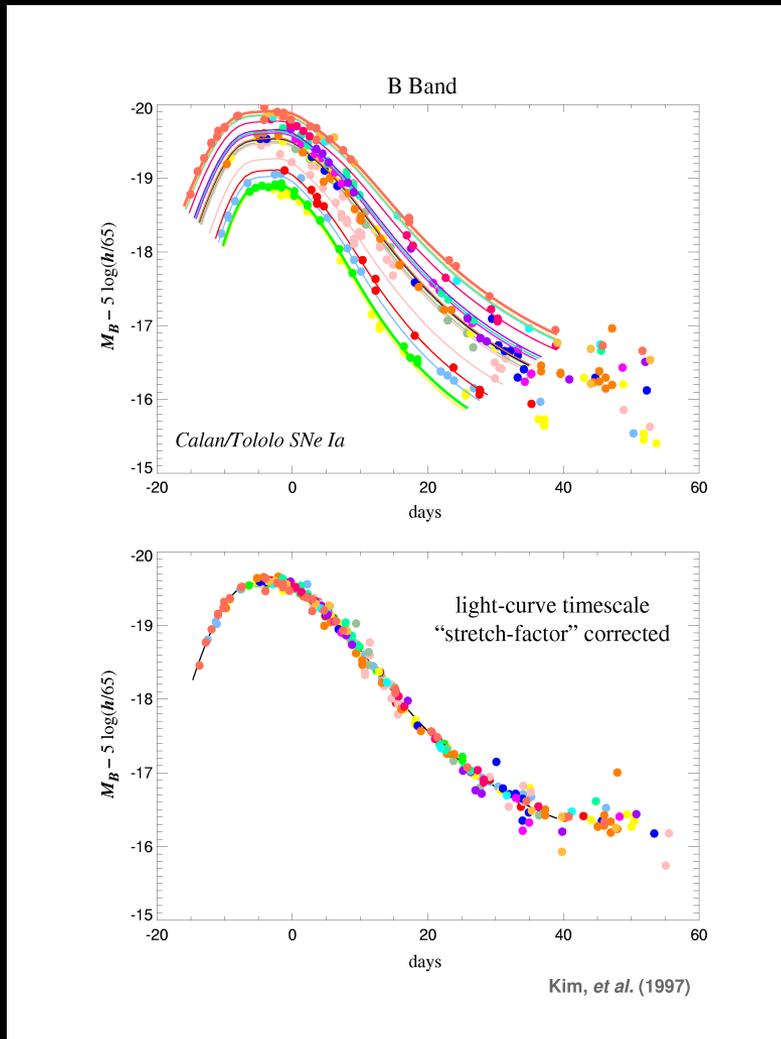
- La ec. de Friedmann da

$$\Omega_k = \frac{-3k}{a^2 8\pi G \rho_c} = 1 - \frac{\rho}{\rho_c} = 1 - \Omega.$$

- El tipo de GEOMETRÍA ESPACIAL depende únicamente de si la densidad relativa Ω es **mayor, igual o menor que uno**.

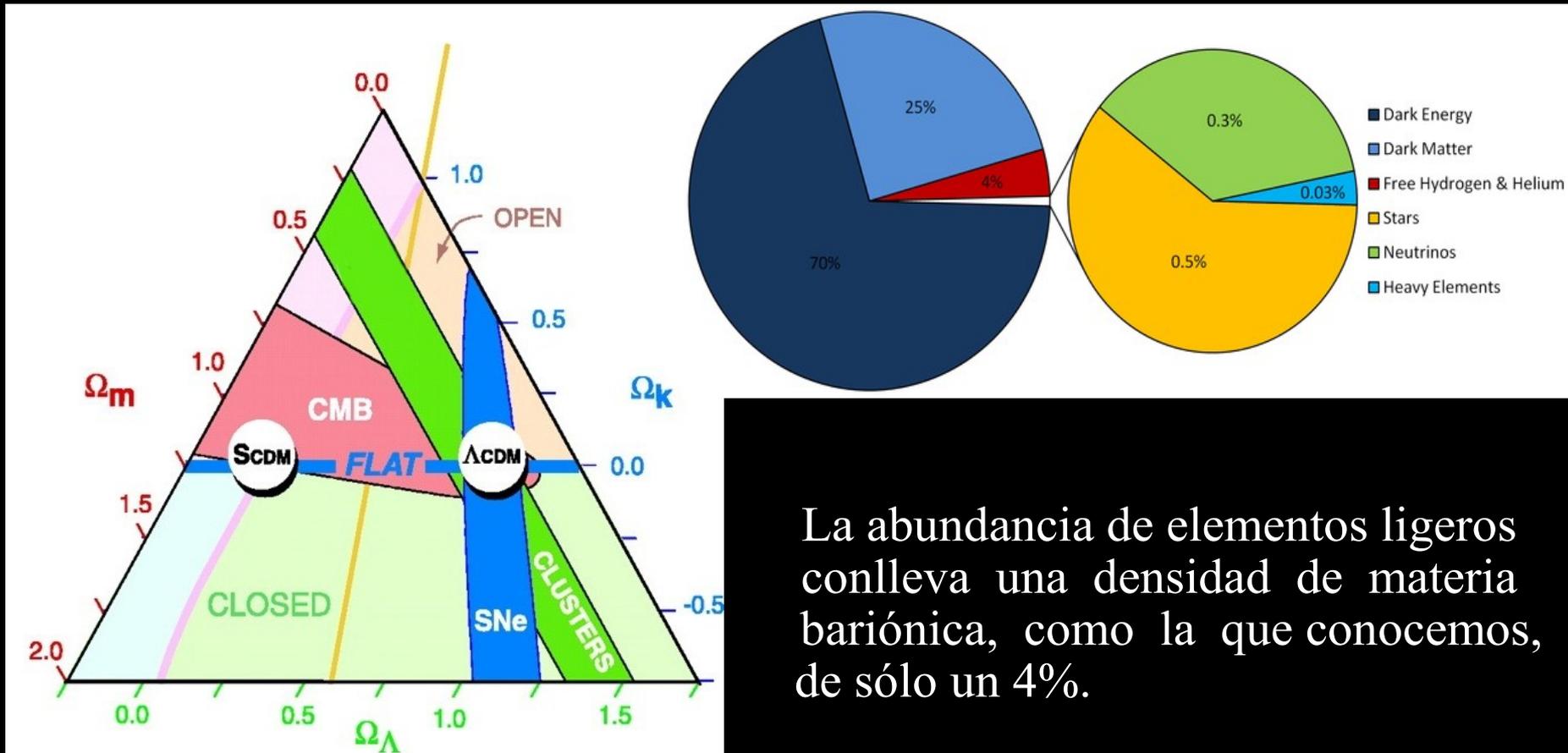
Supernovas Ia: aceleración del Universo

- Las supernovas de tipo Ia proporcionan un buen patrón para medir distancias a regiones con desplazamiento alto. Su observación muestra una expansión del Universo acelerada. Requiere una “energía oscura”, como la constante cosmológica.



Cosmología de precisión y materia oscura

- De la combinación de observaciones se deduce que la geometría es (cuasi-)plana, que hay un 70% de *energía oscura* y que hay más materia sin presión de lo esperado: es el problema de la **materia oscura**.

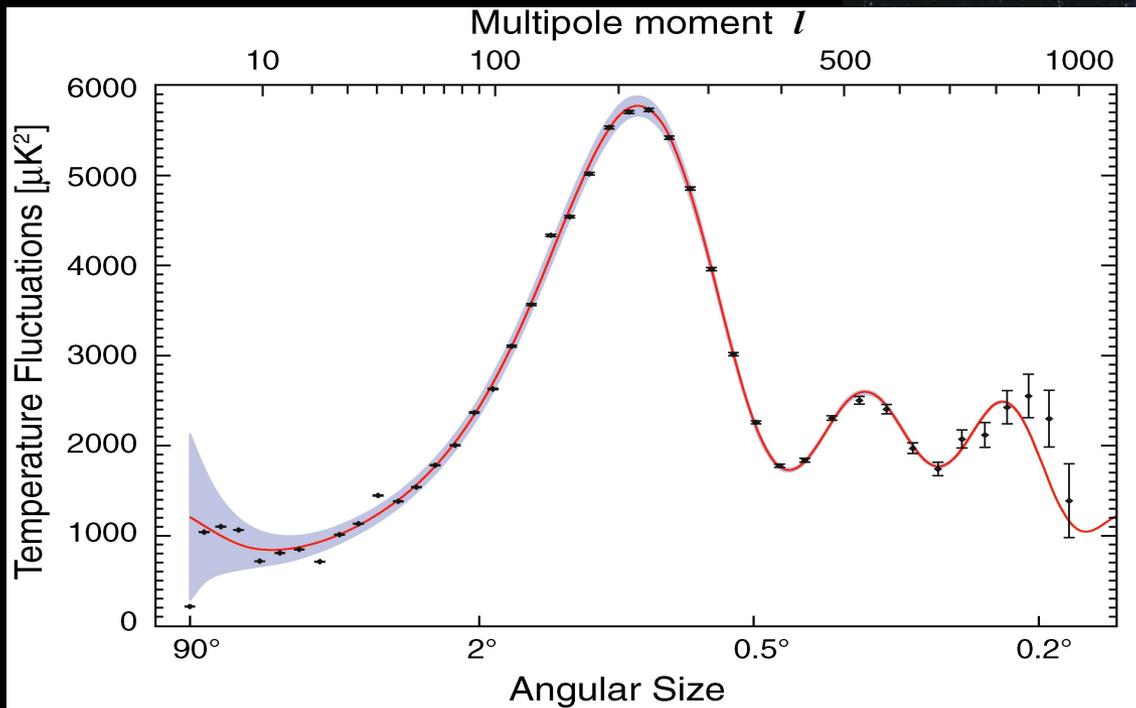
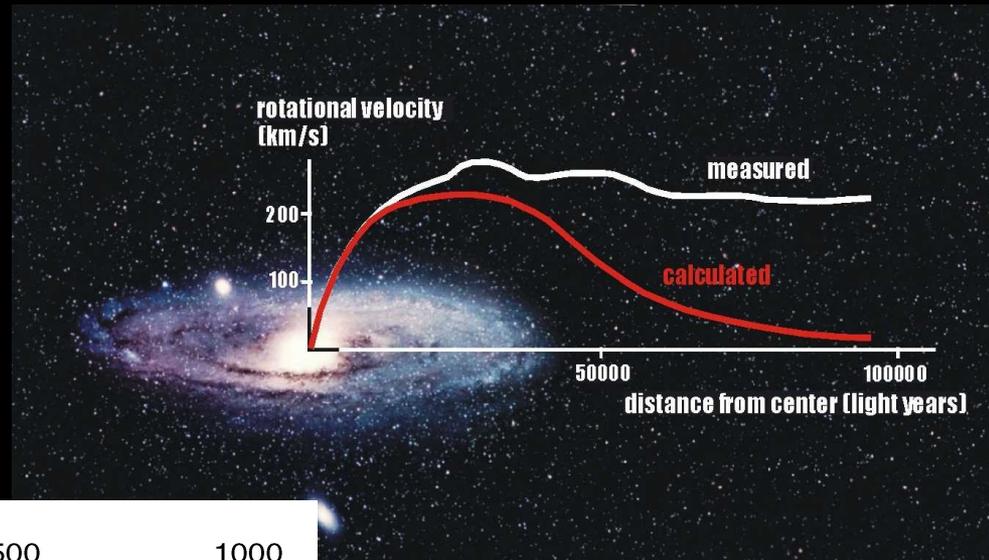


La abundancia de elementos ligeros conlleva una densidad de materia bariónica, como la que conocemos, de sólo un 4%.

Materia oscura – Espectro de fluctuaciones

- La materia oscura se observó por primera vez mediante las curvas de rotación de galaxias.

Los candidatos son variopintos:
WIMPs, MACHOs...



- Con estos datos observacionales, la teoría explica las anisotropías del fondo de microondas.

Evolución

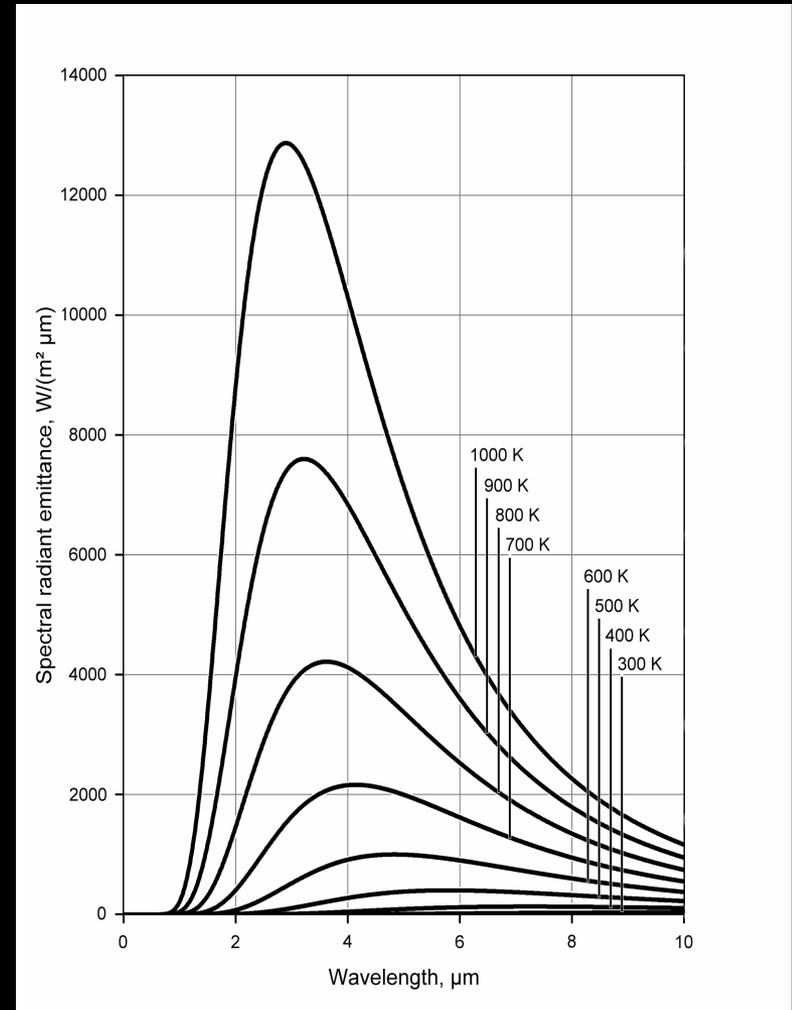
➔ Materia: $\rho \propto \frac{n_{mat}}{Volumen} \propto \frac{1}{a^3}.$

➔ Radiación: $\rho \propto \frac{K_B T n_{rad}}{Volumen} \propto \frac{1}{a^4}.$

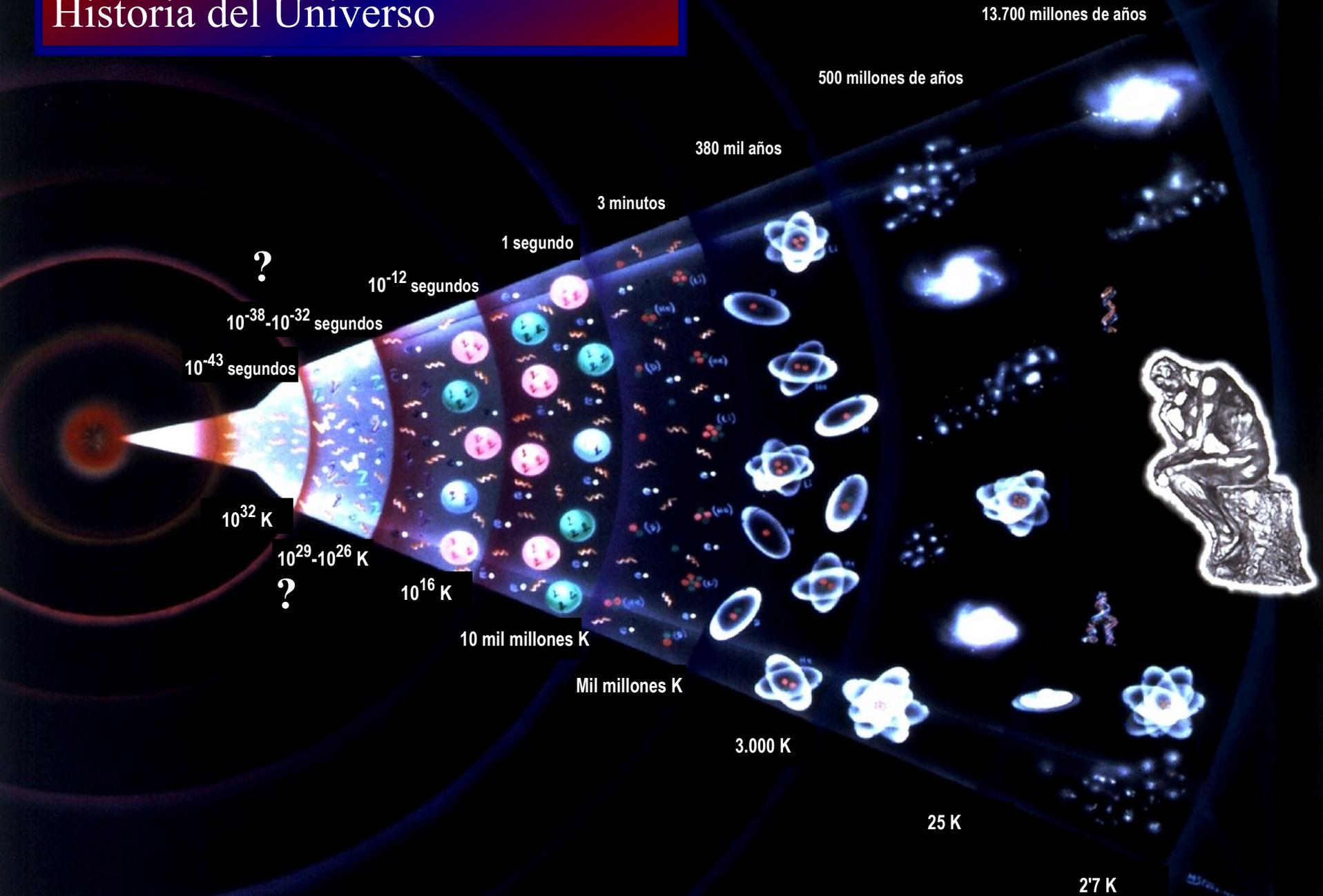
➔ Constante cosmológica: $\rho \propto \Lambda.$

● Cambia la temperatura del fondo de microondas como $a^{-1}.$

$$T \propto \frac{\hbar \omega}{K_B} \propto \frac{1}{\lambda} \propto \frac{1}{a}.$$

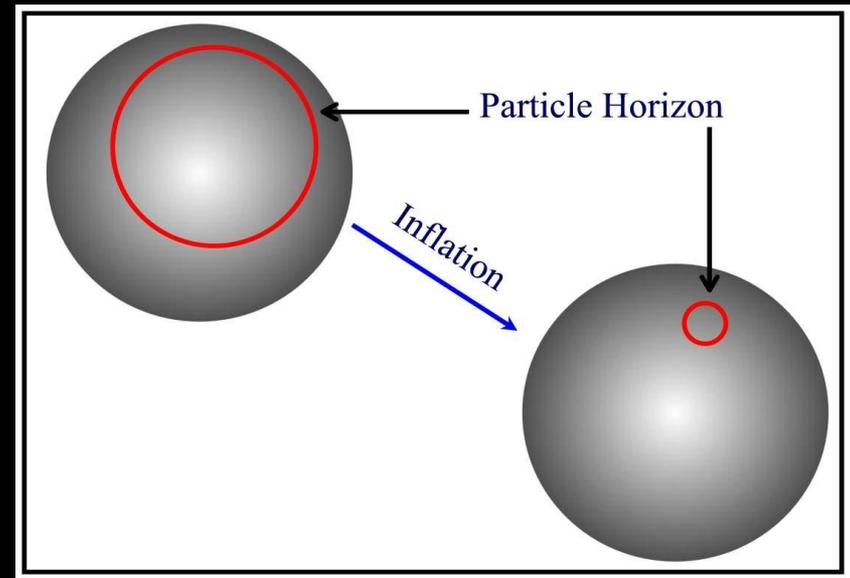
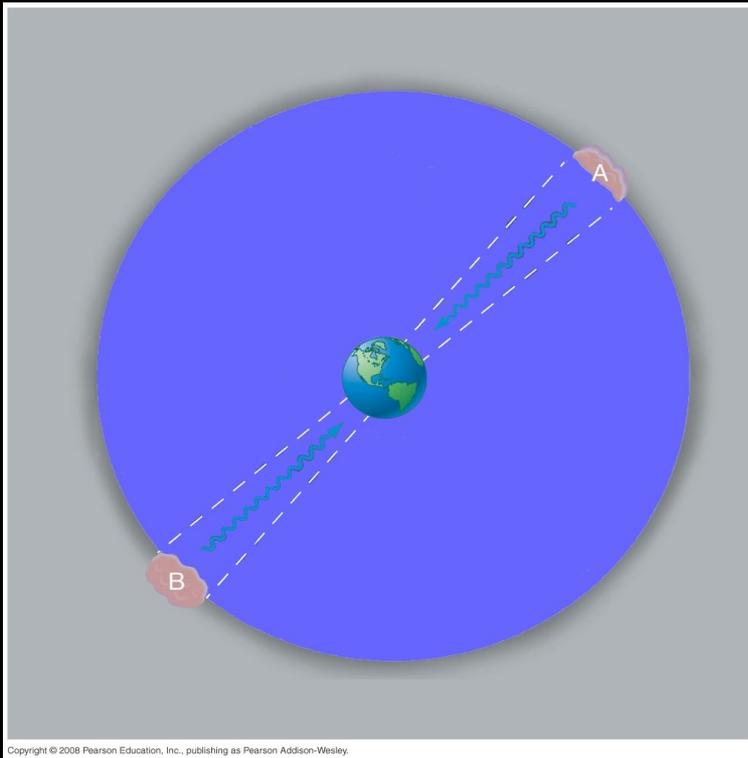


Historia del Universo



Inflación

- La teoría del Big Bang estándar presenta problemas:
 - ➔ El Universo es muy plano.
 - ➔ Las regiones del Universo no han podido interactuar: *horizontes*.
 - ➔ No quedan reliquias de partículas muy masivas...

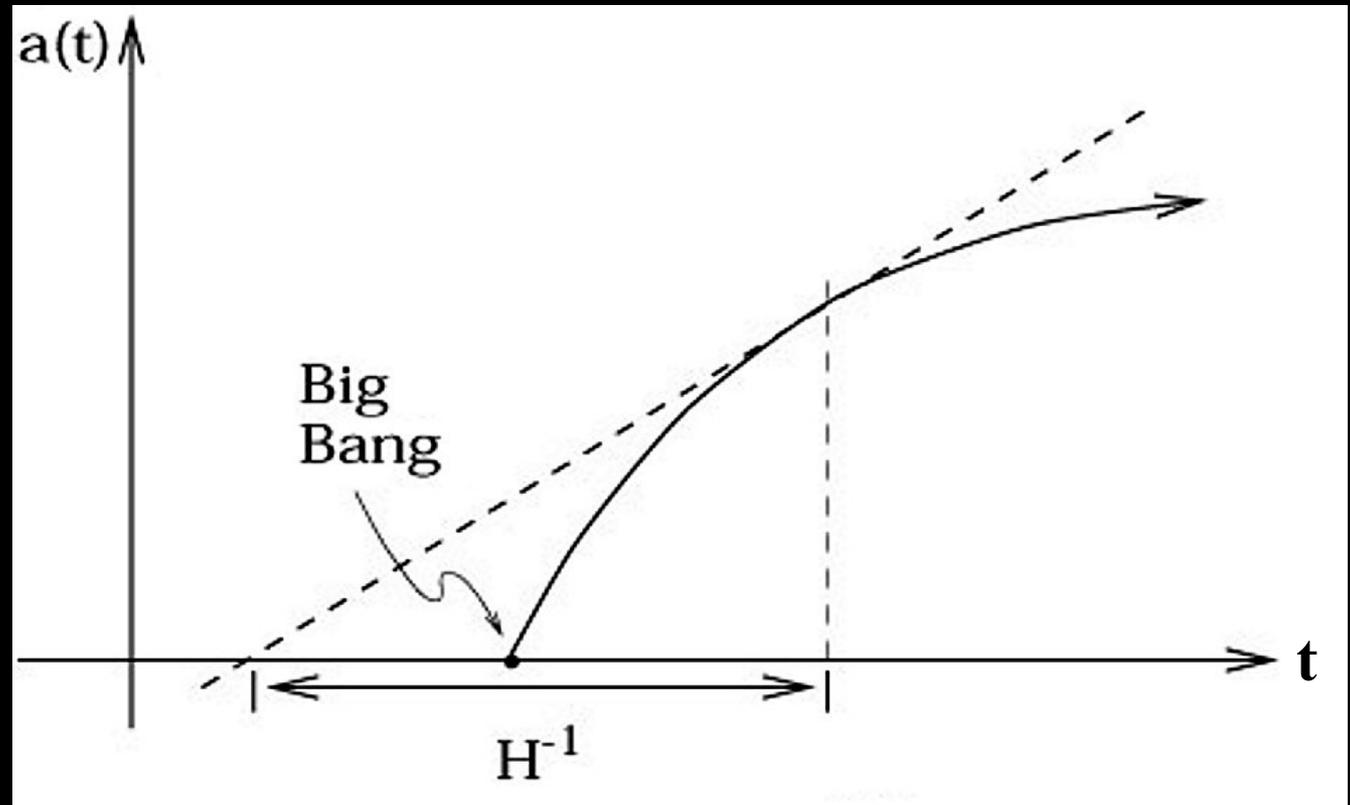


- Se resuelven con un periodo de **INFLACIÓN**.

Singularidad inicial

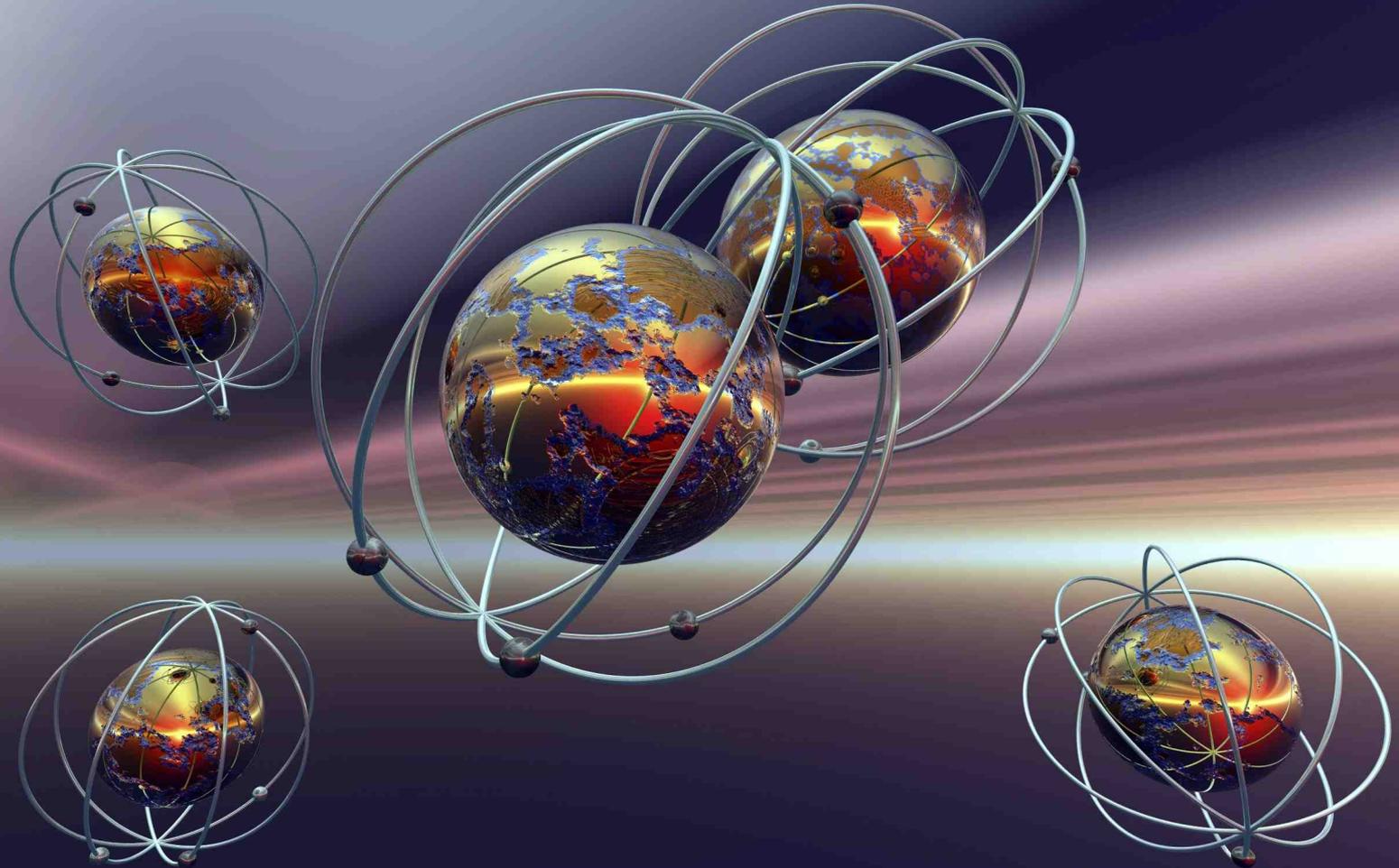
- A tiempos muy pequeños, el contenido de radiación domina sobre otras contribuciones. Para este caso, la aceleración del factor de escala siempre es negativa.

$$\ddot{a} < 0.$$



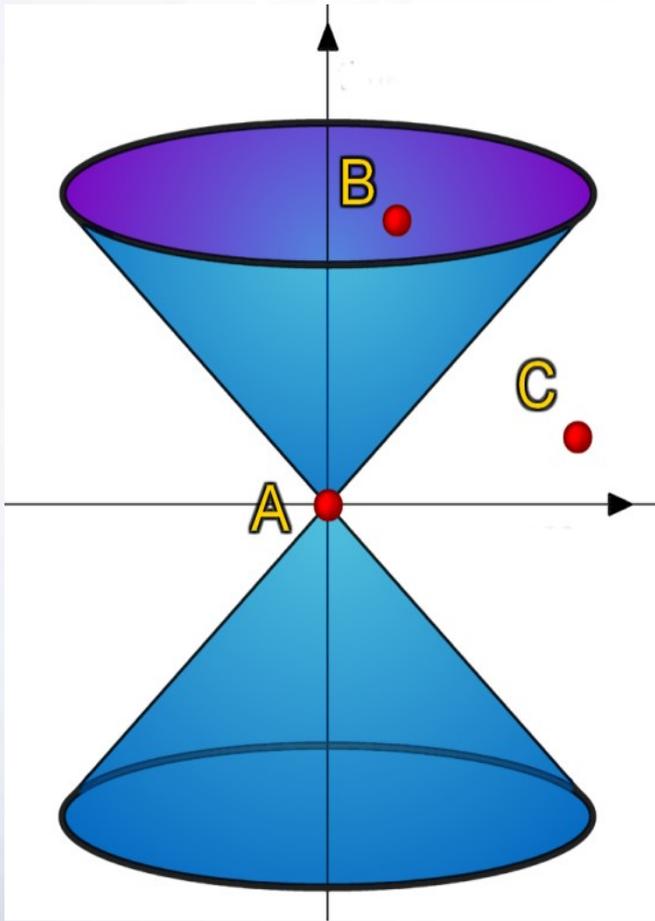
- Los teoremas de Hawking y Penrose aseguran la existencia de singularidad si se cumple la *condición de energía fuerte* $\rho + 3 \frac{p}{c^2} > 0$.

Gravedad y teoría cuántica



- ¿Persiste la singularidad del Big Bang si hay efectos cuánticos?
Pero cuantizar la gravedad es problemático...

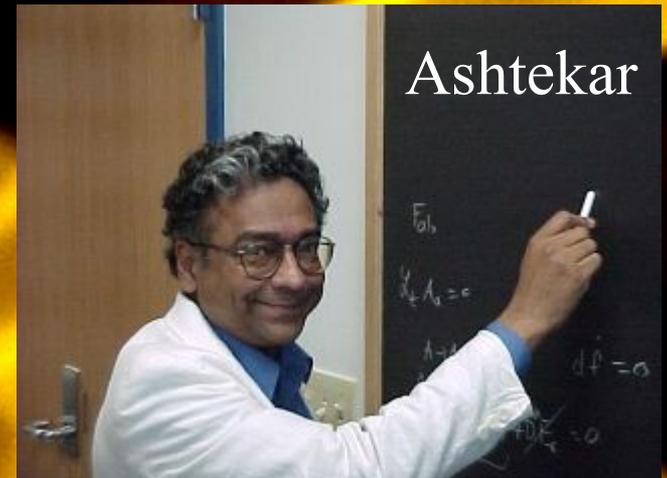
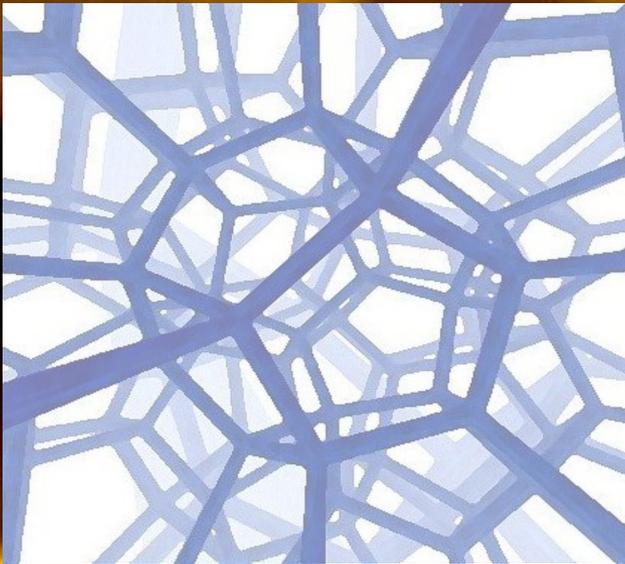
Gravedad y teoría cuántica



- La geometría determina las regiones causales donde uno esperaría localizar los efectos cuánticos. Pero es la geometría lo que se quiere cuantizar.

Gravedad de lazos (*loops*)

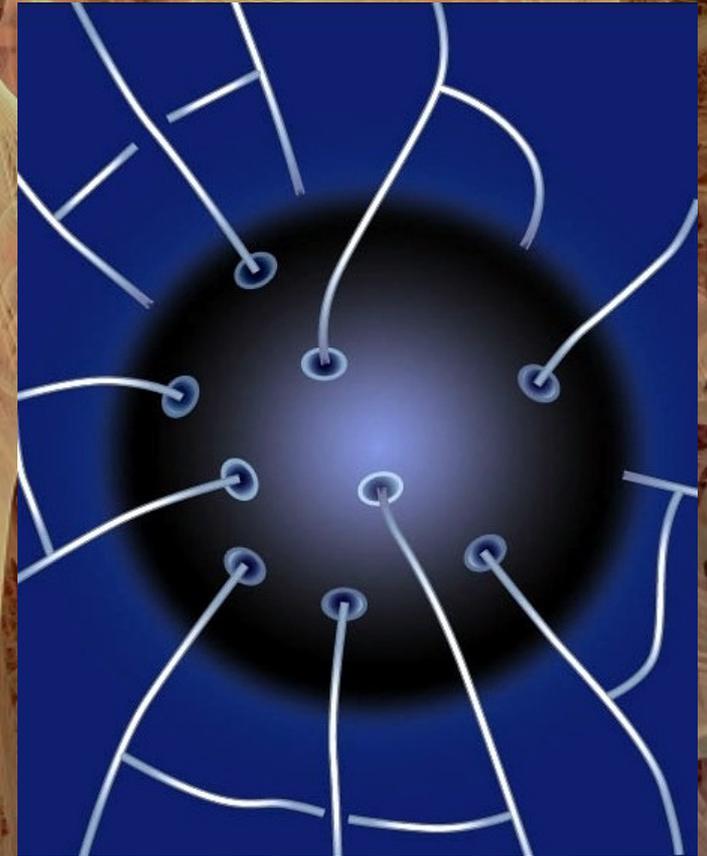
- ¿Cómo describir la geometría de forma adecuada para cuantizarla? El transporte paralelo de fermiones toma cuenta de la curvatura.



- Basta con considerar circuitos cerrados: **LOOPS**.

Gravedad de loops

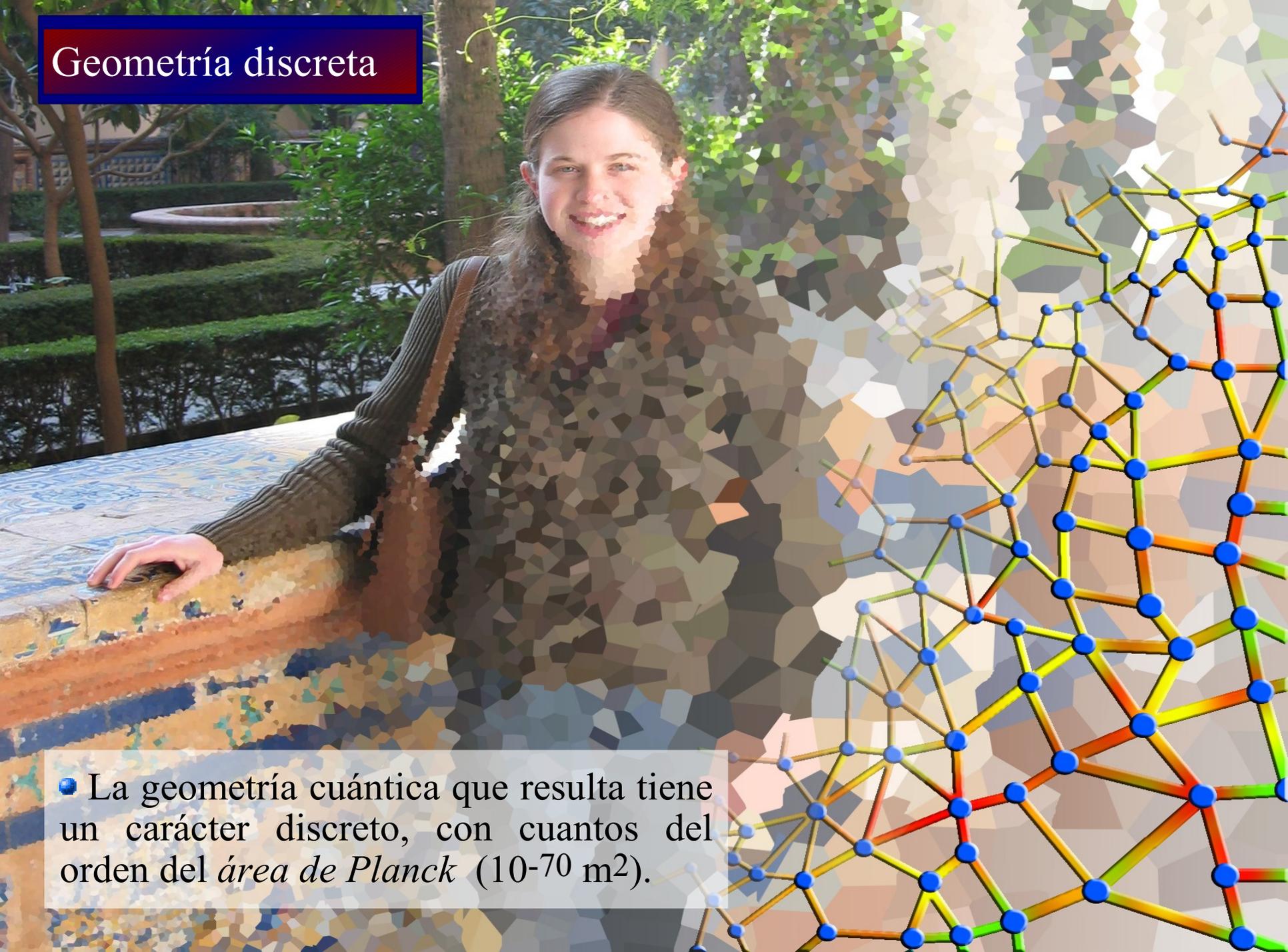
- El resto de información se codifica en la geometría de superficies.



- Una superficie adquiere área cuando la atraviesa una línea de excitación, sobre la que el transporte paralelo no es trivial.

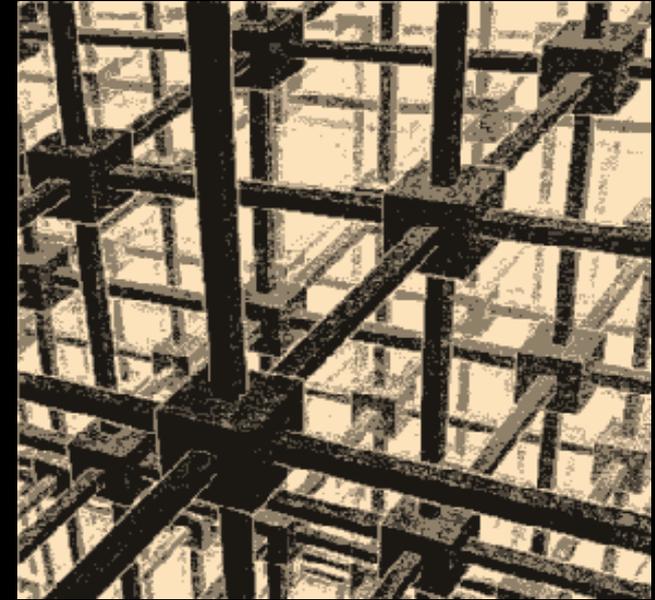
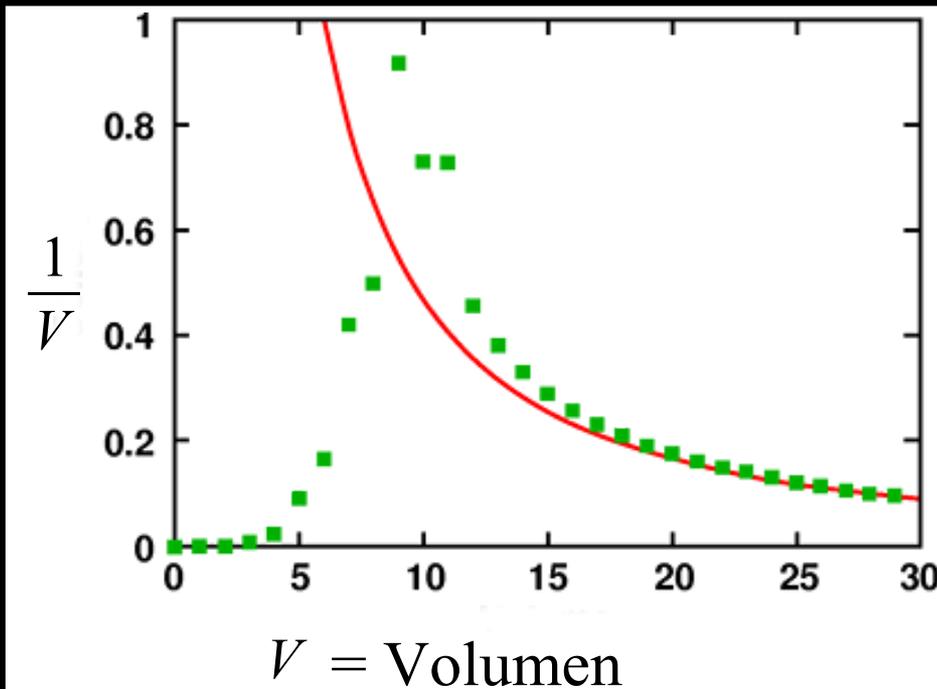
Geometría discreta

- La geometría cuántica que resulta tiene un carácter discreto, con cuantos del orden del *área de Planck* (10^{-70} m^2).



Loops y regularización

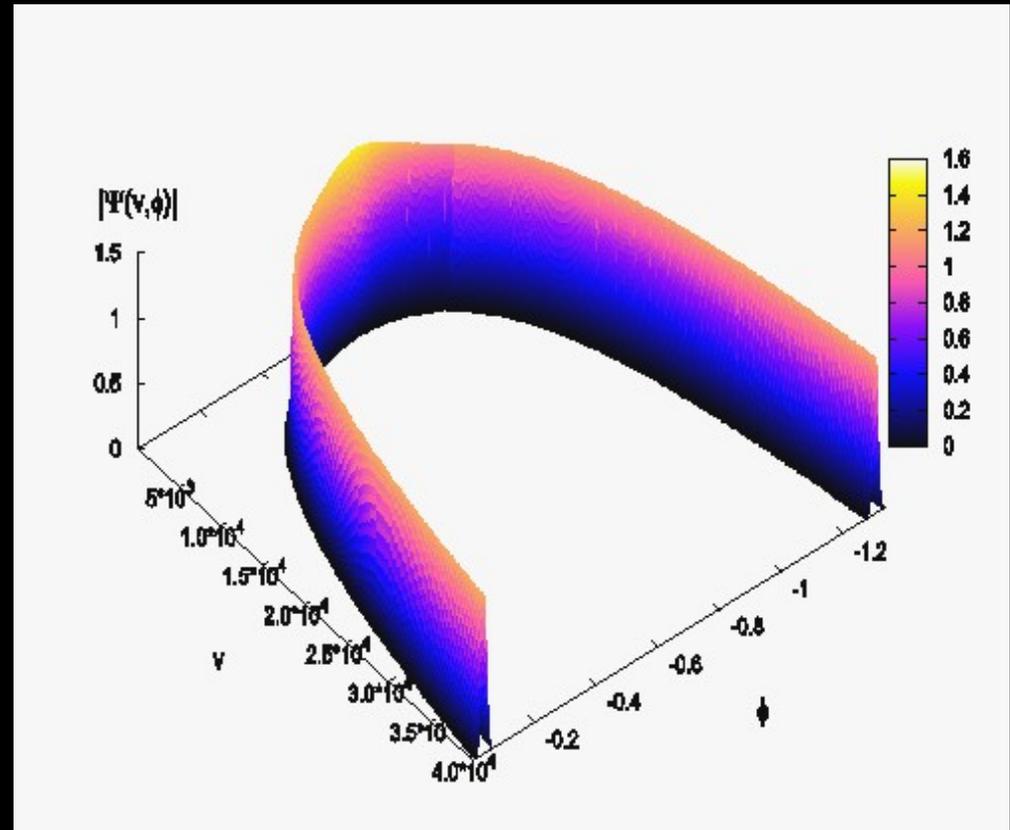
- Al describir la curvatura mediante loops (no puntuales), aparecen contribuciones no locales.



- Regularizándolo con loops, se puede definir el inverso del volumen sin que diverja al contraer el volumen a cero.

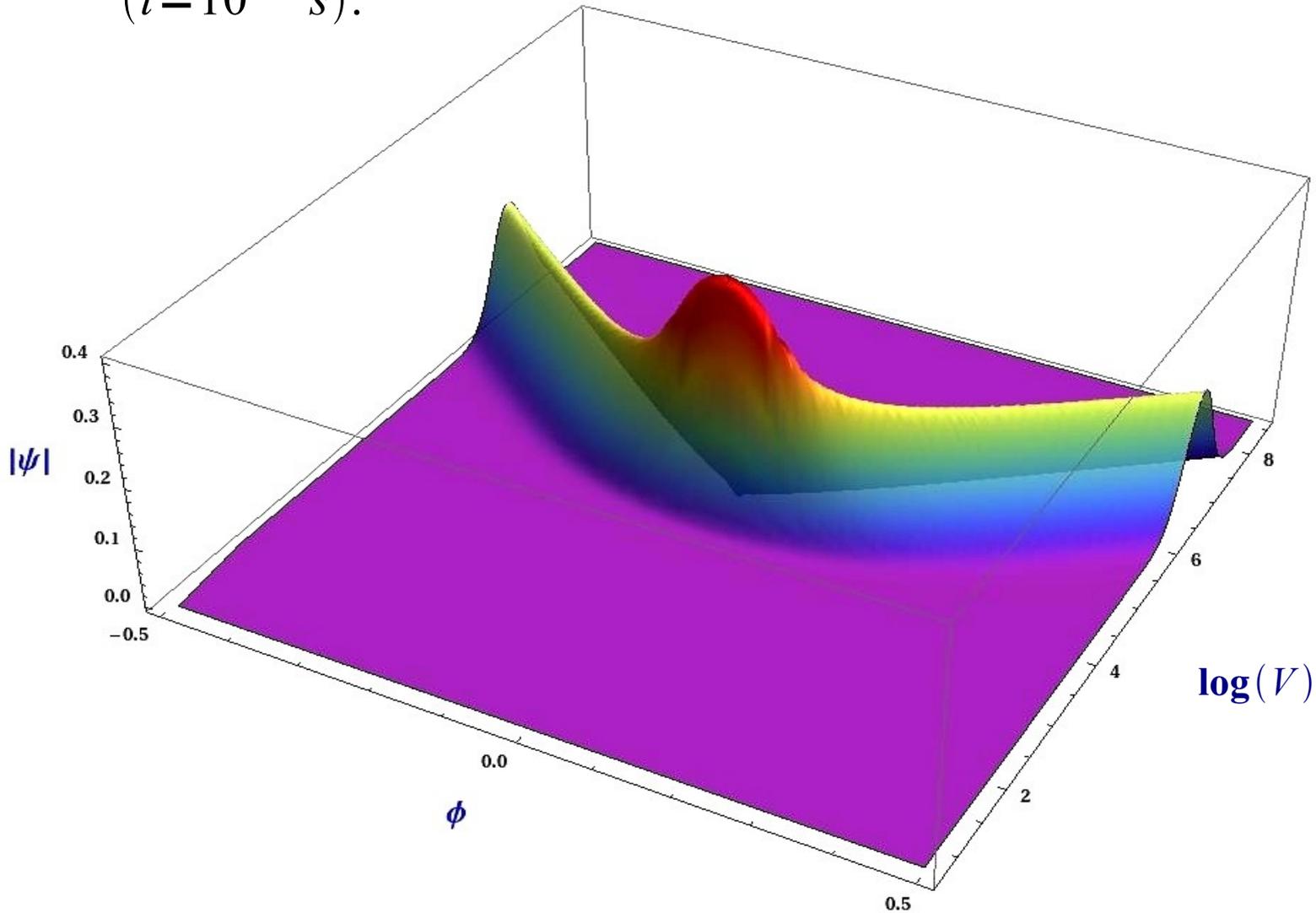
Cosmología cuántica de lazos (*loops*)

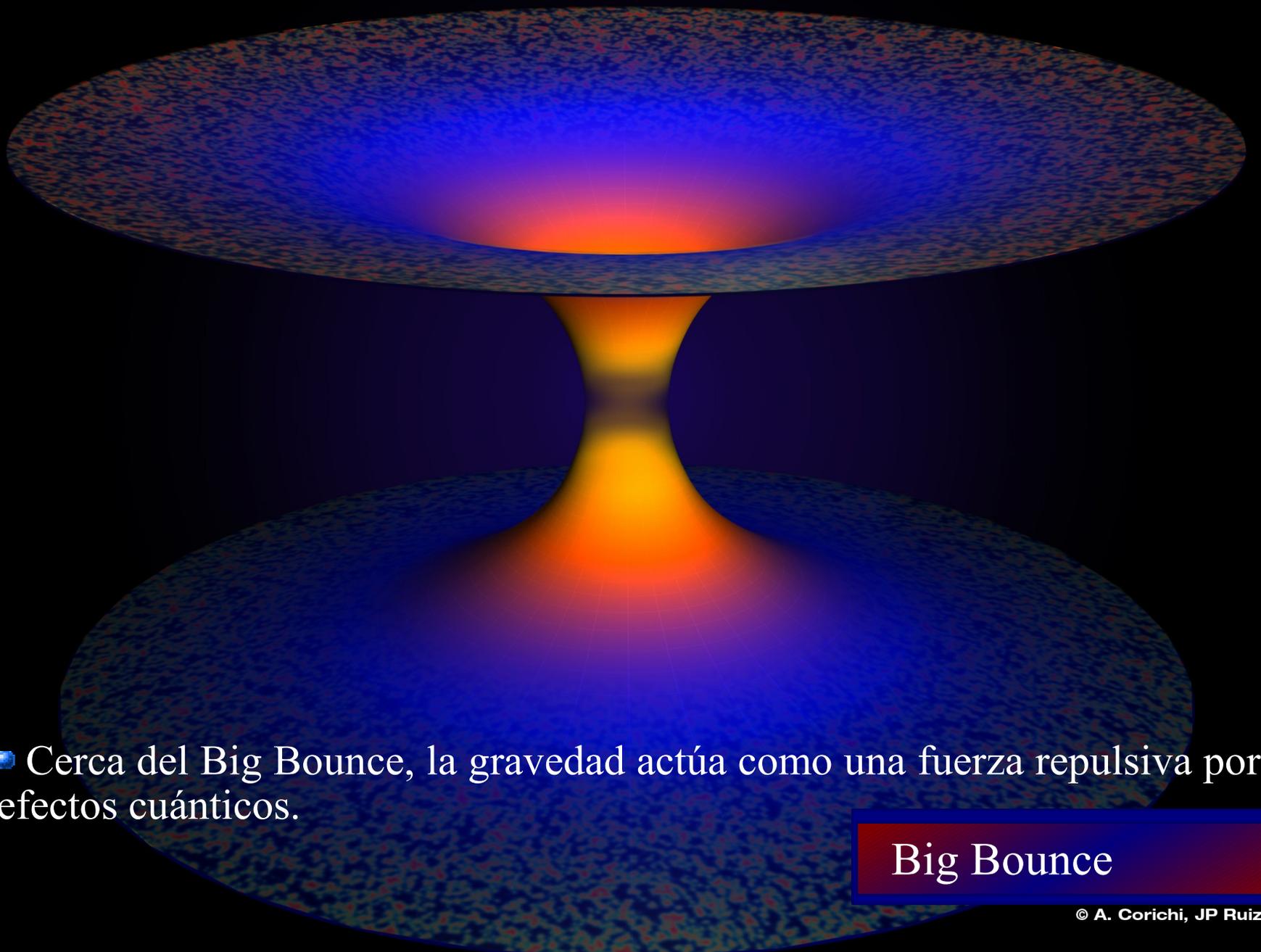
- Se impone la versión cuántica de la ecuación de Friedmann para ver la evolución del Universo (representado por una función de ondas Ψ).
- El ejemplo más simple es el de un Universo plano que contiene un campo material ϕ no masivo (Ashtekar, Singh y Pawłowski).
- La singularidad del Big Bang se evita mediante un rebote: es el **Big Bounce**.



Big Bounce

- El Big Bounce ocurre cuando la densidad es del orden de la de Planck ($t = 10^{-45} s$).

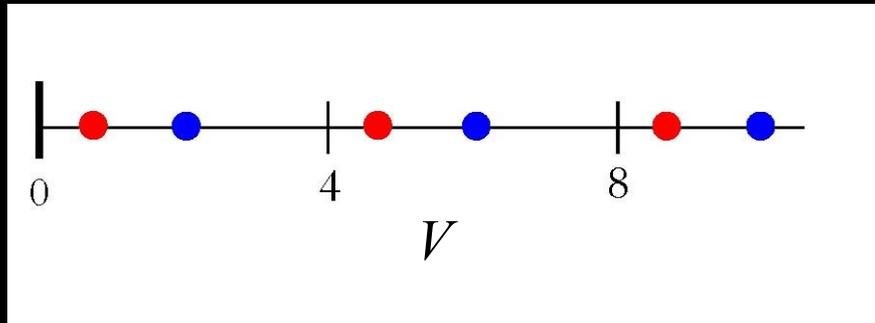


- 
- Cerca del Big Bounce, la gravedad actúa como una fuerza repulsiva por efectos cuánticos.

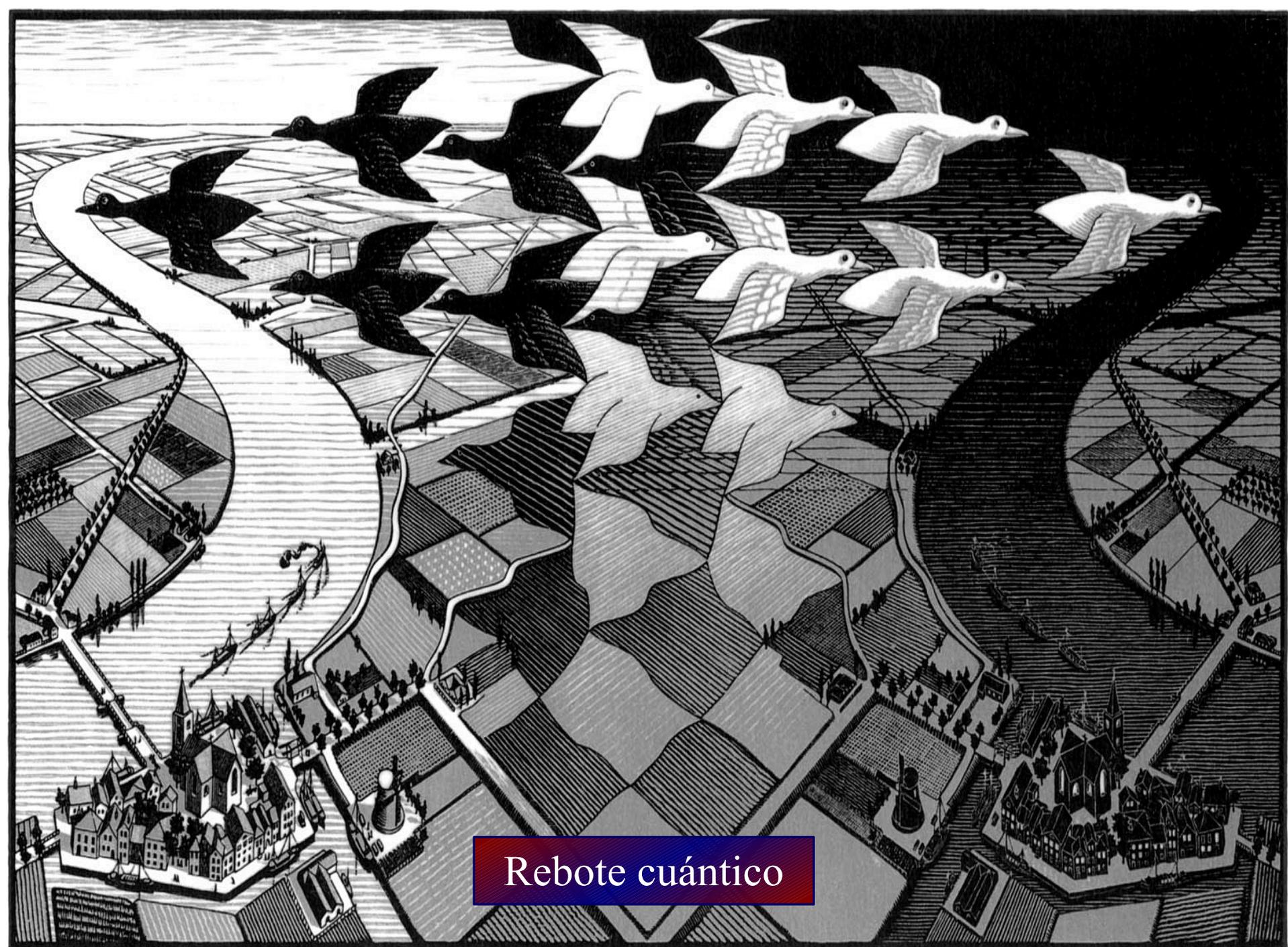
Big Bounce

Rebote cuántico

- Debido a la geometría discreta, la ecuación de Friedmann cuántica es una ecuación en diferencias finitas para el volumen.
- Los estados cuánticos tienen contribuciones de una secuencia infinita de volúmenes equiespaciados.



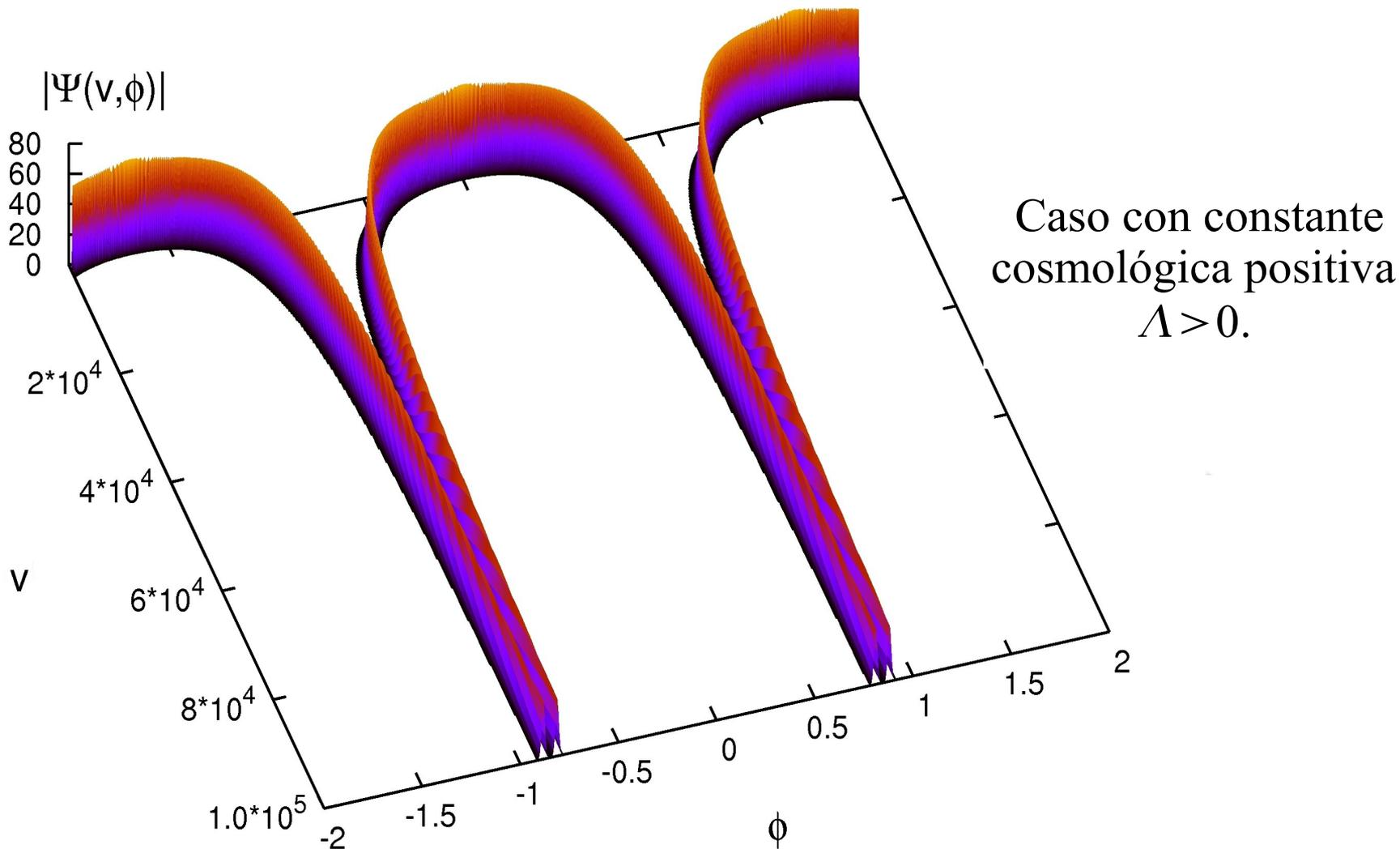
- Las soluciones son superposición de estructuras con volumen discretizado en las que las componentes de ondas salientes y entrantes tienen igual amplitud. Esto garantiza un rebote cuántico generalizado.



Rebote cuántico

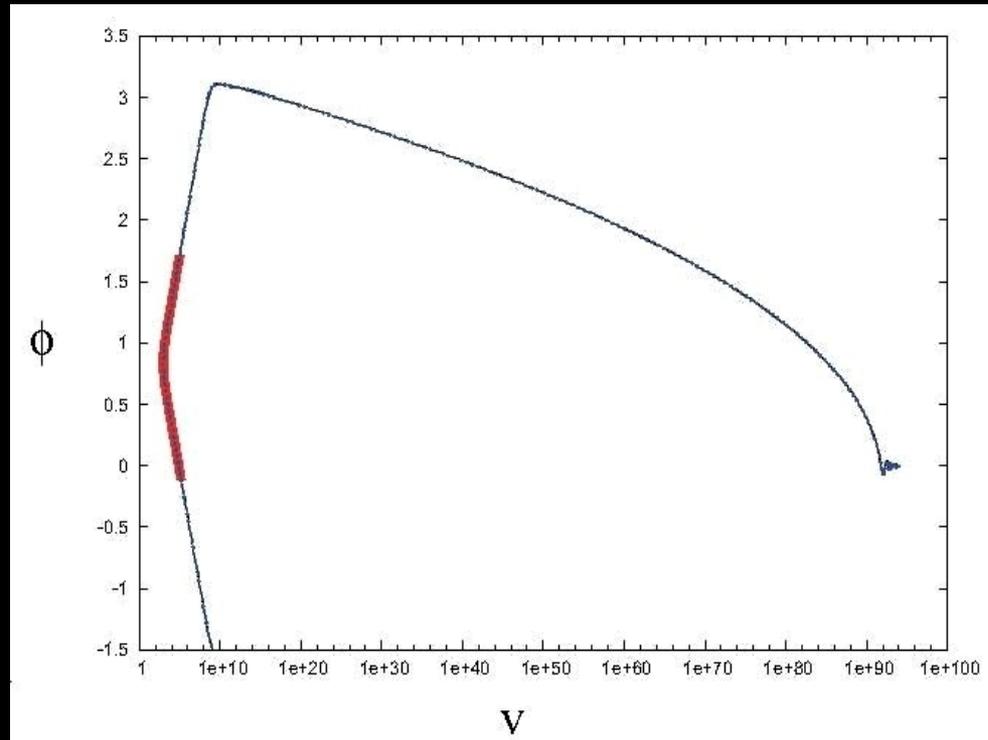
Big Bounce

- El Big Bounce aparece también cuando la geometría espacial no es plana ($k = +1, -1$), o para otros contenidos materiales.



Big Bounce e inflación

- Después del Big Bounce, hay una época de *superinflación*, en la que el parámetro de Hubble H crece.



- Para campos de materia muy generales, a la época de superinflación le sigue otra de inflación más convencional (*slow roll*). Debido a los efectos de gravedad cuántica, hay un 99% de posibilidades de alcanzar suficiente inflación en total, cualesquiera que sean las condiciones de partida para el Universo.

BIG BOUNCE

PRE-EXISTING UNIVERSE
Collapse due to gravity

SPACE-TIME
IS CLASSICAL

10^{-44} seconds:
SPACE-TIME
IS QUANTISED

SPACE-TIME IS CLASSICAL

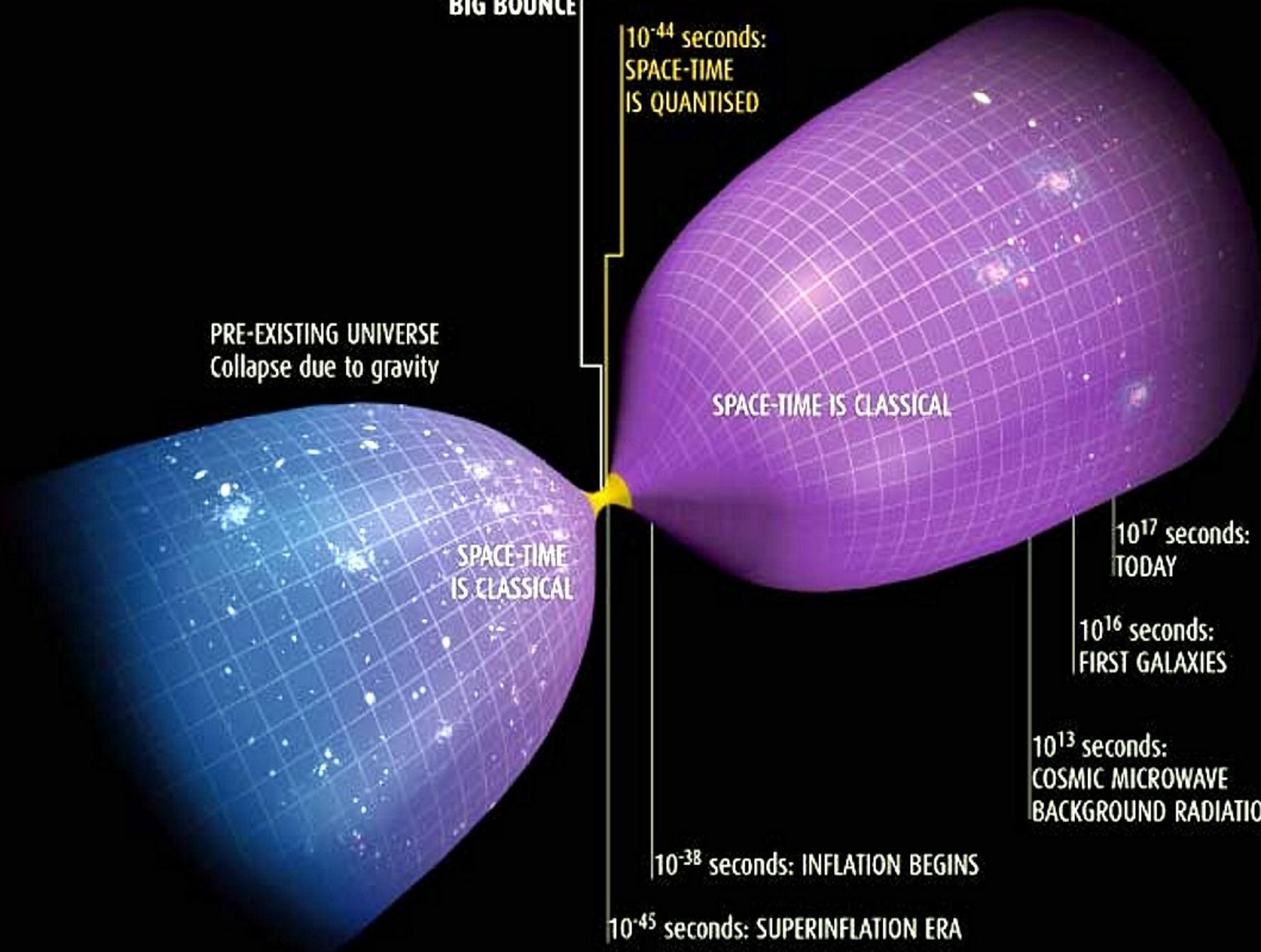
10^{17} seconds:
TODAY

10^{16} seconds:
FIRST GALAXIES

10^{13} seconds:
COSMIC MICROWAVE
BACKGROUND RADIATION

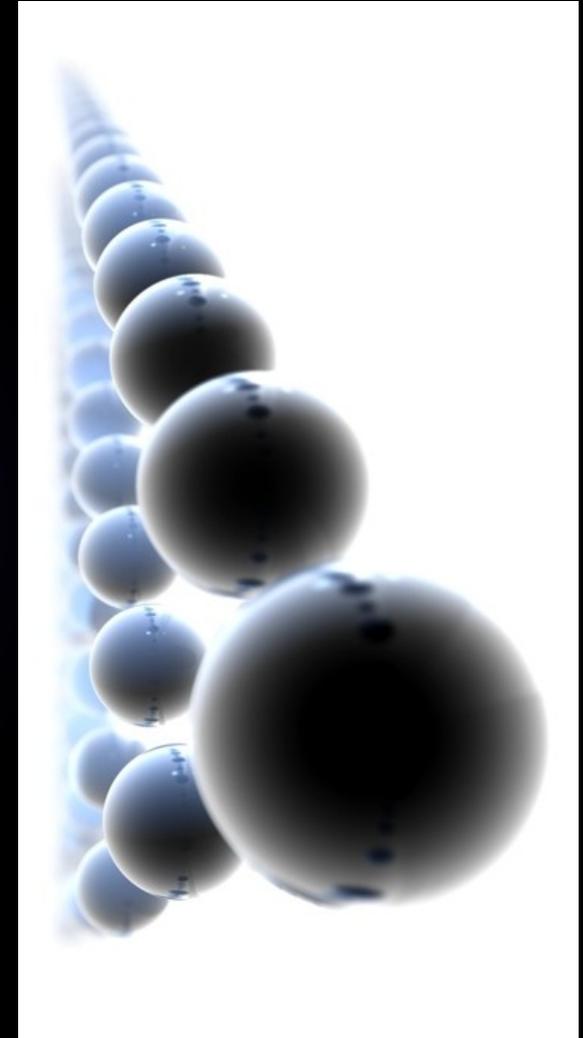
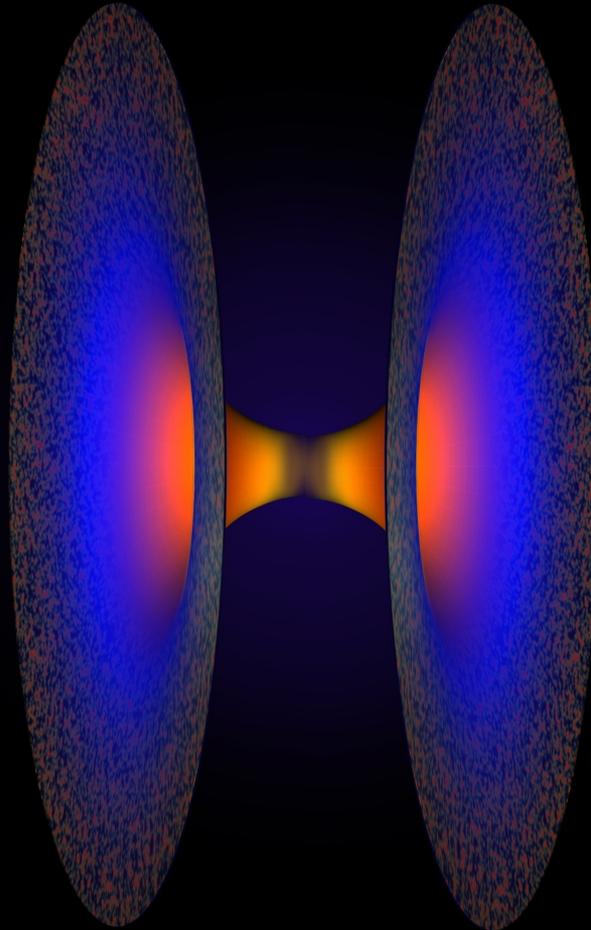
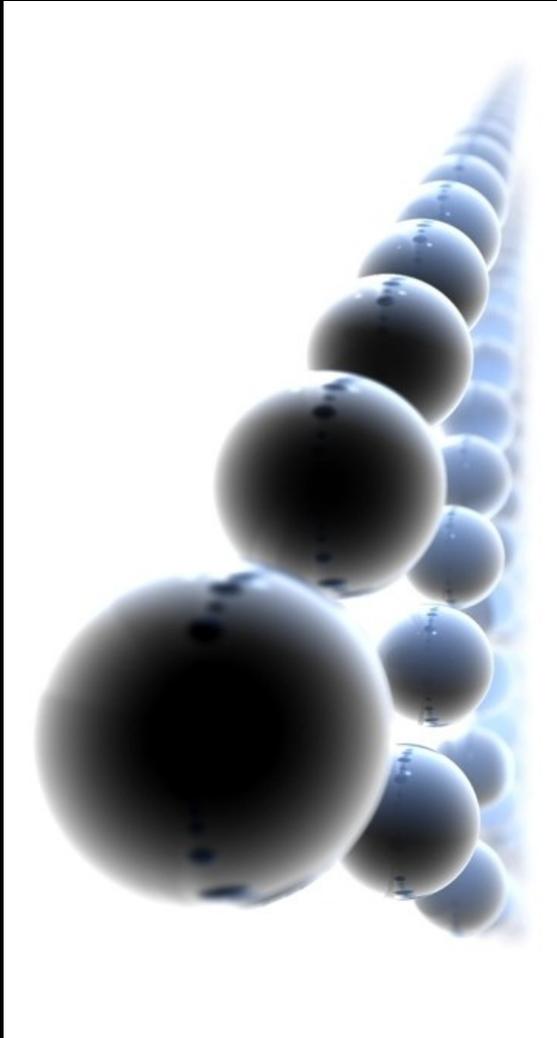
10^{-38} seconds: INFLATION BEGINS

10^{-45} seconds: SUPERINFLATION ERA



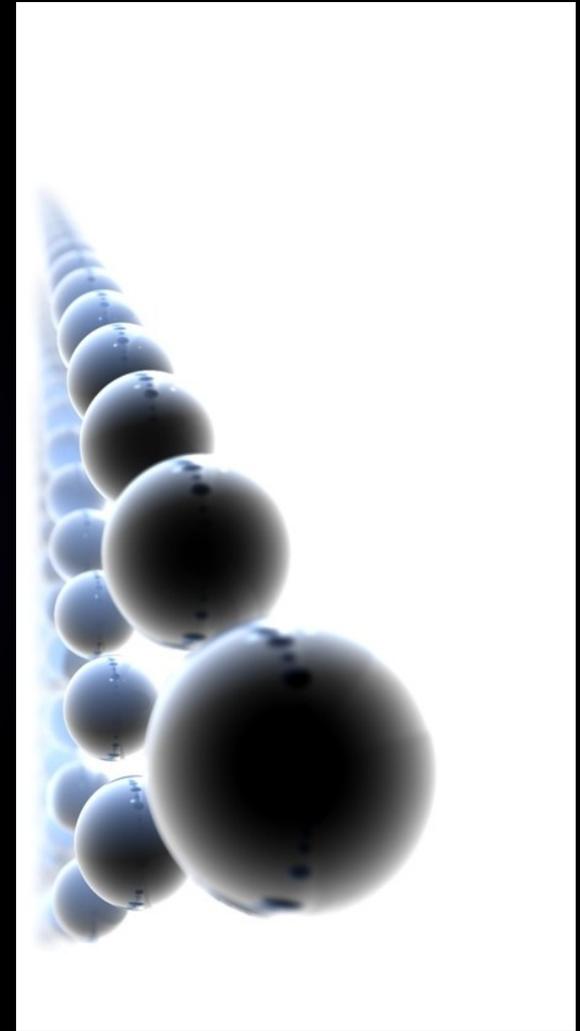
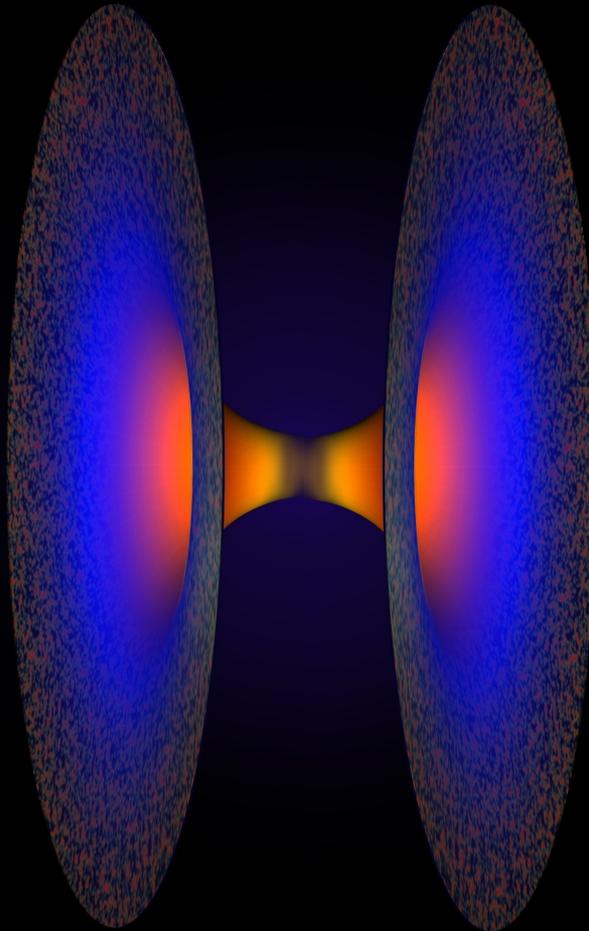
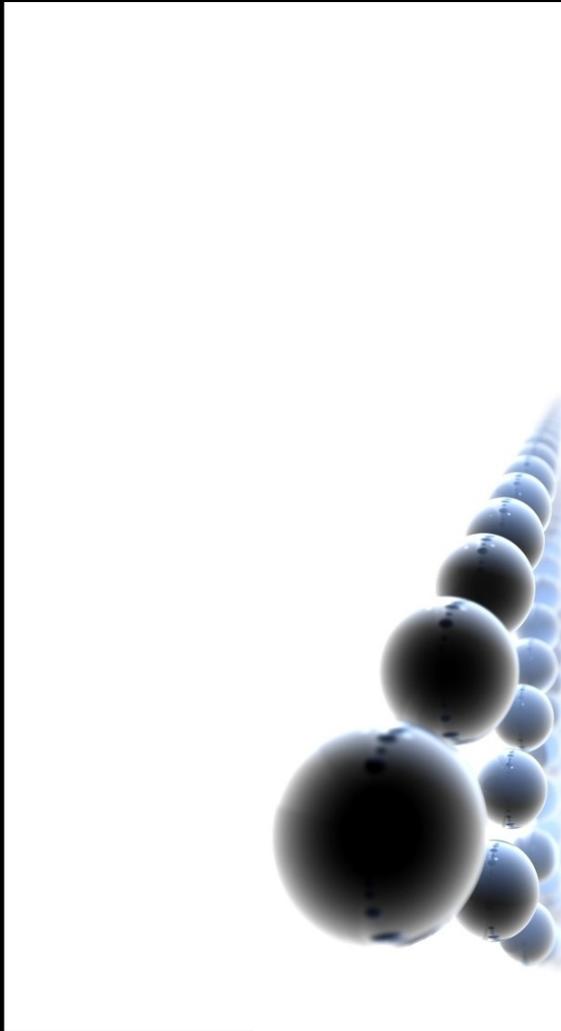
Big Bounce e inhomogeneidades

- ¿Afecta el rebote a las inhomogeneidades? En promedio, no, al menos en modelos sencillos...



Big Bounce e inhomogeneidades

- ... salvo si las inhomogeneidades son muy pequeñas.



Conclusión

- **El modelo estándar del Big Bang es capaz de explicar:**
 - ★ **La ley de Hubble.**
 - ★ **El fondo cósmico de microondas.**
 - ★ **La abundancia de los elementos ligeros.**
 - ★ **La estructura a gran escala.**
 - ★ **La edad del Universo.**
- **La cosmología cuántica de lazos:**
 - ★ **Resuelve la singularidad inicial.**
 - ★ **Conduce a un Big Bounce sin destruir el comportamiento clásico.**
 - ★ **Convierte a la inflación en un mecanismo natural.**
 - ★ **Da un nuevo marco para entender la aparición de inhomogeneidades.**