

El Universo: Cosmología y Evolución del Universo

Ernesto Nicola

Palma de Mallorca, 16-12-2021



Contenido de la charla

1 Introducción Histórica a la Cosmología Física

- Cosmología anterior a Einstein: la Paradoja de Olbers
- Modelos Cosmológico Teóricos: Einstein y Lemaître
- Cosmología Experimental: Hubble y el Universo en Expansión
- Materia Oscura
- Radiación del Fondo Cósmico y la Recombinación
- Inflación Cósmica
- Energía Oscura y la Expansión Acelerada del Universo

2 Evolución del Universo

- El Big Bang y el Universo en Expansión
- El Período Inflacionario
- La Nucleosíntesis y la Radiación del Fondo Cósmico
- La Era Oscura y la Formación de las primeras Estrellas y Galaxias
- La Expansión Acelerada del Universo y el Futuro

¿Qué es la cosmología?

La Cosmología estudia el origen y evolución del universo; desde el Big Bang hasta el presente, y también hacia el futuro.

1. Introducción Histórica a la Cosmología

1. Introducción Histórica a la Cosmología

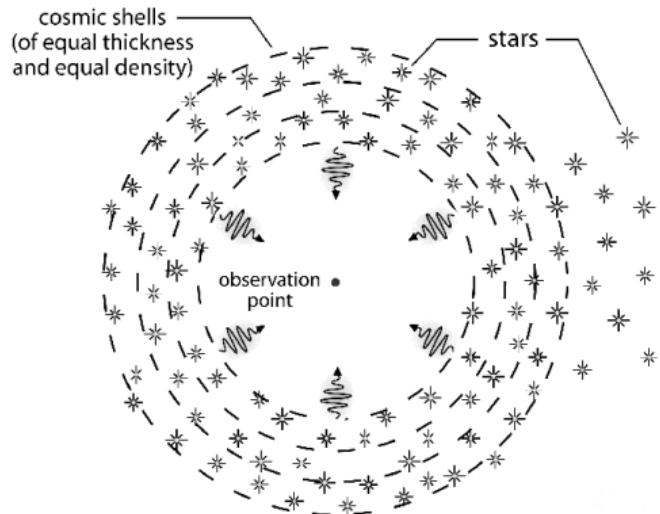
1.1. Cosmología anterior a Einstein: la Paradoja de Olbers

Paradoja de Olbers: ¿Por qué es el cielo oscuro?



- Paradoja propuesta en 1823 por el astrónomo alemán H.W. Olbers (1758–1840):
- "Si el universo fuese eterno y hubiese una distribución homogénea de estrellas, el cielo debería ser extremadamente brillante"

Paradoja de Olbers: Universo Observable Finito y No-Eterno



● Razonamiento de la Paradoja de Olbers

- Suponemos una densidad homogénea de estrellas
- Podemos pensar que las estrellas se disponen en capas esféricas que nos rodean
- El número de estrellas en una capa a distancia R debería ser proporcional a la superficie de una esfera de ese radio
- El brillo de una estrella disminuye con el cuadrado de la distancia pero el número de estrellas esperado aumenta con el cuadrado de la distancia.
- Ambos efectos se compensan y cada capa nos contribuye de manera equivalente al brillo percibido.
- Al haber infinitas capas el cielo debería ser muy brillante!

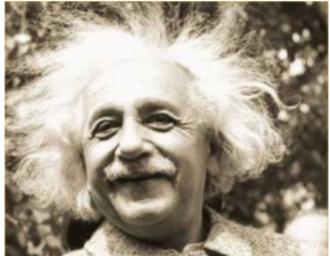
● Resolución de la paradoja

- El universo observable no es infinitamente grande
- El universo no existe desde siempre sino que tiene un origen en el tiempo.

1. Introducción Histórica a la Cosmología

1.2. Modelo Cosmológico de Einstein

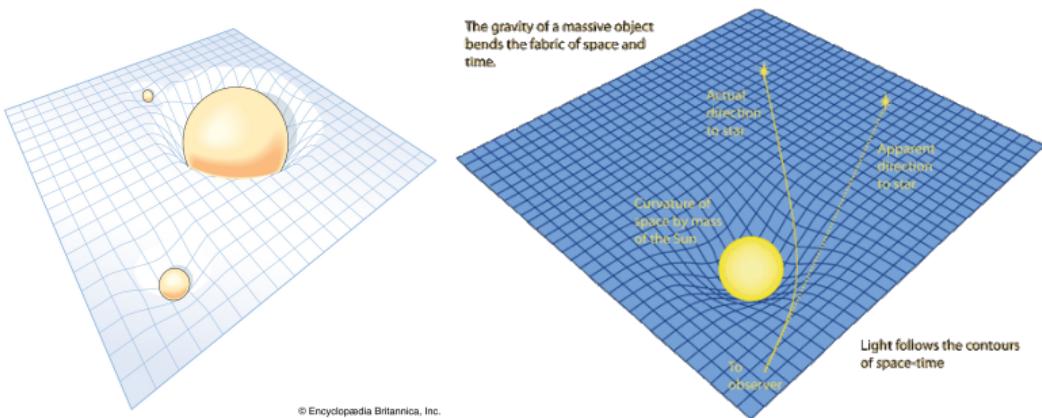
Teoría General de la Relatividad de Einstein



A young Albert Einstein. Photo by Gustav Gossler (1888–1948). © Friend of Einstein's when he was living in Berlin.

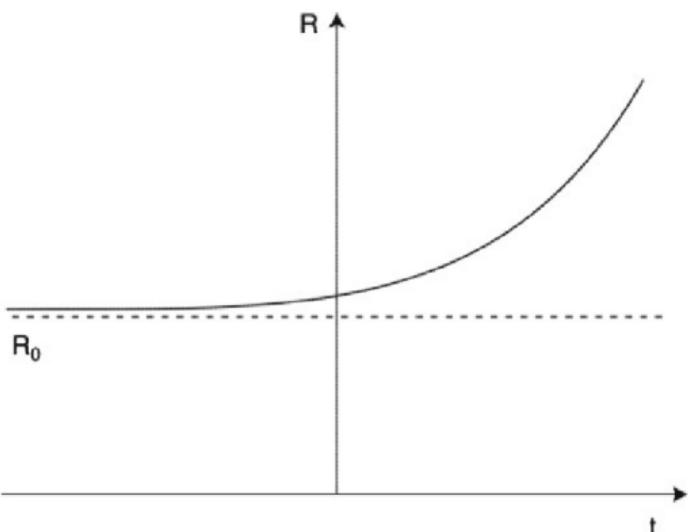
- Albert Einstein en 1916:
Teoría General de la
Relatividad
- La Cosmología moderna
comienza con la Teoría
General de la Relatividad
de Einstein

- La teoría de la relatividad general es una teoría sobre la fuerza de la gravedad.
- Al teoría de la relatividad general se puede resumir como (John Wheeler): "La materia le indica al espacio como tiene que curvarse y a su vez el espacio le indica a la materia como se tiene que mover"



Cosmología de Einstein: Universo Estático

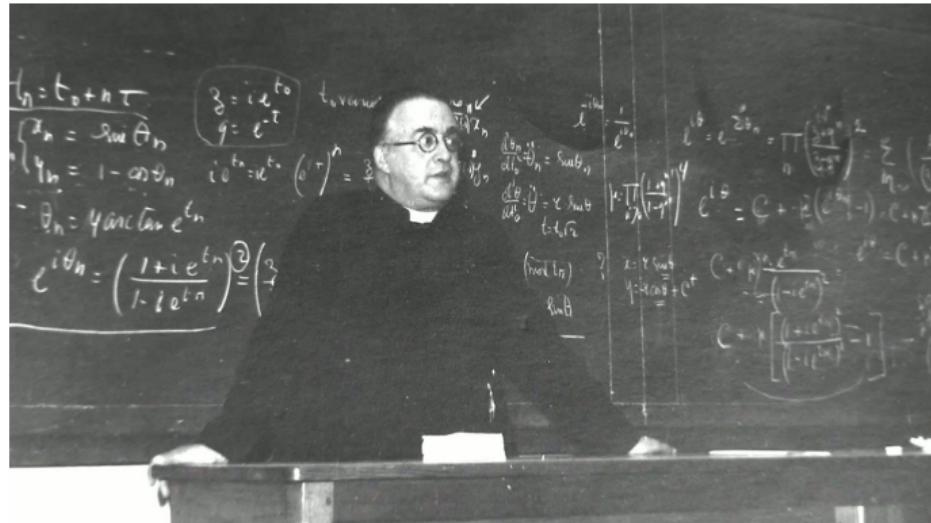
- Einstein se dio cuenta rápidamente que su teoría general de la relatividad podía usarse para predecir la evolución del universo ya que la gravedad es la única fuerza de alcance infinito.
- Asumiendo que el universo era estático (no evolucionaba, siempre había tenido el mismo aspecto que ahora),
 - Einstein encontró una solución a sus ecuaciones de la relatividad general que predecían un universo estático
 - Para que esta solución existiese tuvo que incluir, además de la gravedad, una hipotética fuerza repulsiva que actuaba a grandes distancias (Λ , la llamada "constante cosmológica").
- ¡La solución encontrada por Einstein resultó ser inestable!



1. Introducción Histórica a la Cosmología

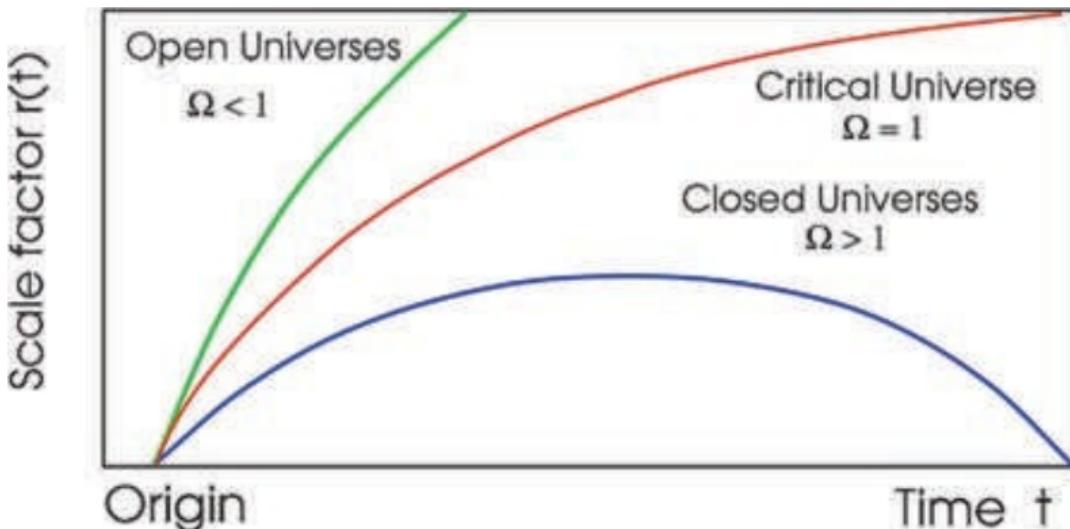
1.3. Modelos Cosmológicos de Lemaître y Friedmann

Modelos Cosmológicos de Friedmann y Lemaître



- En la década de 1920, Alexander Friedmann (1888-1925) y Georges Lemaître (1894-1966) desarrollan en paralelo ecuaciones de la teoría general de la relatividad que predicen la evolución del Universo

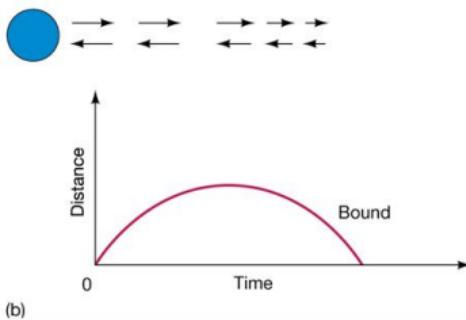
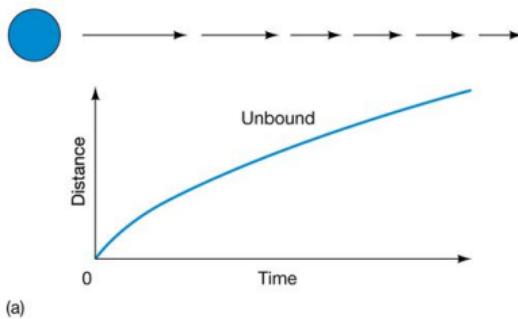
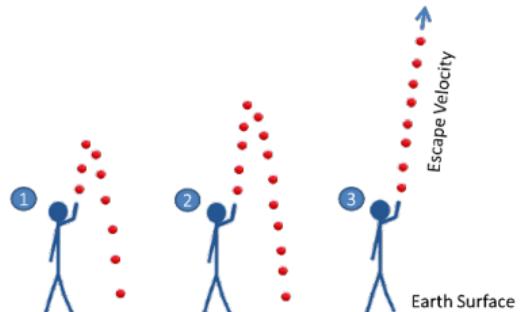
Lemaître y Friedmann predicen la existencia de un Big Bang



- Los modelos de Lemaître y Friedmann predicen un origen temporal del universo
 - Este origen en el tiempo es llamado Big Bang (Fred Hoyle)
 - El Universo puede ser espacialmente finito o infinito
- El parámetro más importante del modelo es la densidad de materia Ω
 - Si la densidad de materia es menor que el valor crítico (un umbral; $\Omega = 1$) el universo se expandirá para siempre.
 - Si la densidad de materia es mayor a un valor crítico, el universo colapsará en un momento en el futuro ("Big Crunch")

Universo en Expansión o Recolapso

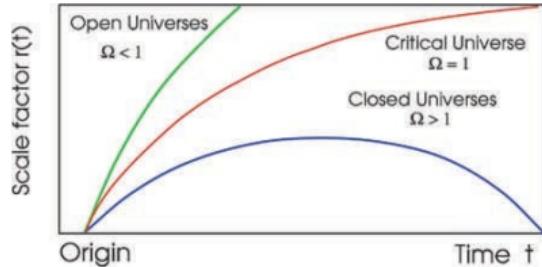
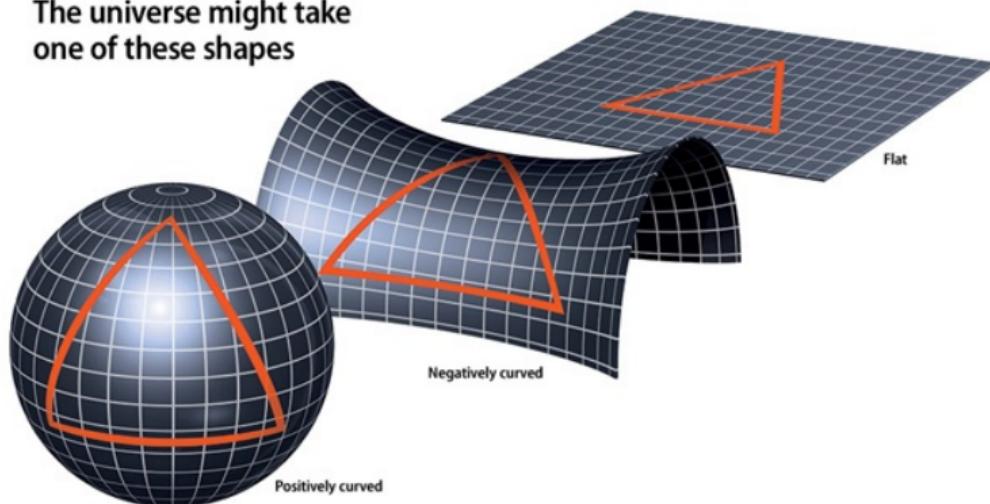
- Analogía del modelo cosmológico de Lemaitre y Friedmann con la velocidad de escape de un cuerpo masivo (eg. la tierra)
 - La densidad de materia Ω corresponde a la velocidad inicial del proyectil en la analogía.



La Densidad de Materia y la Geometría del Universo

- La densidad de materia Ω determina la geometría del espacio del universo.

The universe might take
one of these shapes



- $\Omega = 1$ corresponde a un espacio plano

1. Introducción Histórica a la Cosmología

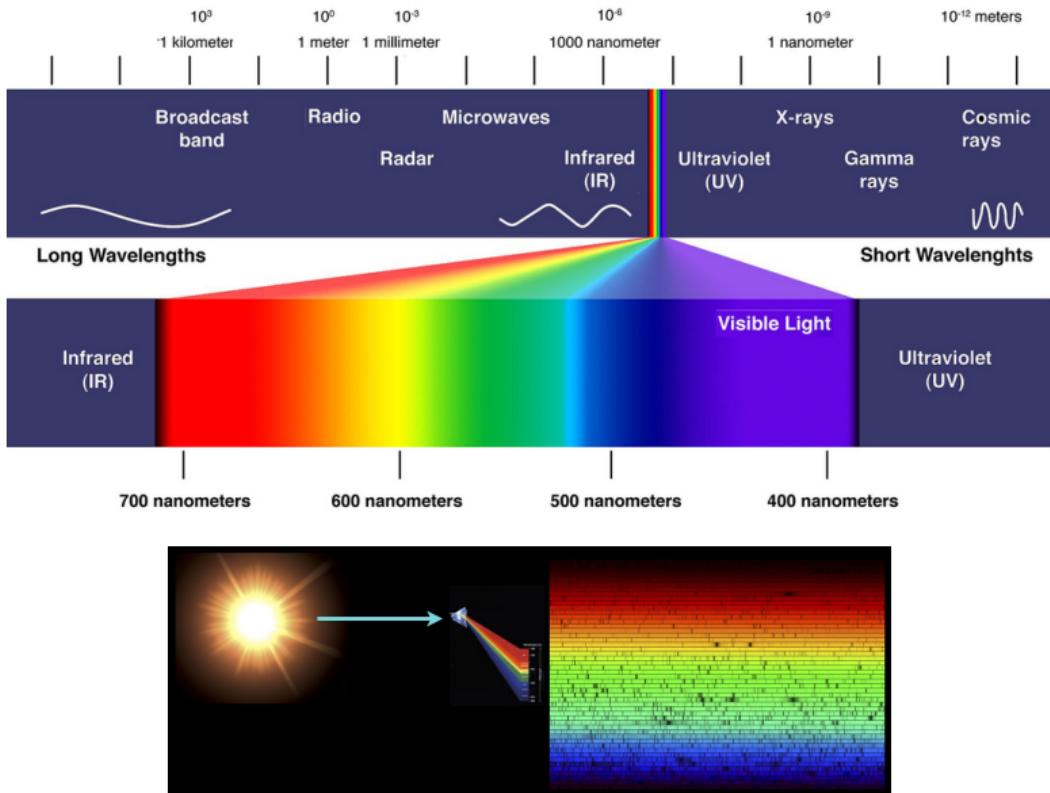
1.4. Hubble y la Confirmación del Universo en Expansión

Slipher (1915): El Universo se expande!



- Vesto Slipher (1875-1969): fue el primero en estudiar la velocidad de galaxias lejanas. Descubrió que muchas galaxias se están alejando de nosotros!
- Primera evidencia que el universo se expande!
- ¿Cómo midió la velocidad de las galaxias?
 - Usando un efecto conocido como *corrimiento al rojo cosmológico*

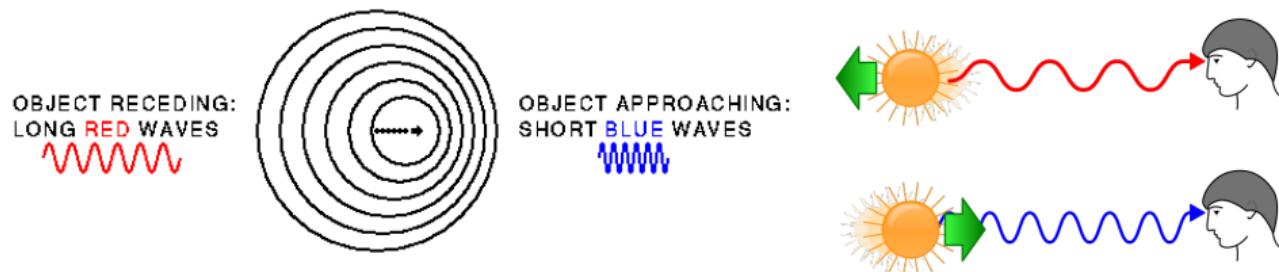
La luz y el Espectro de la Radiación Electromagnética



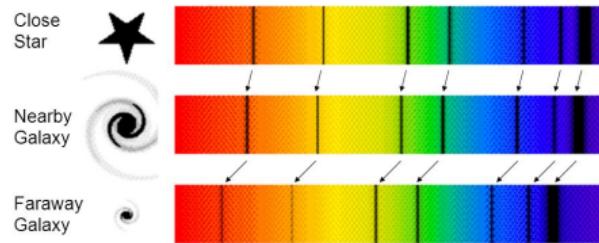
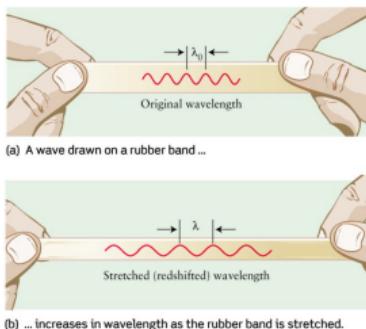
- La luz de estrellas y galaxias que observamos corresponden solo a una pequeña parte del espectro de la radiación electromagnética

Corrimiento al Rojo Cosmológico del Espectro de Luz

- Efecto Doppler Estándar: modificación de la frecuencia observada de una onda debido a su movimiento relativo al observador:



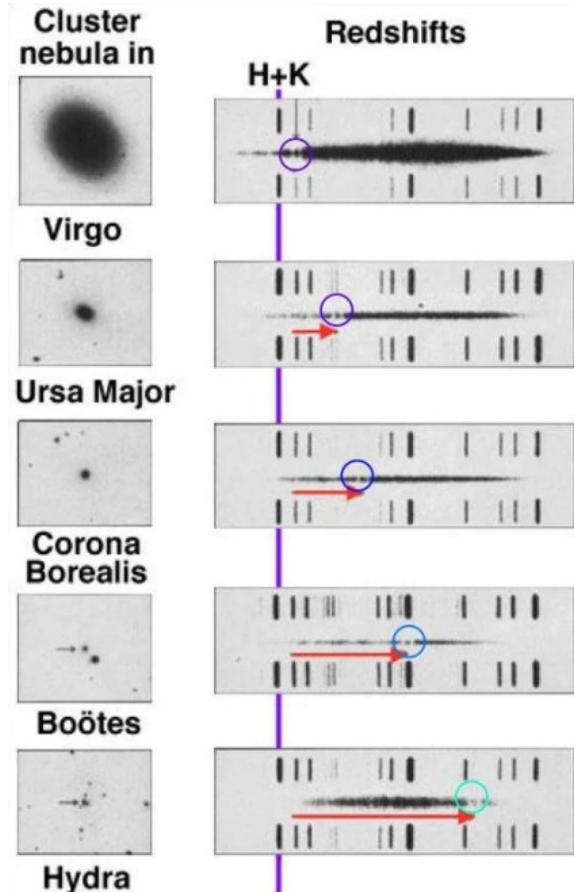
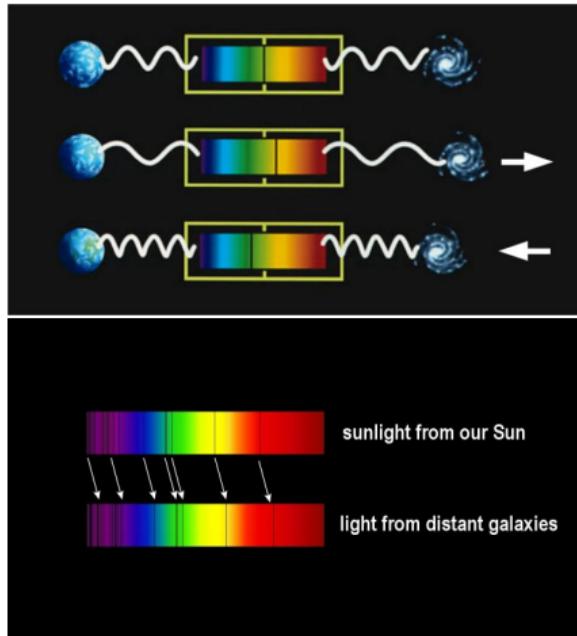
- Efecto Doppler Cosmológico: Corrimiento al Rojo (o Azul) observado en el espectro de Galaxias debido a la expansión (o compresión) del espacio:



The bigger the shift, the faster the light source is moving.

Slipher (1915): El Universo se expande

- Vesto Slipher: la luz que recibimos de muchas galaxias está desplazada hacia el rojo (*redshift* en inglés) → se están alejando de nosotros!
- ¡El Universo se expande!

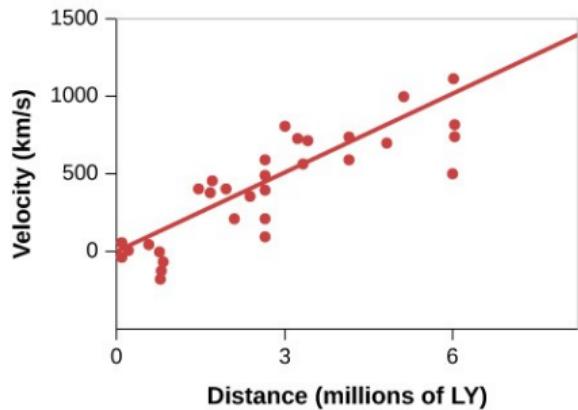


Hubble (1929): El Universo se Expande y tiene un Origen

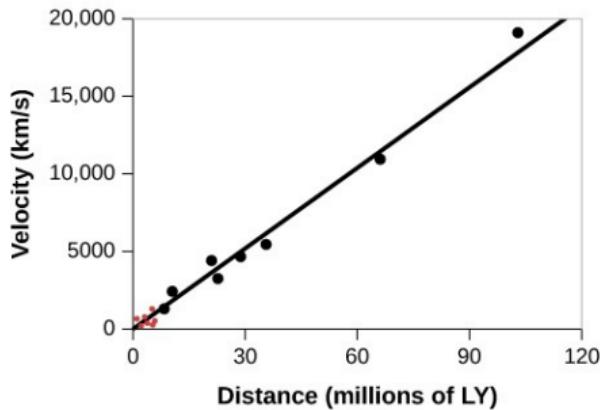


- Edwin Hubble (1889-1953): Combina las mediciones de velocidad de Slipher con sus mediciones de la distancia a la que están esas galaxias (usando estrellas variables llamadas *Ceféidas*) → la velocidad es proporcional a la distancia!

Hubble's Data (1929)

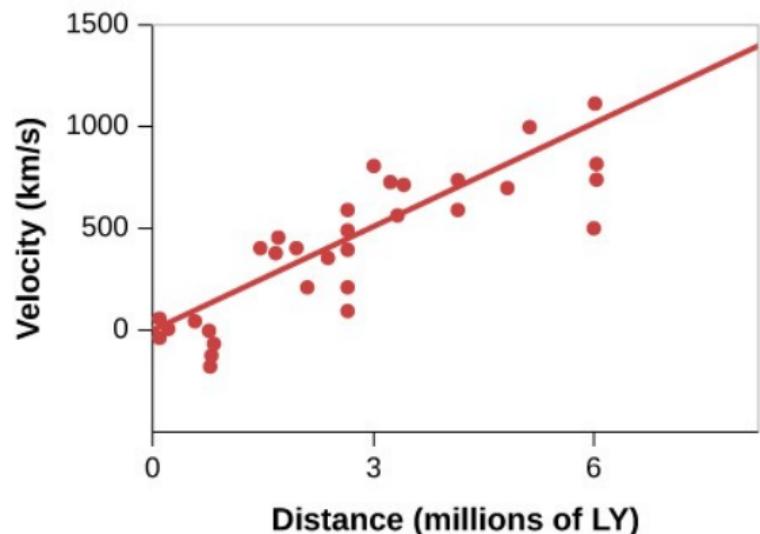


Hubble and Humason (1931)

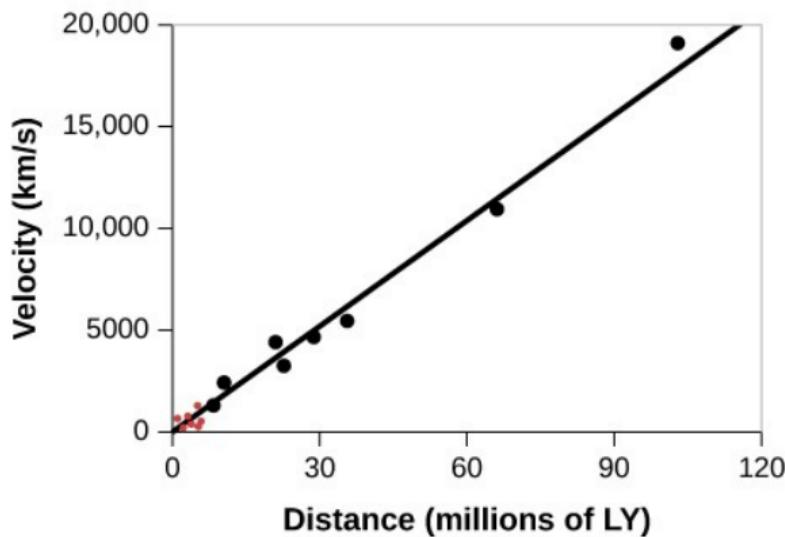


Hubble (1929): Constante de Hubble

Hubble's Data (1929)



Hubble and Humason (1931)

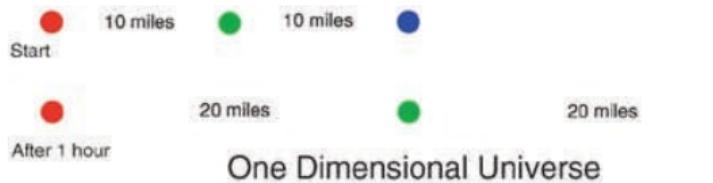


Ley de Hubble: la velocidad de recesión es proporcional a la distancia

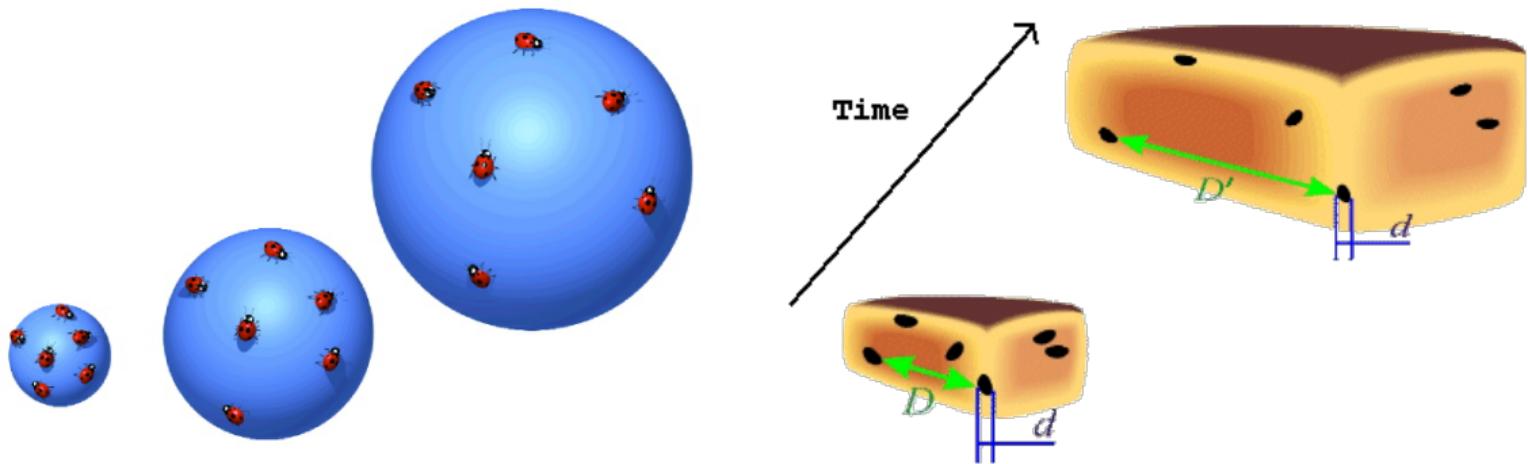
- velocidad de recesión = $H_0 \times$ distancia
 - Esto se aplica a objetos muy lejanos en el universo (eg: dos galaxias cercanas se pueden estar acercando debido a la fuerza atractiva de la gravedad)
- H_0 es la llamada constante de Hubble

Hubble (1929): El Universo se expande

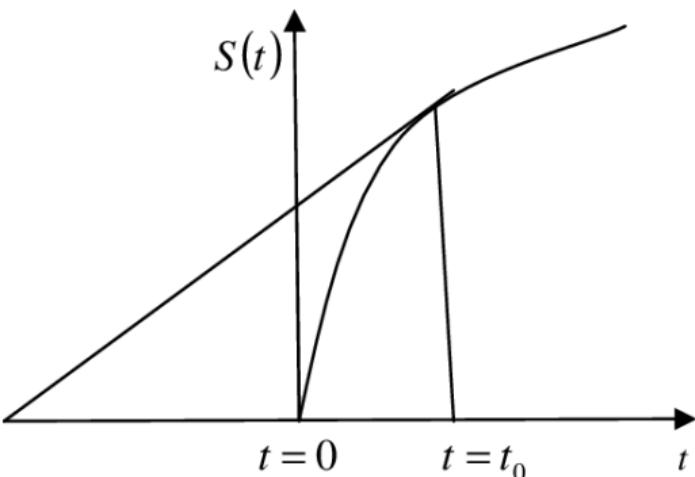
- La ley de Hubble implica que el universo se expande de manera homogénea.
 - Solo el espacio entre las galaxias de expande, las galaxias en si no se mueven respecto al espacio.



- Analogías:



El Big Bang: el Inicio del Universo

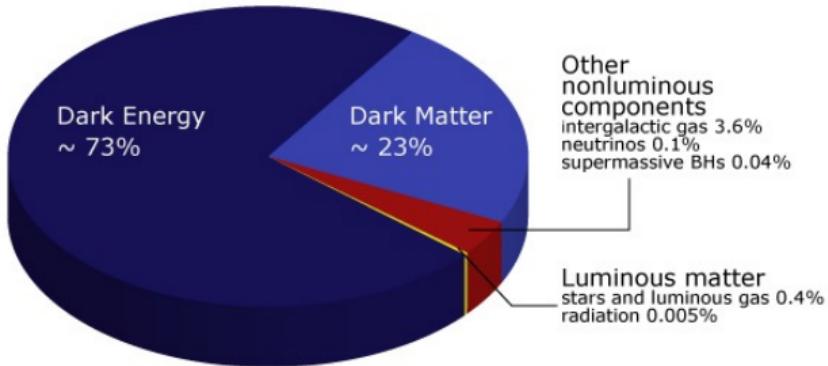


- A partir de la constante de Hubble H_0 se puede hacer una estimación de la edad del universo
- El Universo se originó en un evento llamado Big Bang hace unos 13.800 millones de años
- El evento del Big Bang ocurrió en un momento dado del tiempo pero no en un sitio específico del espacio (no fue una "explosión"!).

1. Introducción Histórica a la Cosmología

1.5. La Materia Oscura

La Materia Oscura

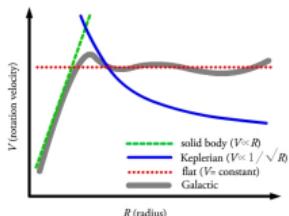
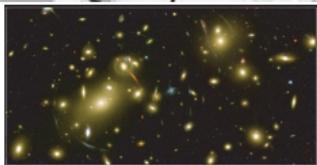


- ¿Qué es la materia oscura?
 - Es materia que no emite ningún tipo de radiación electromagnética (como la luz).
 - No interacciona de ninguna manera con la radiación y es completamente transparente en todo el espectro electromagnético.
 - El nombre "materia oscura" es desafortunado; un nombre más apropiado sería "materia transparente o invisible"
 - Es materia que no es:
 - Materia normal (bariónica)
 - Neutrinos
 - Agujeros Negros
 - La composición de la materia oscura se desconoce. Es uno de los grandes enigmas de la astronomía moderna.
 - El 85% de la materia en el universo es materia oscura!

La Materia Oscura: Evidencia Experimental



¿Cómo sabemos que la Materia Oscura Existe?

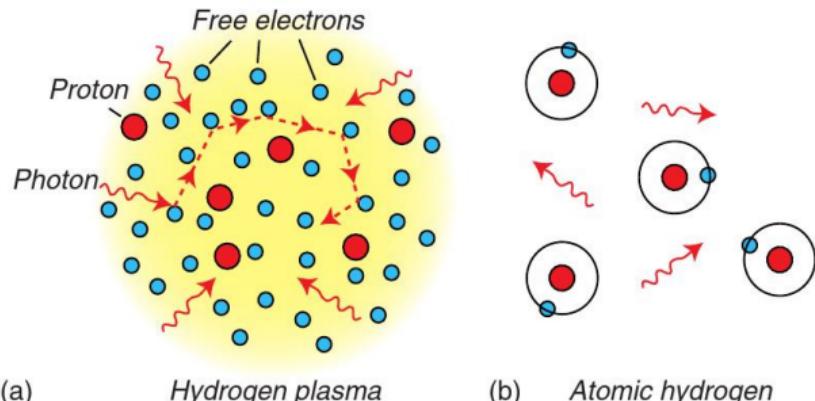


- La existencia de la materia oscura se puede inferir a partir de sus efectos gravitacionales en la materia visible (por ejemplo en las estrellas o las galaxias), así como en las anisotropías del fondo cósmico de microondas presente en el universo.
- Las evidencias experimentales incluyen:
 - Estudios de Fritz Zwicky (1898-1974) en 1933 del movimiento de galaxias en el cúmulo "Coma" de galaxias (aplicación del teorema del Virial)
 - Estudios de Vera Rubin (1928-2016) en los 1960s y 1970s de las curvas de rotación de estrellas en galaxias espirales
 - Lentes gravitacionales a partir de los años 1980s
 - Anisotropías del fondo de radiación cósmica por los satélites WMAP en 2003–12 y más precisamente por la misión Planck en 2013–15.

1. Introducción Histórica a la Cosmología

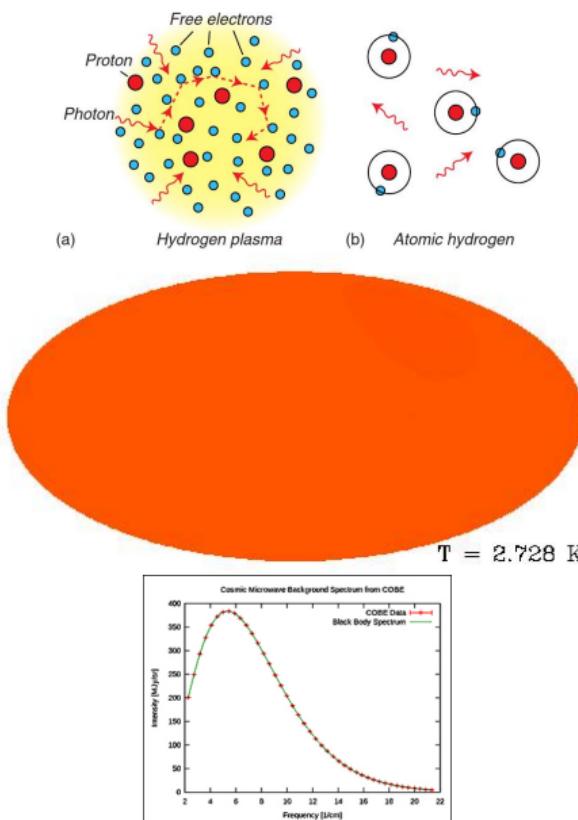
1.6. Radiación del Fondo Cósmico

Gamov 1948: Predicción de la Radiación del Fondo Cósmico



- El físico George Gamow (1904-1968) fue el primero en considerar de manera teórica en 1948 la evolución del universo primitivo, muy poco tiempo después del Big Bang.
- Gamow se dio cuenta que:
 - Durante el primer período posterior al evento del Big Bang el universo era opaco; compuesto por un plasma ionizado de protones, neutrones y electrones
 - A medida que el Universo se expande también se enfria.
 - Hay un momento en el cual los protones, neutrones y electrones que componen el plasma forman átomos de H y He (este evento se llama "recombinación")
 - En este momento el Universo se transforma en transparente, resultando en una radiación homogénea y de características muy particulares que cubre todo el universo.

Gamov 1948: Recombinación y Radiación del Fondo Cósmico



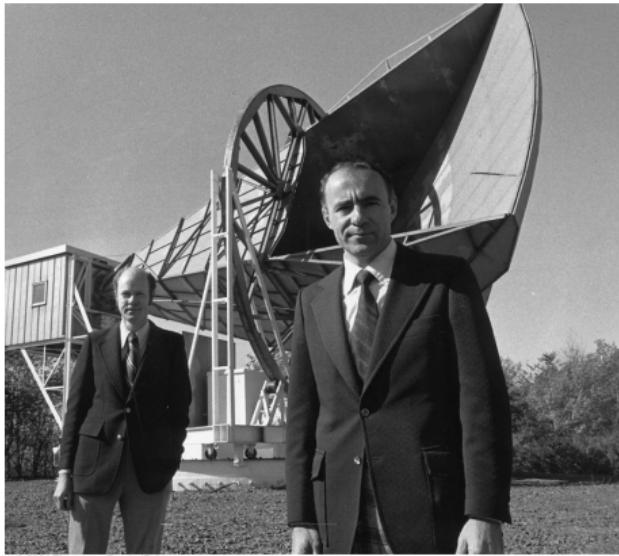
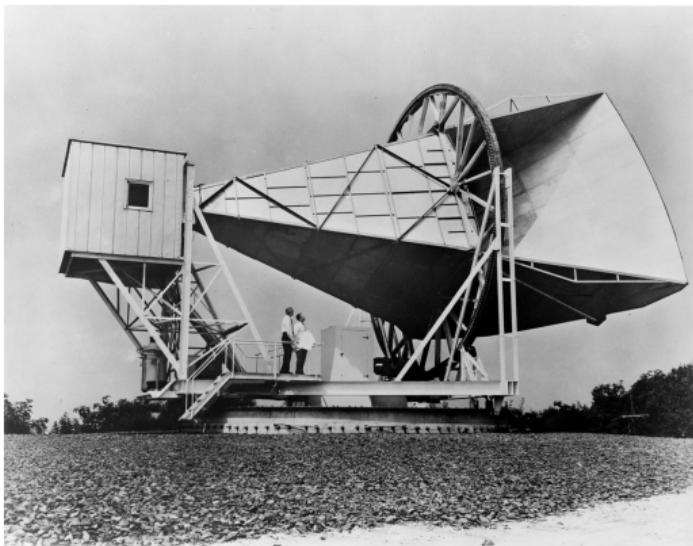
● Recombinación:

- El universo se va enfriando con el paso del tiempo hasta que 380.000 años después del Big Bang el universo tiene la misma temperatura que la superficie de una estrella (una enana roja de unos 3000 °K) y en este momento los electrones se recombinan con los núcleos dejando libre el paso para los fotones.

● Radiación de Microondas del Fondo Cósmico:

- Un mar de fotones inunda el universo. Esta radiación es lo que queda del resplandor de la gran explosión original!
- La radiación resultante es equivalente a la irradiada por una enana roja
- Debido al corrimiento al rojo cosmológico esta radiación nos llega como microondas
- La recombinaión y emisión de la radiación del fondo cósmico ocurre 380.000 años después del Big Bang

Penzias y Wilson 1963: Descubrimiento de Radiación de Fondo



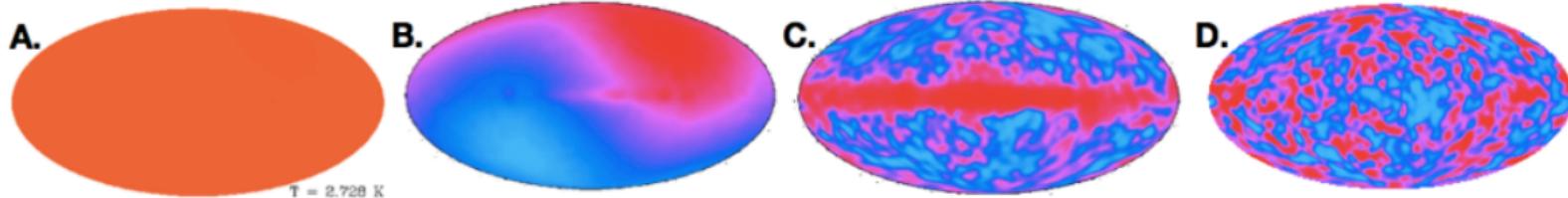
- Penzias y Wilson en 1963 miden una Radiación de Microondas homogénea en todas las direcciones.
- La radiación medida por Penzias y Wilson corresponde a una temperatura de $2,7^{\circ}\text{K}$.
- A partir de este descubrimiento, el modelo del Big Bang es considerado el modelo prevalente de la cosmología moderna.

1. Introducción Histórica a la Cosmología

1.6. Radiación del Fondo Cósmico

Fluctuaciones de la Radiación de Microondas

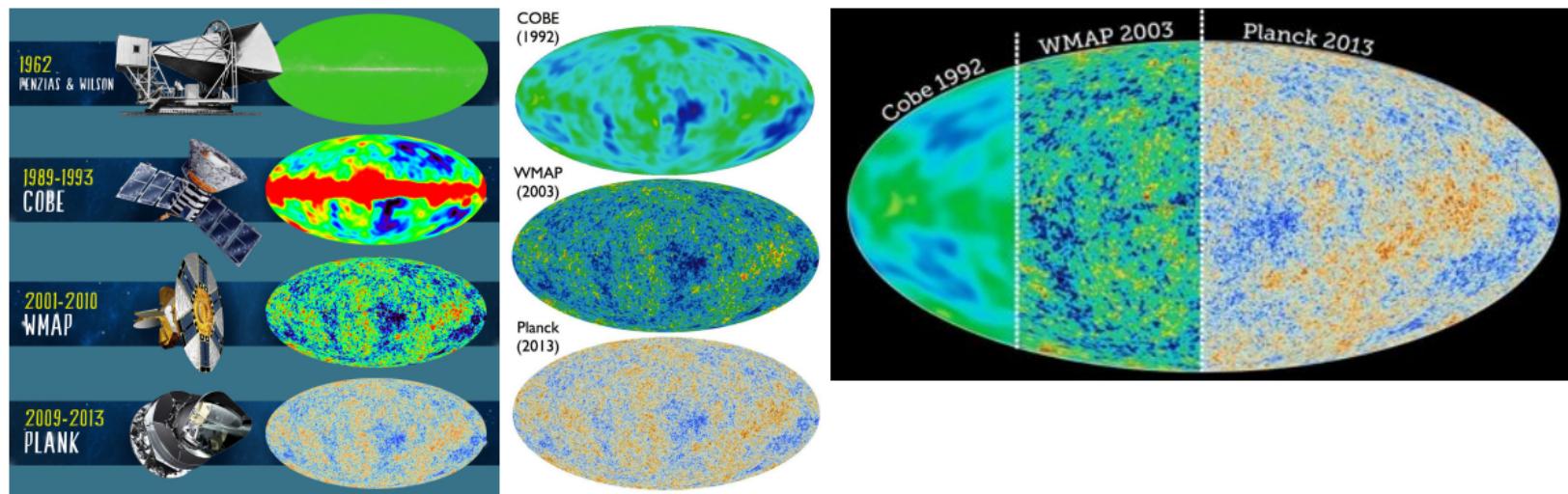
La Radiación Cósmica de Fondo y sus Ondulaciones



- La radiación de fondo cósmica es muy homogénea y representa una "fotografía" de la distribución de materia (normal y oscura) en una época muy temprana del universo
- Las fluctuaciones alrededor de los 2,7 °K son muy pequeñas (la variación máxima entre dos direcciones cualquiera es como máximo 1/100.000)
- ¡Las fluctuaciones nos proveen información esencial sobre la edad temprana del universo!
- La mejor manera de estudiar el fondo de radiación cósmica es desde el espacio con satélites ya que la atmósfera absorbe parte de la radiación de microondas.

La Radiación Cómica de Fondo y sus Ondulaciones

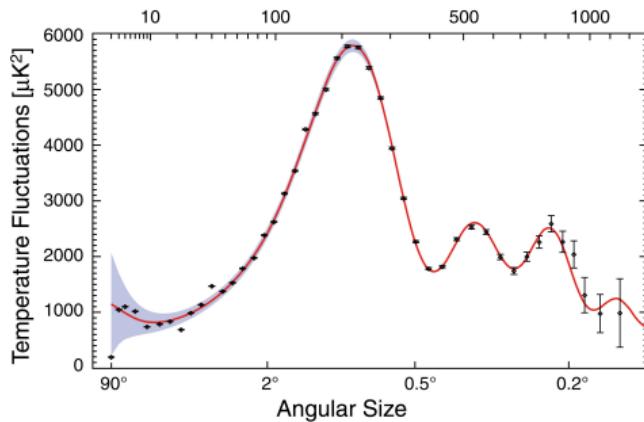
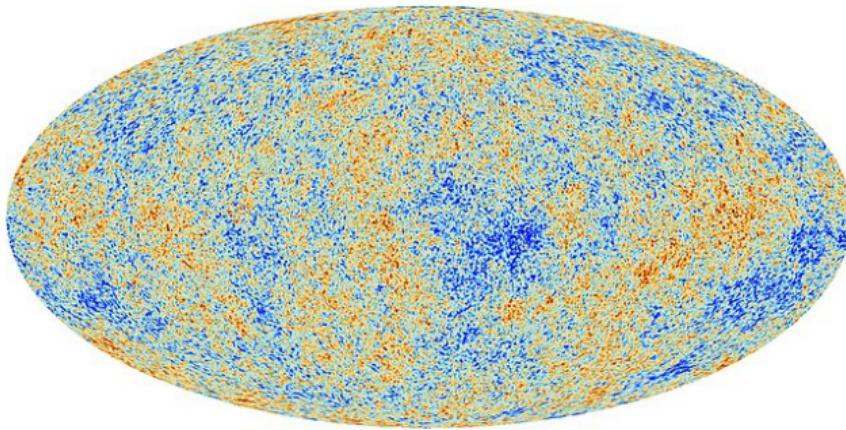
Los satélites y sus mediciones de las fluctuaciones de la radiación de fondo cósmica:



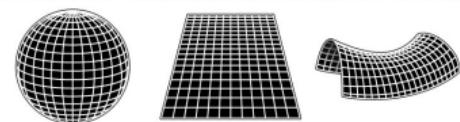
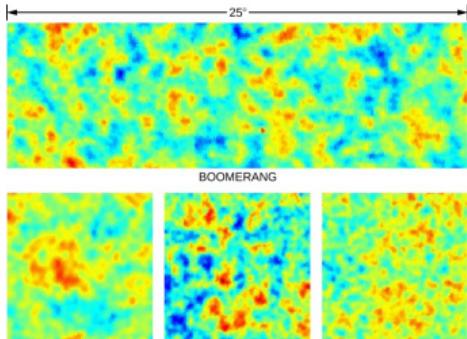
- Experimentos:

- 1963 Penzias y Wilson (antena terrestre)
- 1992 COBE (Satélite NASA)
- 2003 WMAP (Satélite NASA)
- 2013 Planck (Satélite ESA)

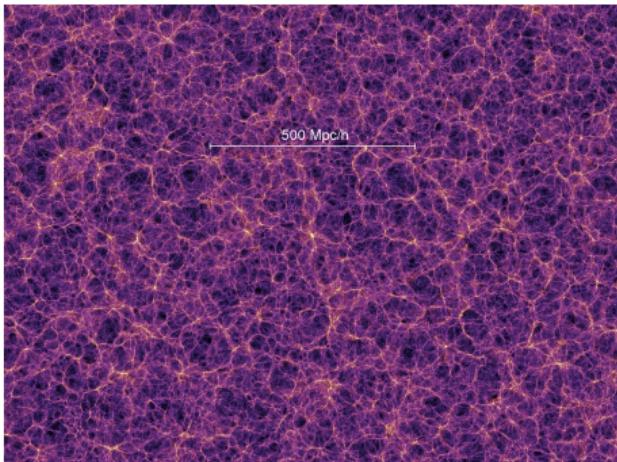
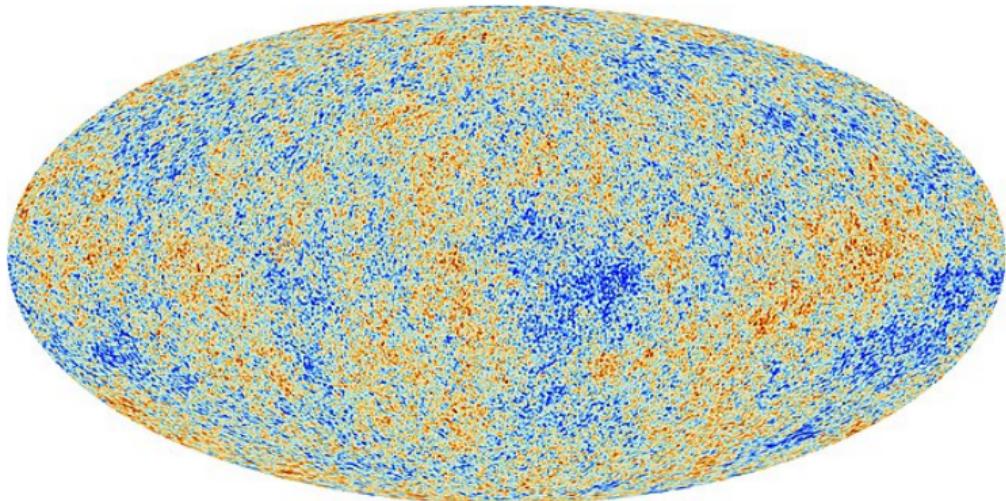
La Radiación Cósmica de Fondo y sus Ondulaciones



- Las mediciones de los satélites permiten estimar los parámetros cosmológicos como:
 - Densidad de Materia ($\Omega \approx 1 \rightarrow$ universo plano!)
 - La cantidad de Materia y Energía "normal"
 - La cantidad de Materia Oscura
 - La cantidad de Energía Oscura
- Estas mediciones han transformado en los últimos 30 años la cosmología de una ciencia especulativa en una ciencia de precisión!



La Radiación Cósmica de Fondo y sus Ondulaciones

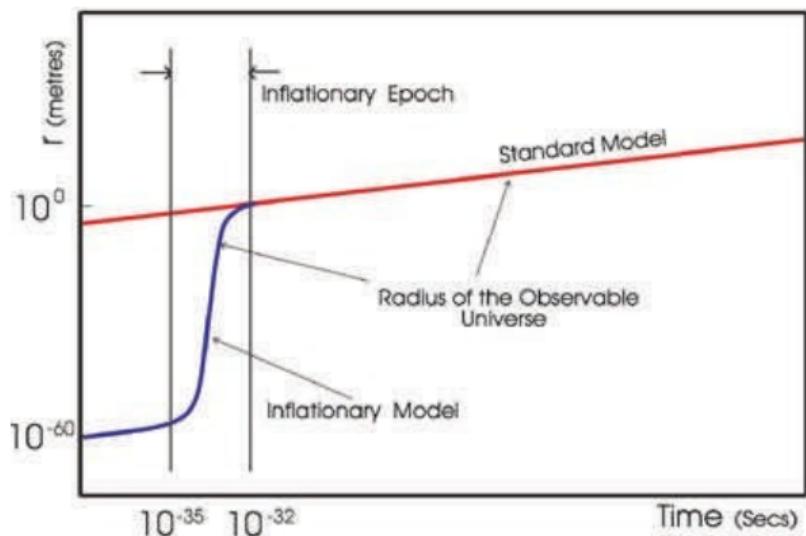


- Correlación entre las fluctuaciones del fondo de radiación de microondas y la "espuma galáctica"

1. Introducción Histórica a la Cosmología

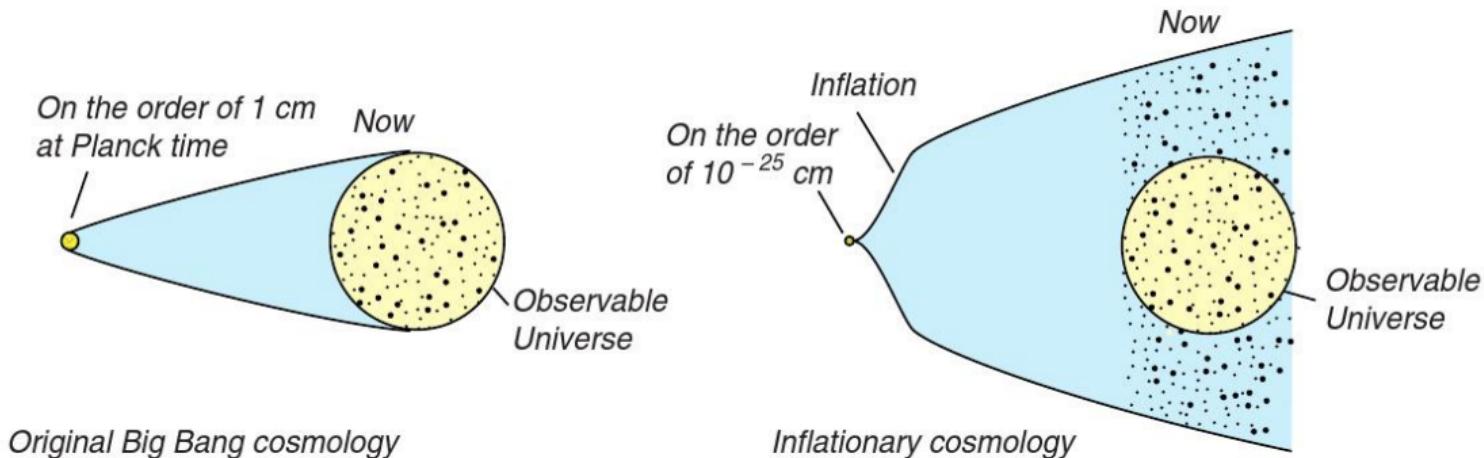
1.7. La Inflación Cósmica

Guth 1979: Teoría de la Inflación Cósmica



- En 1979 Alan Guth propone un mecanismo llamado **inflación cósmica** para:
 - explicar la razón por la cual el universo es aparentemente plano (i.e. $\Omega = 1$)
 - proponer una razón física para las variaciones de densidad observadas en el Universo.
- Mecanismo de la Inflación Cósmica:
 - Poco después del Big Bang ocurre la llamada "Inflación Cósmica" en la cual el universo se expande de manera extremadamente rápida
 - La inflación cósmica solo dura una fracción minúscula de un segundo.
 - Durante la inflación el universo se expande a una velocidad muy superior a la de la luz.

Guth 1979: Teoría de la Inflación Cósmica



Original Big Bang cosmology

Inflationary cosmology

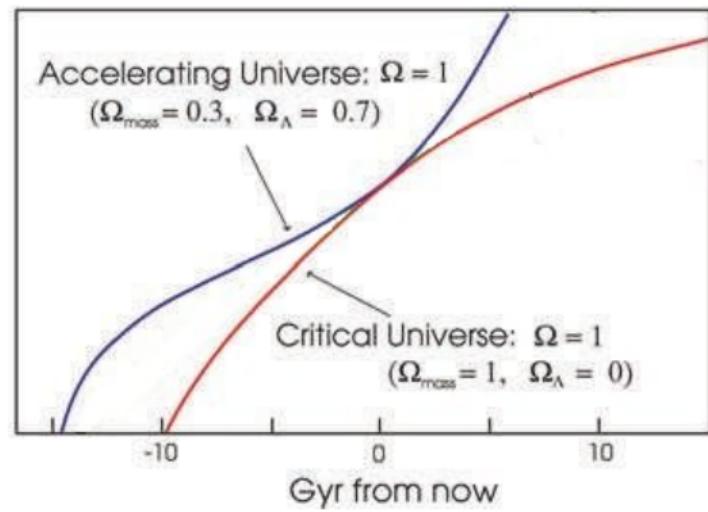
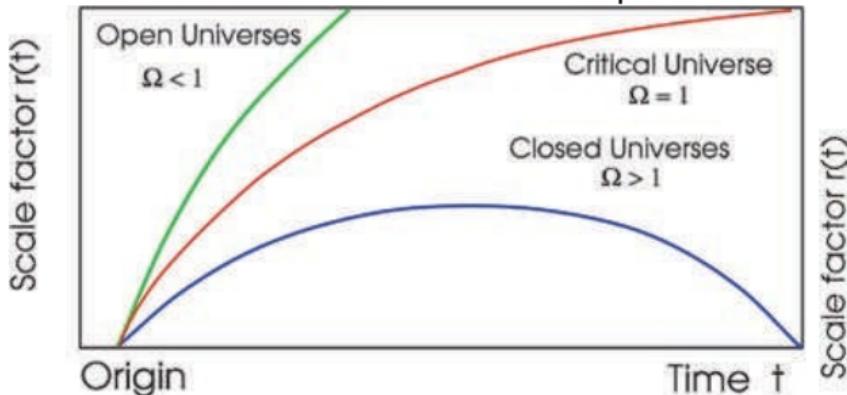
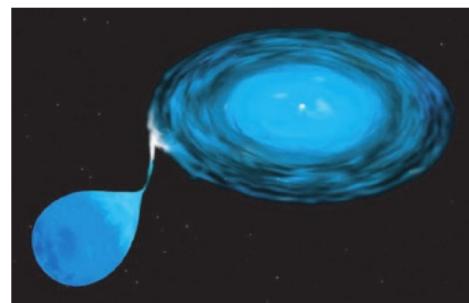
- Al empezar el período de inflación cósmica, el universo tiene el tamaño de un protón
 - Por lo tanto está sujeto a las leyes de la cuántica, sujeto a fluctuaciones cuánticas
- Al final del período de inflación el universo tiene aproximadamente un diámetro de 1 metro.
- Las fluctuaciones cuánticas presentes en el universo pre-inflación pasan a tener un tamaño macroscópico.
 - ¡Estas variaciones de densidad quedan fijadas y darán lugar a los cúmulos de galaxias y demás grandes estructuras que observamos en nuestro universo actual!

1. Introducción Histórica a la Cosmología

1.8. La Energía Oscura y la Expansión Acelerada del Universo

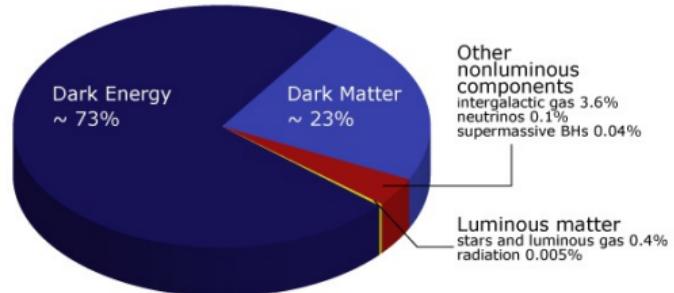
Perlmutter, Riess y Schmidt 1998: Expansión Acelerada

- Descubrimiento de la expansión acelerada del universo
 - En el año 1998 dos grupos distintos descubren que el universo se expande a una velocidad cada vez mayor.
 - La expansión del universo ha ido acelerándose desde hace unos 6.000 millones de años.
 - Observaron supernovas de tipo 1a (sistemas binarios, donde una de las dos estrellas es una enana blanca).
 - En 2011 Saul Perlmutter, Adam Riess y Brian Schmidt obtienen el Nobel de Física por este descubrimiento

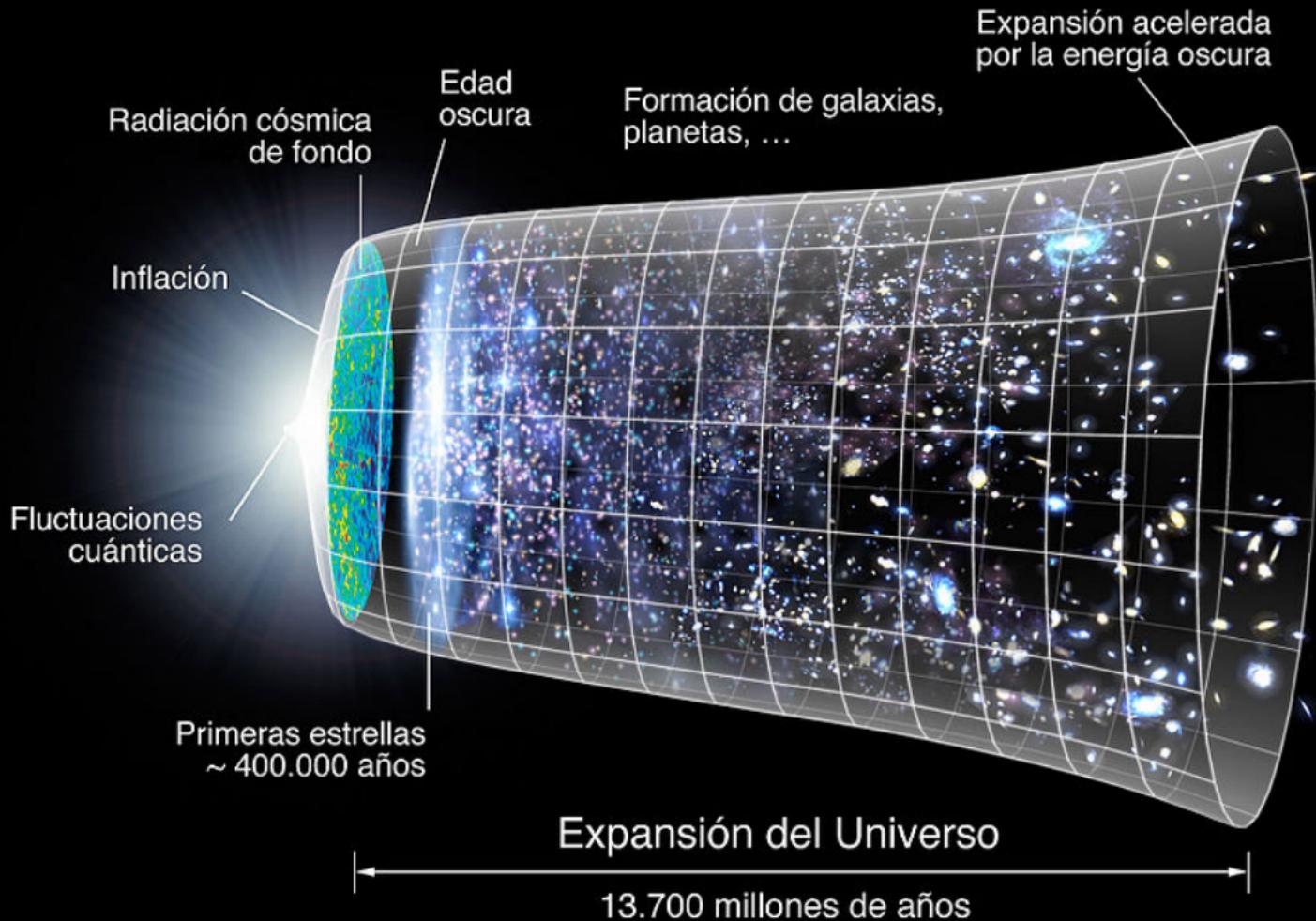


La Expansión Acelerada del Universo y la Energía Oscura

- La energía oscura actúa como una especie de "anti-gravedad" que hace que objetos masivos se repelan (con la gravedad siempre se atraen).
 - La energía oscura solo actúa si los objetos son muy lejanos y es imperceptible para objetos cercanos.
- ¿Qué provoca la expansión acelerada del universo?
- Hay varias hipótesis pero la más frecuente es que es la **energía del vacío** (también llamada constante cosmológica)
 - Es una energía inherente al mismo espacio: Todo volumen de espacio tiene una energía fundamental e intrínseca.
 - Debido a la relatividad general, la energía del vacío tendrá un efecto gravitacional.
 - La existencia de una energía de vacío fue hipotetizada por Einstein hace un siglo. Él la llamó "constante cosmológica"



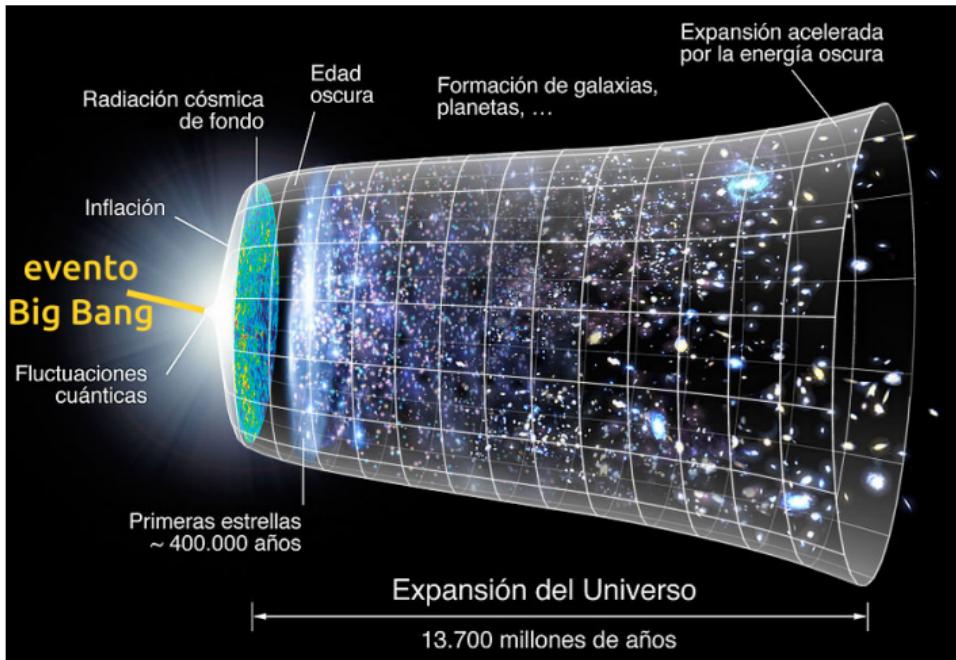
2. Evolución del Universo



2. Evolución del Universo

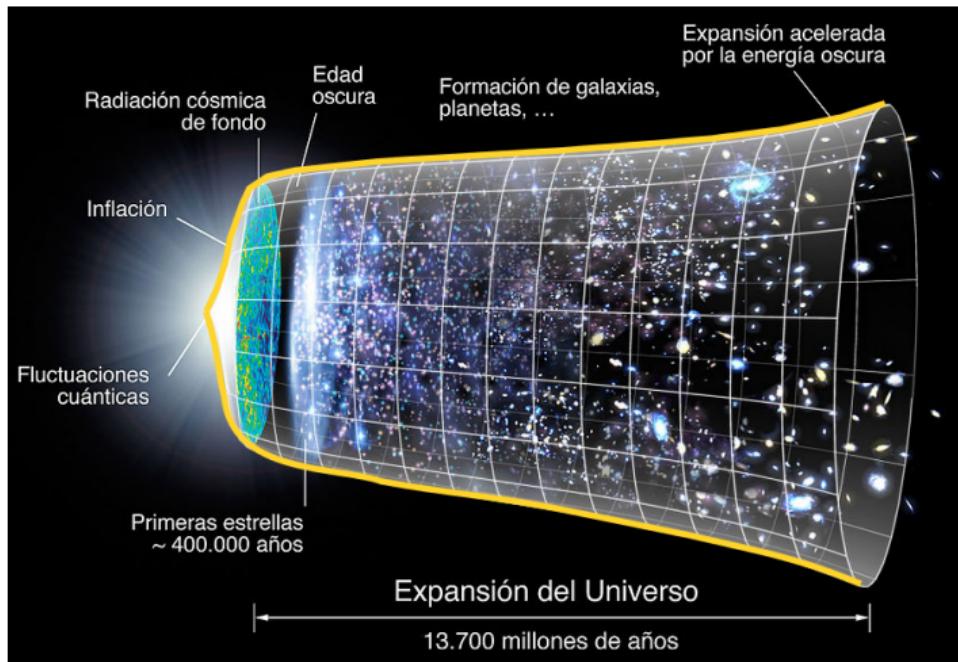
2.1. El Big Bang y el Universo en Expansión

El Origen del Universo: El Big Bang



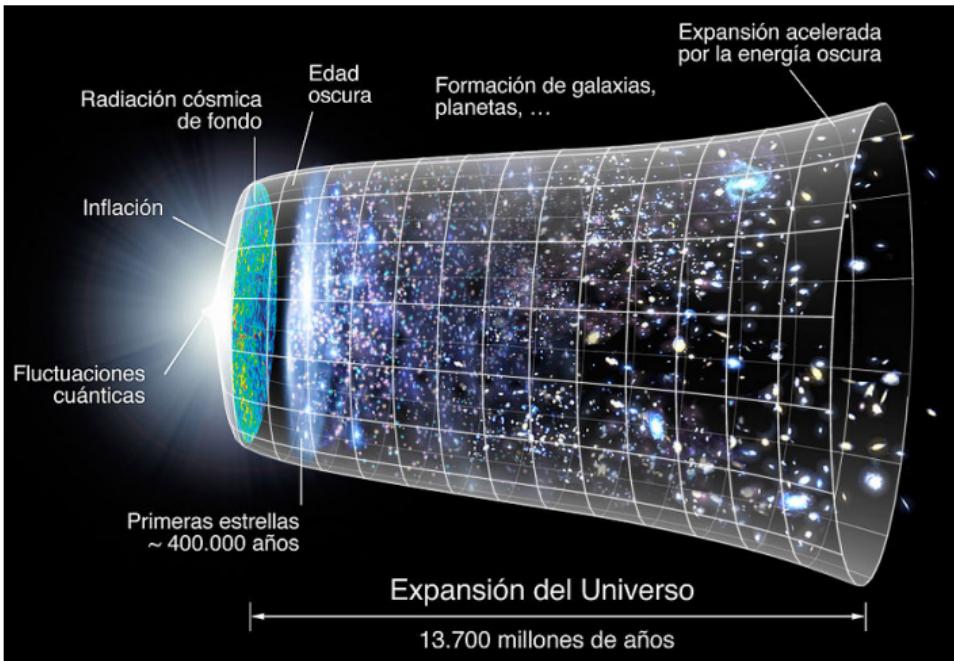
- El Universo se originó en un evento llamado **Big Bang** hace 13.800 millones de años.
- El modelo del Big Bang es la idea de que el universo se expandió y enfrió a partir de un estado anterior muy denso y caliente.
- El evento del Big Bang ocurrió en un momento dado del tiempo pero no en un sitio específico del espacio (no fue una "explosión"!).

Un Universo en Expansión



- El Universo se ha expandido desde el evento del Big Bang
- El modelo del Big Bang es compatible con un universo infinito (¡incluso en el momento de su creación!)

Evolución del Universo: Tamaño del Universo



- Solo podemos observar una parte finita del universo: el llamado **Universo observable**
 - Al ser tanto la velocidad de la luz como la edad del universo finita, solo podemos observar una parte finita del universo
 - Lo mas probable es que el Universo sea infinito!
- ¡El universo no tiene un centro!

Confusiones Típicas sobre el Big Bang: Evento vs. Modelo

Es conveniente diferenciar "evento del Big Bang" de "modelo del Big Bang":

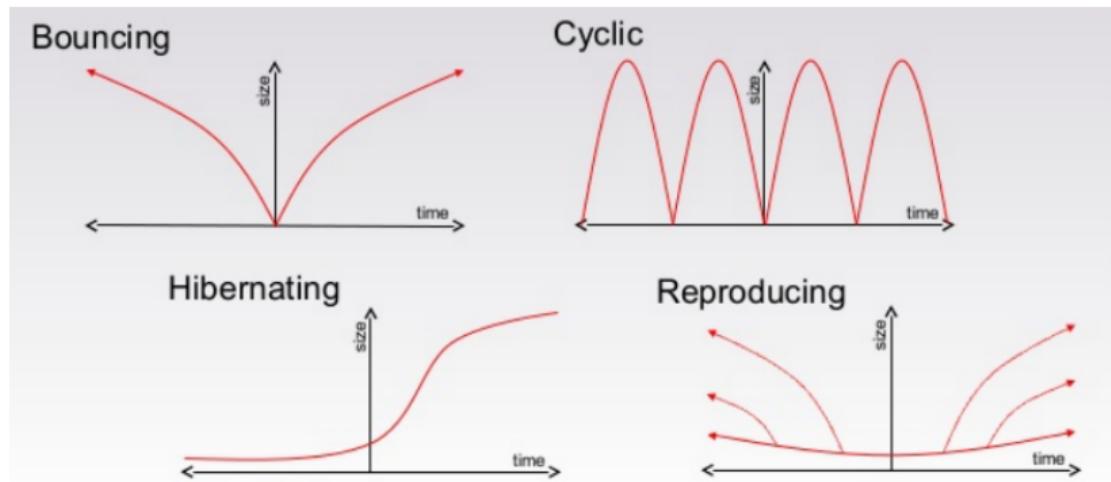
- **Modelo del Big Bang:**
 - El **modelo** del Big Bang es la idea de que nuestro universo se ha expandido y enfriado, habiendo empezado de un estado anterior muy caliente y denso.
 - ¡Hay muchísima evidencia de que esta hipótesis es cierta!
- **Evento del Big Bang:**
 - El **evento** del Big Bang no es un punto en el espacio sino un momento en el tiempo
 - En evento del Big Bang se produce una **singularidad** con infinita densidad y curvatura.
 - Es una hipótesis que no es necesariamente verdadera (se trata de una predicción de la física clásica, ignorando lo que nos dice la mecánica cuántica!)

Hasta donde sabemos, el universo no se expande sobre o en nada.

- La relatividad general de Einstein describe la geometría intrínseca del espacio, y que este puede agrandarse sin que nada exista "afuera".

Confusiones Típicas sobre el Big Bang: Antes del Big Bang

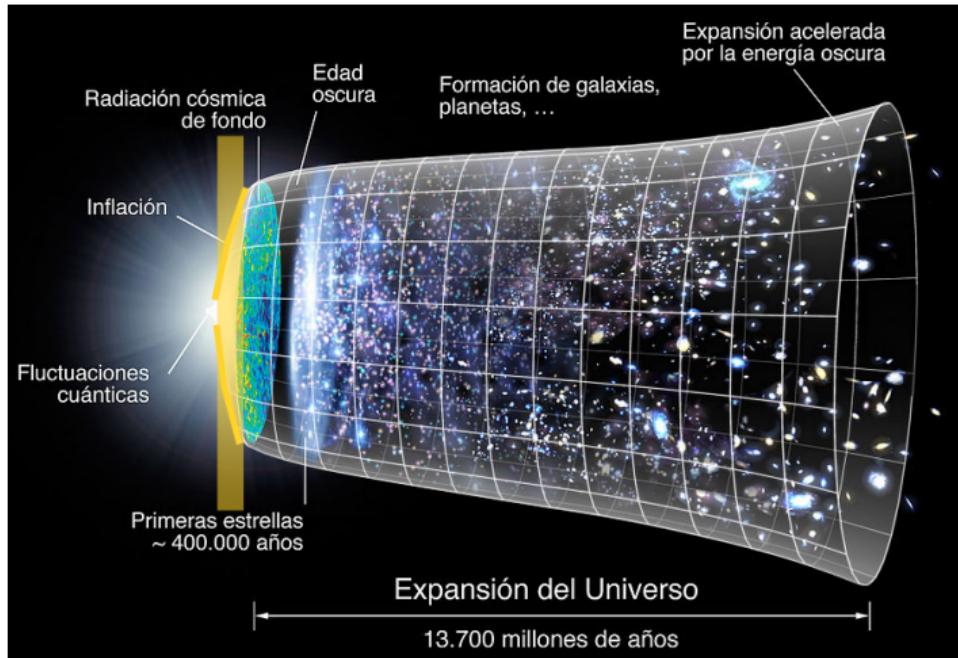
- El Big Bang puede haber sido el comienzo del universo.
- No sabemos a ciencia cierta que hubo antes del Big Bang.
- ¿Qué ocurrió antes del Big Bang? Posibles respuestas:
 - No hay un tiempo anterior al Big Bang! El tiempo comienza con el Big Bang. El concepto de "tiempo" no está definido antes del evento. Es como preguntar ¿qué hay al norte del polo norte?
 - Otras posibilidades:



2. Evolución del Universo

2.2. El Período Inflacionario

Evolución del Universo: 1ra Etapa

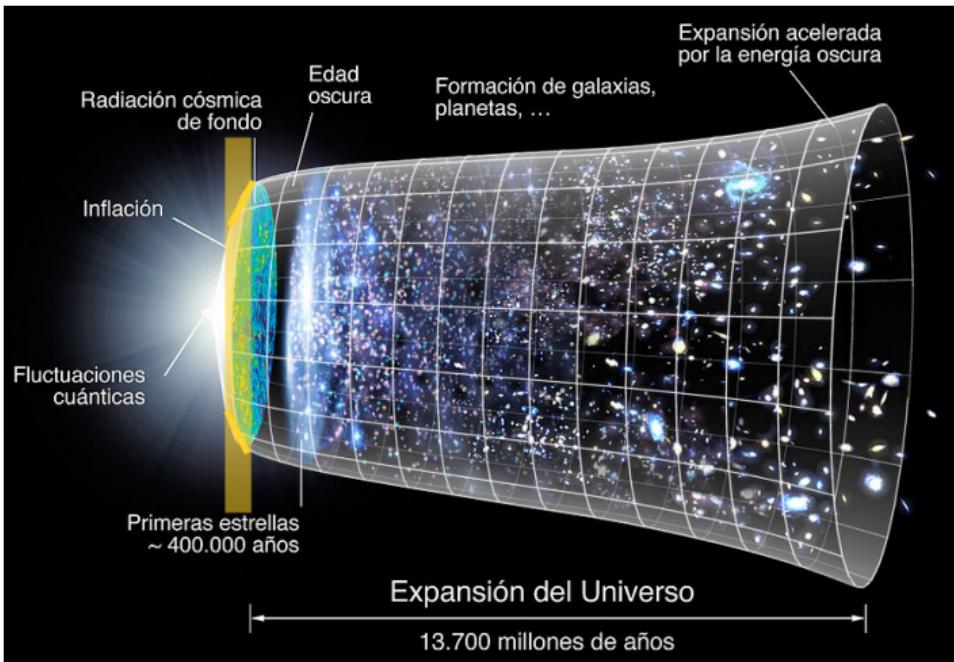


- Poco después del Big Bang ocurre la llamada "**Inflación Cósmica**" en la cual el universo se expande de manera extremadamente rápida (la inflación solo dura una fracción minúscula de un segundo en la cual el universo se expande a una velocidad muy superior a la de la luz)

2. Evolución del Universo

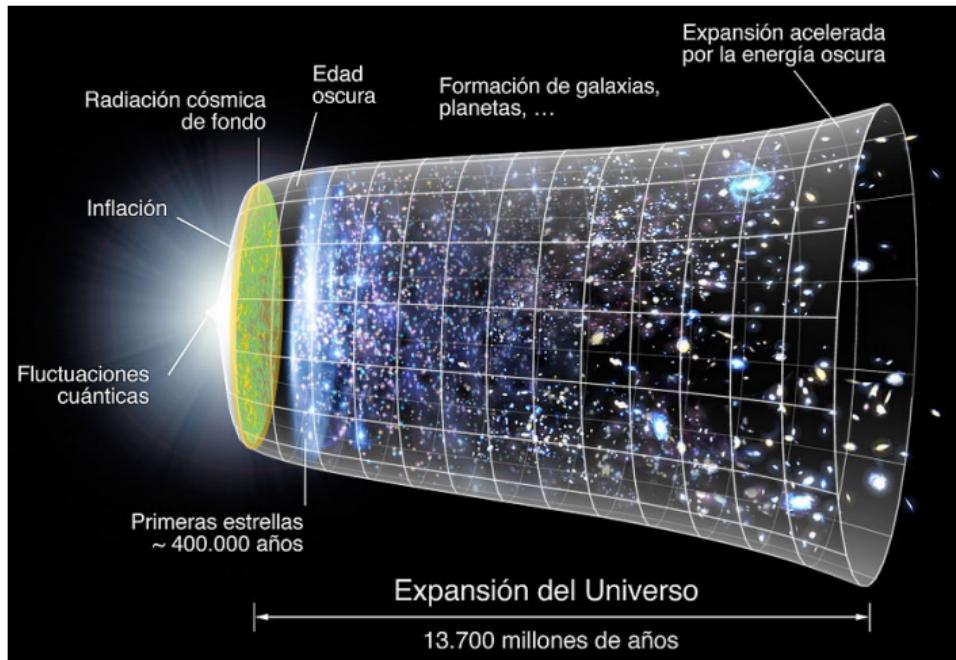
2.3. La Nucleosíntesis y la Radiación del Fondo Cósmico

Evolución del Universo: Nucleosíntesis



- Nucleosíntesis: Durante los primeros segundos se generan los átomos que componen el universo
 - Se generan 75% de Hidrógeno y 25% de Helio.

Evolución del Universo: Radiación del Fondo Cósmico

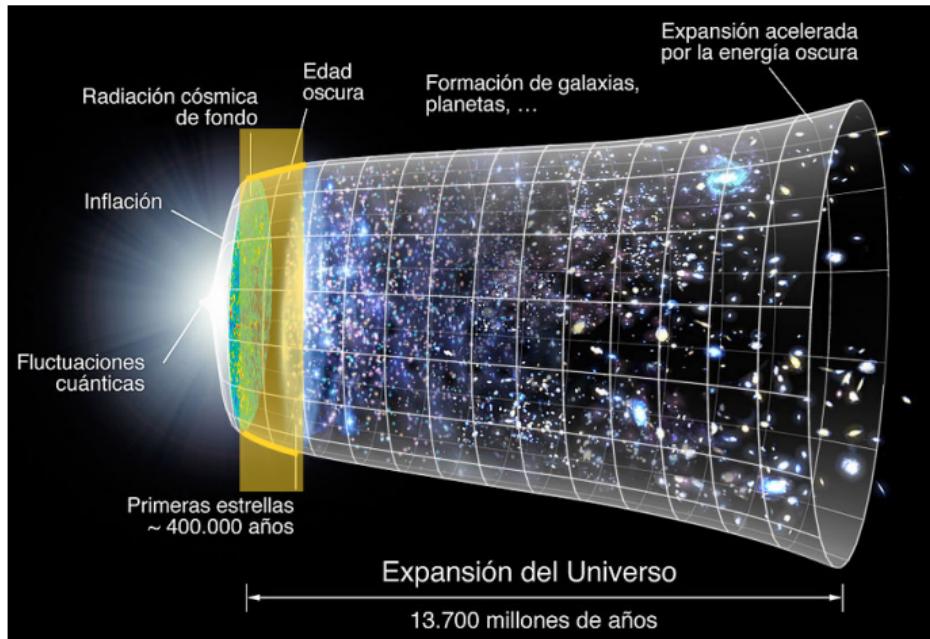


- Hasta los 375.000 años el universo es opaco, pero ese momento se transforma en transparente. Esa "luz fósil" del Big Bang es lo que hoy en día podemos observar y llamamos **Radiación de Microondas del Fondo Cósmico**

2. Evolución del Universo

2.4. La Era Oscura y la Formación de las Estrellas y Galaxias

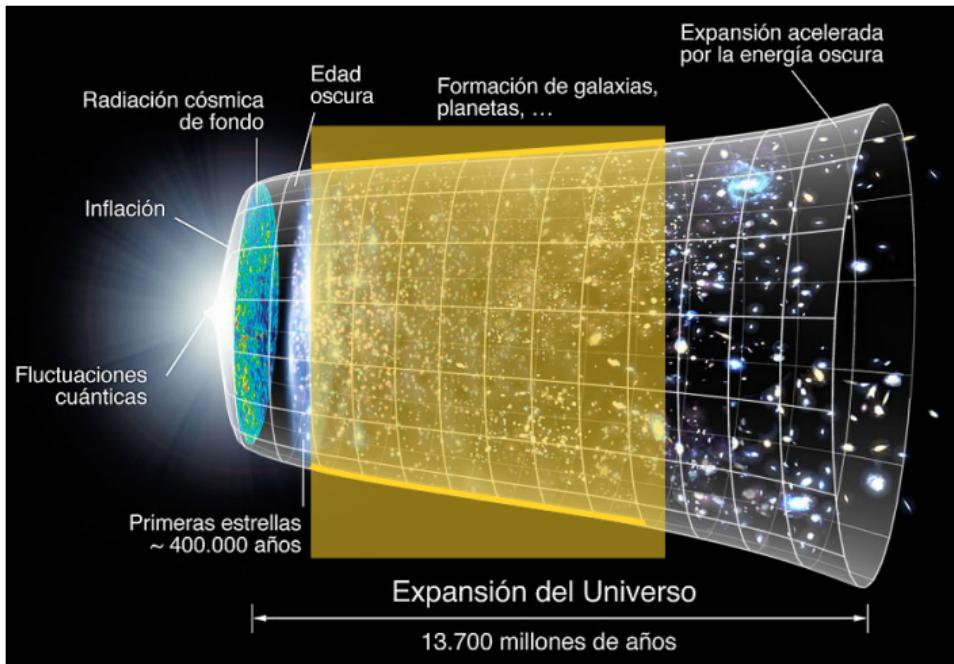
Evolución del Universo: Era Oscura



- **"Era Oscura":**

- Tiempo transcurrido entre el origen de la Radiación de del Fondo Cósmico (375.000 años después del Big Bang) hasta la formación de las primeras estrellas (400 millones de años).
- En este período se observa un universo oscuro, sin radiación (exceptuando la de microondas).

Evolución del Universo: Primeras Estrellas y Galaxias

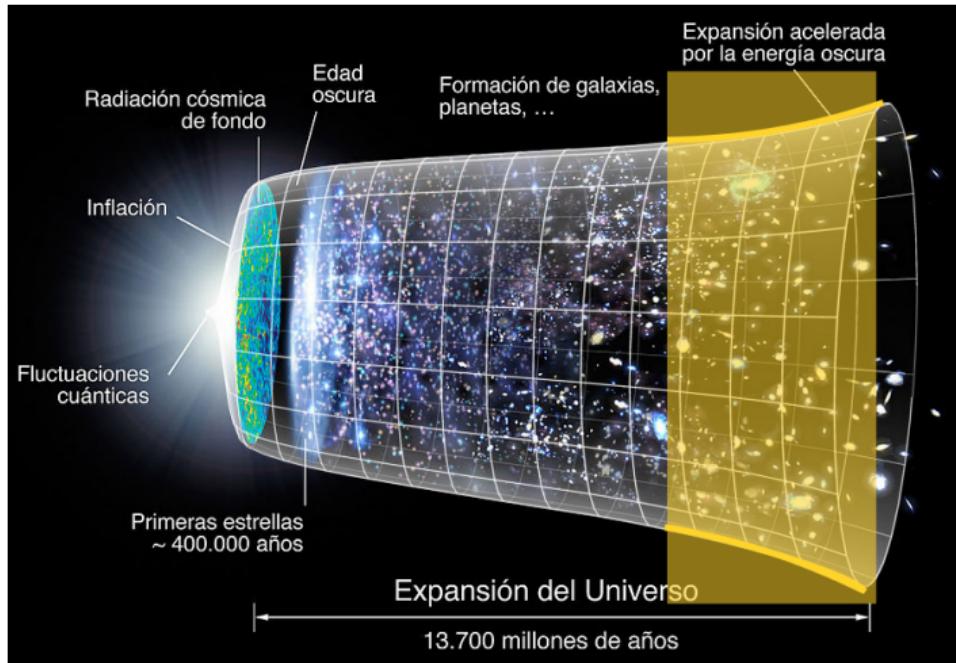


- A partir de 400 millones de años, desarrollo de las primeras estrellas, galaxias, planetas, etc.
 - ~ 9.000 millones de años después del Big Bang: formación del sistema solar

2. Evolución del Universo

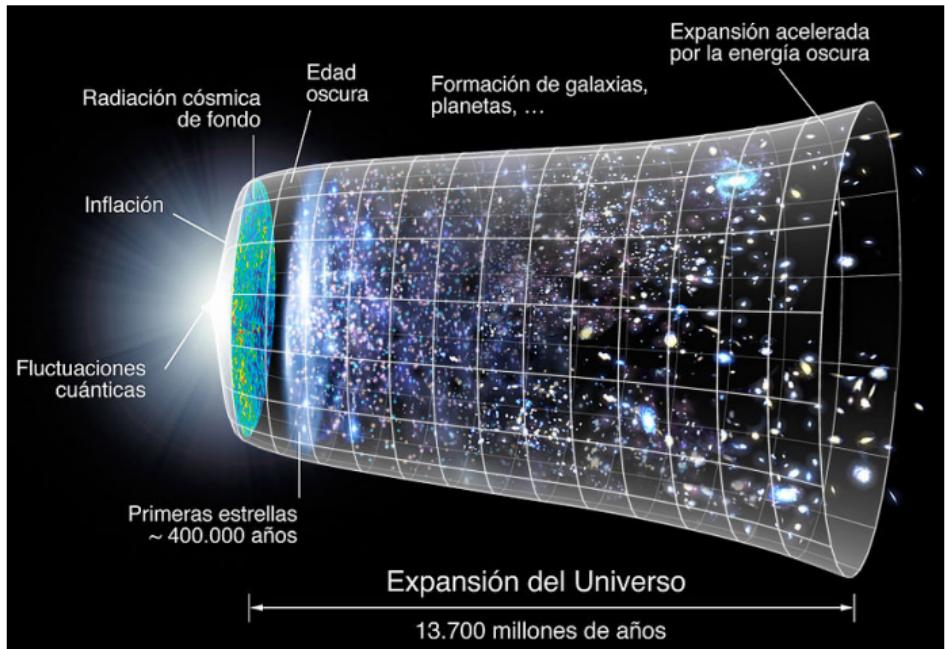
2.5. Expansión Acelerada del Universo y el Futuro

Evolución del Universo: Expansión Acelerada (actual)



- **Era de la Energía Oscura:** Expansión acelerada del Universo.
 - Etapa dominada por la Energía Oscura
 - Incluye el presente

Evolución del Universo: Destino del Universo



● Destino del Universo

- Creemos que el universo se expandirá para siempre
- Las estrellas eventualmente dejarán de existir y el universo pasará a estar dominado por agujeros negros
- Más tarde, los agujeros también decaerán dejando un universo totalmente vacío. Esta es la llamada **muerte térmica** del universo

