

El Universo: Cosmología y Evolución del Universo

Ernesto Nicola

Curso de Iniciación a la Astronomía 2022, 1er trimestre

Palma de Mallorca, 2022-03-31



¿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.

COSMOLOGY MARCHES ON



"El avance de la cosmología"

"¿De dónde viene todo?"

Contenido de la charla

1 Historia de la Cosmología

- Olbers y su Paradoja
- Einstein: Teoría General de la Relatividad
- Lemaître y Friedmann
- Hubble: El Universo se expande
- Materia Oscura
- Radiación de Fondo de Microondas
- Inflación Cósmica
- Energía Oscura

2 Evolución del Universo

- Big Bang y el Universo en Expansión
- Período Inflacionario
- Nucleosíntesis
- Radiación del Fondo Cósmico
- Era Oscura y Primeras Estrellas y Galaxias
- Expansión Acelerada del Universo
- Futuro del Universo

1. Introducción Histórica a la Cosmología

1. Introducción Histórica a la Cosmología

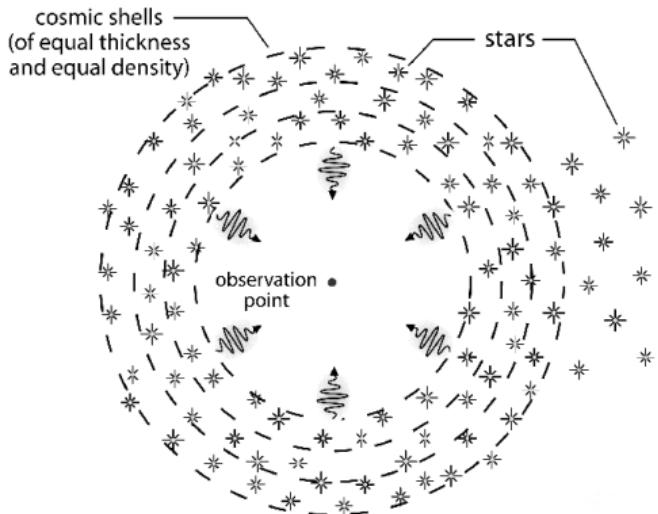
1.1. Cosmología anterior a Einstein: la Paradoja de Olbers

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

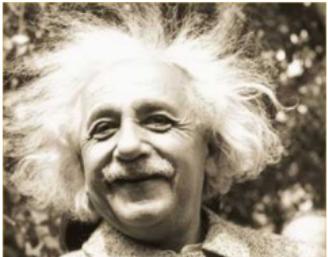


- Razonamiento de la Paradoja de Olbers
 - 1 Suponemos una densidad homogénea de estrellas
 - 2 Podemos pensar que las estrellas se disponen en capas esféricas que nos rodean
 - 3 El número de estrellas en una capa a distancia R debería ser proporcional a la superficie de una esfera de ese radio
 - 4 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.
 - 5 Ambos efectos se compensan y cada capa nos contribuye de manera equivalente al brillo percibido.
 - 6 Al haber infinitas capas el cielo debería ser muy brillante!
- Resolución de la paradoja
 - 1 El universo observable no es infinitamente grande
 - 2 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

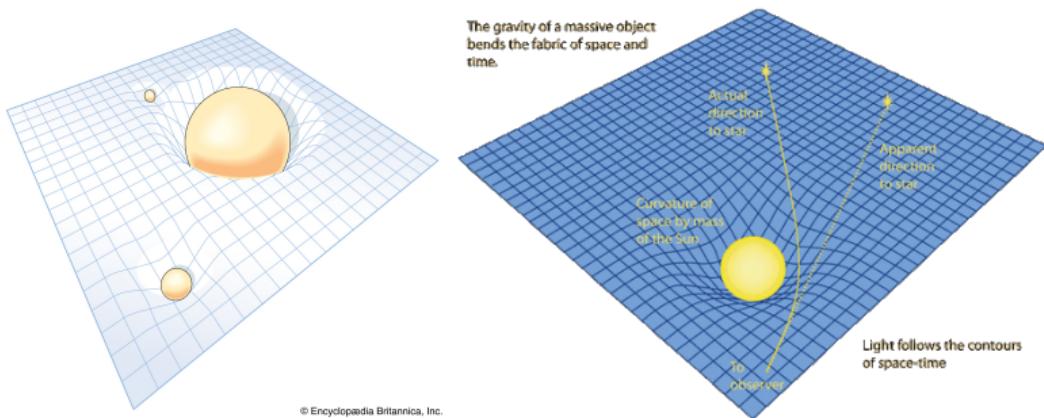
Teoría General de la Relatividad de Einstein



A young Albert Einstein. Photo by Gustav Osterloh (1) (1888–1941). © Friend of Einstein's when he was living in Berlin.

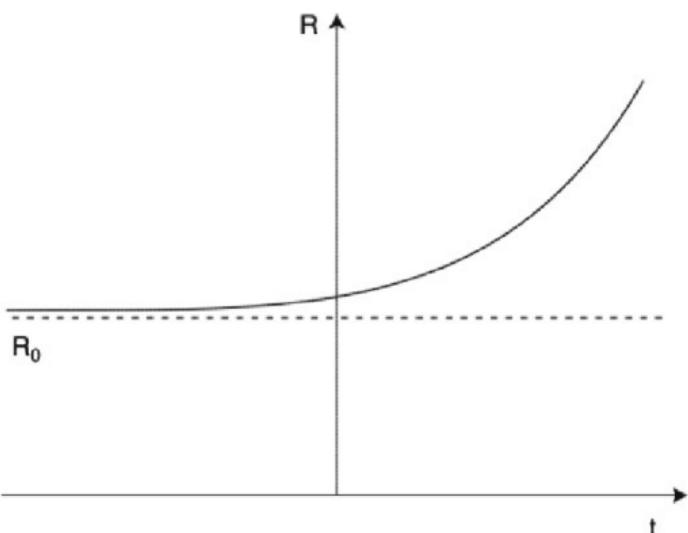
- Albert Einstein en 1916:
Teoría General de la
Relatividad
- La Cosmología moderna
comienza con la Teoría
General de la Relatividad
de Einstein

- 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

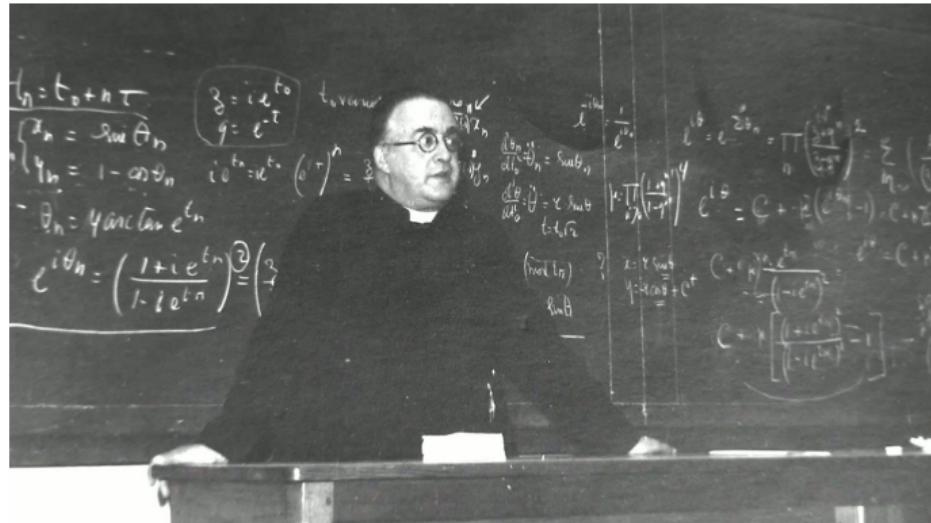
- Einstein se dio cuenta rápidamente que su teoría general de la relatividad podía usarse para predecir la evolución del universo ya que la gravedad es la única fuerza de alcance infinito.
- Asumiendo que el universo era estático (no evolucionaba, siempre había tenido el mismo aspecto que ahora),
 - 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

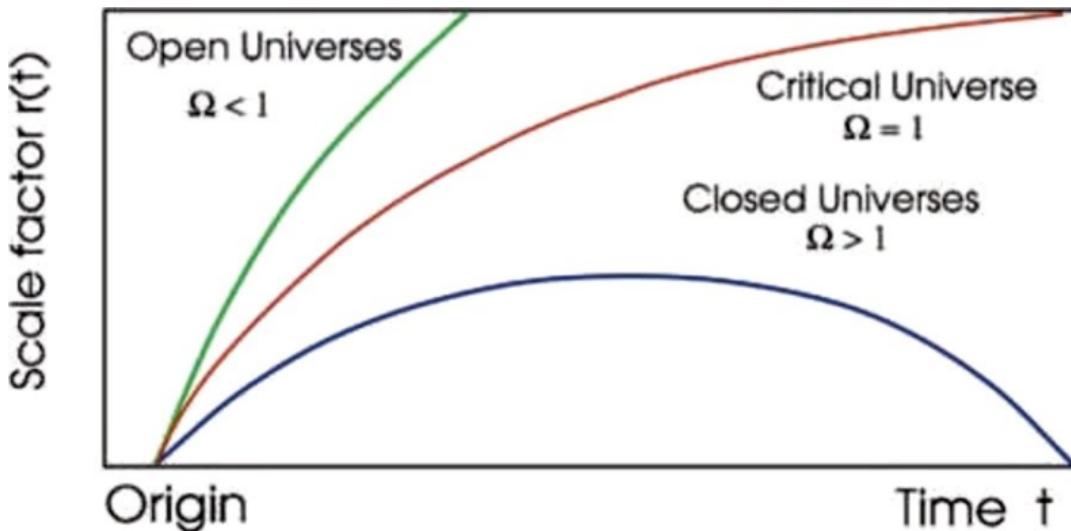
1.3. Modelos Cosmológicos de Lemaître y Friedmann

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

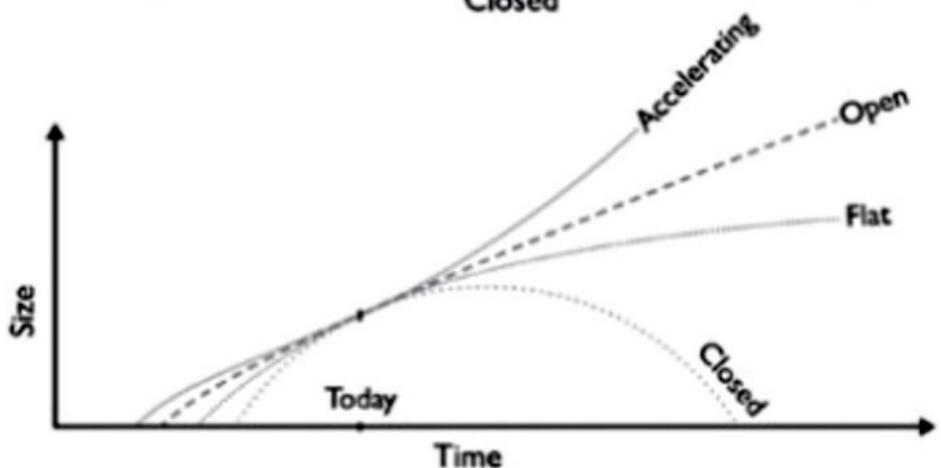
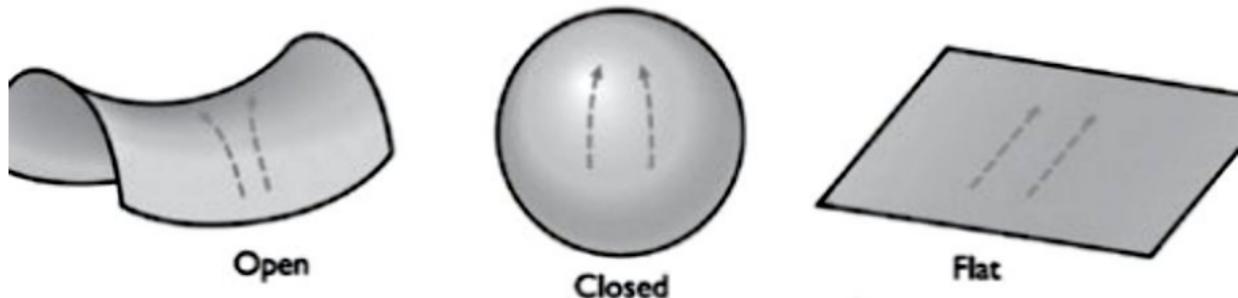
Lemaître y Friedmann predicen la existencia de un Big Bang



- 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")

La Densidad de Materia y la Geometría del Universo

- La densidad de materia Ω determina la geometría del espacio del universo.
 - $\Omega = 1$ 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!



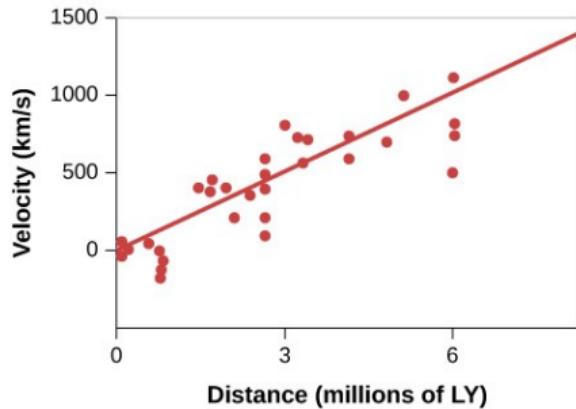
- Vesto Slipher (1875-1969): fue el primero en estudiar la velocidad de galaxias lejanas. Descubrió que muchas galaxias se están alejando de nosotros!
- Primera evidencia que el universo se expande!

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

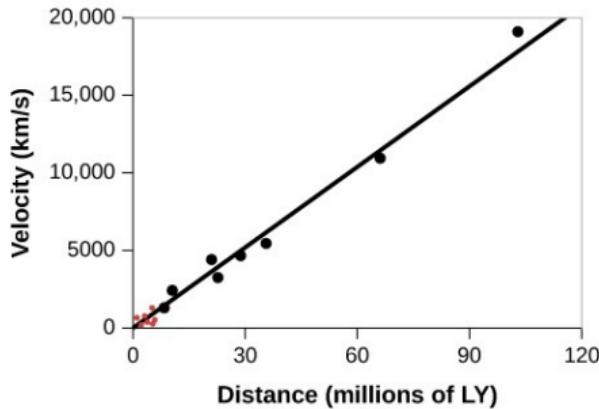


- Edwin Hubble (1889-1953): Combina las mediciones de velocidad de Slipher con sus mediciones de la distancia a la que están esas galaxias (usando estrellas variables llamadas *Ceféidas*) → la velocidad es proporcional a la distancia!

Hubble's Data (1929)

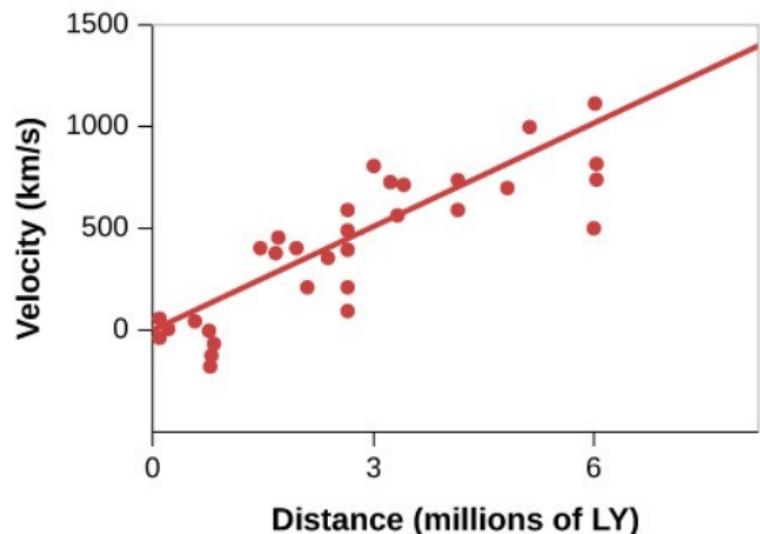


Hubble and Humason (1931)

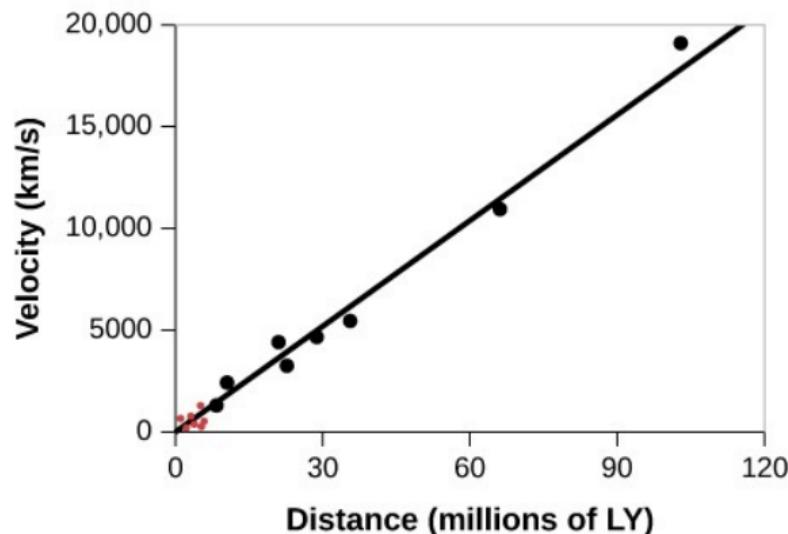


Hubble (1929): Constante de Hubble

Hubble's Data (1929)



Hubble and Humason (1931)

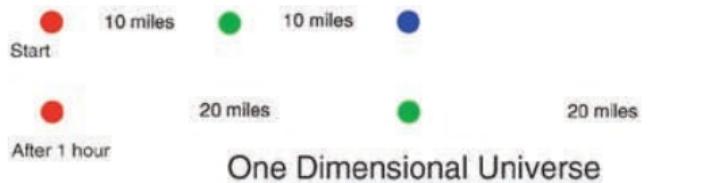


Ley de Hubble: la velocidad de recesión es proporcional a la distancia

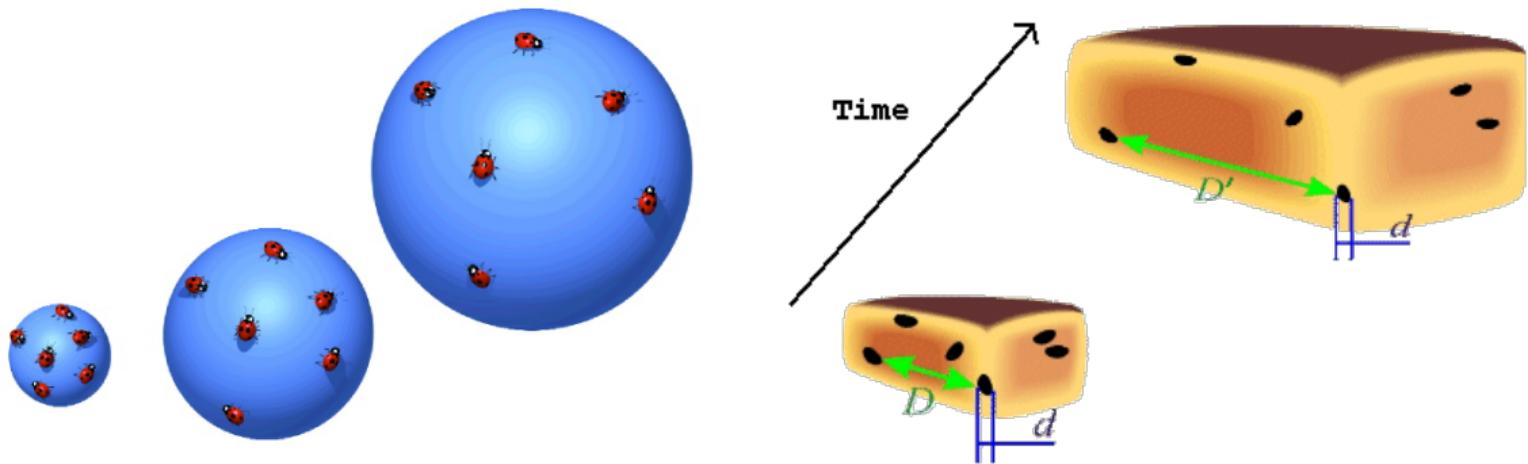
- velocidad de recesión = $H_0 \times$ distancia
 - Esto se aplica a objetos muy lejanos en el universo (eg: dos galaxias cercanas se pueden estar acercando debido a la fuerza atractiva de la gravedad)
- H_0 es la llamada constante de Hubble

Hubble (1929): El Universo se expande

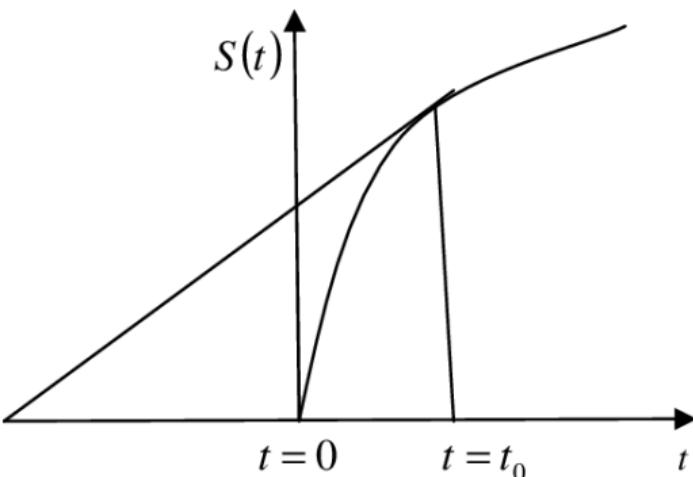
- La ley de Hubble implica que el universo se expande de manera homogénea.
 - Solo el espacio entre las galaxias de expande, las galaxias en si no se mueven respecto al espacio.



- Analogías:



El Big Bang: el Inicio del Universo

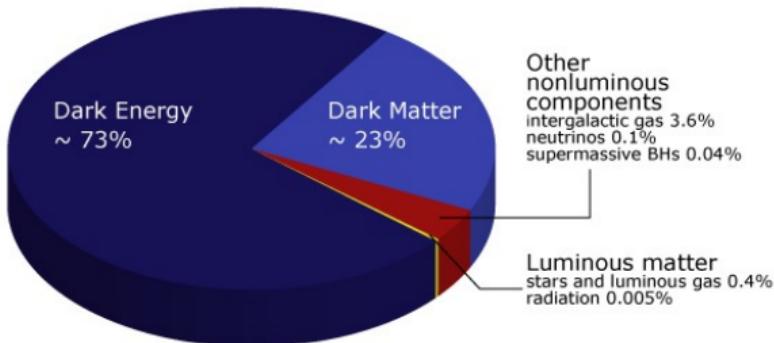


- A partir de la constante de Hubble H_0 se puede hacer una estimación de la edad del universo
- El Universo se originó en un evento llamado Big Bang hace unos 13.800 millones de años
- El evento del Big Bang ocurrió en un momento dado del tiempo pero no en un sitio específico del espacio (no fue una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

1. Introducción Histórica a la Cosmología

1.5. La Materia Oscura

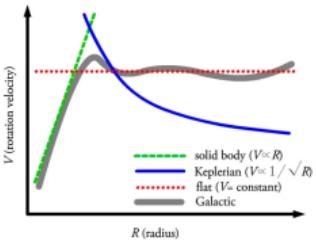
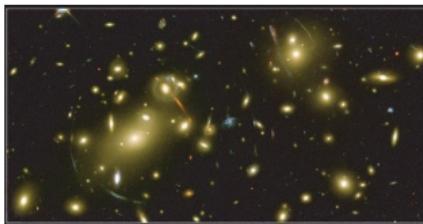
La Materia Oscura



- Materia Ordinaria ("Bariónica") ~ 4 %
 - 15% de toda la materia
- Materia Oscura ~ 23 %
 - 85% de toda la materia

- ¿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



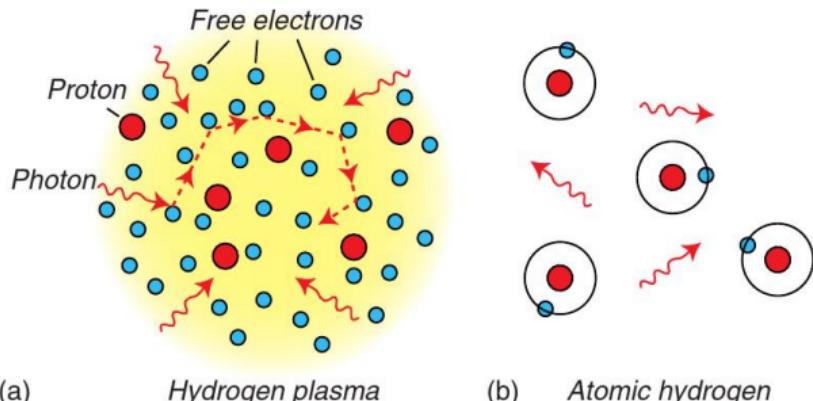
¿Cómo sabemos que la Materia Oscura Existe?

- Las evidencias experimentales incluyen:
 - 1 Estudios de Fritz Zwicky (1898-1974) en 1933 del movimiento de galaxias en el cúmulo "Coma" de galaxias (aplicación del teorema del Virial)
 - 2 Estudios de Vera Rubin (1928-2016) en los 1960s y 1970s de las curvas de rotación de estrellas en galaxias espirales
 - 3 Lentes gravitacionales a partir de los años 1980s
 - 4 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

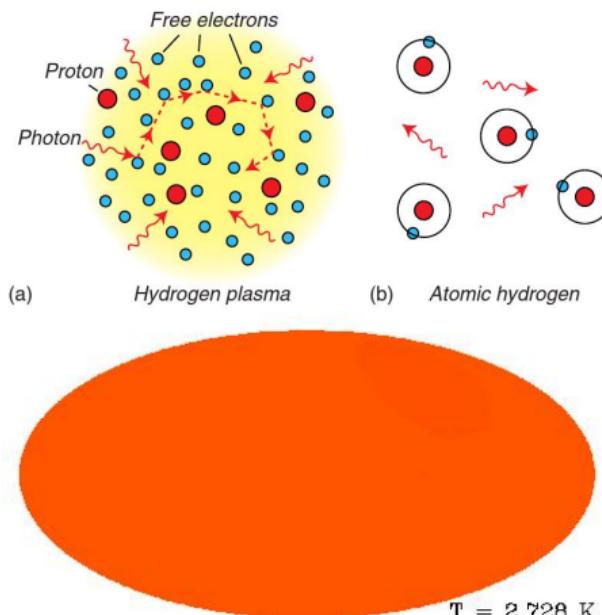
1.6. Radiación del Fondo Cósmico

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:
 - ➊ Durante el primer período posterior al evento del Big Bang el universo era opaco; compuesto por un plasma ionizado de protones, neutrones y electrones
 - ➋ A medida que el Universo se expande también se enfria.
 - ➌ Hay un momento en el cual los protones, neutrones y electrones que componen el plasma forman átomos de H y He (este evento lo llama "**recombinación**")
 - ➍ 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



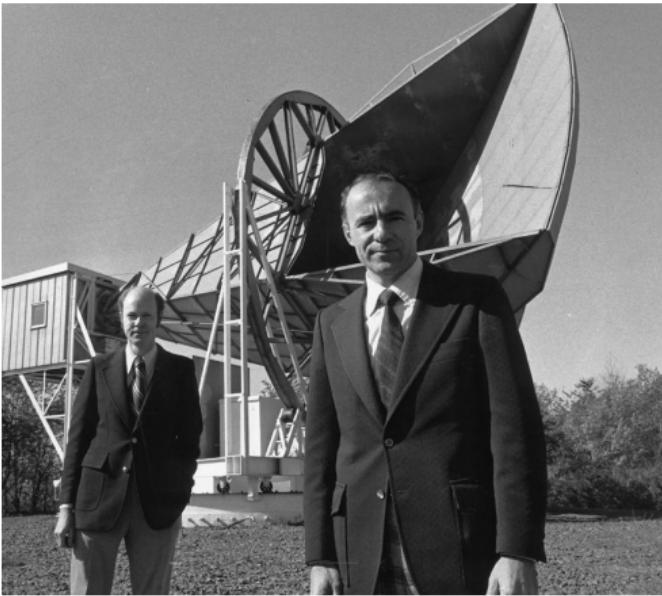
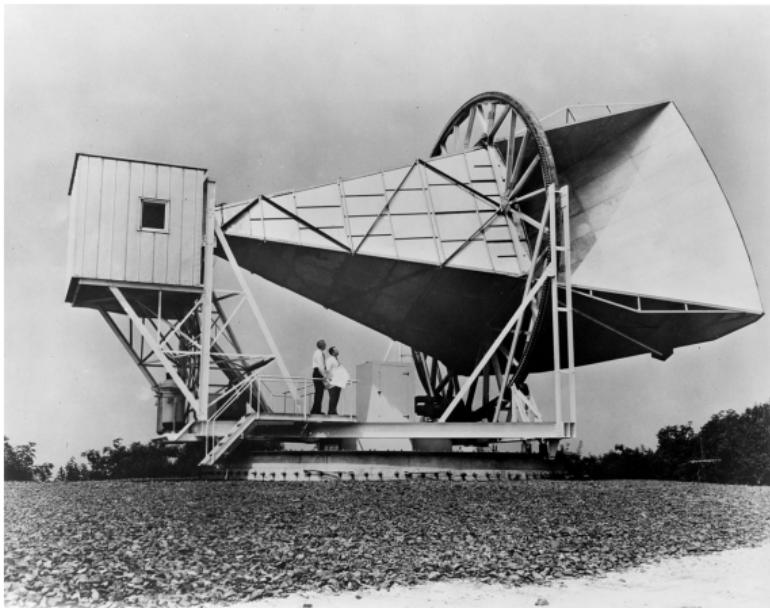
- Recombinación:

- 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 a 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



© 2004 Thomson - Brooks/Cole

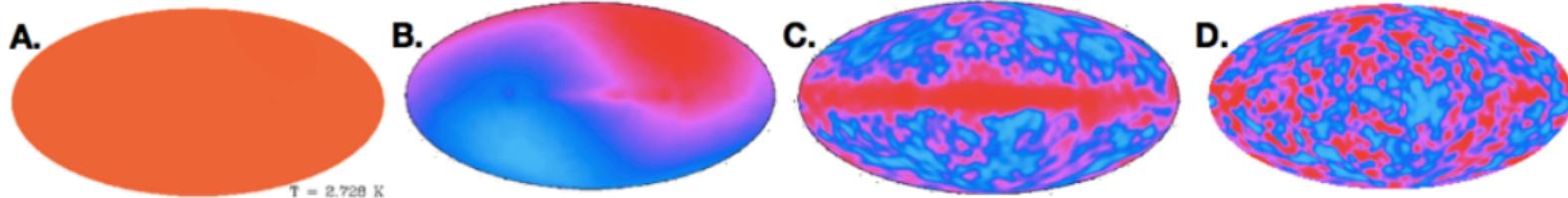
- Penzias y Wilson en 1963 miden una Radiación de Microondas homogénea en todas las direcciones.
- Penzias y Wilson midieron una radiación con una temperatura de $2,7 \text{ }^{\circ}\text{K}$.
- A partir de este descubrimiento, el modelo del Big Bang es considerado el modelo prevalente de la cosmología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

1. Introducción Histórica a la Cosmología

1.6. Radiación del Fondo Cósmico

Fluctuaciones de la Radiación de Microondas

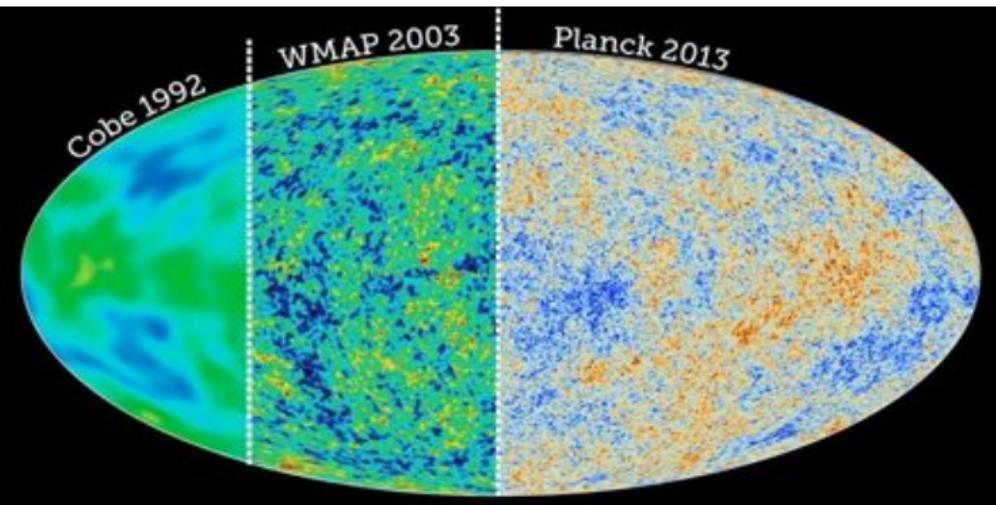
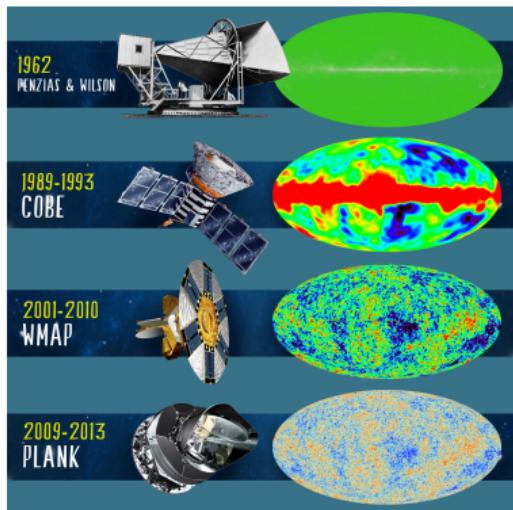
La Radiación Cósmica de Fondo y sus Ondulaciones



- La radiación de fondo cósmica representa una "fotografía" de la distribución de materia (normal y oscura) en una época muy temprana del universo
- Si bien la radiación de fondo cósmica es muy homogénea, tiene pequeñísimas fluctuaciones alrededor de los 2,7 °K (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.

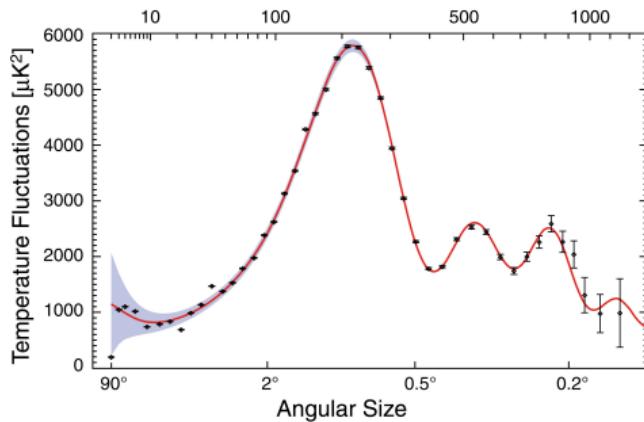
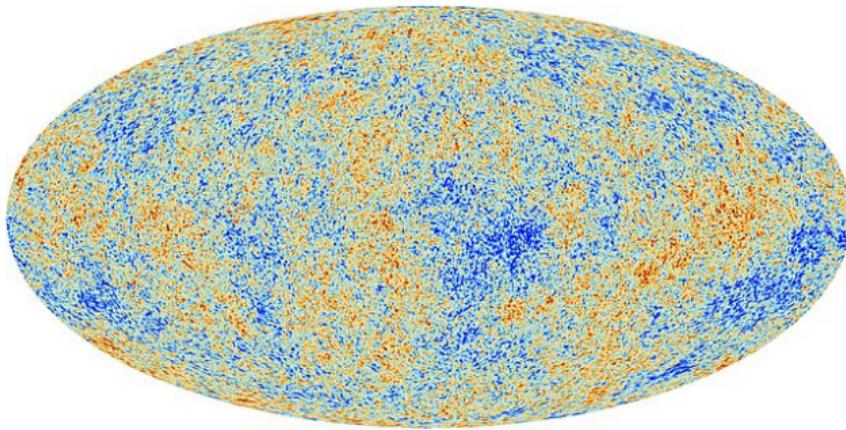
La Radiación Cómica de Fondo y sus Ondulaciones

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

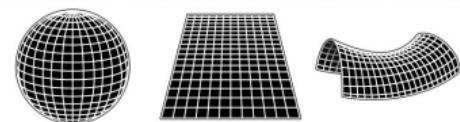
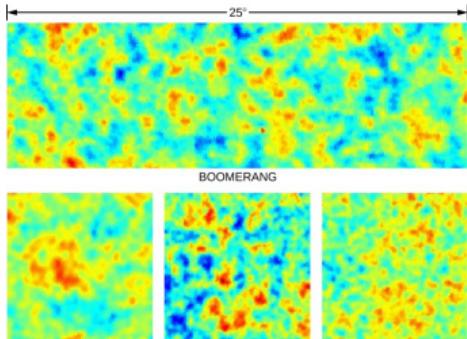


- Experimentos:
 - 1 1963 Penzias y Wilson (antena terrestre)
 - 2 1992 COBE (Satélite NASA)
 - 3 2003 WMAP (Satélite NASA)
 - 4 2013 Planck (Satélite ESA)

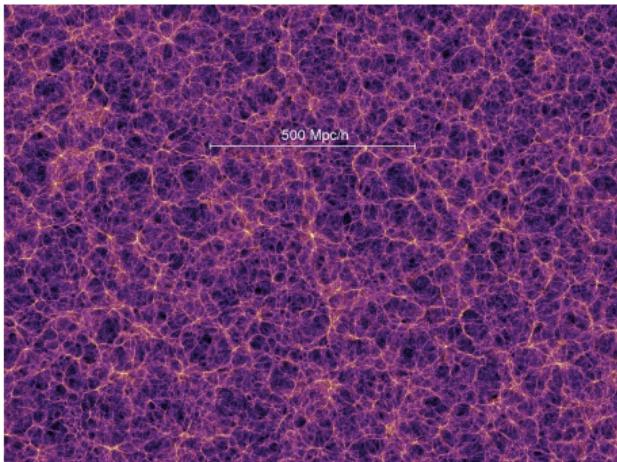
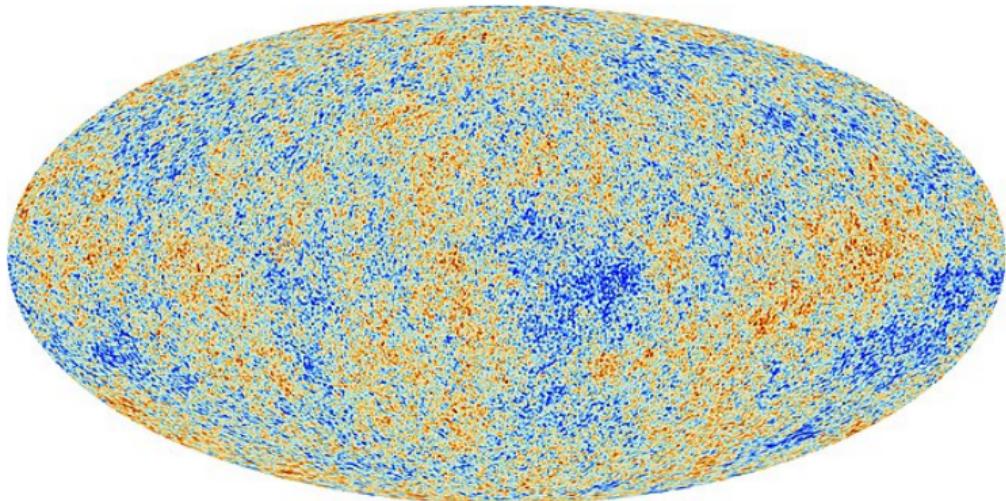
La Radiación Cósmica de Fondo y sus Ondulaciones



- Las mediciones de los satélites permiten estimar los parámetros cosmológicos como:
 - 1 Densidad de Materia ($\Omega \approx 1 \rightarrow$ universo plano!)
 - 2 La cantidad de Materia y Energía "normal"
 - 3 La cantidad de Materia Oscura
 - 4 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

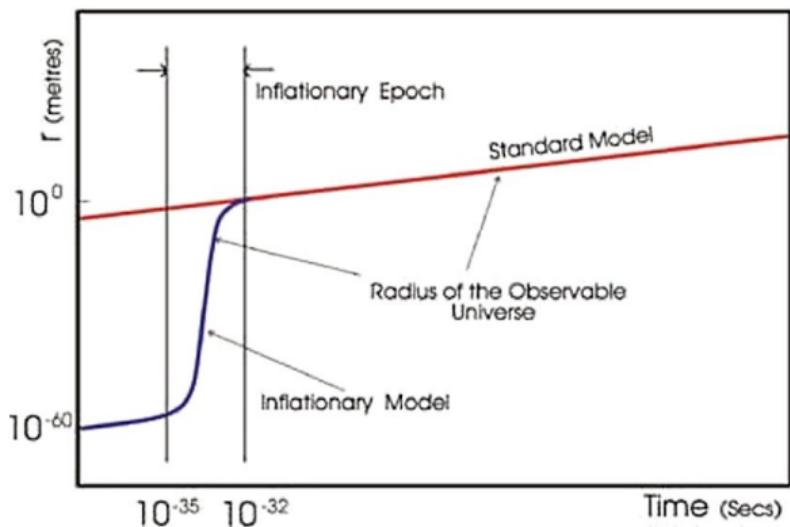


- Correlación entre las fluctuaciones del fondo de radiación de microondas y la "espuma galáctica"

1. Introducción Histórica a la Cosmología

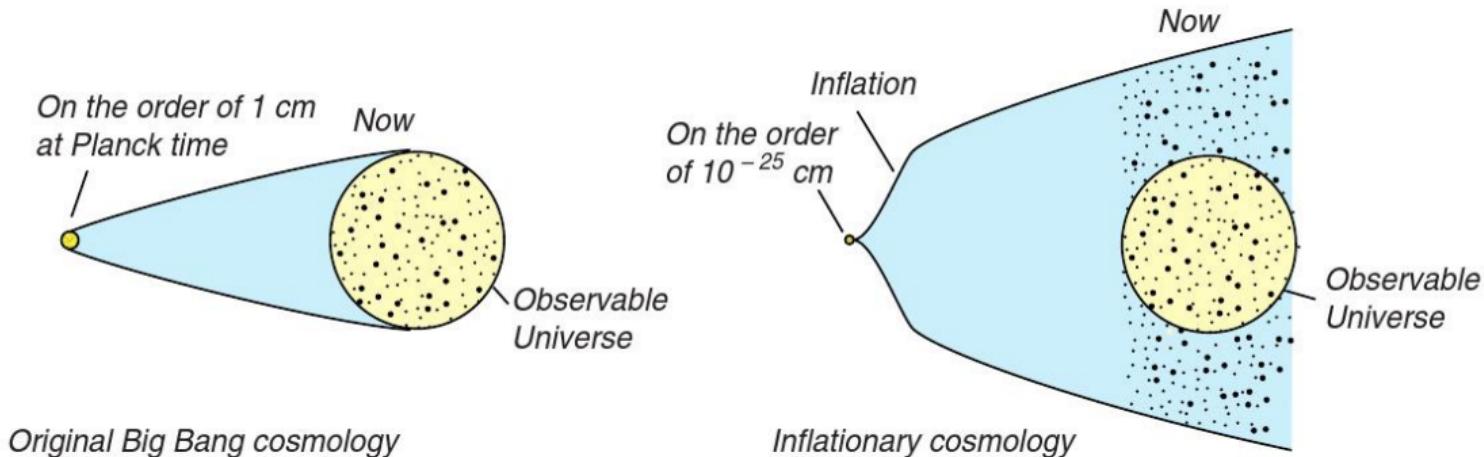
1.7. La Inflación Cósmica

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

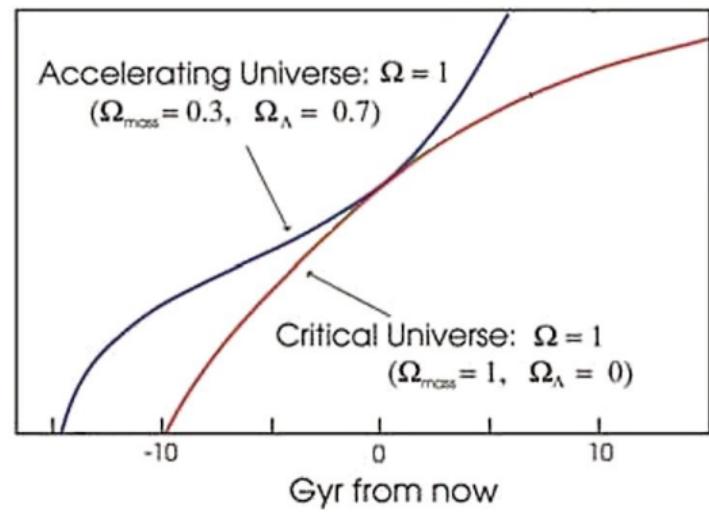
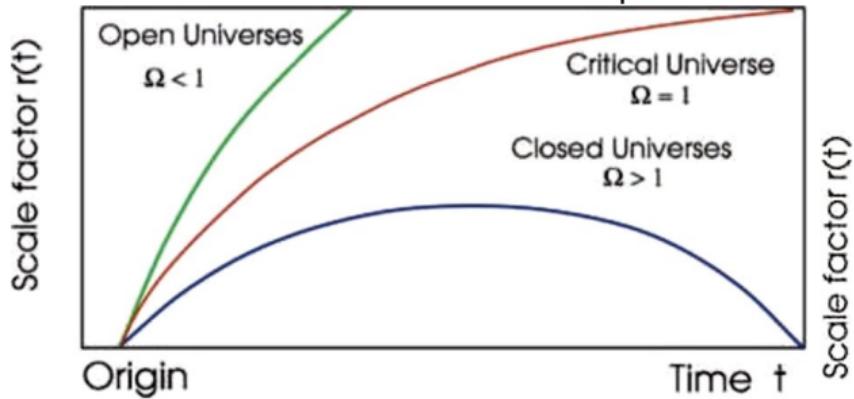
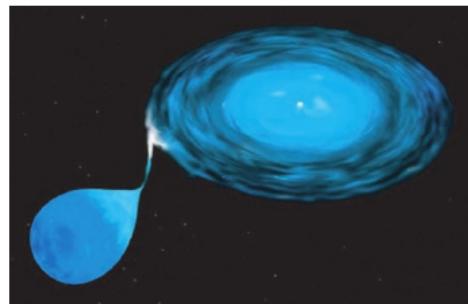
- Al empezar el período de inflación cósmica, el universo tiene el tamaño de un protón
 - Por lo tanto está sujeto a las leyes de la cuántica, sujeto a fluctuaciones cuánticas
- Al final del período de inflación el universo tiene aproximadamente un diámetro de 1 metro.
- Las fluctuaciones cuánticas presentes 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

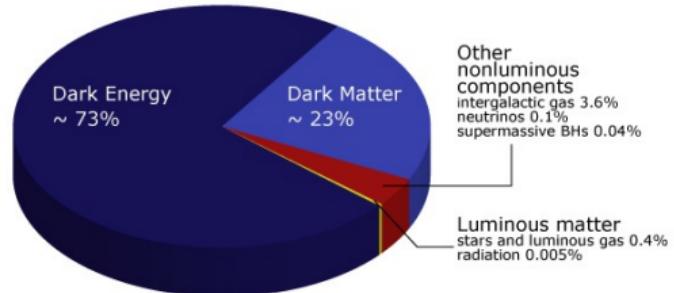
Perlmutter, Riess y Schmidt 1998: Expansión Acelerada

- 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

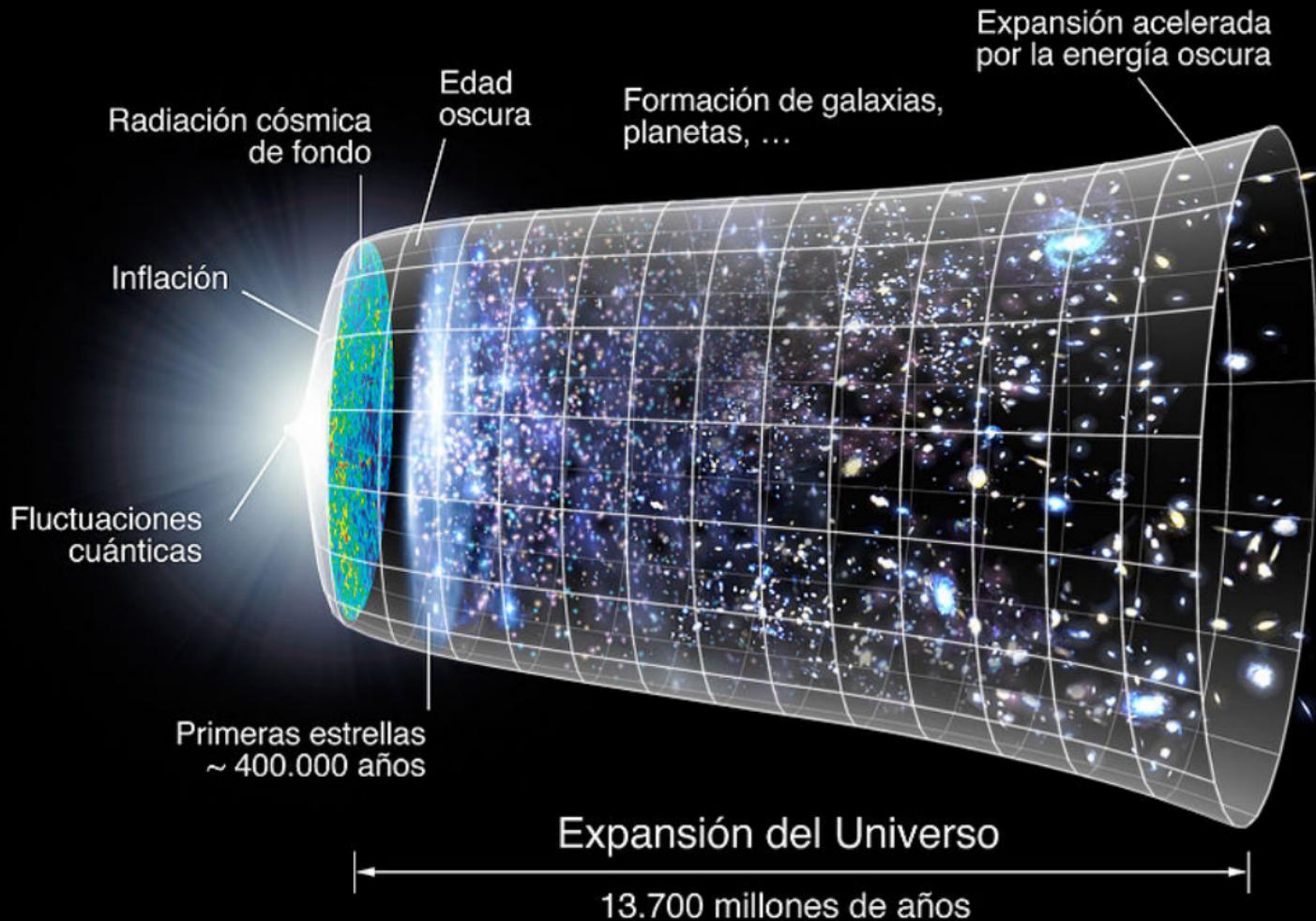


La Expansión Acelerada del Universo y la Energía Oscura

- 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"



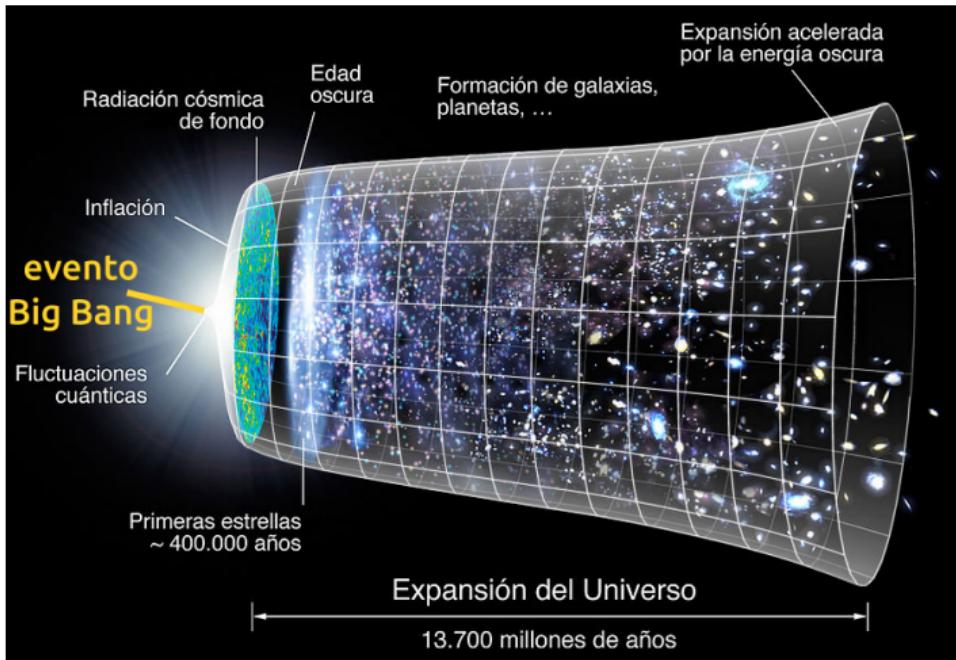
2. Evolución del Universo



2. Evolución del Universo

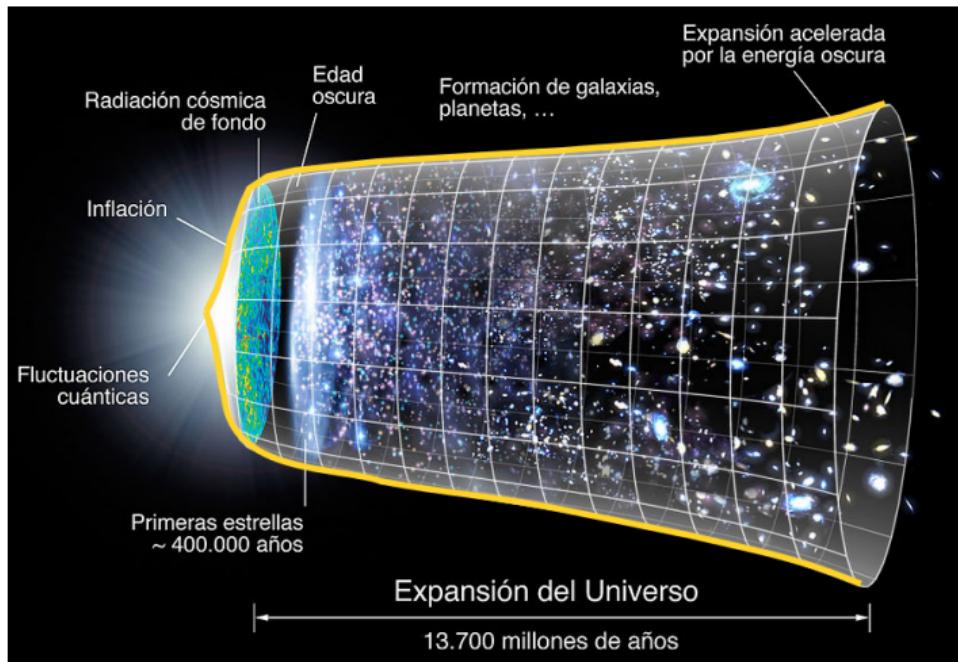
2.1. El Big Bang y el Universo en Expansión

El Origen del Universo: El Big Bang



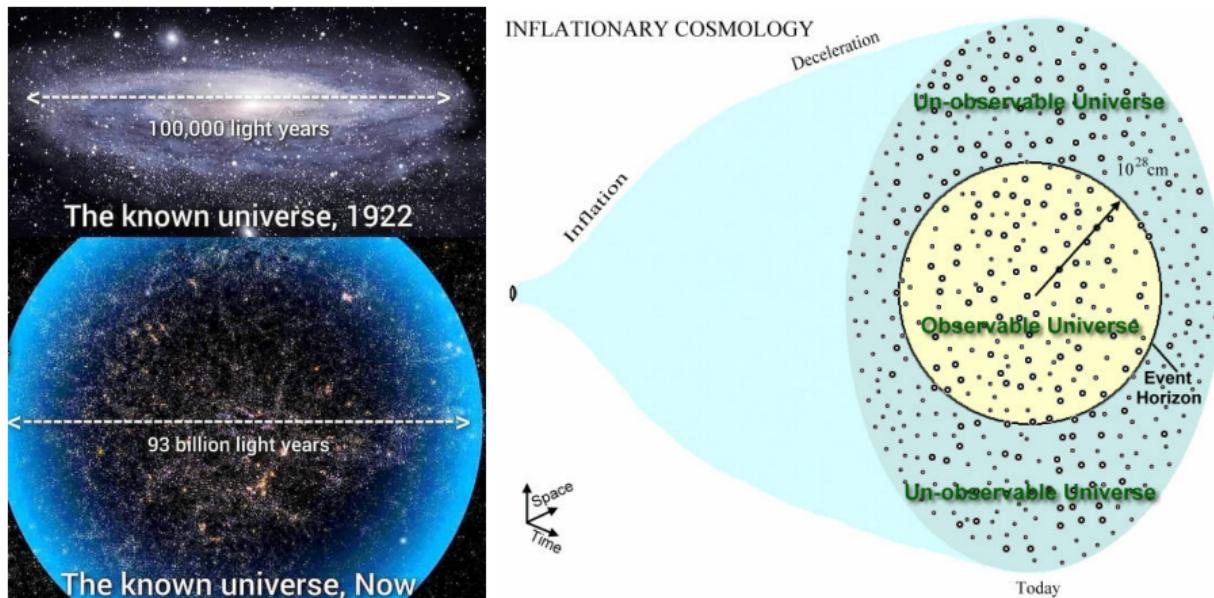
- El Universo se originó en un evento llamado **Big Bang** hace 13.800 millones de años.
- El modelo del Big Bang es la idea de que **el universo se expandió y enfrió a partir de un estado anterior muy denso y caliente.**
- El evento del Big Bang ocurrió en un momento dado del tiempo pero no en un sitio 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: Universo Observable



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
- El universo observable es una bola alrededor de la Tierra con un radio de 46.500 millones de años luz (¡recordar que el Big Bang ocurrió hace 13.800 millones de años!).
- ¡El universo observable contiene unas 170.000 millones de galaxias!

Evolución del Universo: Universo Observable



"I'VE SEEN OUT TO THE LIMIT OF THE
OBSERVABLE UNIVERSE, AND BELIEVE ME, IT'S NO
BETTER OUT THERE THAN IT IS HERE."

"He mirado hasta el límite del universo observable. Créeme, ahí no es mejor que aquí"

Evolución del Universo: Universo Observable



"I'll tell you what's beyond the observable universe -- lots and lots of unobservable universe."

"Déjame que te cuente que hay más allá del universo observable: un montón de universos inobservables"

2. Evolución del Universo

2.1. El Big Bang y el Universo en Expansión

Confusiones Típicas sobre el Big Bang

Confusiones Típicas sobre el Big Bang: Evento vs. Modelo

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

1 **Modelo** del Big Bang:

- El modelo del Big Bang es la idea de que nuestro universo se ha expandido y enfriado, habiendo comenzado de un estado anterior muy caliente y denso.
- ¡Hay muchísima evidencia de que esta hipótesis es cierta!

2 **Evento** del Big Bang:

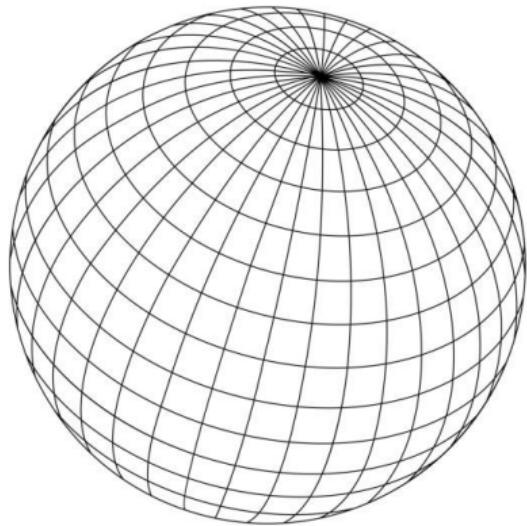
- El evento del Big Bang es un momento en el tiempo en el cual el universo empieza a existir.
- ¡El evento del Big Bang no ocurre en un punto en el espacio! El espacio que nace en el Big Bang puede haber sido infinito.
- Es una hipótesis que no es necesariamente verdadera (se trata de una predicción de la teoría de la relatividad, ¡ignorando lo que nos dice la mecánica cuántica!)

Confusiones Típicas sobre el Big Bang: Antes del Big Bang

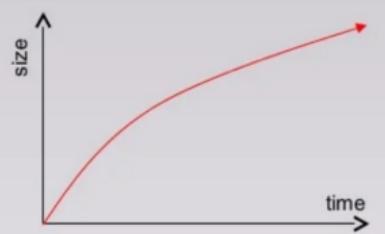
¿Qué hubo antes del evento del Big Bang? Esta pregunta puede contestarse de distintas maneras:

- Respuesta estándar según las leyes de la física conocidas:

- Según la relatividad general el tiempo no está definido antes del Big Bang
- El evento del Big Bang indica el inicio de la escala de tiempo ($t = 0$)
- 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.
- Stephen Hawking nos dice: *"Preguntarse qué había antes del Big Bang es como preguntarse por un punto que está situado un kilómetro al norte del Polo Norte. No tiene ningún sentido. Ese punto no existe como tampoco existe el tiempo antes del Big Bang"*



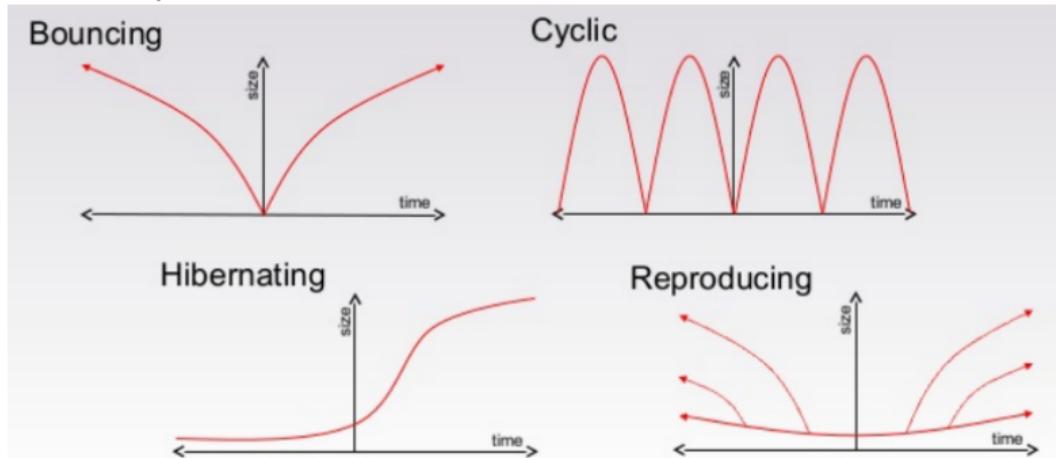
¿Qué hay al norte del Polo Norte?



Confusiones Típicas sobre el Big Bang: Antes del Big Bang

¿Qué hubo antes del evento del Big Bang? Esta pregunta puede contestarse de distintas maneras:

- Posibles respuestas según ampliaciones de las leyes de la física conocidas (e.g. teoría de cuerdas):



- 1 Bouncing ("Rebote"): el universo colapsa en un "Big Crunch" y luego se re-expande en un Big Bang
- 2 Cyclic ("Cíclico"): es una serie eterna de colapsos y rebotes
- 3 Hibernating ("Hibernado"): un universo "inactivo" por un largo tiempo previo al inicio del Big Bang
- 4 Reproducing ("Reproductor"): un universo vacío que genera universos "bebé", cada uno iniciándose con un Big Bang

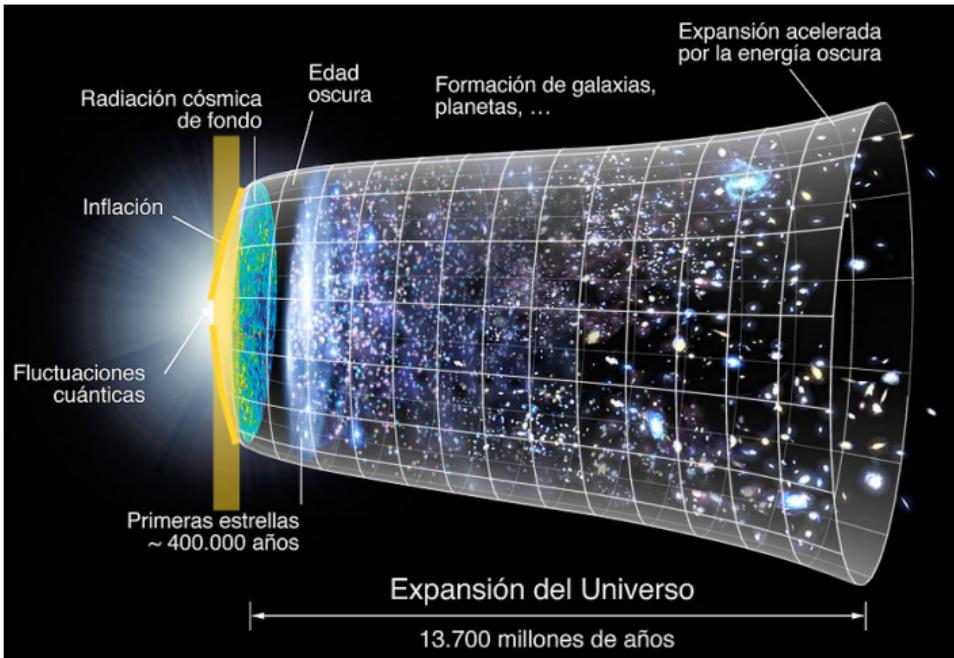
Confusiones Típicas sobre el Big Bang: Espacio

- ① El evento del Big Bang ocurrió en un momento dado del tiempo pero no en un sitio específico del espacio
- ② El Big Bang no fue una "explosión" en un punto de un espacio pre-existente. Durante el evento del Big Bang el espacio mismo empieza a existir
- ③ Tamaño del universo:
 - El modelo del Big Bang es compatible con un universo infinito (¡incluso en el momento de su creación!)
 - Lo mas probable es que el Universo sea infinito!
- ④ ¡El universo no tiene un centro!
- ⑤ 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".

2. Evolución del Universo

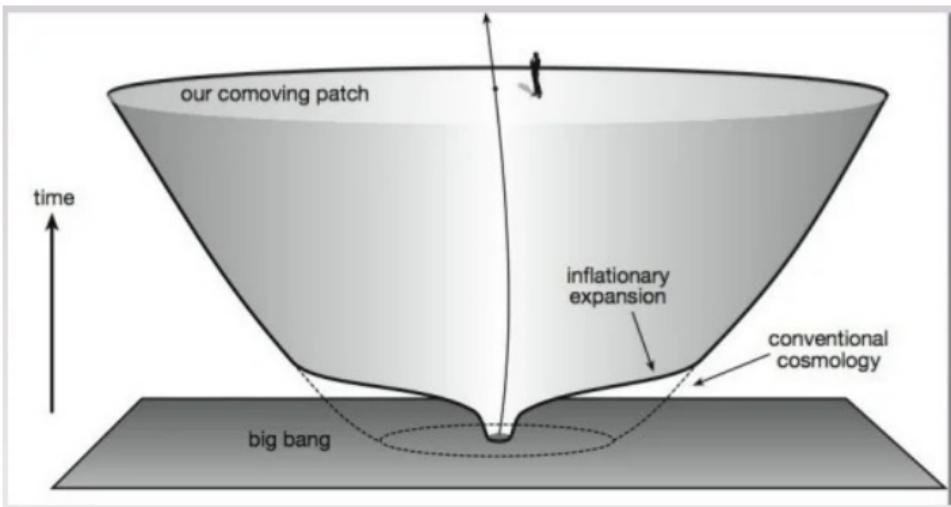
2.2. El Período Inflacionario

Evolución del Universo: El Período Inflacionario



- 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)

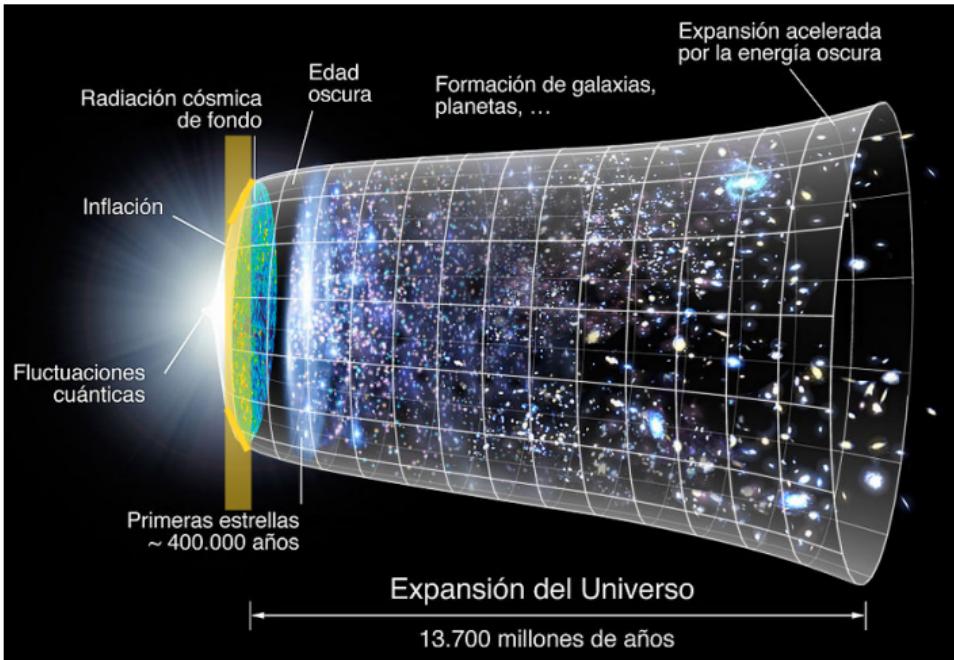
Evolución del Universo: El Período Inflacionario



2. Evolución del Universo

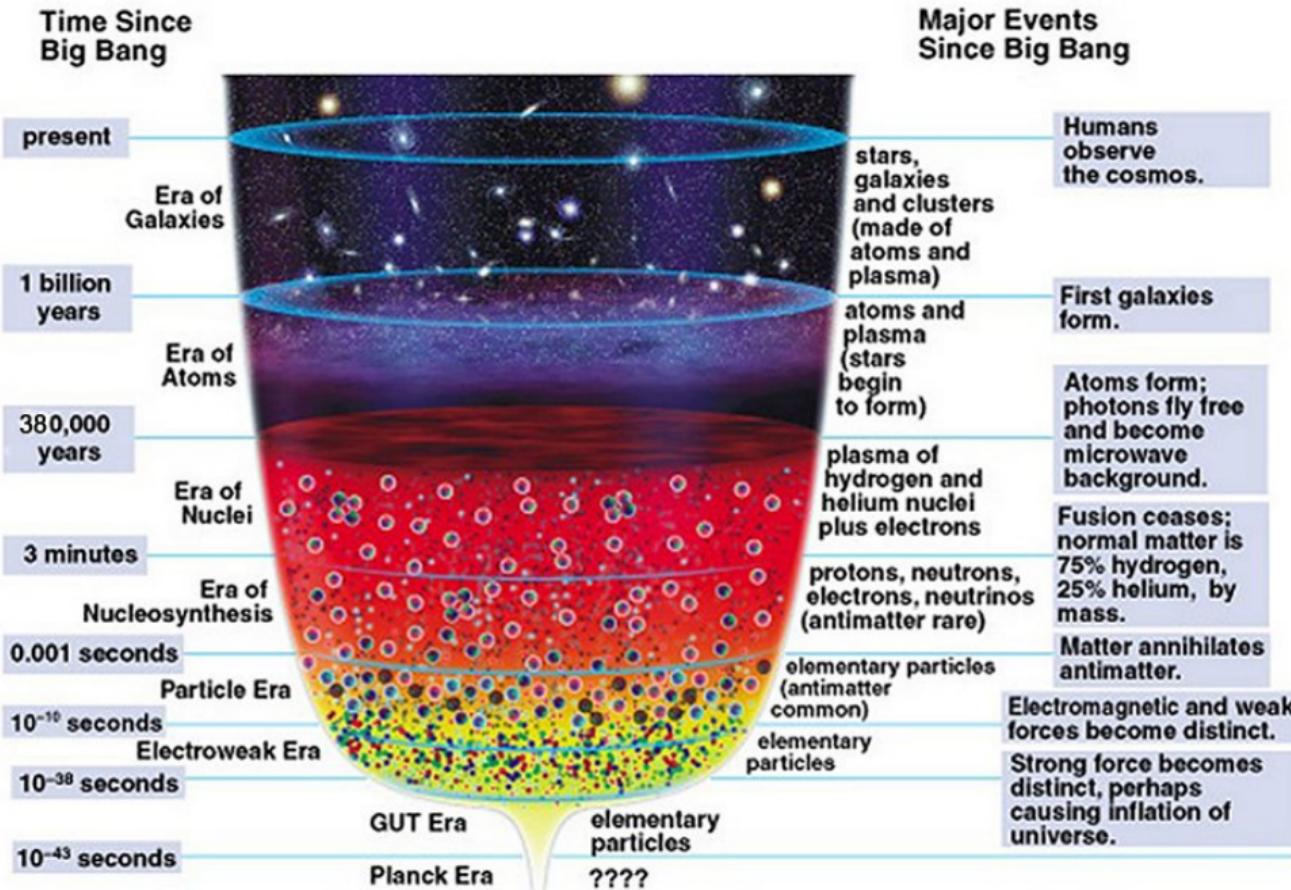
2.3. La Nucleosíntesis

Evolución del Universo: Nucleosíntesis

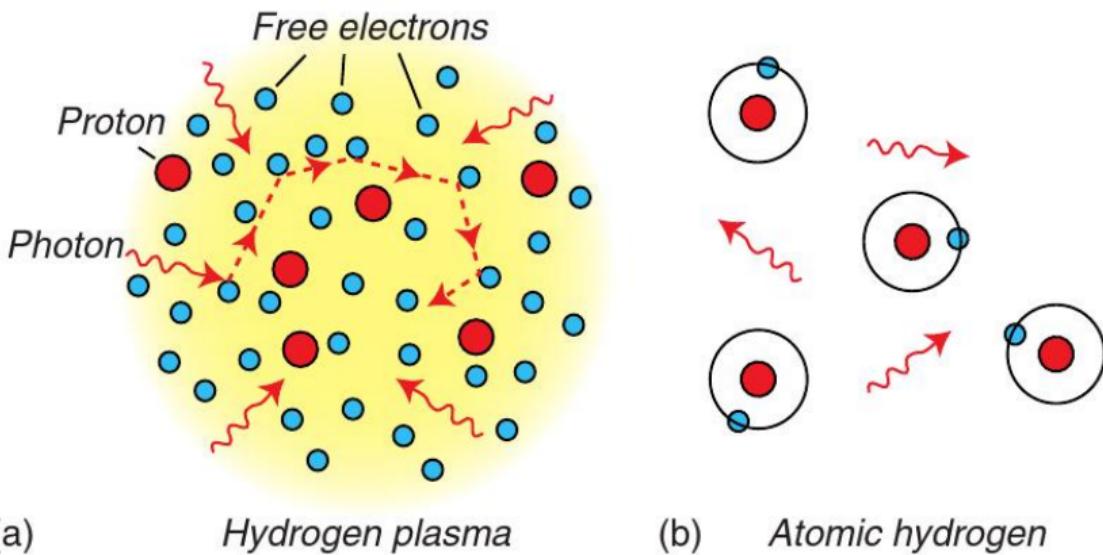


- **Nucleosíntesis:** Durante los primero segundos se generan los átomos que componen el universo

Evolución del Universo: Nucleosíntesis

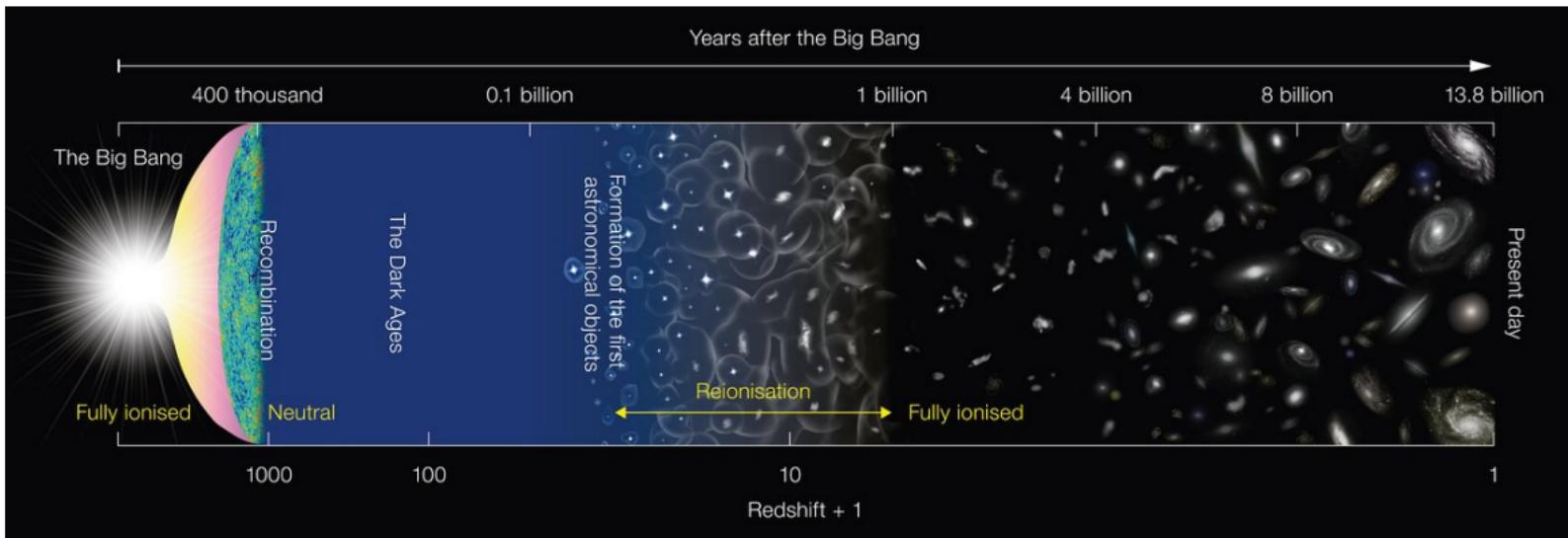


Evolución del Universo: Recombinación



- **Recombinación:** hace 380,000 millones de años los núcleos de Hidrógeno y Helio que antes estaban en forma de plasma se combinan con electrones para dar lugar a átomos neutros de Hidrógeno y Helio.
 - Se generan 75% de Hidrógeno y 25% de Helio.

Evolución del Universo: Recombinación

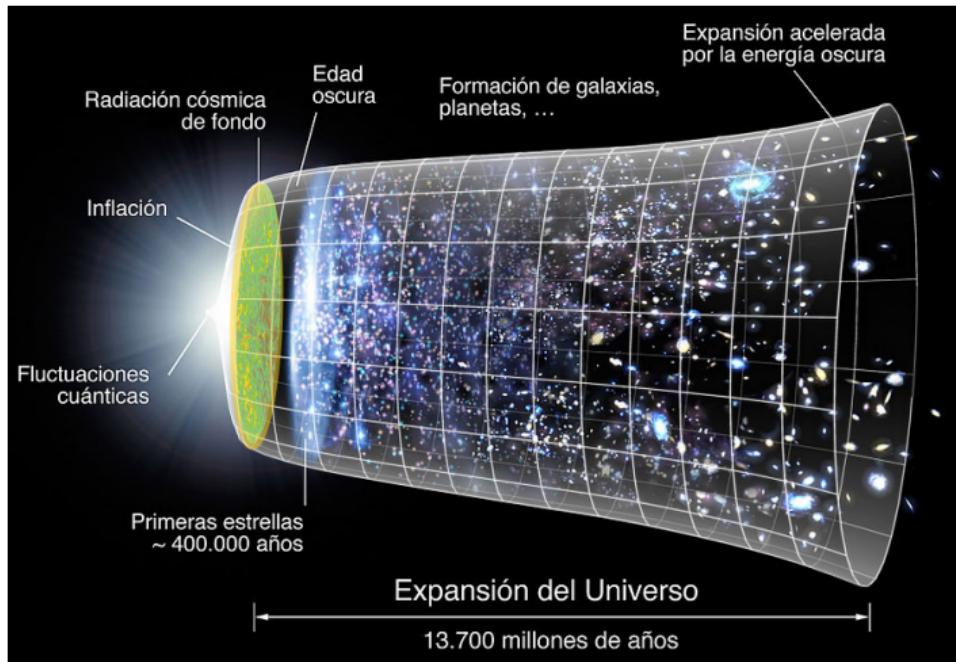


- **Recombinación:** hace 380,000 millones de años los núcleos de Hidrógeno y Helio que antes estaban en forma de plasma se combinan con electrones para dar lugar a átomos neutros de Hidrógeno y Helio.
 - Se generan 75% de Hidrógeno y 25% de Helio.

2. Evolución del Universo

2.4. La Radiación del Fondo Cósmico

Evolución del Universo: Radiación del Fondo Cósmico

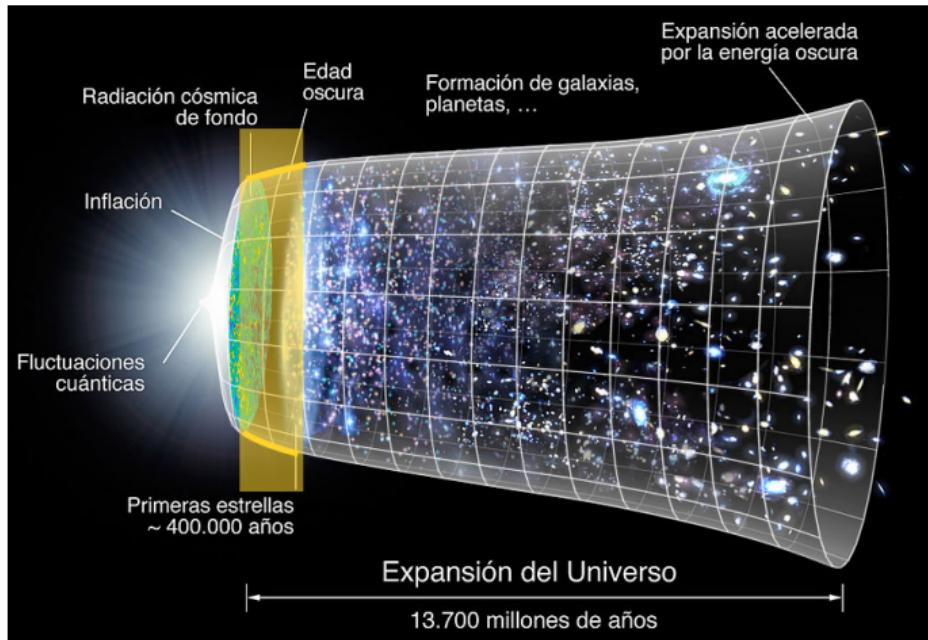


- Hasta los 375.000 años el universo es opaco, pero ese momento se transforma en transparente. Esa "luz fósil" del Big Bang es lo que hoy en día podemos observar y llamamos **Radiación de Microondas del Fondo Cósmico**

2. Evolución del Universo

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

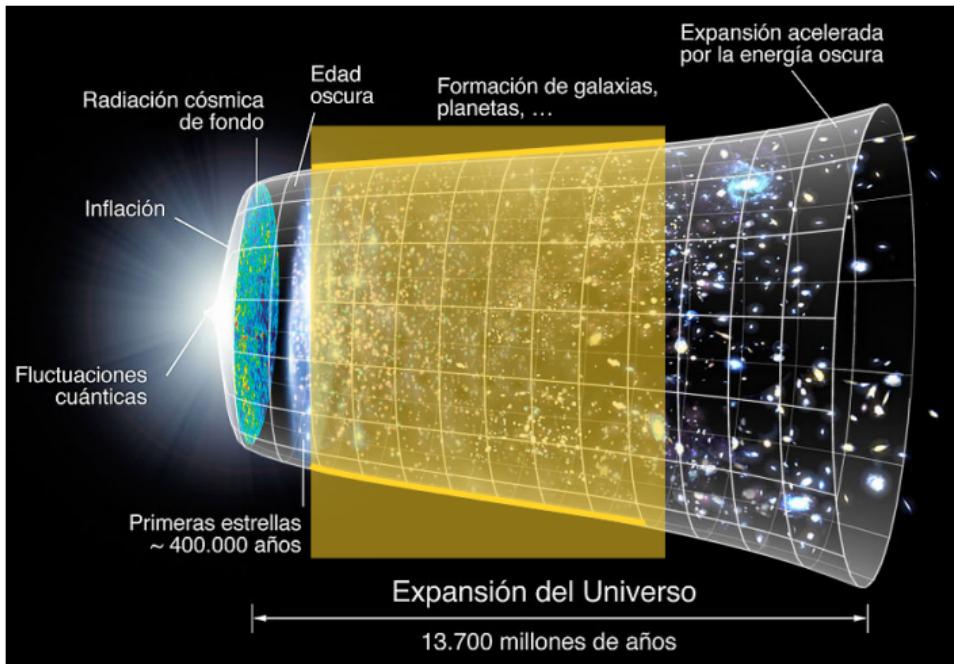
Evolución del Universo: Era Oscura



● "Era Oscura":

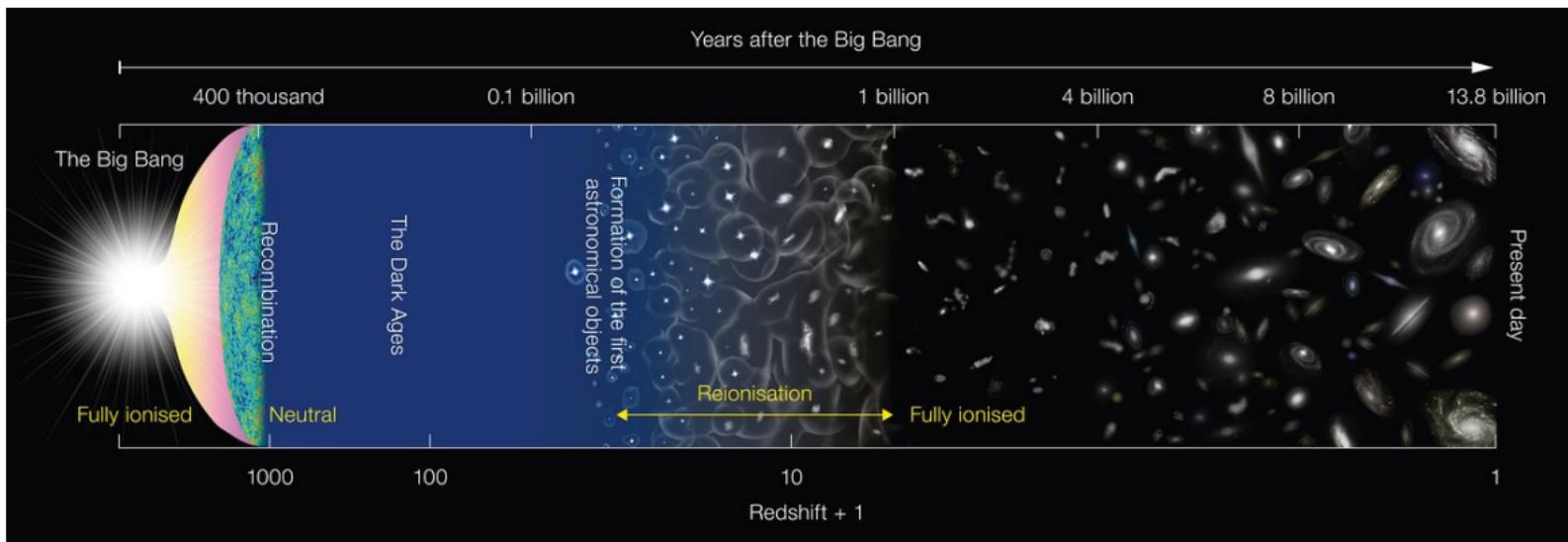
- Tiempo transcurrido entre el origen de la Radiación de del Fondo Cósmico (375.000 años después del Big Bang) hasta la formación de las primeras estrellas (400 millones de años).
- En este período se observa un universo oscuro ya que no hay ninguna fuente de luz (radiación), exceptuando la de microondas emitida durante la recombinación

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

Evolución del Universo: Era Oscura y la Reionización

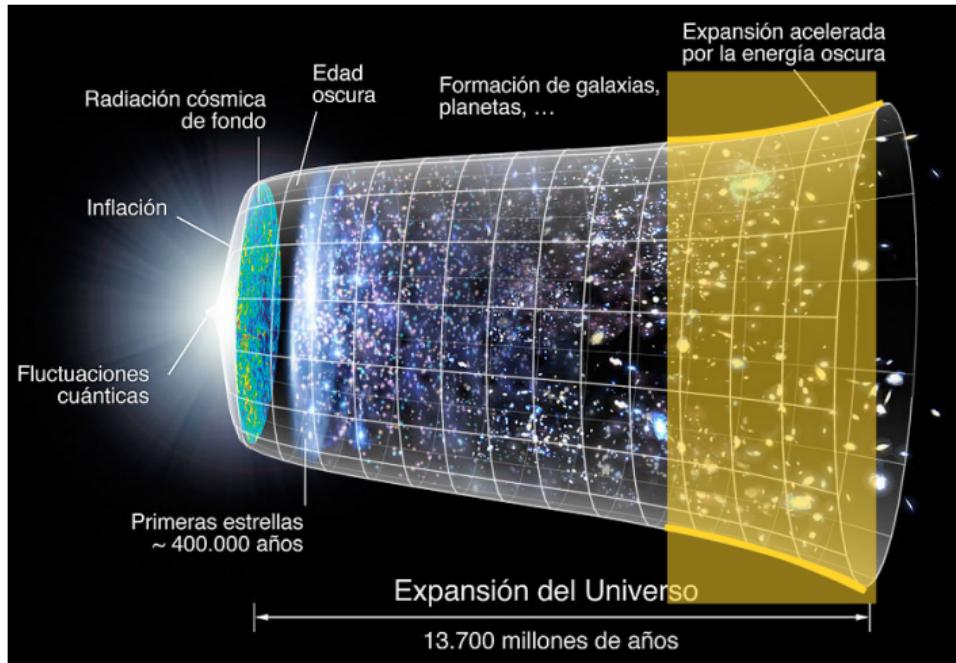


- **Era Oscura**
- **Reionización:** formación de las primeras estrellas y galaxias

2. Evolución del Universo

2.6. Expansión Acelerada del Universo

Evolución del Universo: Expansión Acelerada (actual)

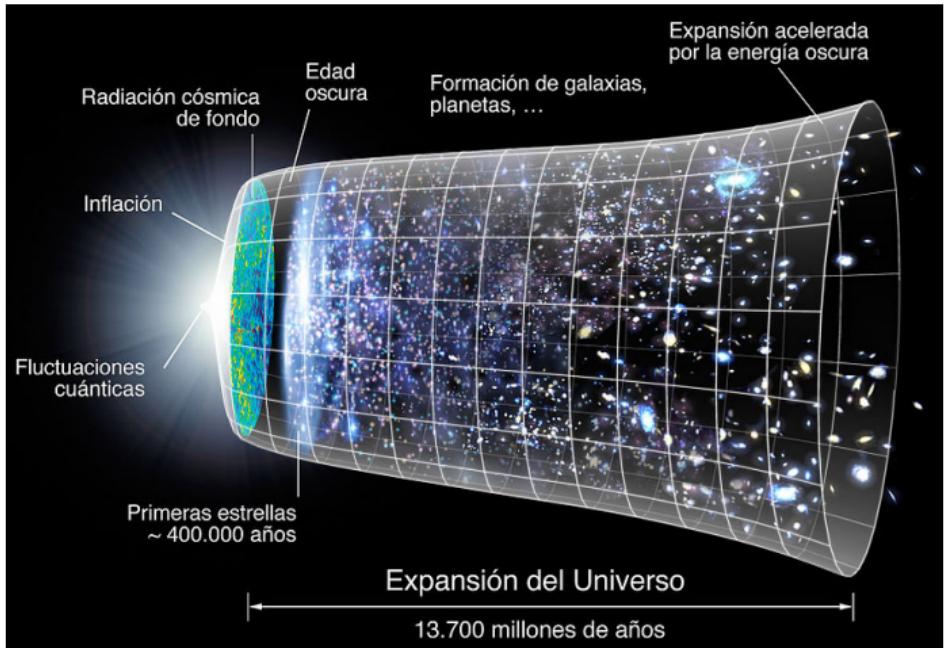


- **Era de la Energía Oscura:** Expansión acelerada del Universo.
 - Etapa dominada por la Energía Oscura
 - Incluye el presente

2. Evolución del Universo

2.7. El Futuro del Universo

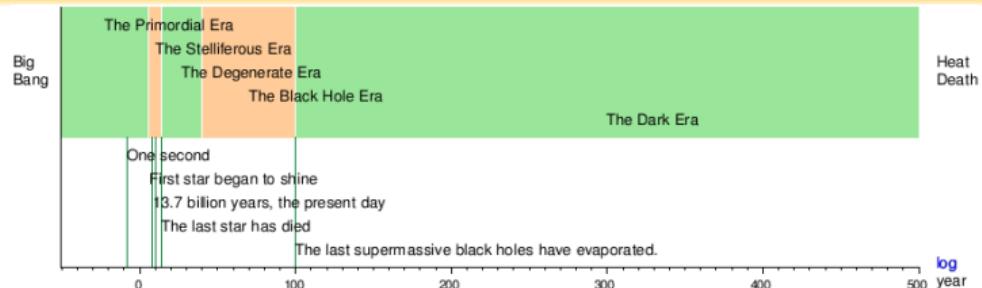
Evolución del Universo: Destino del Universo



● 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

El Futuro del Universo: Las Edades del Universo



El Universo pasaría por cinco grandes eras:

- ① Era primordial. Desde 0 hasta los 300.000 años.
 - Se crea un universo caliente y opaco.
- ② Era estelar. Desde los 300.000 hasta los 10^{15} años.
 - Es la era actual. Las estrellas brillan y las galaxias se forman y evolucionan.
- ③ Era degenerada. De los 10^{15} a los 10^{40} años.
 - Los neutrones y los protones se desintegran. El Universo pasa a estar compuesto por energía y otras partículas.
- ④ Era de los agujeros negros. De los 10^{40} a los 10^{100} años.
 - Dominado por los agujeros negros, casi los únicos objetos masivos que existirían.
- ⑤ Era oscura. A partir de los 10^{100} años.
 - Los agujeros negros acabarían evaporándose, convirtiéndose en energía.
 - La energía sería lo único que sobrevive en un universo expandido y con muy baja densidad y temperatura.

El Futuro del Universo



- ¿así que tú as creado todo?
 - Sí
- ¿includiendo los agujeros negros?
 - Sí
- ¿...qué eventualmente se tragará todo?
 - Sí
- ¿includiéndote a ti mismo?
 - ...
 - Sí, estoy trabajando en eso.

¡FIN del Curso!



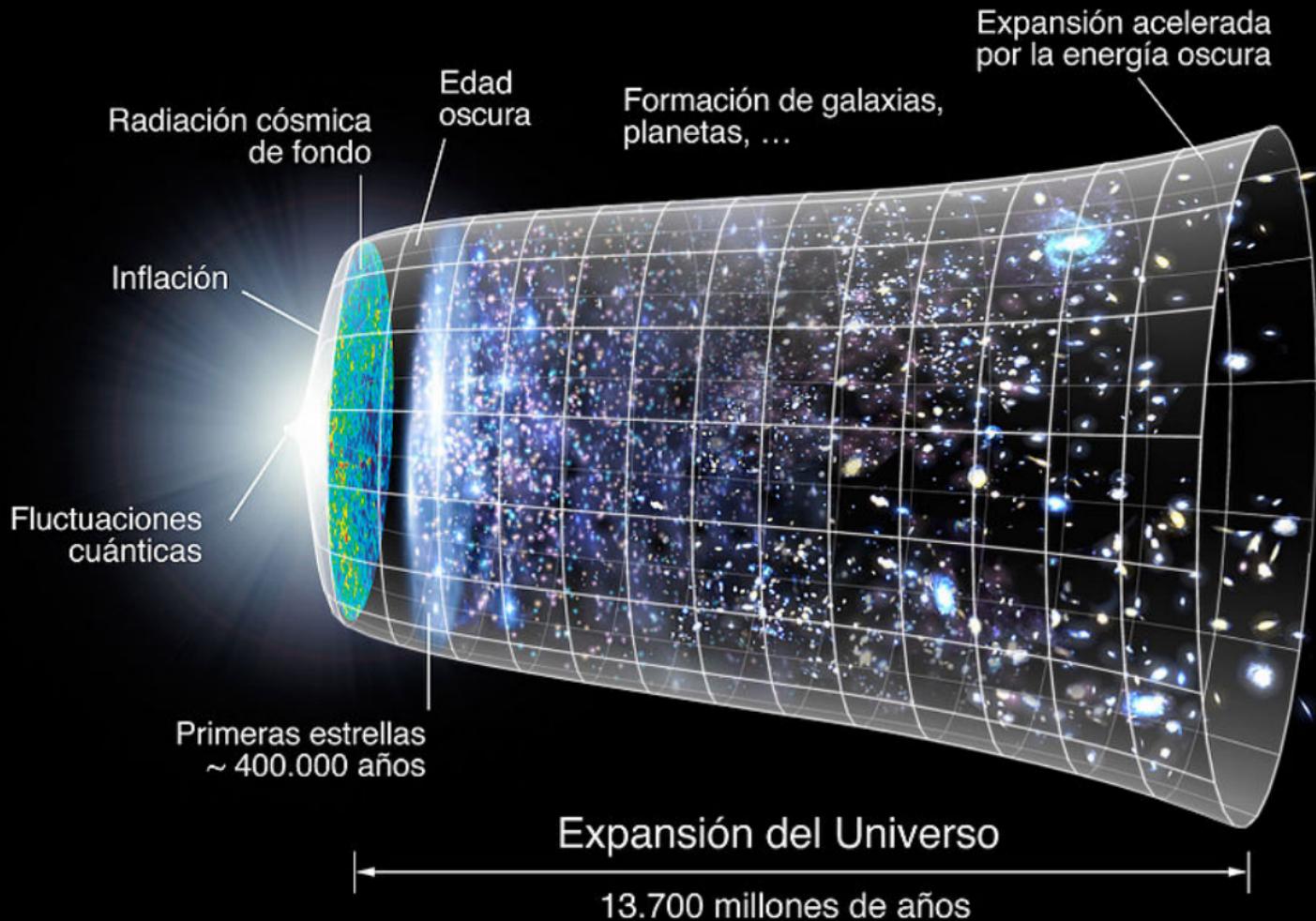
¡FIN del Curso!

- Espero que el curso os fuese de utilidad
- Mis coordenadas:
 - ernesto.nicola@gmail.com
 - 693 99 79 33
- Las coordenadas de AstroMallorca, mi asociación (30 Euro por año)
 - <https://astromallorca.wordpress.com>
 - <https://www.youtube.com/AstroMallorca>
 - <https://www.facebook.com/groups/astromallorca>



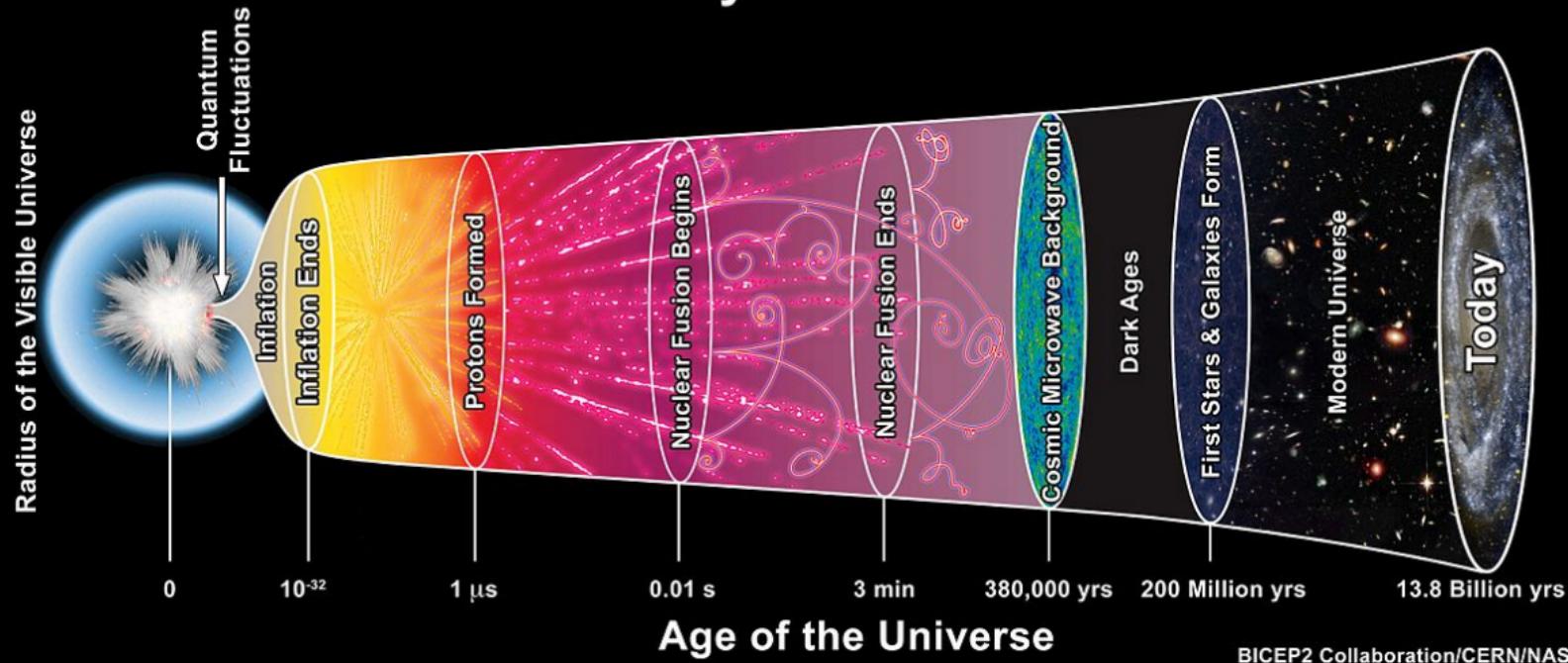
¿Preguntas?



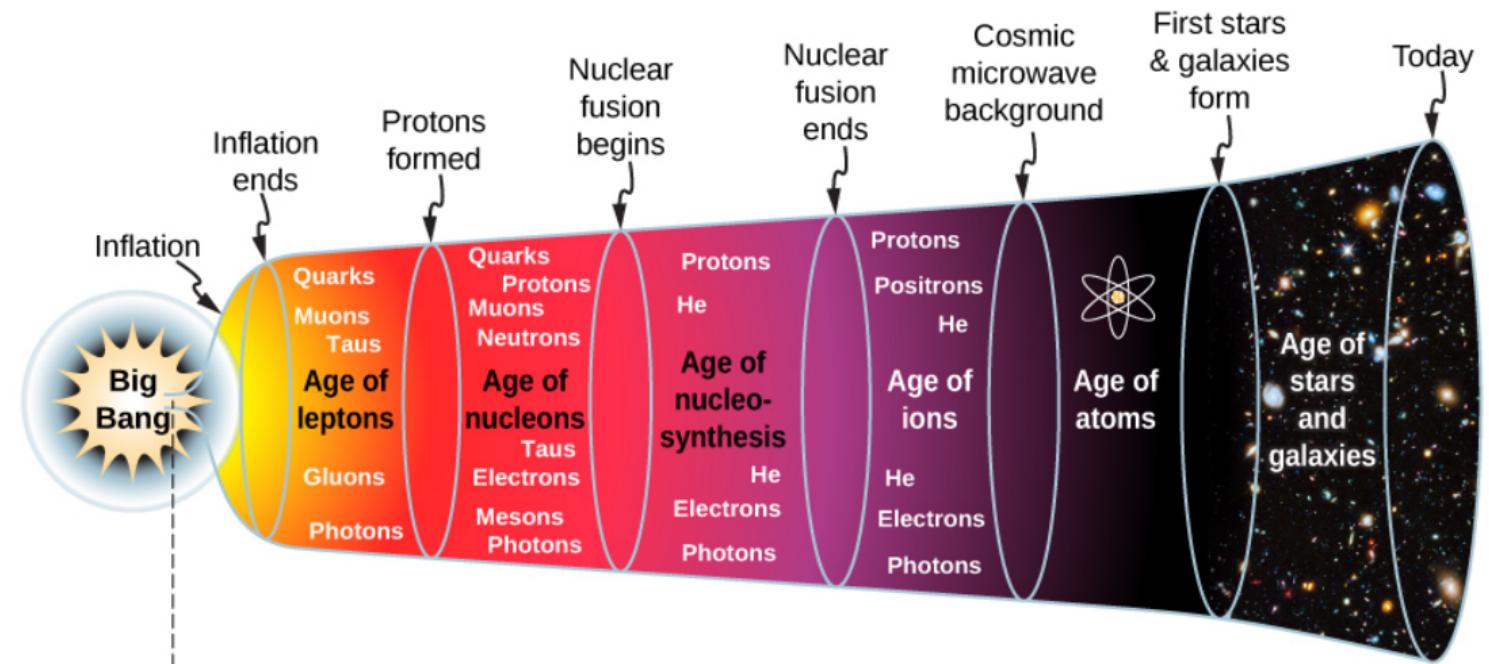


2. Material Extra

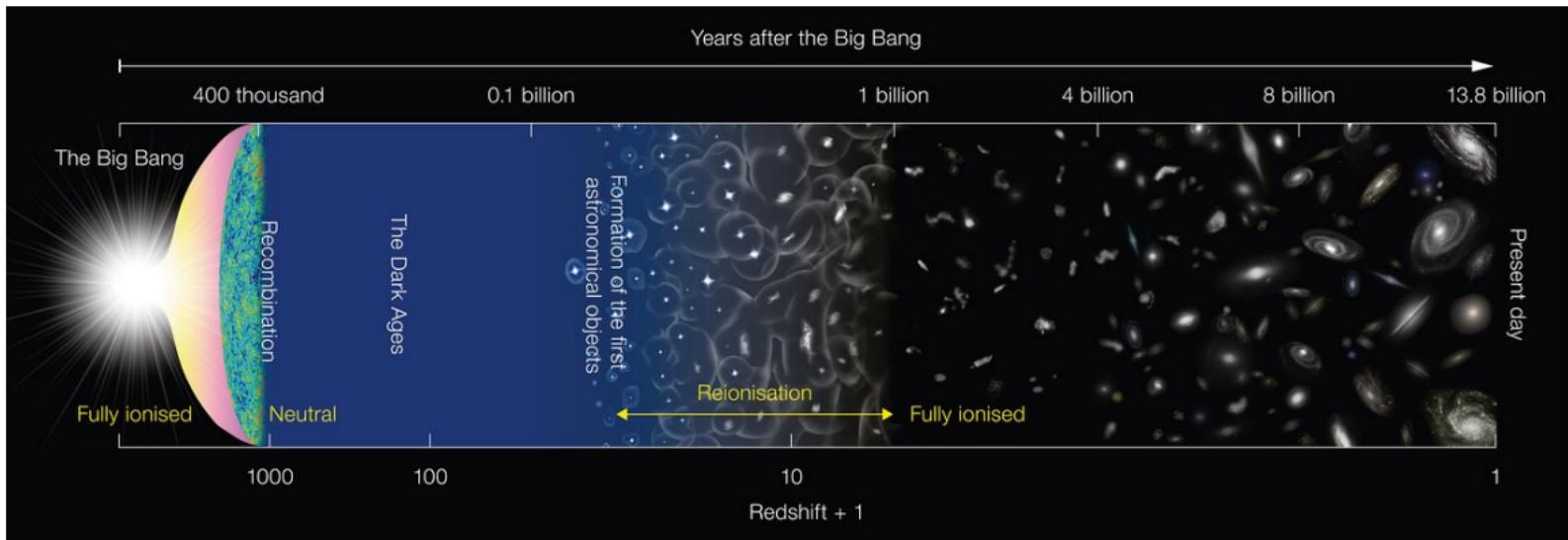
History of the Universe

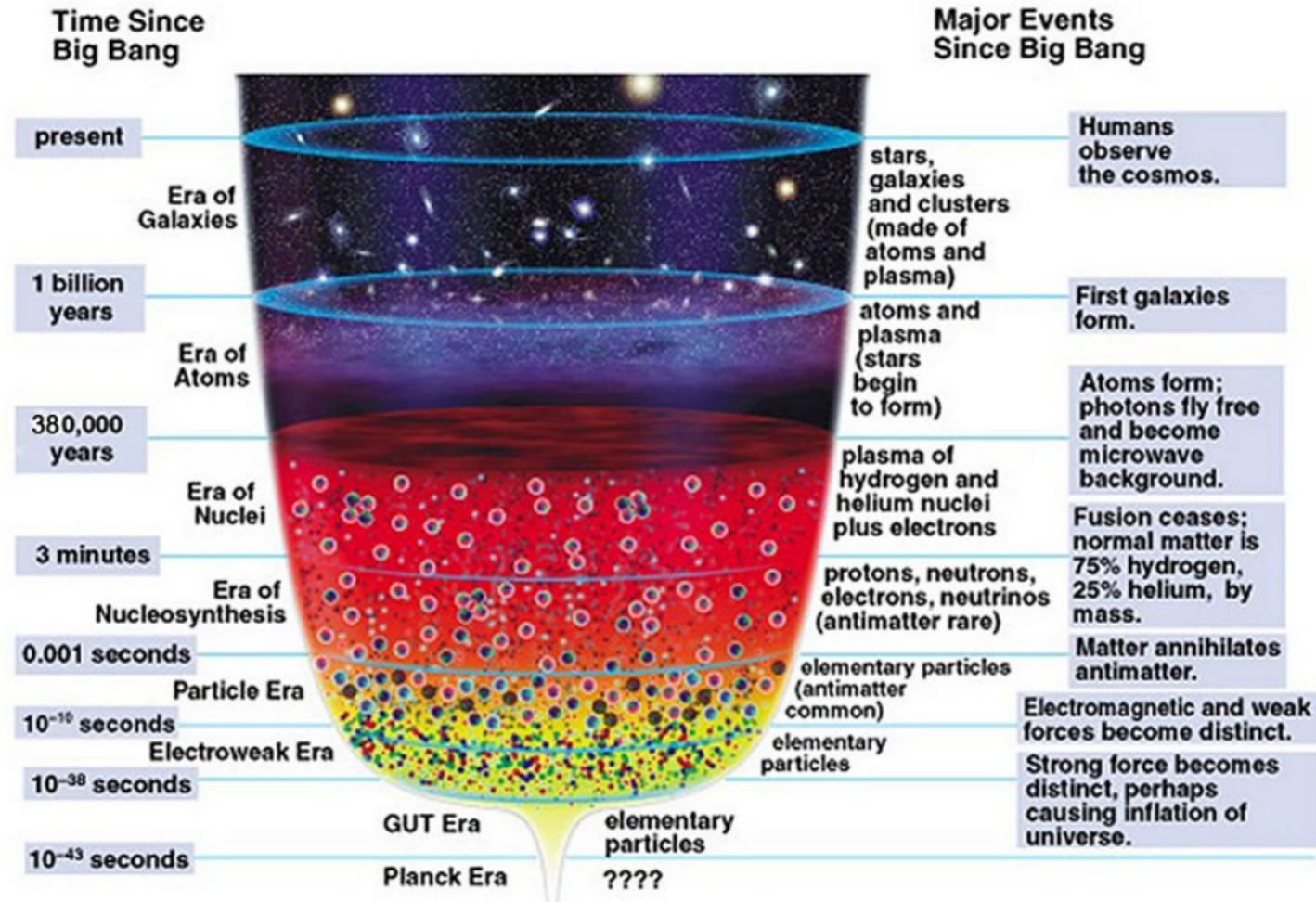


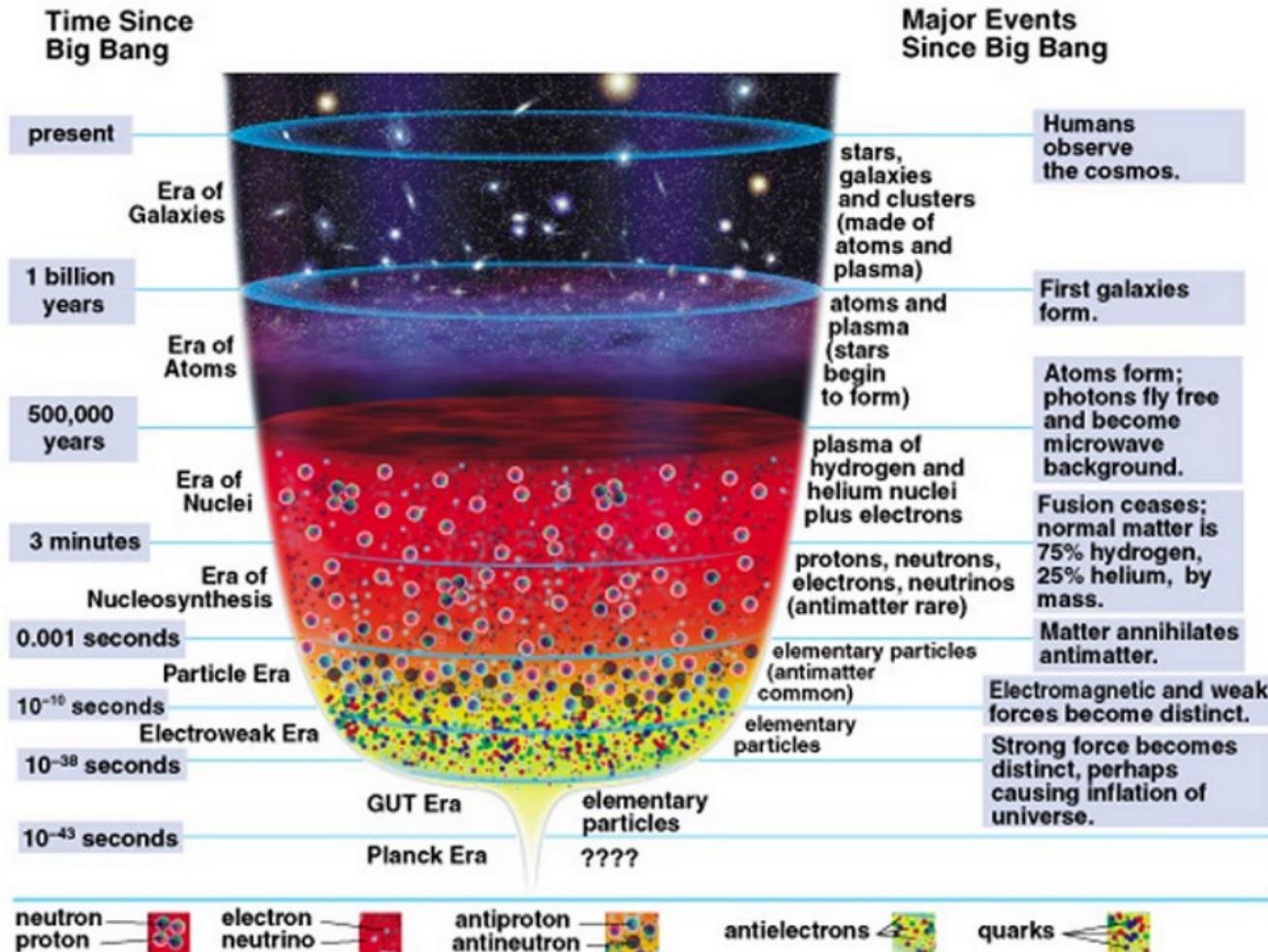
BICEP2 Collaboration/CERN/NASA



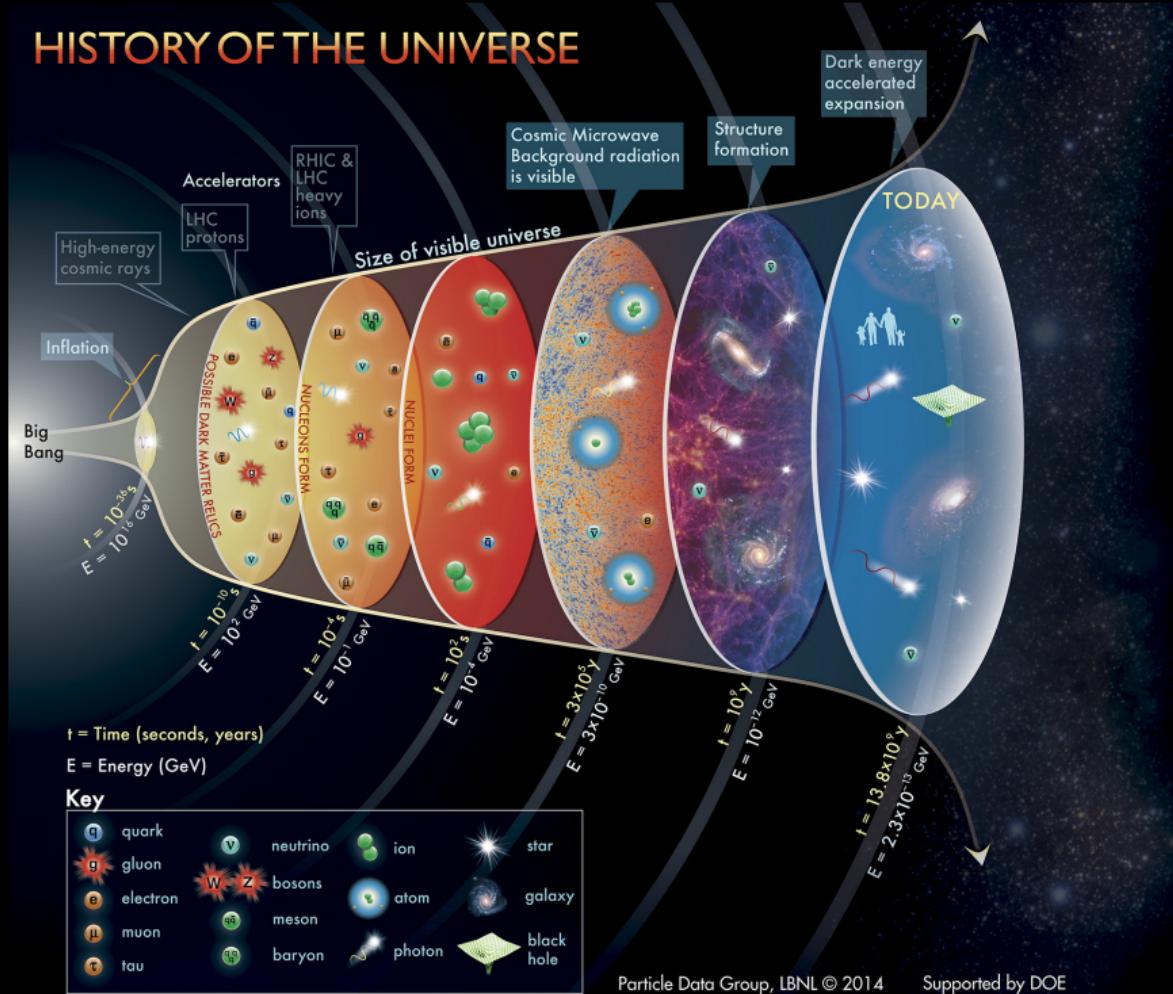
Time (s, y)	10^{-43}	10^{-35} s	10^{-6} s	225 s	1000 y	3000 y	$300,000$ y	present
Temperature (K)	10^{32}	10^{27}	10^{15}	0.1	10^{-8}	10^{-8}	3×10^{-10}	2.7
Energy (GeV)	10^{19}							2.3×10^{-13}



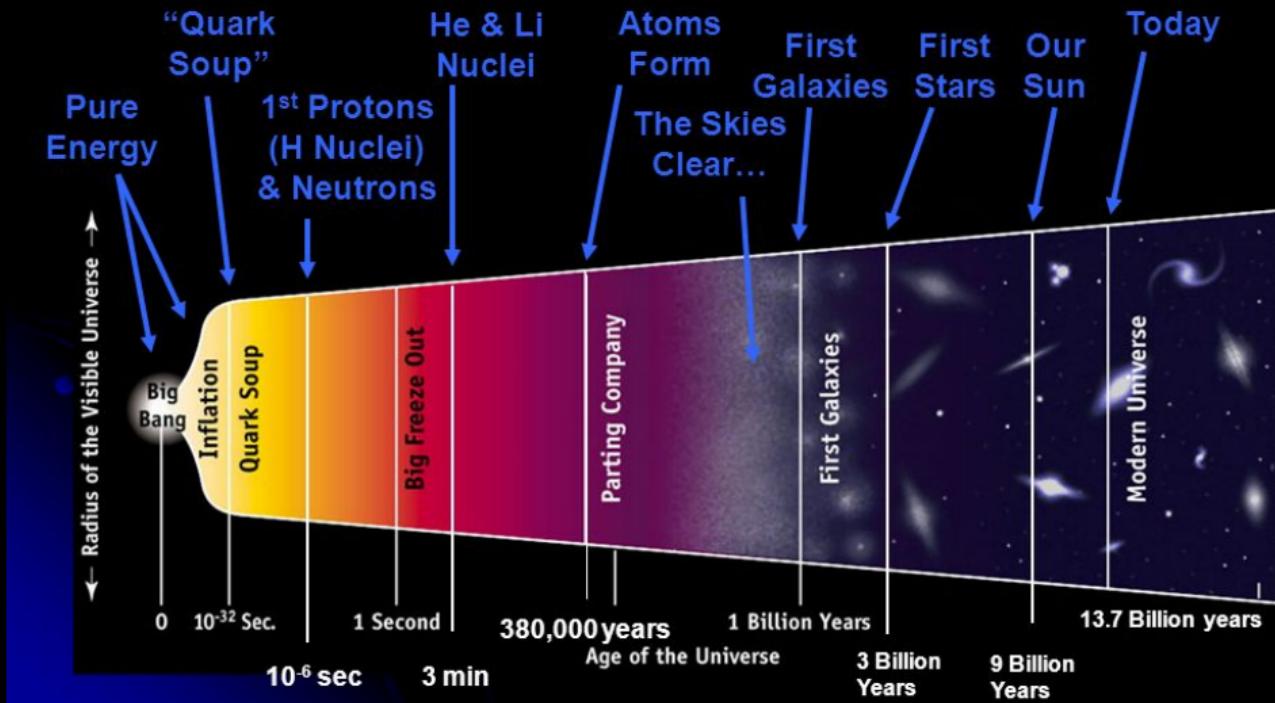




HISTORY OF THE UNIVERSE

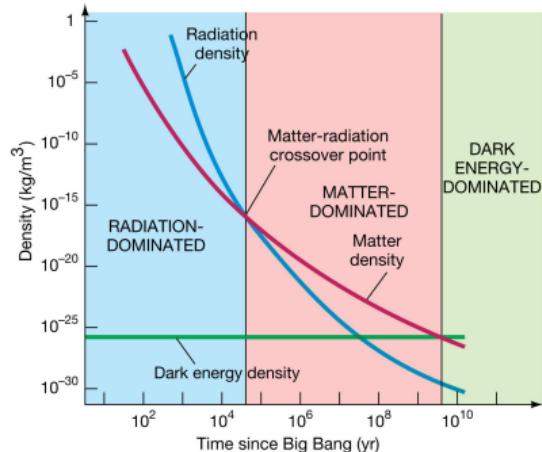
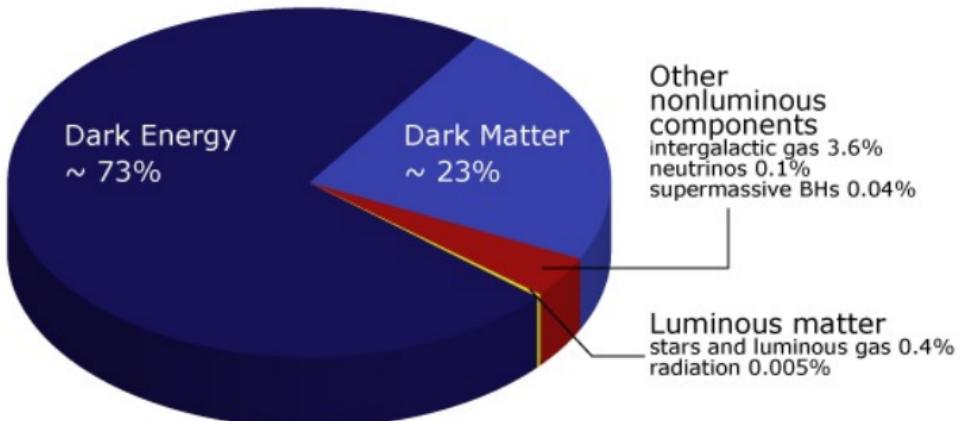


Big Bang Timeline



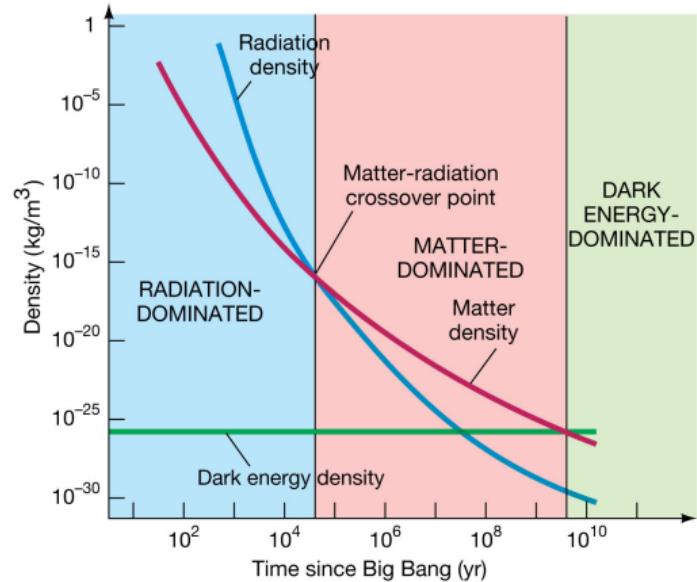
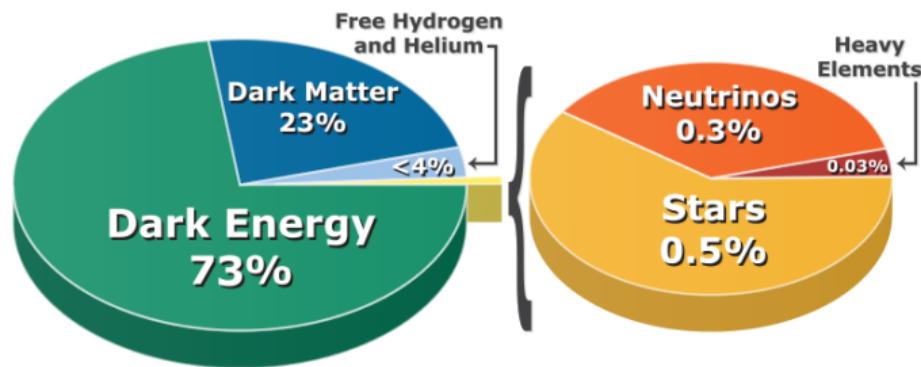
Composición del Universo

Evolución del Universo: Energía y Materia

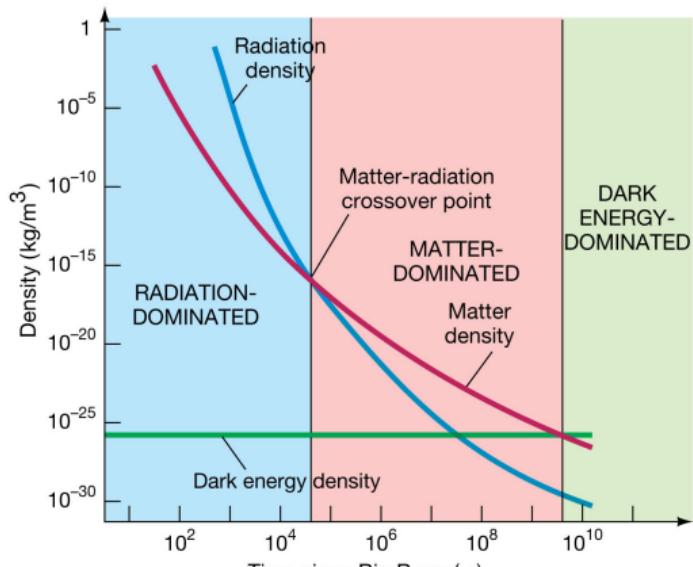
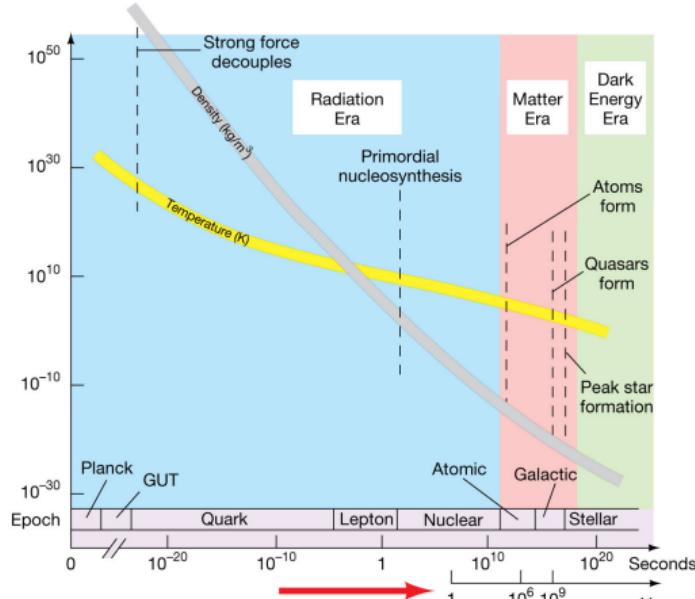
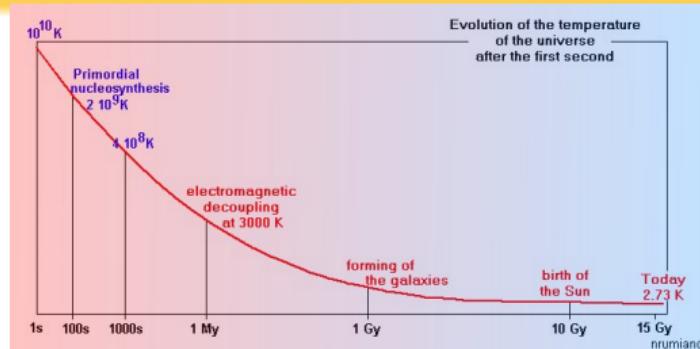


- El Universo está compuesto casi exclusivamente de materia y casi no tiene antimateria
- El universo está compuesto de materia y energía (y podemos comparar su contribución usando que $E = mc^2$).
 - La mayor parte del Universo está compuesto de Energía Oscura (73%) que es responsable de la expansión acelerada actual.
 - La materia consiste en el 27% restante.
 - Solo el 4% está compuesto por materia "normal" (llamada materia bariónica)
 - El 23% restante es materia que no sabemos de que está compuesta y que llamamos **Materia Oscura**

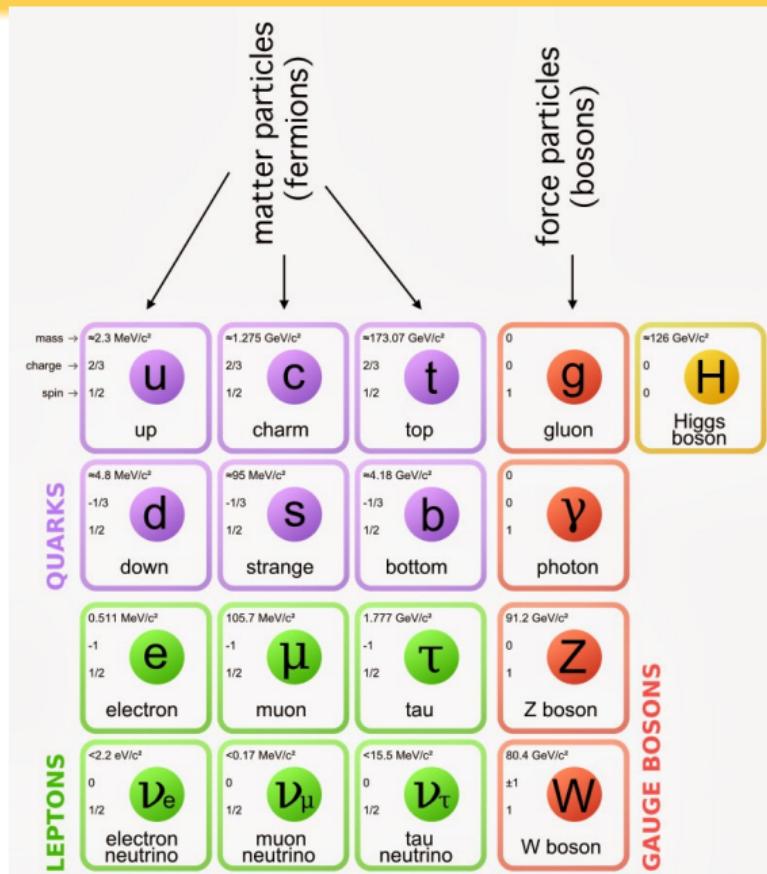
Materia Normal vs. Materia Oscura vs. Energía Oscura



Evolución Térmica del Universo



El Model Estandard de Partícules

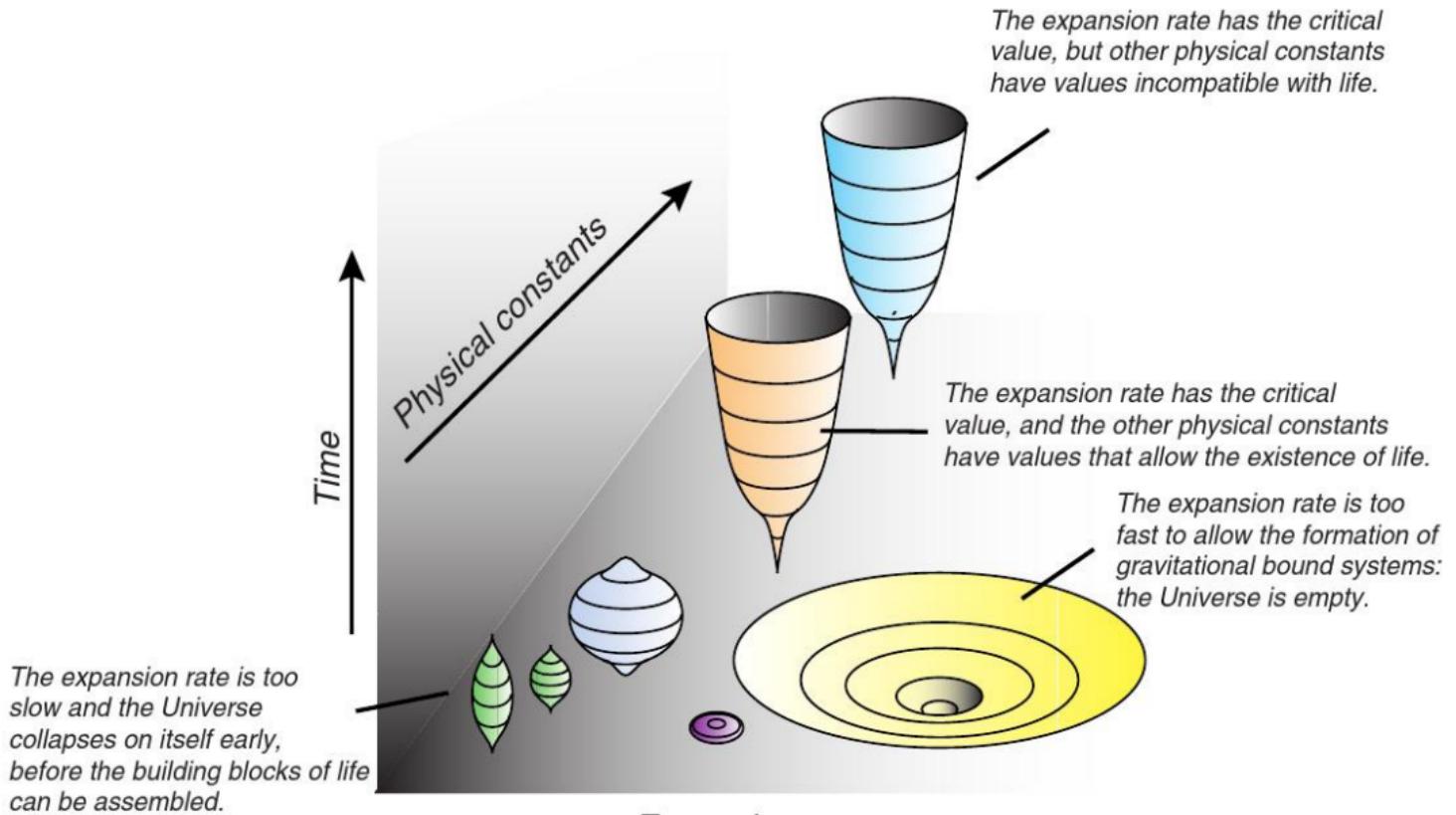


STANDARD MODEL MATTER AND FORCE PARTICLES

Origen de la proporción 75% Hidrógeno vs. 25% Helio

- Originalmente se crean cantidades iguales de protones y de neutrones
- Los neutrones son inestables, tiene una vida media de unos 10 minutos
- Con el paso del tiempo los protones se van desintegrando y el universo se va enfriando
- Llega el momento en el cual la temperatura es suficientemente baja como para que se generen núcleos de Helio (= 2 protones + 2 neutrones)
- En este momento hay 14 protones por cada 2 neutrones
 - Por cada núcleo de Helio que se forman, sobran 12 protones (= núcleos de Hidrógeno)
 - Por cada Helio hay 12 Hidrógenos
 - El Helio es 4 veces mas pesado que el Hidrógeno, por lo tanto la proporción en masa de de 75% Hidrógeno vs. 25% Helio

Multiversos



Confusiones Típicas en Cosmología

- ① La inflación cósmica; la idea que el universo tuvo una expansión súper acelerada muy temprano en el tiempo, puede que no sea correcta. Es una hipótesis (pero hay varias razones por las cuales esta hipótesis es plausible)
- ② ¡La materia oscura existe! ¡Pero no sabemos que es!
- ③ La energía oscura
 - La energía oscura puede que no exista. Es imaginable que la aceleración del universo pueda ser causada por una fuerza de la gravedad modificada. Sin embargo la idea que la energía oscura es más simple y concuerda más fácilmente con las observaciones experimentales.
 - Tenemos una hipótesis muy razonable y también muy probablemente correcta de lo que la energía oscura es: es la energía del vacío (también llamada constante cosmológica). Es una energía inherente al mismo espacio.
 - Las estimaciones cuánticas de esta energía dan valores mucho más grande que la energía medida. Resolver la discordancia entre los cálculos teóricos y la observación experimental es el gran reto.

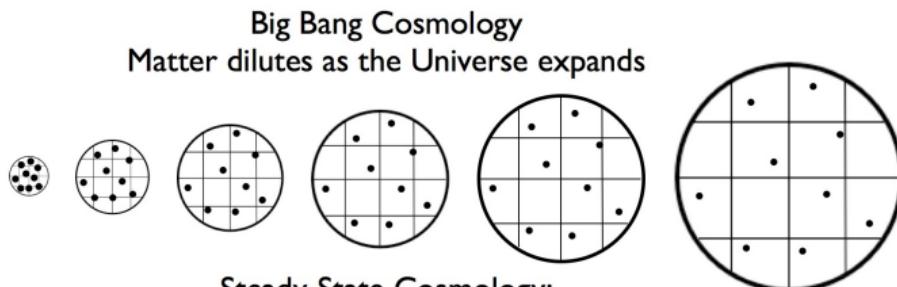
Pruebas observacionales de la existencia del Big Bang

- 1 El Universo en expansión
- 2 La radiación de fondo de microondas
- 3 La composición del Universo
- 4 La proporción entre materia y radiación
- 5 La paradoja de Olbers
- 6 El Universo está formado por materia y no por antimateria
- 7 El Universo de encuentra en evolución

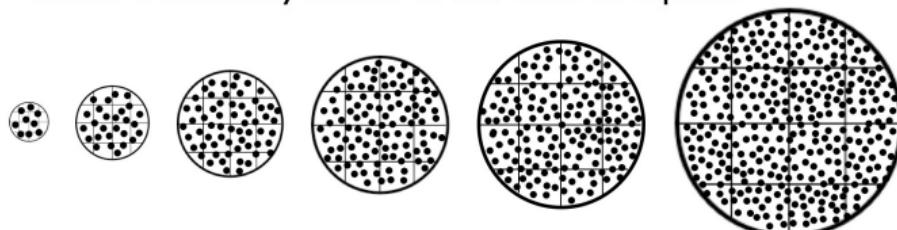
Expansión del universo y evento de Big Bang

¿La expansión del universo prueba la existencia de un evento de Big Bang?

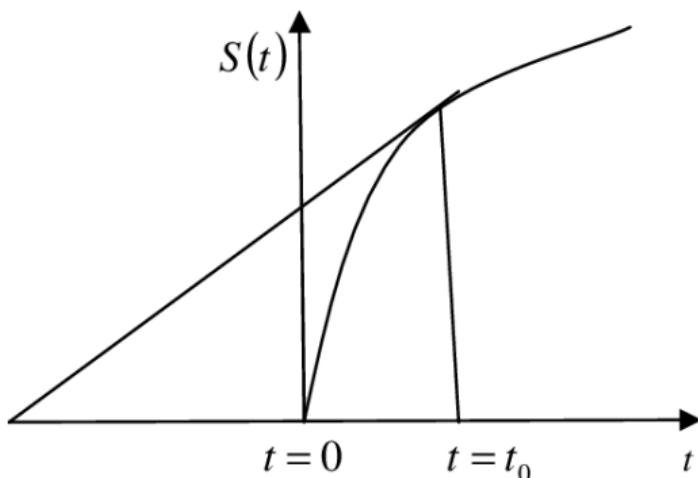
- No!
- Un modelo cosmológico rival fue propuesto por Fred Hoyle, Bondi y Gold en 1948: el modelo del universo de "Estado Estacionario"
 - Materia (Hidrógeno) es continuamente creada en todo el universo de tal manera que la densidad de materia permanece constante a pesar de que el universo se expanda



Steady-State Cosmology:
Matter is constantly created as the Universe expands



El problema con la determinación de la edad del Universo



- A partir de la constante de Hubble H_0 se puede hacer una estimación de la edad del universo
 - Usando los datos originales de Hubble: el Universo tiene como máximo 2.000 millones de años (comparar con edad de la tierra: 4.500 millones de años!!!)
 - Problema: Las mediciones hechas por Hubble de la distancia de las galaxias tenía errores debido a que hay distintos tipos de estrellas variable Ceféidas
 - Una vez corregidos estos errores se estima una edad máxima del Big Bang de 14.000 millones de años.

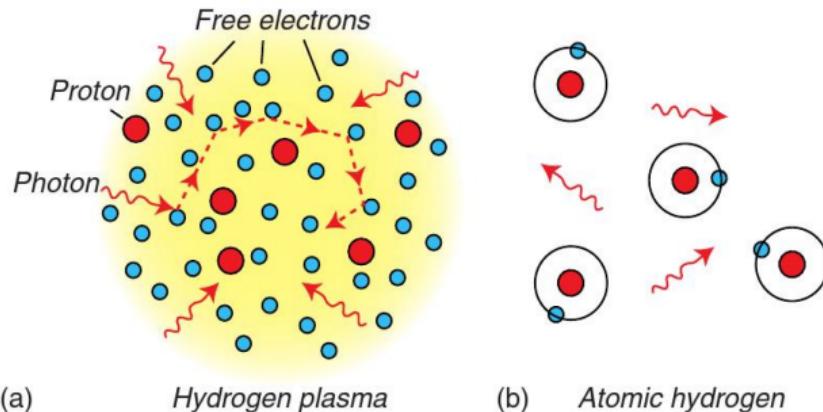
El Universo Oscuro: La Materia Oscura

¿Cuáles son los principales candidatos para la materia oscura?

- Dependiendo de la velocidad con la que se mueve de la materia oscura se la puede clasificar en:
 - "caliente" (hot dark matter; partículas livianas moviéndose a velocidades cercanas a la de la luz),
 - "tibia" (warm dark matter) y
 - "fría" (cold dark matter; partículas pesadas moviéndose a bajas velocidades).
- Los modelos de materia oscura mas usuales asumen que ese trata de materia oscura "fría" (cold dark matter) en el cual las estructuras emergen a partir de una acumulación gradual de partículas en una zona específica.
- El principal candidato para la materia oscura es algún tipo desconocido de partícula elemental que todavía no se ha descubierto. Por ejemplo:
 - WIMPs (weakly-interacting massive particles)
 - GIMPs (gravitationally-interacting massive particles)
 - Axiones

La Radiación de Fondo de Microondas

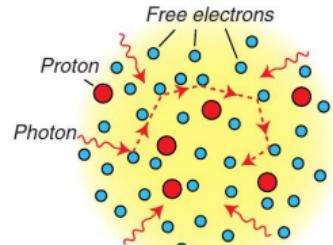
Gamow predice la existencia de la Radiación de Fondo de Microondas en 1948



- Eventos:
 - (1) Como resultado del Big Bang se generó casi la misma cantidad de materia que de anti-materia
 - (2) Poco después la materia y la anti-materia se aniquilan produciendo una cantidad enorme de radiación (fotones) de muy alta energía (rayos gamma)
 - (3) La materia que sobrevivió a la aniquilación inicial, se encontraba en forma de plasma (lo protones y neutrones por un lado y los electrones por el otro)
 - (4) Los fotones de alta energía no pueden viajar libremente por el universo ya que continuamente interactúan (chocan) con los electrones libres: el universo es opaco

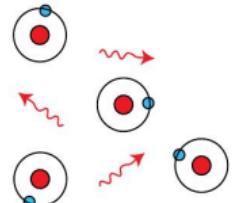
La Radiación de Fondo de Microondas

Gamow predice la existencia de la Radiación de Fondo de Microondas en 1948

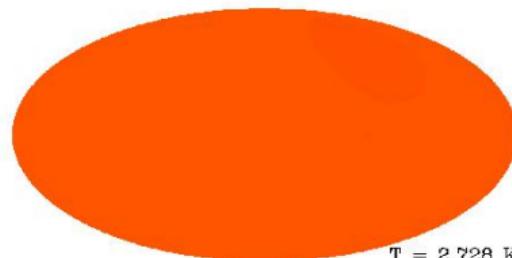


(a)

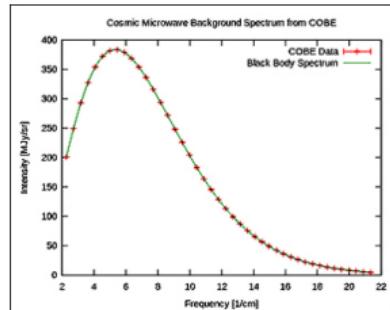
Hydrogen plasma



(b) Atomic hydrogen



$T = 2.728 \text{ K}$

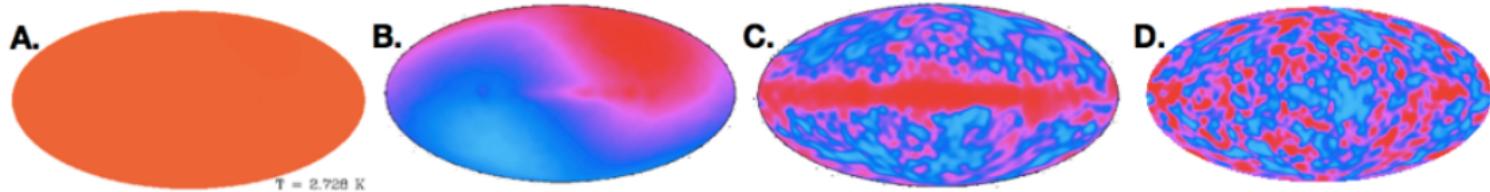


- Eventos:

- (5) 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 (enana roja; unos 3000 K) y en este momento los electrones se recombinan con los núcleos dejando libre el paso para los fotones.
- 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 los llega como microondas

La Radiación Cósmica de Fondo y sus Ondulaciones

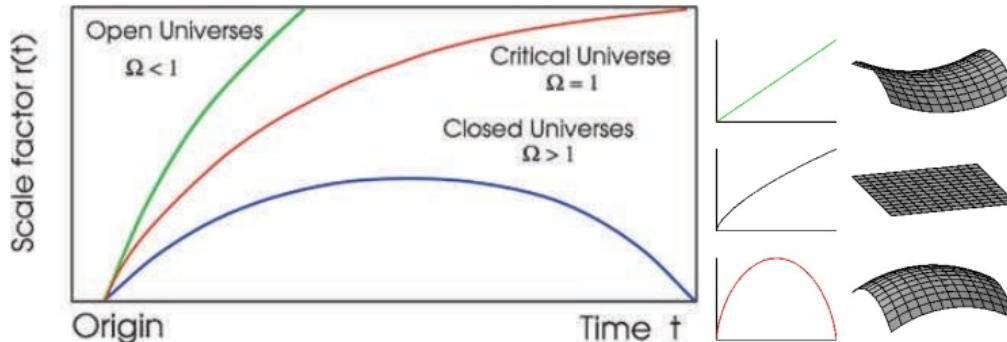
Las fluctuaciones de la radiación de fondo cósmica se pueden estudiar de la siguiente manera:



- ① Fondo de radiación perfectamente isotrópico de 3 Kelvin (el mismo en cualquier dirección)
- ② Dipolo resultante de nuestro movimiento respecto al fondo ($+/- 0.003$ Kelvin)
- ③ Fluctuaciones primordiales (en una escala $+/- 0.00002$ Kelvin)

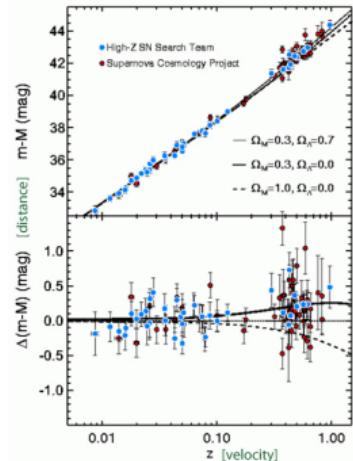
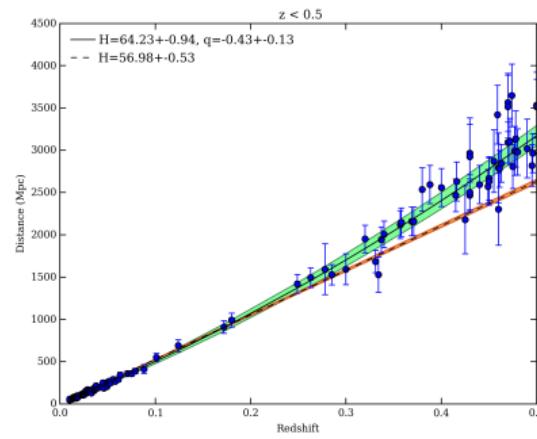
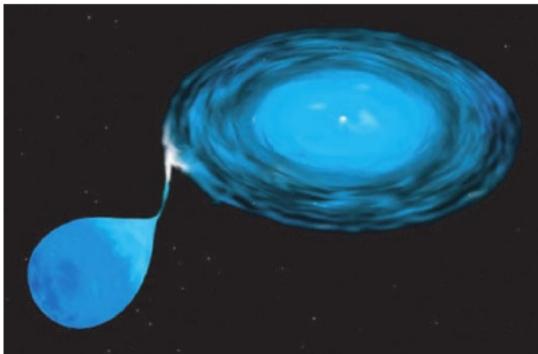
Teoría de la Inflación Cósmica

- En los años 1970s la teoría del Big Bang existente se encuentra con dos problemas:
 - El problema de la "planitud":** las mediciones de la densidad del universo dan valores de $\Omega = 1$
 - Por lo tanto predicen un universo plano.
 - Pero de los modelos de Friedmann y Lemaître se deduce que $\Omega = 1$ es un caso umbral y que si la densidad fuese un poco menos o más de 1 con el tiempo tendería a hacerse cada vez mas distinta de 1.
 - El problema del "horizonte":** La radiación de fondo observada por Penzias y Wilson es increíblemente homogénea, incluso en direcciones opuestas del universo.
 - Zonas que no pueden haber estado conectadas casualmente en ningún momento tienen temperaturas prácticamente iguales.

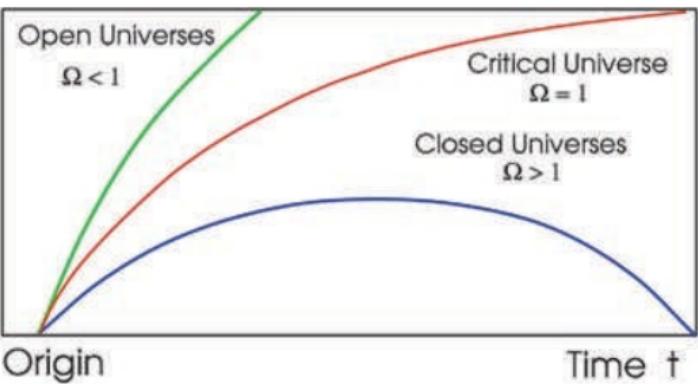
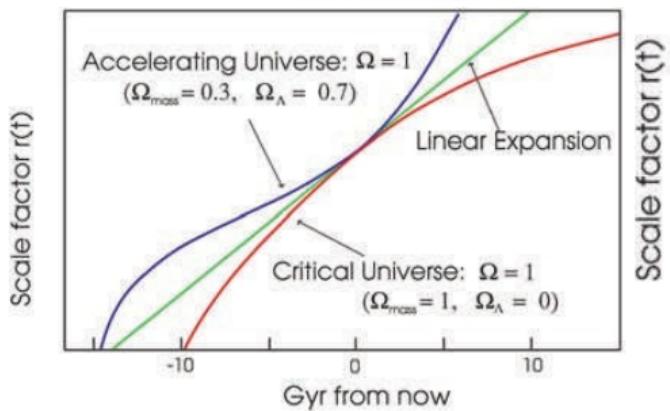
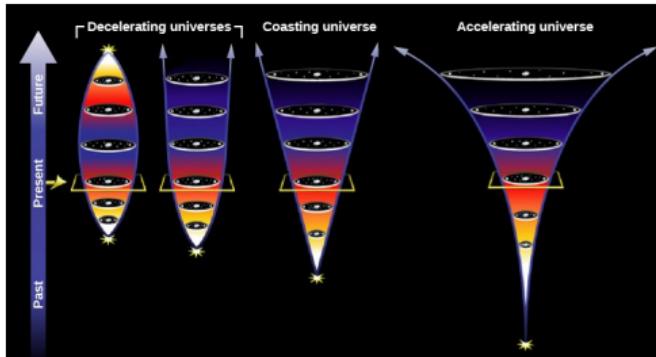
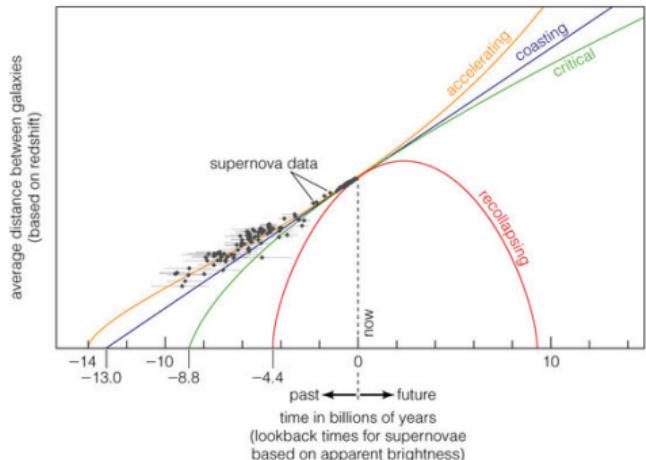


Perlmutter, Riess y Schmidt 1998: Expansión Acelerada

- 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 6000 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

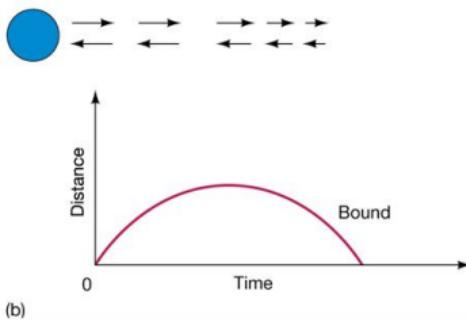
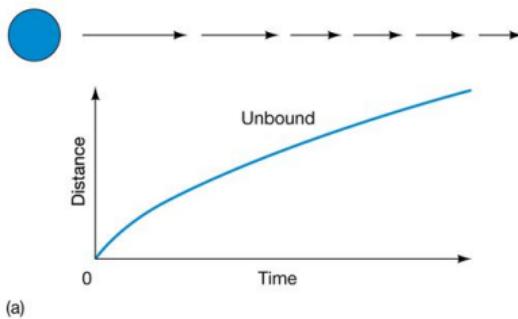
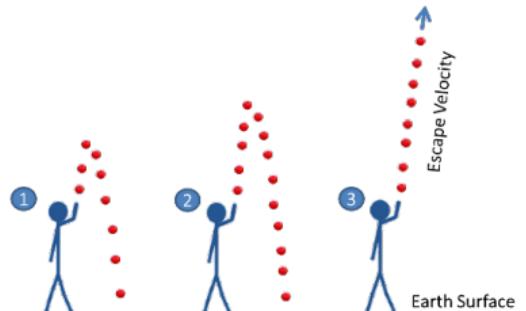


Expansión Acelerada del Universo

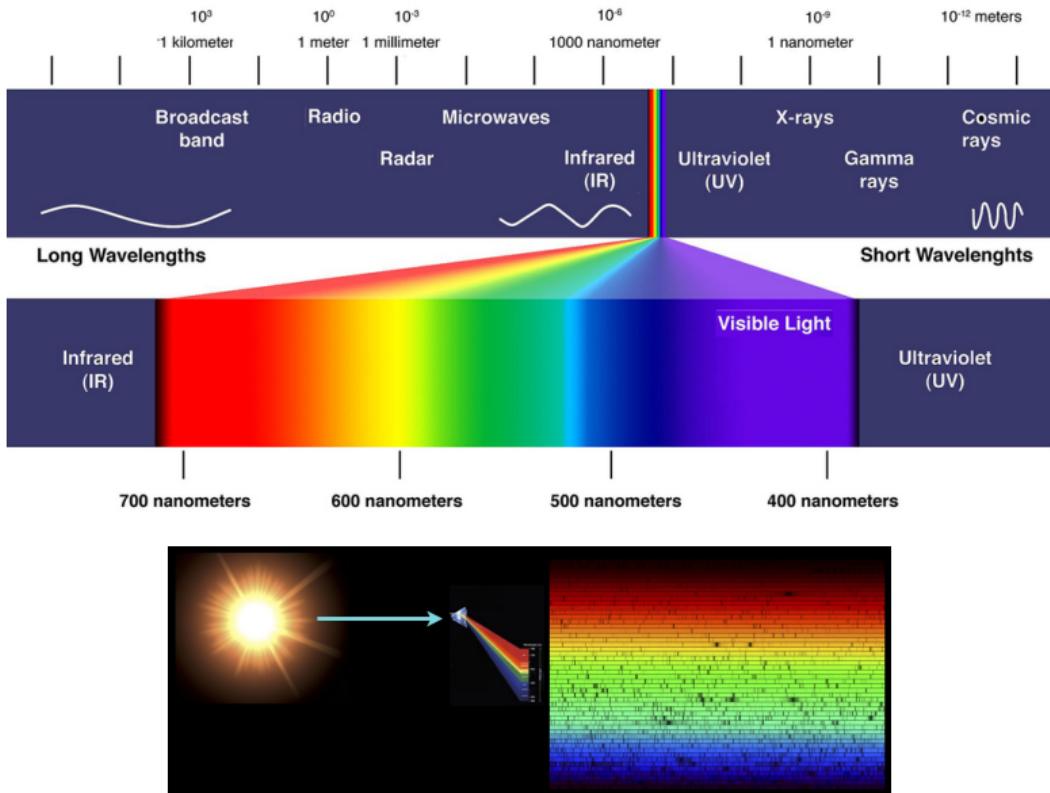


Universo en Expansión o Recolapso

- 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.



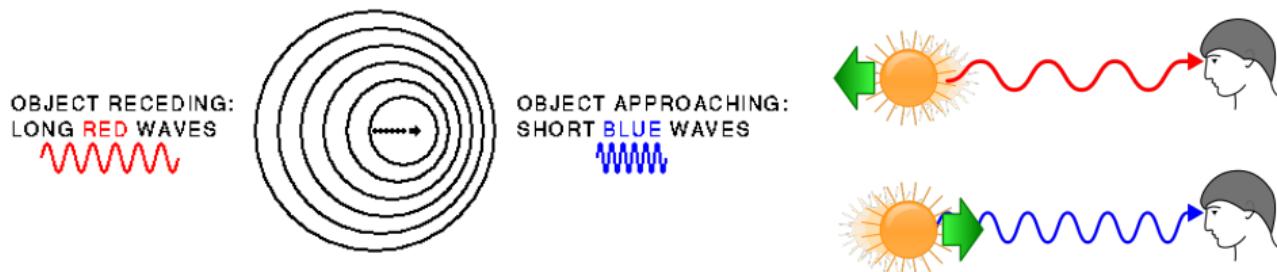
La luz y el Espectro de la Radiación Electromagnética



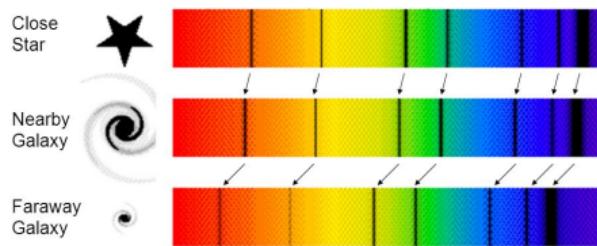
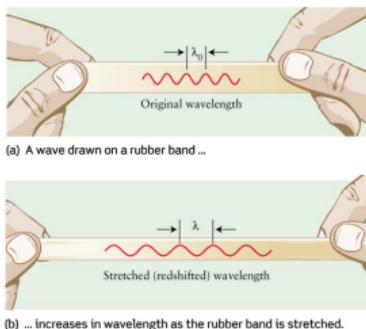
- La luz de estrellas y galaxias que observamos corresponden solo a una pequeña parte del espectro de la radiación electromagnética

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!

