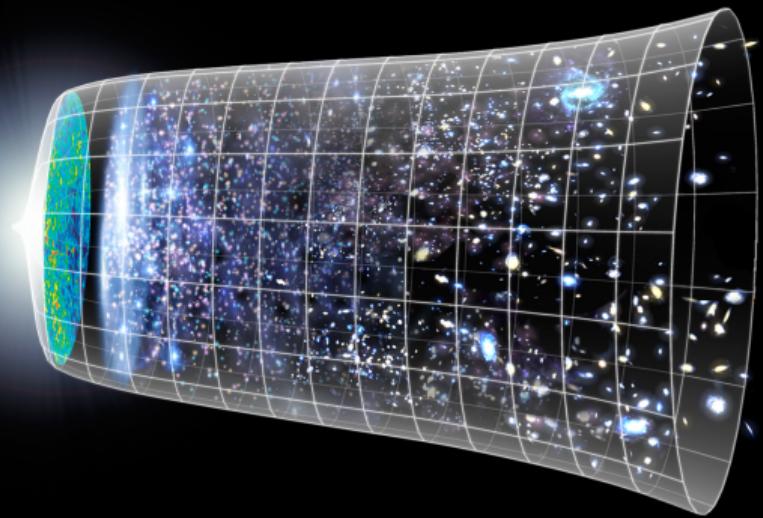


# Cosmología

## Evolución del universo

Ernesto Nicola

Palma, 29-11-2024



NASA/WMAP Science Team

- 1** ¿Qué es la cosmología?
- 2** Evolución del universo
  - El Big Bang y el universo en expansión
    - *Historia:* Hubble y la confirmación del universo en expansión
  - El universo observable
  - El período inflacionario
  - Los primeros átomos y la radiación de fondo cósmico
    - *Historia:* La recombinación y la radiación del fondo de cósmico
  - La era oscura y las primeras estrellas y galaxias
  - Expansión acelerada del universo
    - *Historia:* La expansión acelerada del universo y la energía oscura
  - El futuro del universo
- 3** Desmontando confusiones sobre cosmología

# 1 ¿Qué es la cosmología?

# ¿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.
- RAE: Cosmología = teoría científica que trata del origen y la evolución del universo.

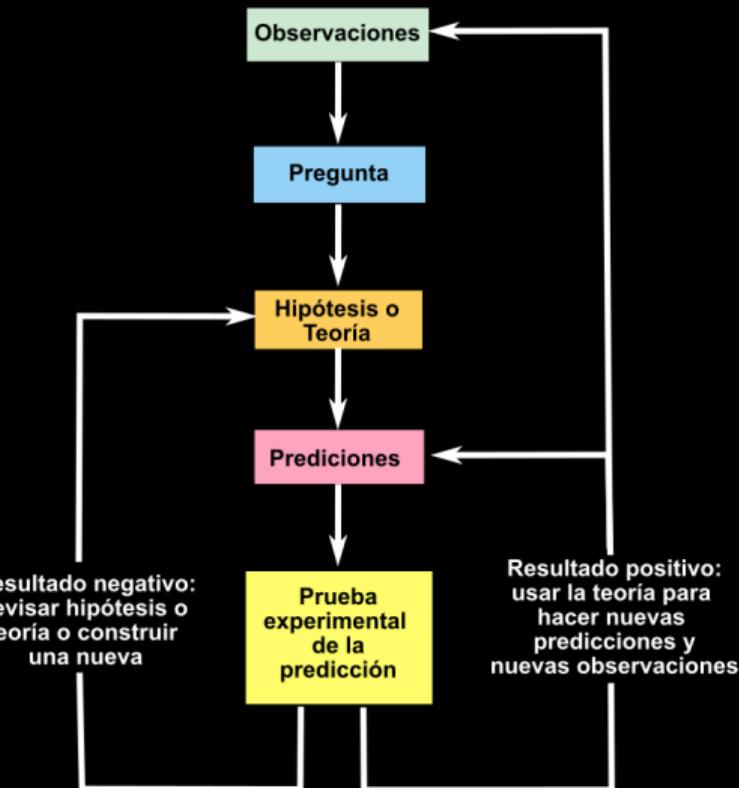


Sidney Harris

# 1 ¿Qué es la cosmología?

## 1.1 ¿Qué es el método científico?

# ¿Cómo funciona el método científico?



El método científico es una **metodología para obtener conocimientos sobre la naturaleza**

- Observaciones de un fenómeno natural
- Formulación de una pregunta
- Planteamiento de una hipótesis o teoría
- Elaboración de una predicción (falsable)
- Verificación experimental de la predicción
  - Resultado positivo del experimento: el experimento apoya la teoría, hacer otras predicciones y validarlas experimentalmente. Usar la teoría para diseñar nuevas observaciones
  - Resultado negativo del experimento: la predicción no es corroborada por el experimento; revisar la hipótesis o hacer una nueva.

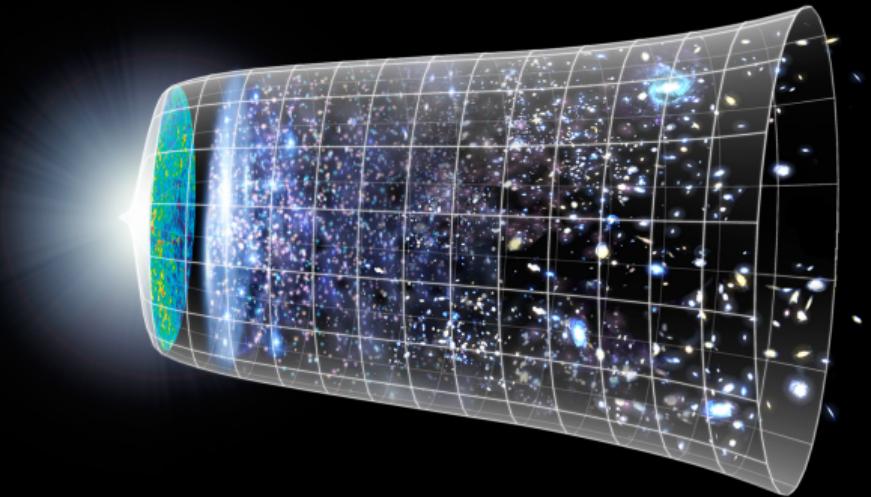
# La construcción del conocimiento científico

- A medida que la evidencia se acumula, el conocimiento científico y su nivel de certidumbre se incrementan



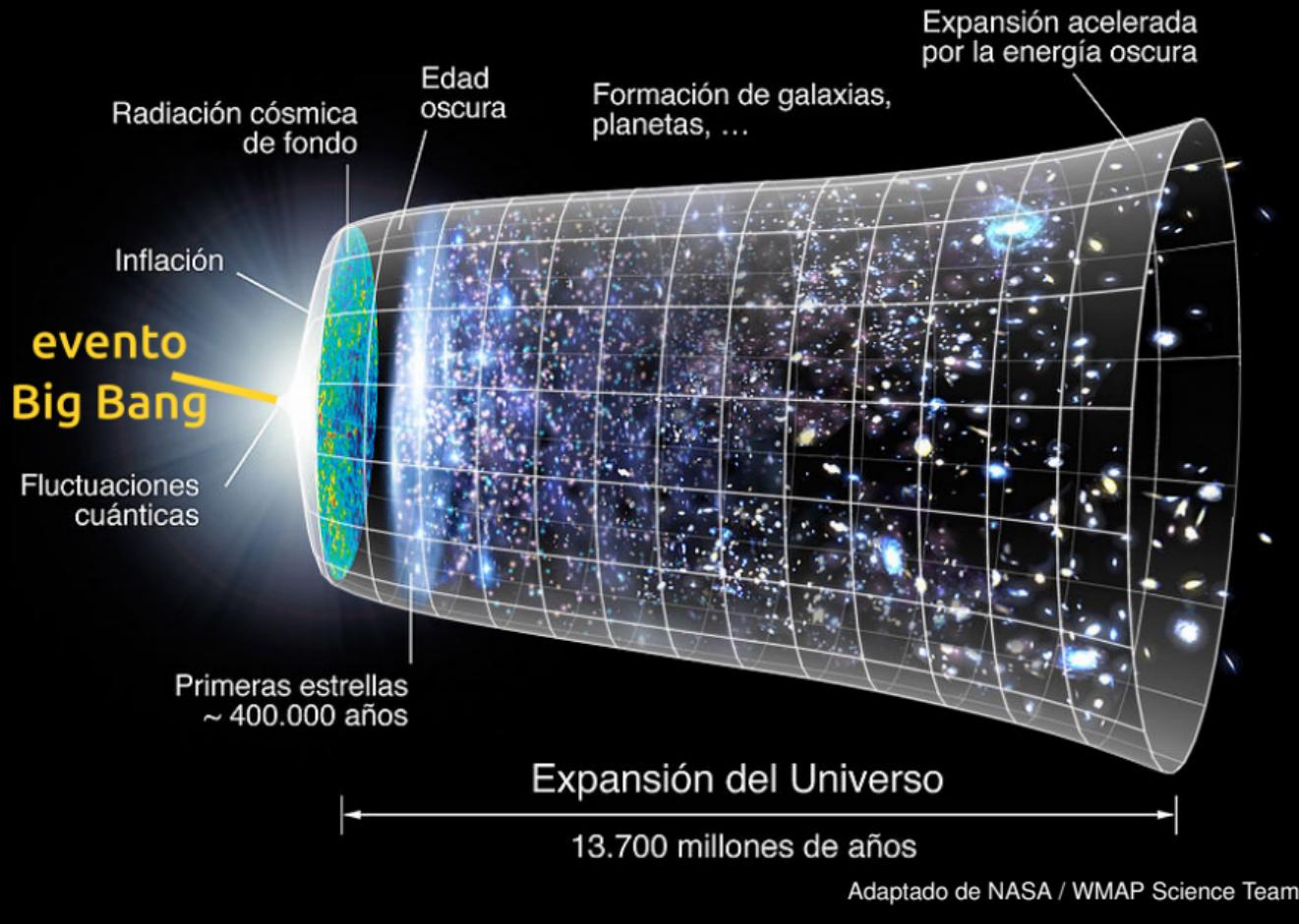
- ¡Las áreas del conocimiento científico más cercanas a la frontera son más tentativas!

# ¿Preguntas?



Adaptado de NASA / WMAP Science Team

## 2 Evolución del universo

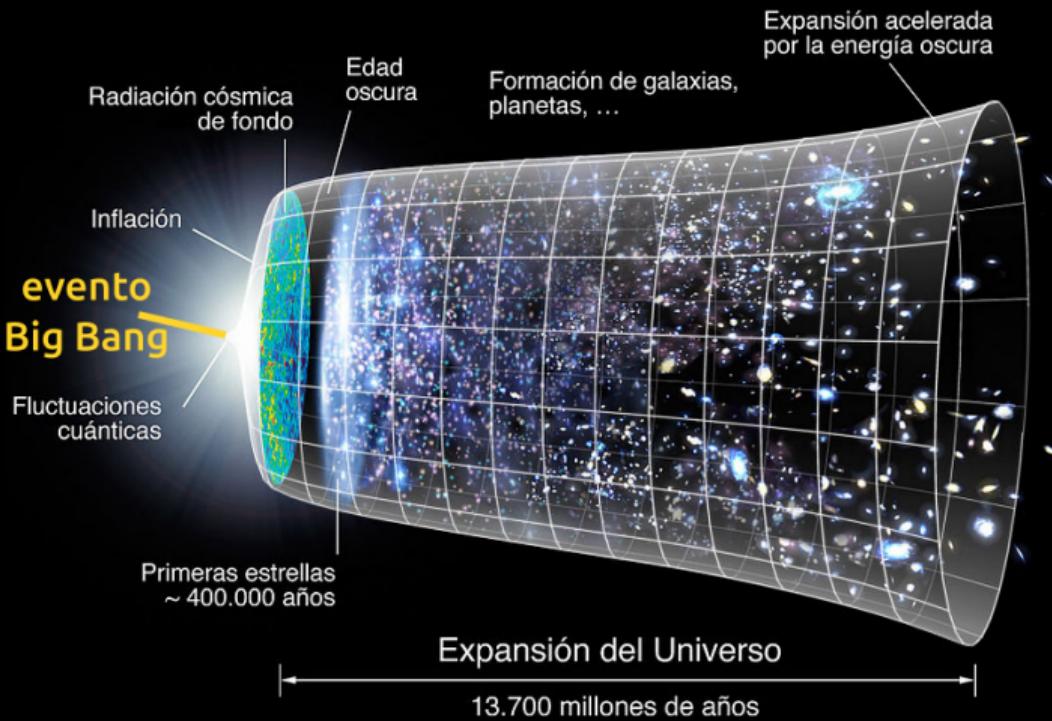


- 1 El Big Bang
- 2 El período inflacionario
- 3 Los primeros átomos
- 4 La radiación de fondo cósmico
- 5 La era oscura
- 6 Las primeras estrellas y galaxias
- 7 Expansión acelerada del universo
- 8 El futuro del universo

## 2 Evolución del universo

### 2.1 El Big Bang y el universo en expansión

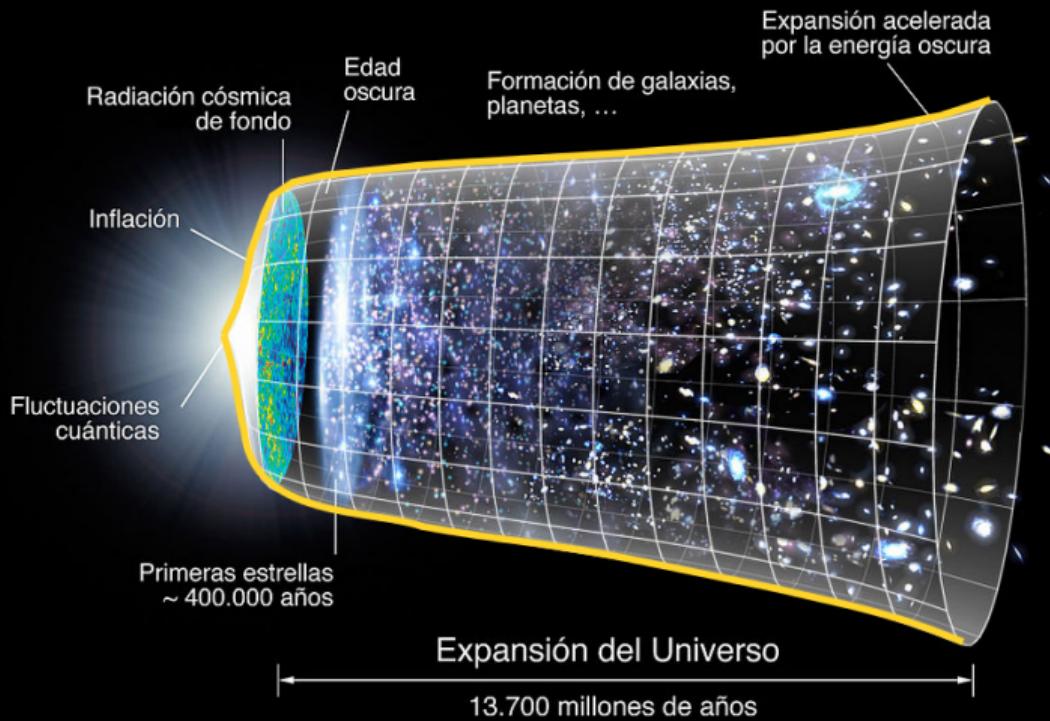
# El origen del universo: el Big Bang



- El Universo se originó en un evento llamado **Big Bang** hace 13.800 millones de años.
- El evento del Big Bang ocurrió en un momento dado del tiempo pero no en un sitio específico del espacio (¡no fue una "explosión"!).

Adaptado de NASA / WMAP Science Team

# Un universo en expansión



Adaptado de NASA / WMAP Science Team

- 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 modelo del Big Bang es compatible con un universo infinito (¡incluso en el momento de su creación!)

## 2.1 El Big Bang y el universo en expansión

*Historia:* Hubble y la confirmación del universo en expansión

# Slipher (1915): el universo se expande!

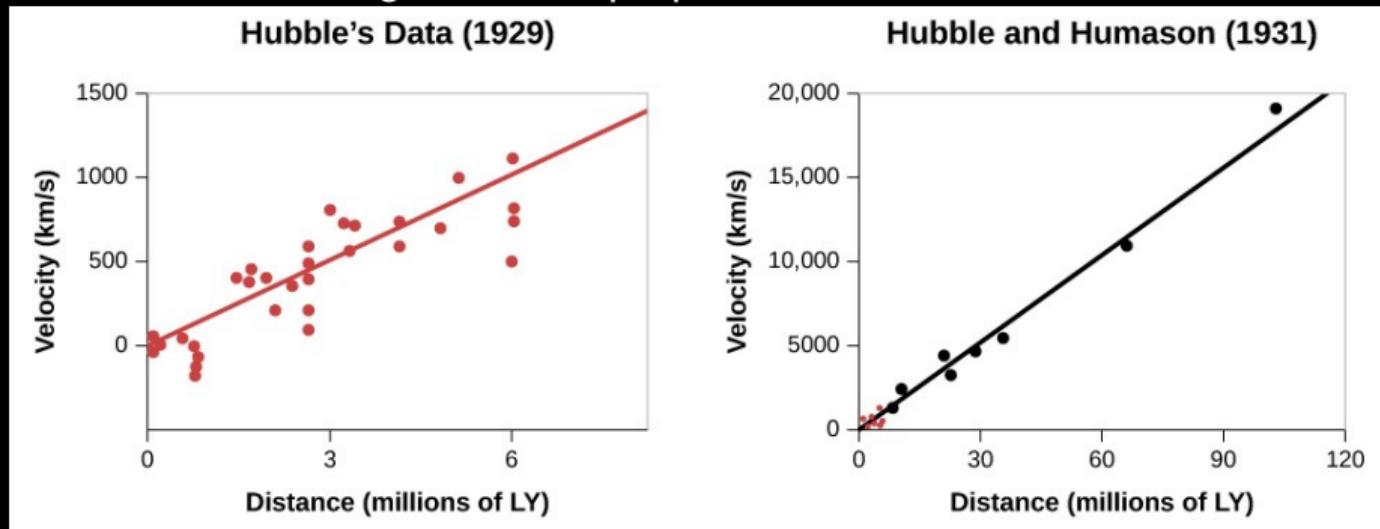


- Vesto Slipher (1875-1969): fue el primero en estudiar la velocidad de galaxias lejanas. Descubrió que muchas galaxias se están alejando de nosotros!
- ¡Primera evidencia que el universo se expande!

# Hubble (1929): el universo se expande

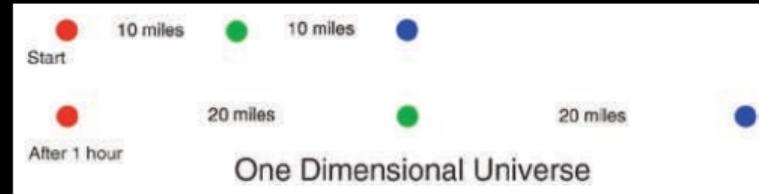


- Edwin Hubble (1889-1953) combina las mediciones de Slipher de velocidad de las galaxias con sus medias de distancias usando estrellas variables del tipo *cefeidas* (Henrietta Swan Leavitt 1868-1921)
- ¡Hubble descubre que la velocidad a la que se alejan las galaxias es proporcional a su distancia!

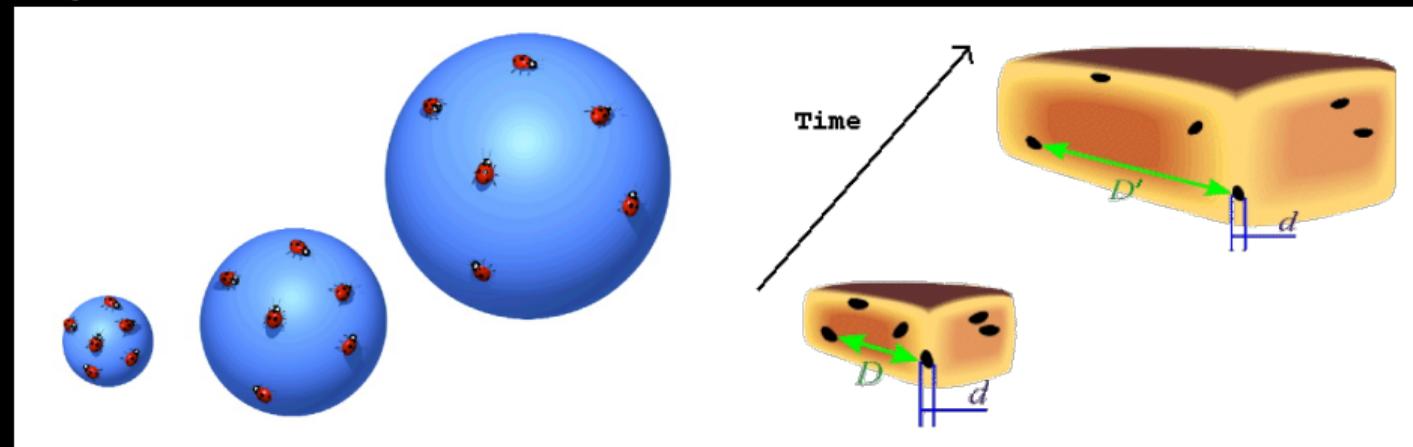


# Hubble (1929): el Universo se expande y tiene un origen temporal

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



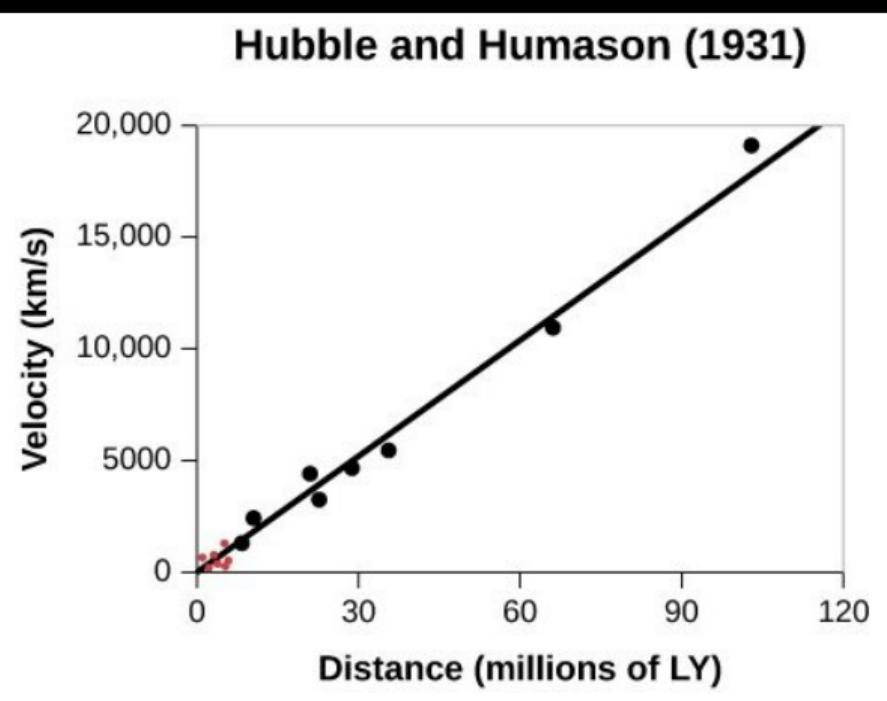
- Analogías:



globo que se hincha

pudín con pasas que sube

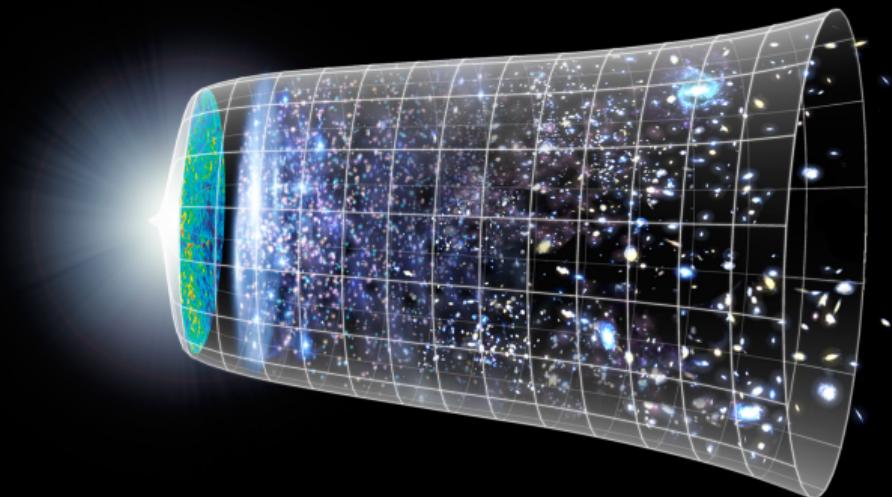
# Hubble (1929): La constante de Hubble y la edad del universo



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

- $v = H_0 D$ 
  - $v$  es la velocidad de recesión
  - $D$  es la distancia entre objetos
  - $H_0$  es la llamada constante de Hubble
- A partir de la constante de Hubble  $H_0$  se puede hacer una estimación de la edad del universo
  - La constante de Hubble tiene unidades de *velocidad/distancia*, en consecuencia tiene unidades de *1/tiempo*
- El Universo se originó hace unos 13.800 millones de años

¿Preguntas?

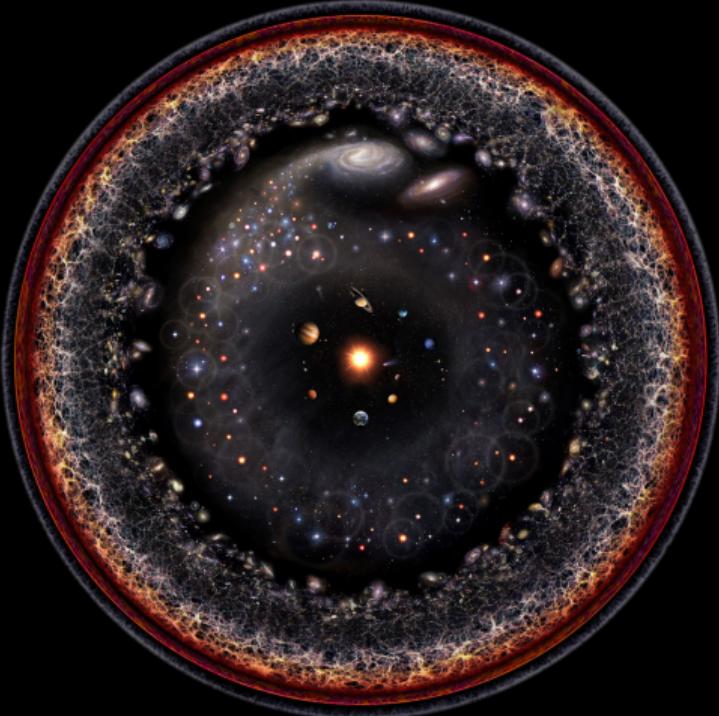


Adaptado de NASA / WMAP Science Team

## 2 Evolución del universo

### 2.2 El universo observable

# El universo observable



- Mirar lejos en el universo es contemplar su pasado
  - Ya que los fotones viajan a una velocidad finita, necesitan tiempo para llegar desde su origen hasta nosotros.
  - Los fotones que llegan aquí ahora informan de cómo era la fuente en el momento de su emisión y de eso puede hacer hasta miles de millones de años
  - Pero como el universo no ha existido siempre, solo podemos observar una región finita del universo con forma de esfera: el **universo observable**.

# Tamaño del universo observable



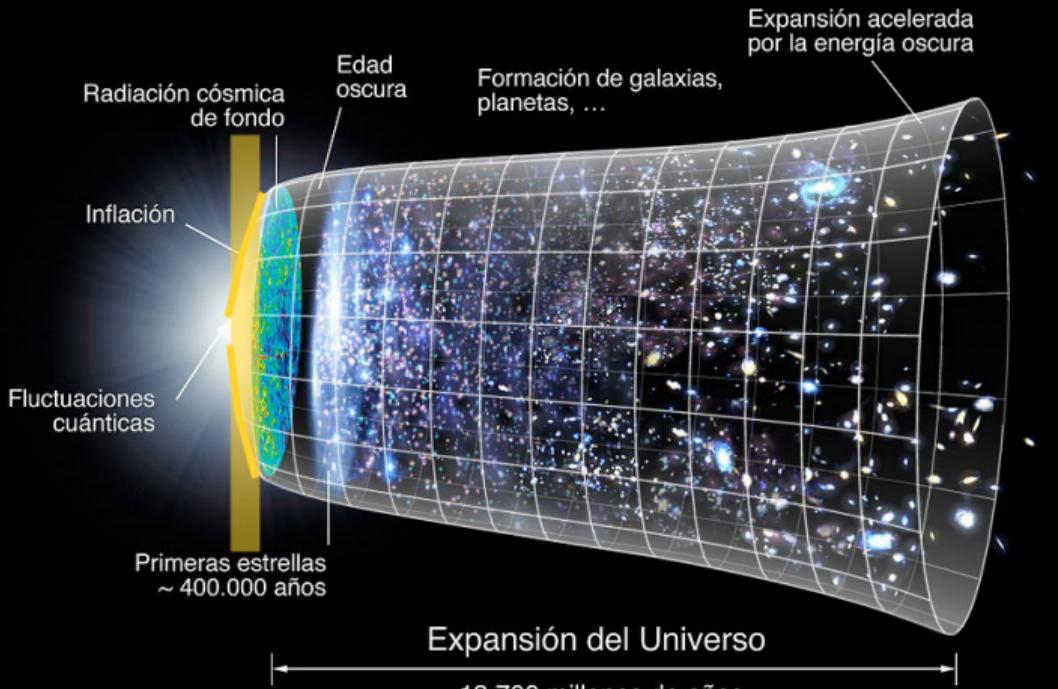
Solo podemos observar una parte finita del universo: el llamado **universo observable**

- 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 esfera 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!
  - Hay aproximadamente tantas galaxias en el universo observable como estrellas en la Vía Láctea

## 2 Evolución del universo

### 2.3 El período inflacionario

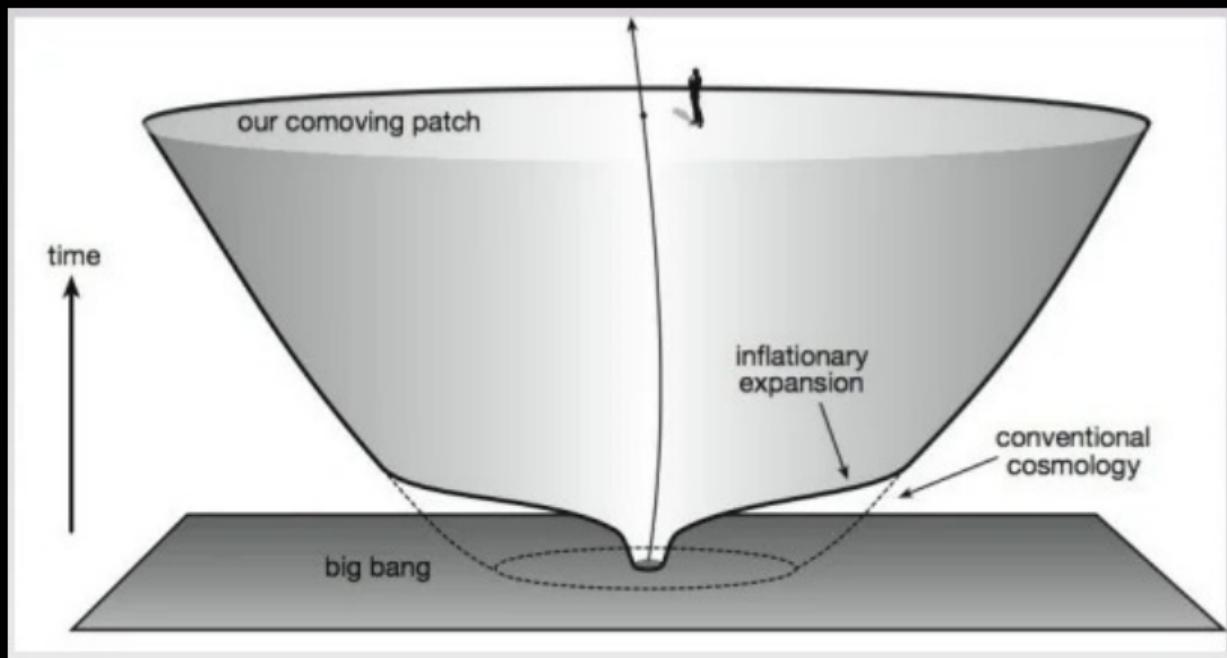
# El período inflacionario



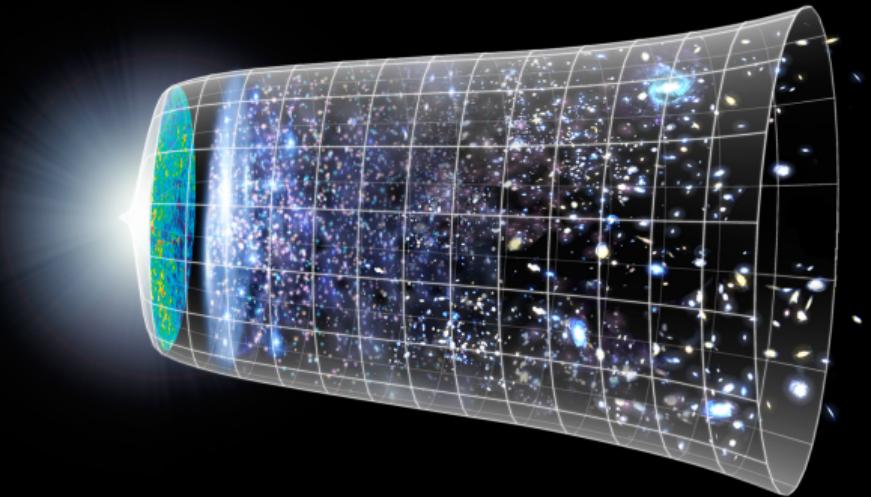
Adaptado de NASA / WMAP Science Team

- Poco después del Big Bang ocurre la llamada "**inflación cósmica**"
- Durante la inflación cósmica el universo se expandió de manera extremadamente rápida
- La inflación solo dura una fracción minúscula de un segundo
  - En este período el universo se expande a una velocidad muy superior a la de la luz

# Evolución del universo: el período inflacionario



# ¿Preguntas?

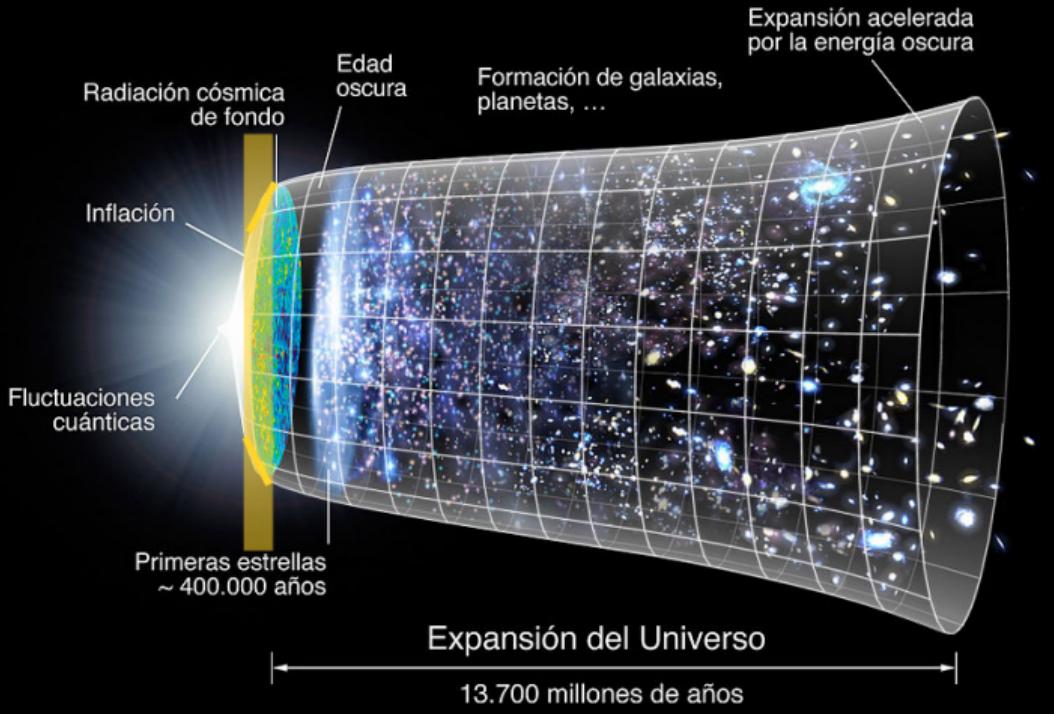


Adaptado de NASA / WMAP Science Team

## 2 Evolución del universo

### 2.4 Los primeros átomos y la radiación de fondo cósmico

# El universo opaco: los primeros átomos

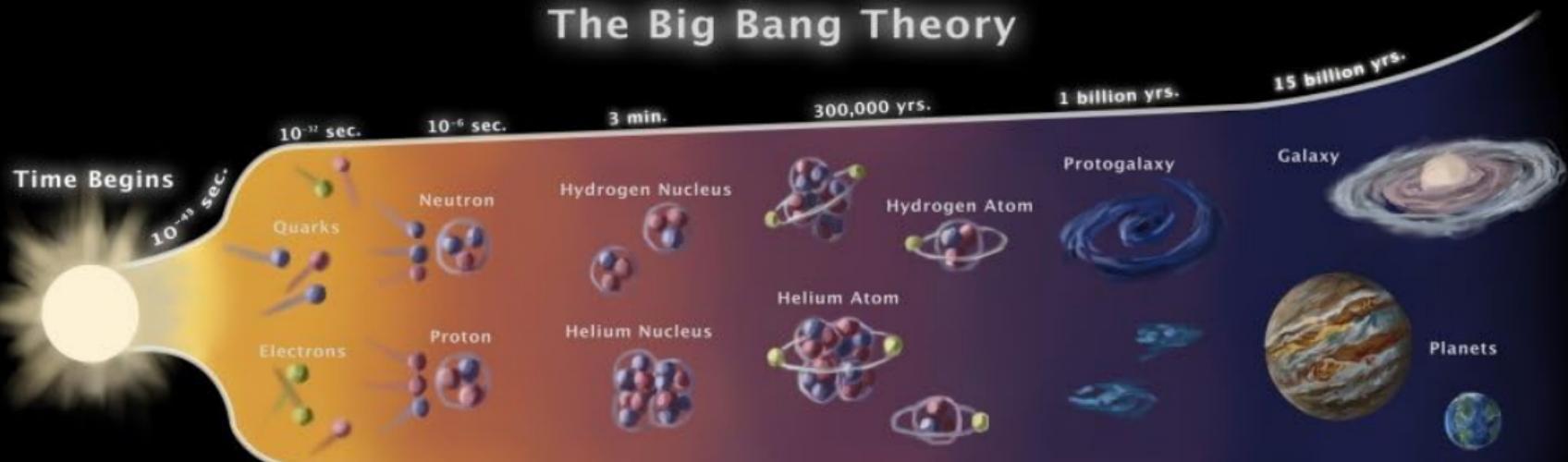


Adaptado de NASA / WMAP Science Team

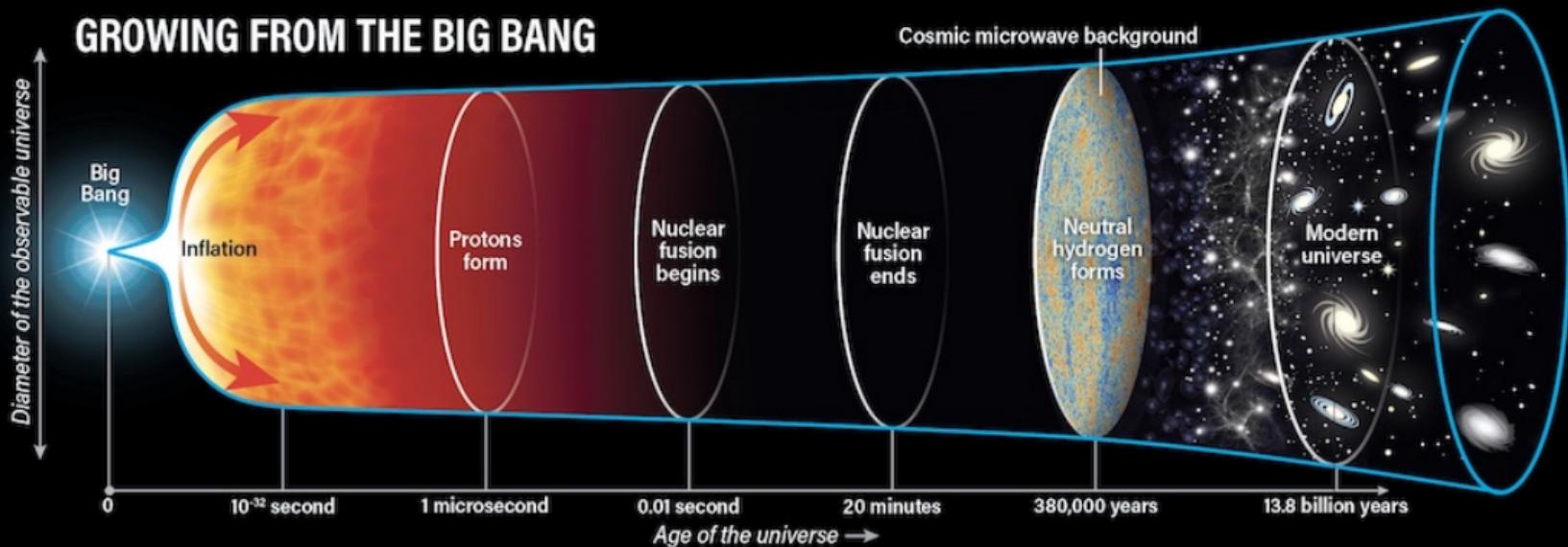
- Durante los primeros segundos posteriores al Big Bang se forman:
  - 1 Las partículas elementales (quarks, electrones, etc.)
  - 2 Los neutrones y protones (nucleones) a partir de los quarks
  - 3 Los núcleos de Hidrógeno y Helio (la nucleosíntesis)
  - 4 La mayoría de los átomos de Hidrógeno y Helio que componen hoy el universo se formaron en este período

# Formación de partículas elementales, nucleones, núcleos y átomos

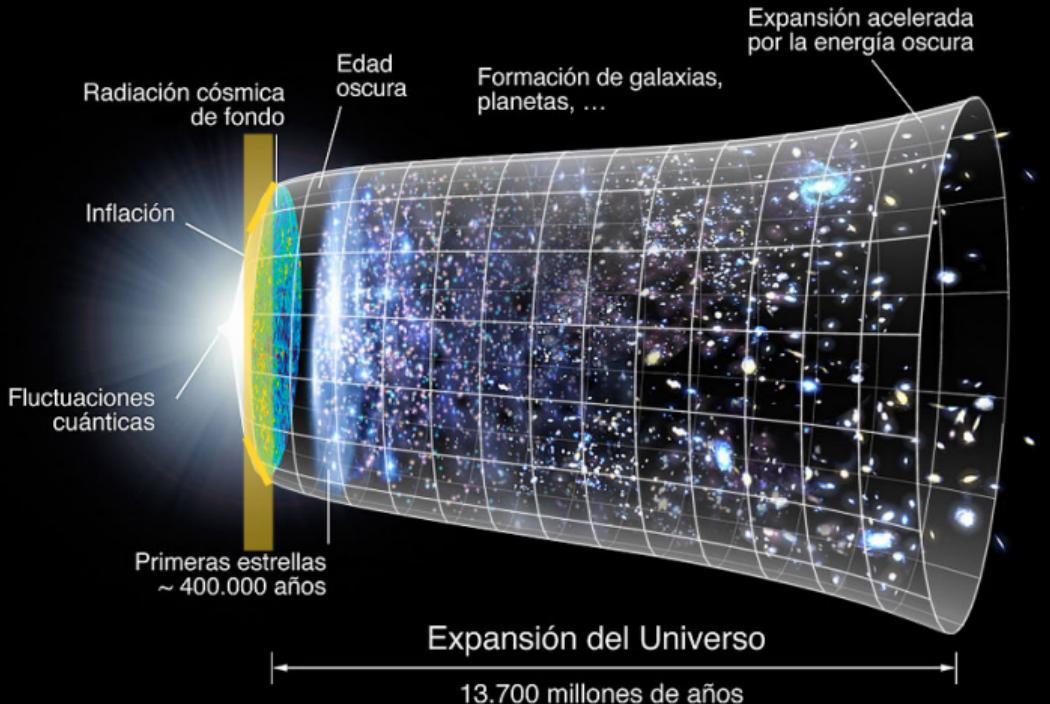
## The Big Bang Theory



# Formación de partículas elementales, nucleones, núcleos y átomos



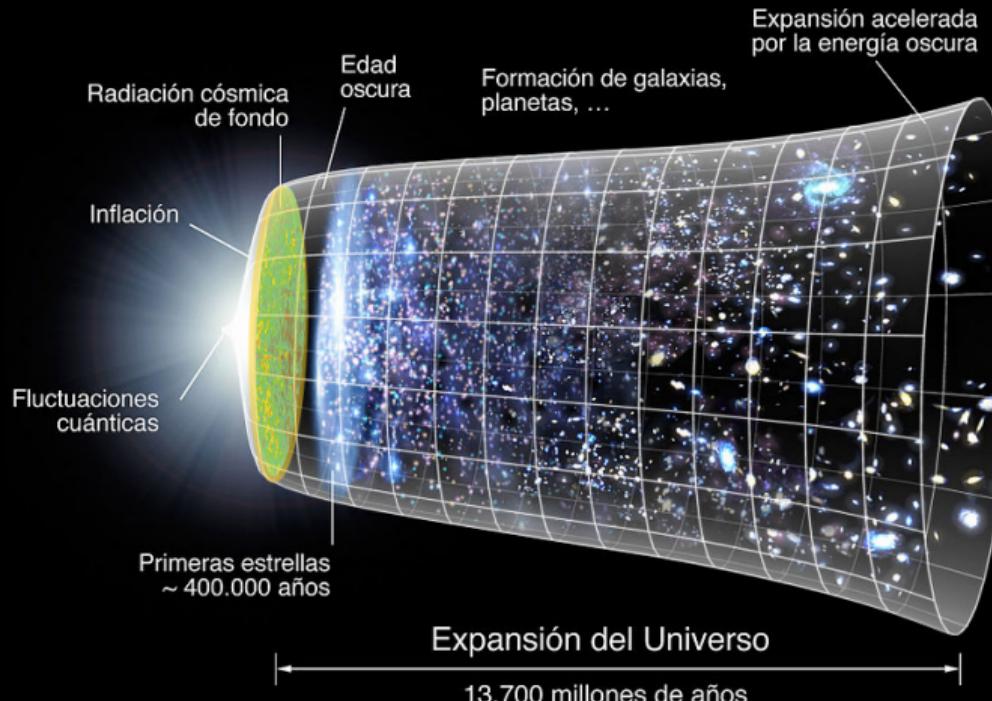
# El universo opaco: los primeros átomos



- Durante este período el **universo era opaco**, ya que los fotones (la luz) no podían moverse libremente

Adaptado de NASA / WMAP Science Team

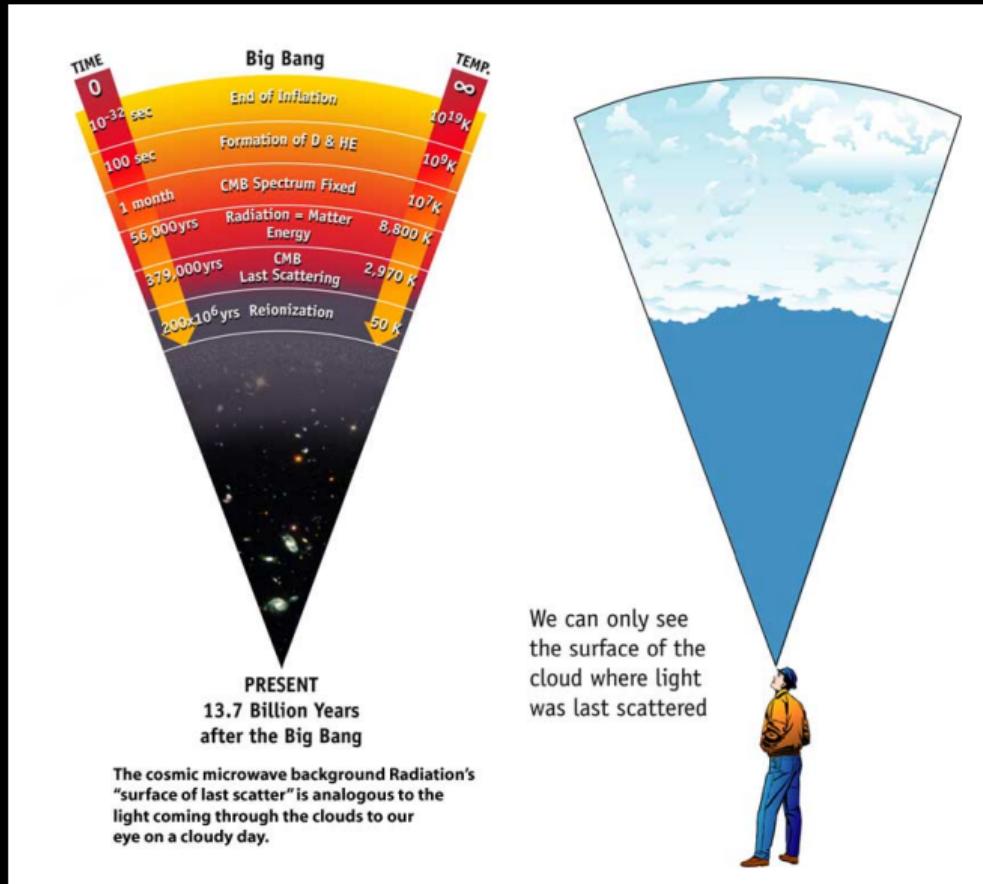
# El universo se hace transparente: radiación del fondo cósmico



Adaptado de NASA / WMAP Science Team

- Desde el Big Bang hasta los ~ 375.000 años el universo fue opaco,
- ~ 375.000 años después del Big Bang el universo se hace transparente.
- La **radiación de microondas del fondo cósmico** es la "luz fósil" del Big Bang que podemos observar en la actualidad

# El universo se hace transparente: radiación del fondo cósmico

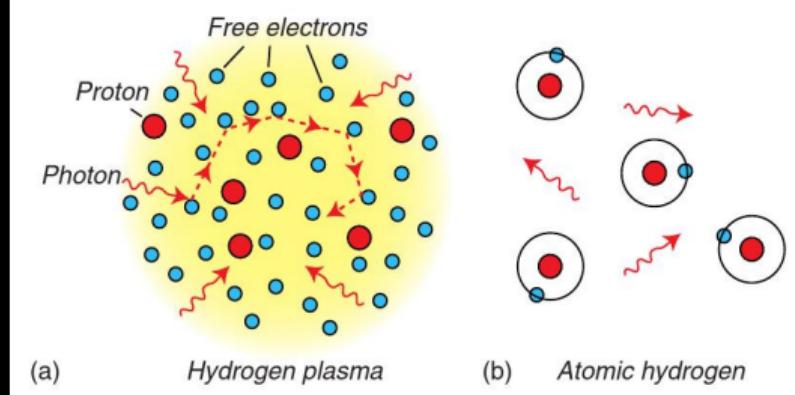


## 2.4 Los primeros átomos y la radiación de fondo cósmico

*Historia:* La recombinación y la radiación del fondo de cósmico

# Gamov 1948: predicción de la recombinación y radiación de fondo

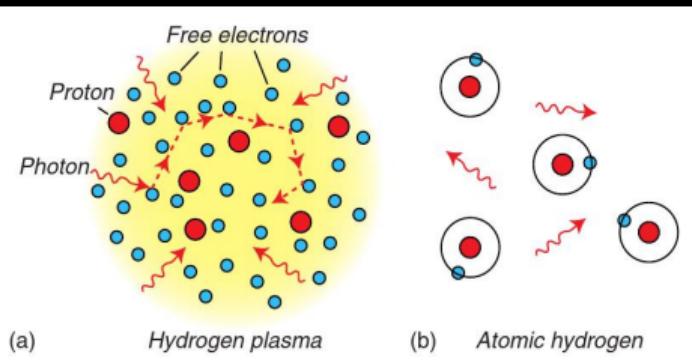
- El físico George Gamow (1904-1968) fue el primero en considerar de manera teórica en 1948 la evolución del universo primitivo, muy poco tiempo después del Big Bang.



- Gamow se dio cuenta que:

- 1 Durante período posterior al evento del Big Bang el universo era opaco. Estaba compuesto por un plasma ionizado de protones, neutrones y electrones
- 2 A medida que el universo se expande, también se enfriá.
- 3 **Recombinación**: Hay un momento en el cual los protones, neutrones y electrones que componen el plasma forman átomos de  $H$  y  $He$ .
- 4 **Radiación del fondo cósmico**: el universo se transforma en transparente. Hoy recibimos esta radiación de manera homogénea de todas las direcciones en el cielo como radiación electromagnética de microondas.

# Gamov 1948: recombinación y radiación del fondo cósmico

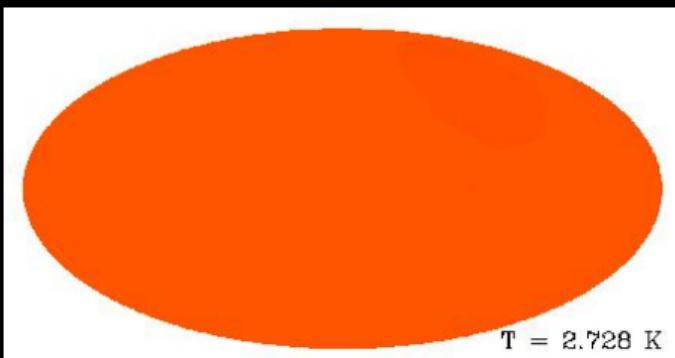


## ■ Recombinación:

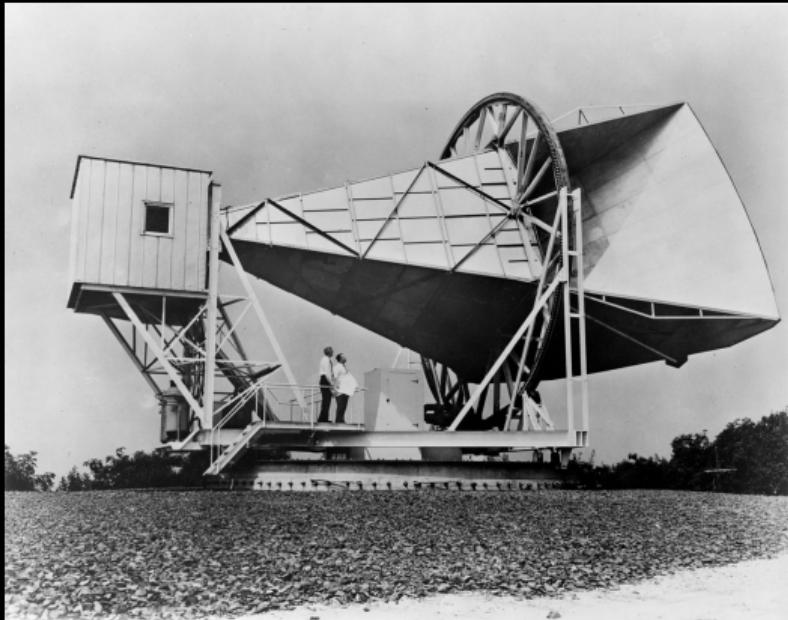
- El universo se enfria con el paso del tiempo.
- 380.000 años después del Big Bang el universo tiene la misma temperatura que la superficie de una estrella (una enana roja de unos 3000 °K).
- En este momento los electrones se combinan con los núcleos dejando libre el paso a los fotones.

## ■ 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



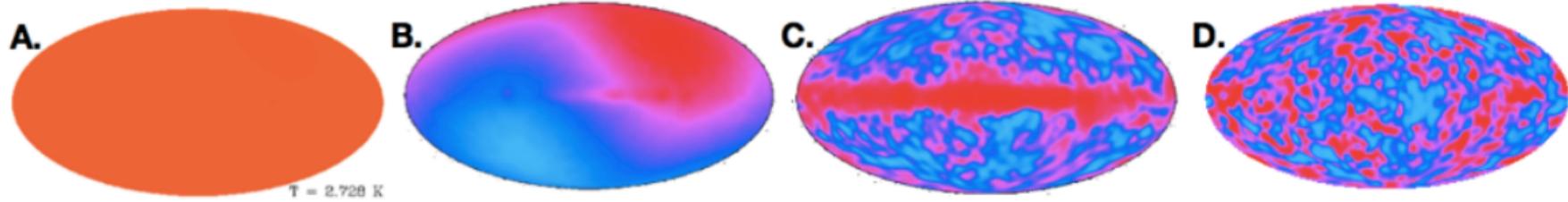
## Penzias y Wilson 1963: descubrimiento de radiación de fondo



© 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.

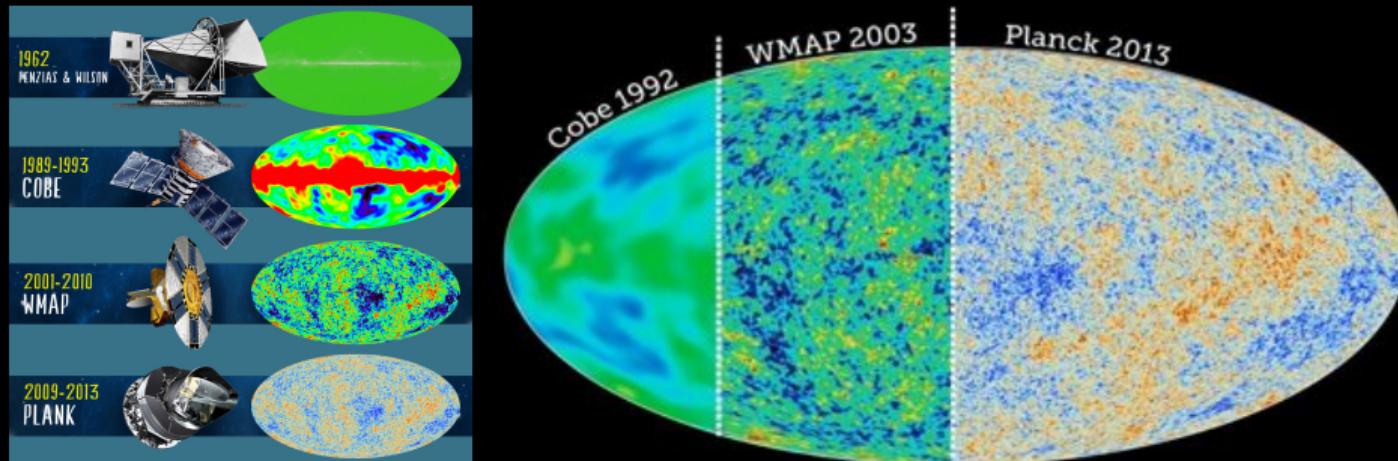
# La radiación del fondo cósmico y sus ondulaciones



- 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  $2,7 \text{ }^{\circ}\text{K}$  (la variación entre cualquier par de direcciones es como máximo  $1/100.000$ )
- ¡Las fluctuaciones nos proveen información esencial sobre la edad temprana del universo!

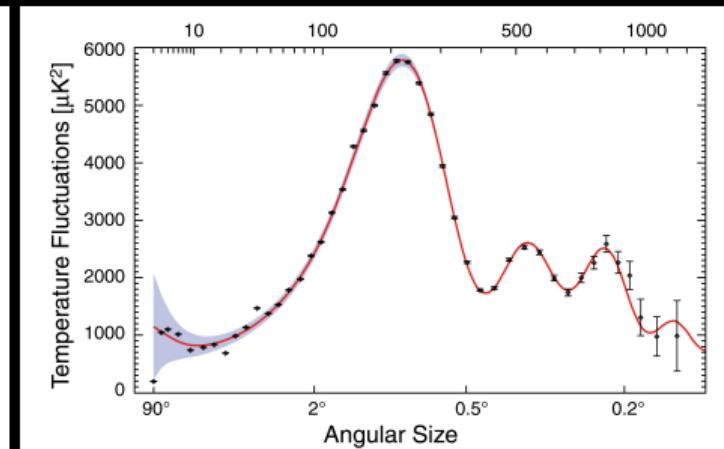
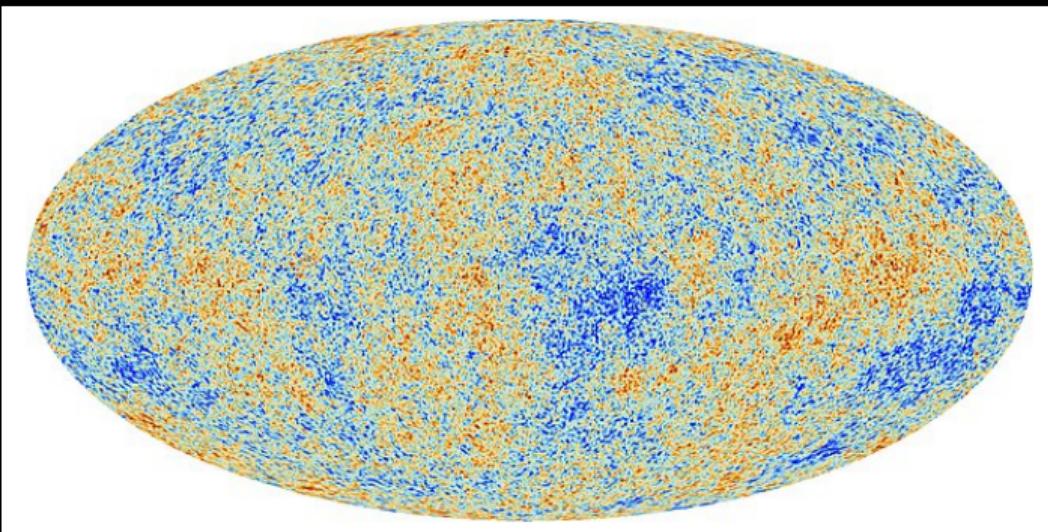
# La radiación del fondo cósmico y sus ondulaciones

- 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.
- Mediciones de las fluctuaciones de la radiación de fondo cósmica por satélites:

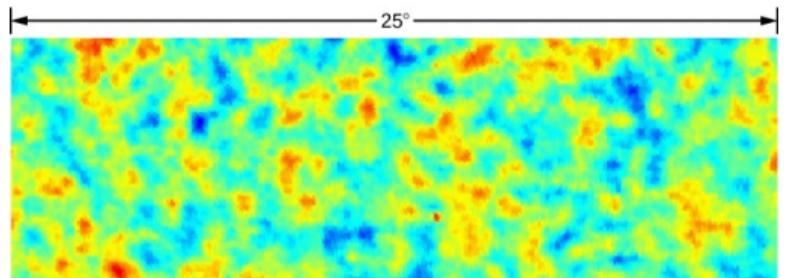


- Experimentos:
  - 1 1963 Penzias y Wilson (antena terrestre)
  - 2 1992 COBE (Satélite NASA)
  - 3 2003 WMAP (Satélite NASA)
  - 4 2013 Planck (Satélite ESA)

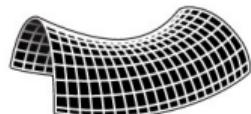
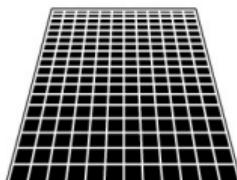
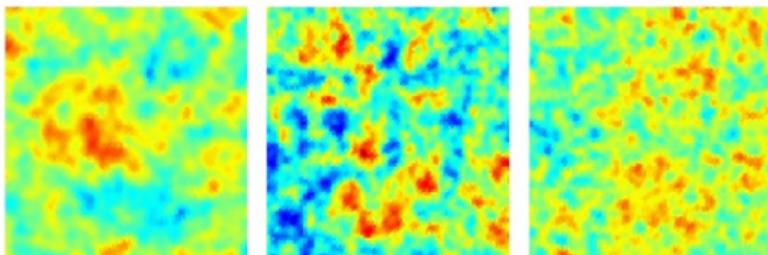
# Mediciones de Planck (ESA, 2013)



# La radiación del fondo cósmico y sus ondulaciones



BOOMERANG

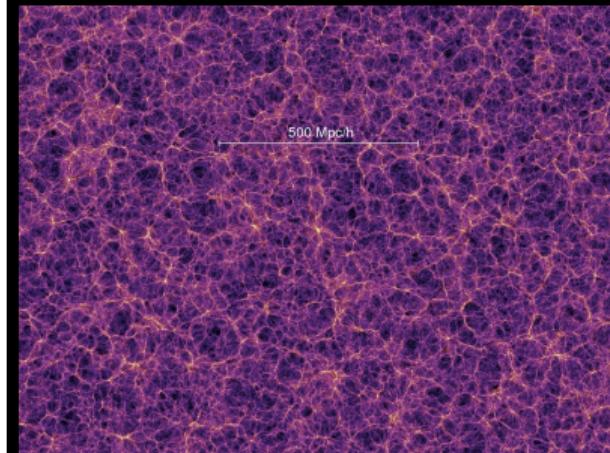
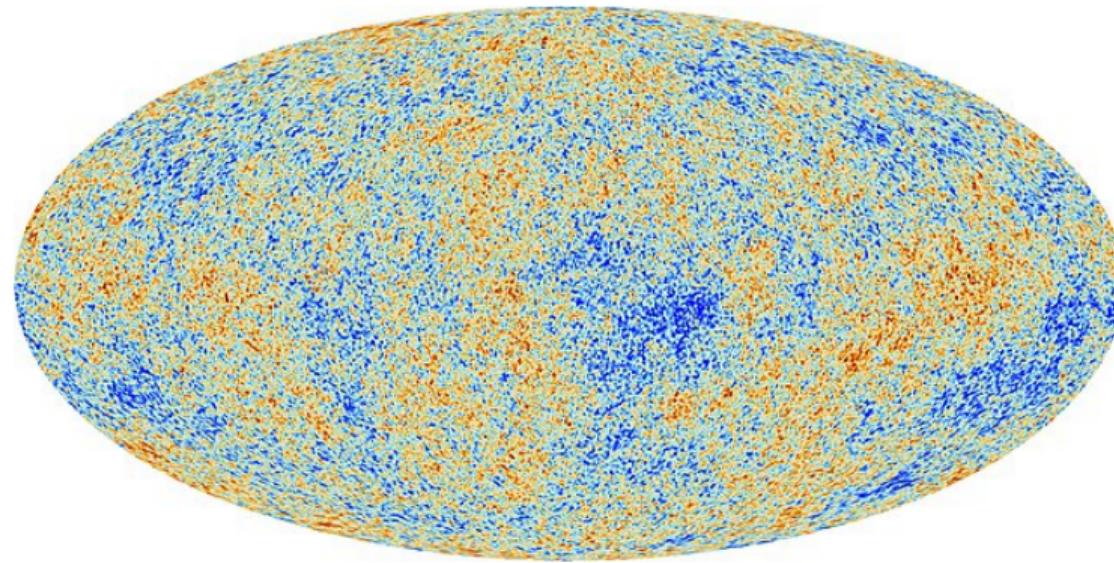


- Las mediciones de los satélites permiten estimar los parámetros cosmológicos como:

- 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

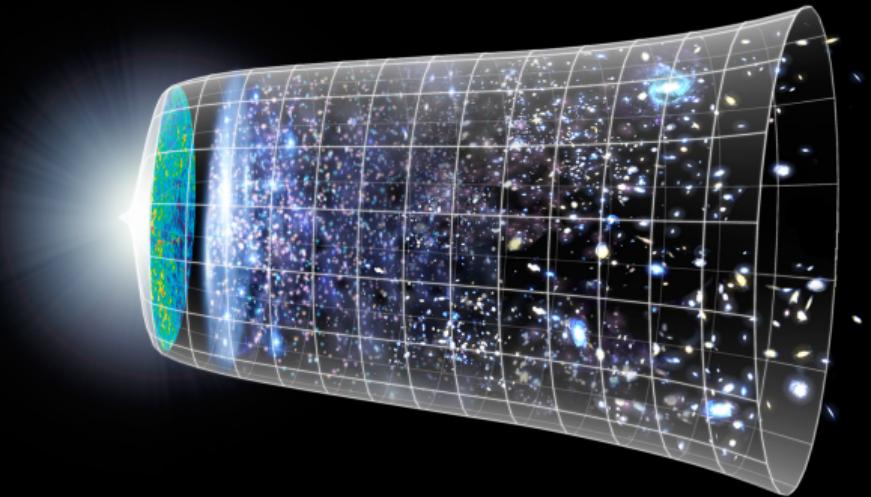
- ¡Estas mediciones en los últimos 30 años han transformado cosmología de una ciencia especulativa a una ciencia precisa!

# La radiación del fondo cósmico y sus ondulaciones



- Las ondulaciones están relacionadas con las variaciones de densidad que había en un momento temprano del universo.
- Correlación entre las fluctuaciones del fondo de radiación de microondas y la "espuma galáctica"

# ¿Preguntas?

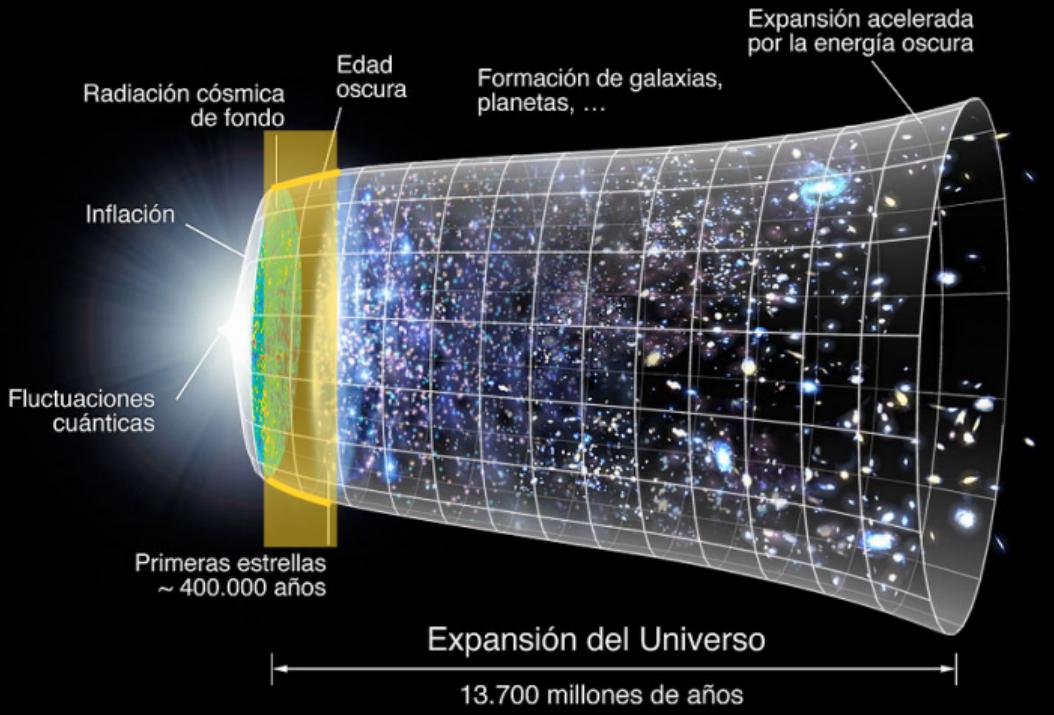


Adaptado de NASA / WMAP Science Team

## 2 Evolución del universo

### 2.5 La era oscura y las primeras estrellas y galaxias

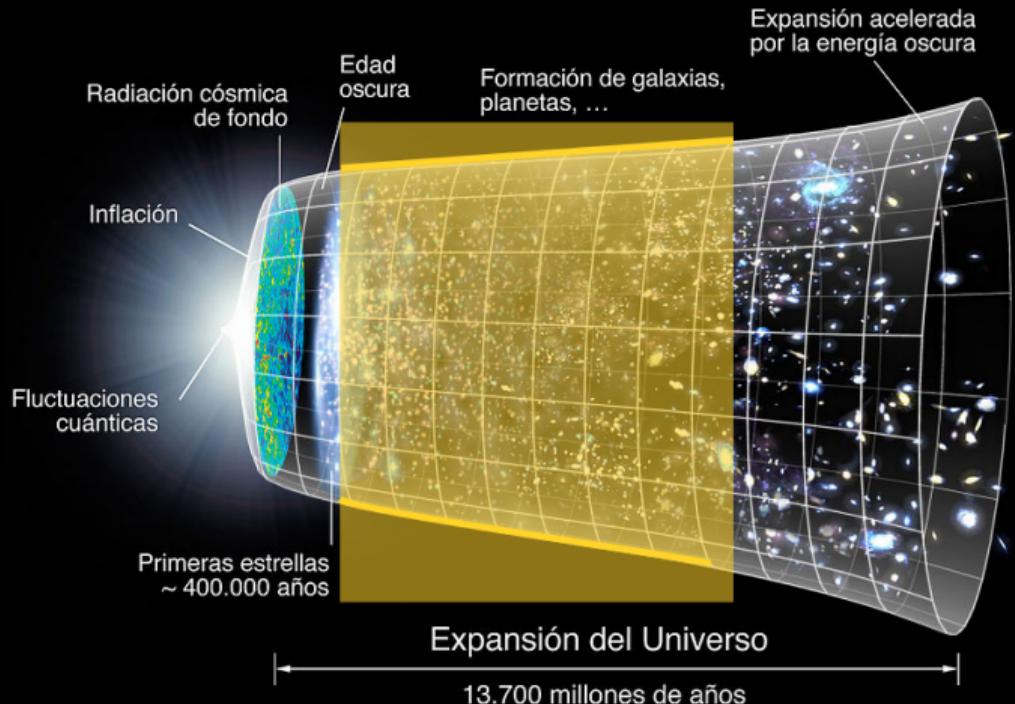
# La era oscura



Adaptado de NASA / WMAP Science Team

- La "era oscura" es el tiempo transcurrido entre el origen de la Radiación de del Fondo Cósmico (unos  $\sim 375.000$  años después del Big Bang) hasta la formación de las primeras estrellas (dura unos  $\sim 400$  millones de años).
- En este período se observa un universo oscuro ya que no hay ninguna fuente de "luz"

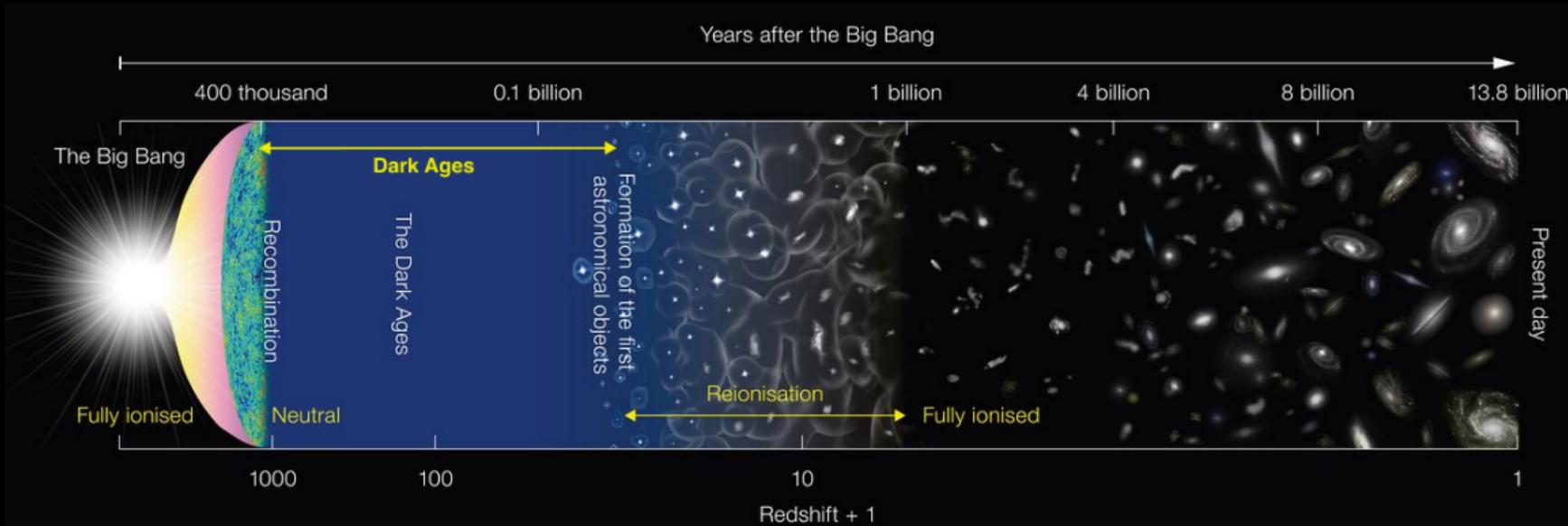
# Las primeras estrellas y galaxias



- A partir de  $\sim 400$  millones de años después del Big Bang se crean las primeras estrellas, galaxias, planetas, etc.
  - $\sim 9.000$  millones de años después del Big Bang se forma el Sol y el sistema solar

Adaptado de NASA / WMAP Science Team

# La era oscura y la formación de las primeras estrellas



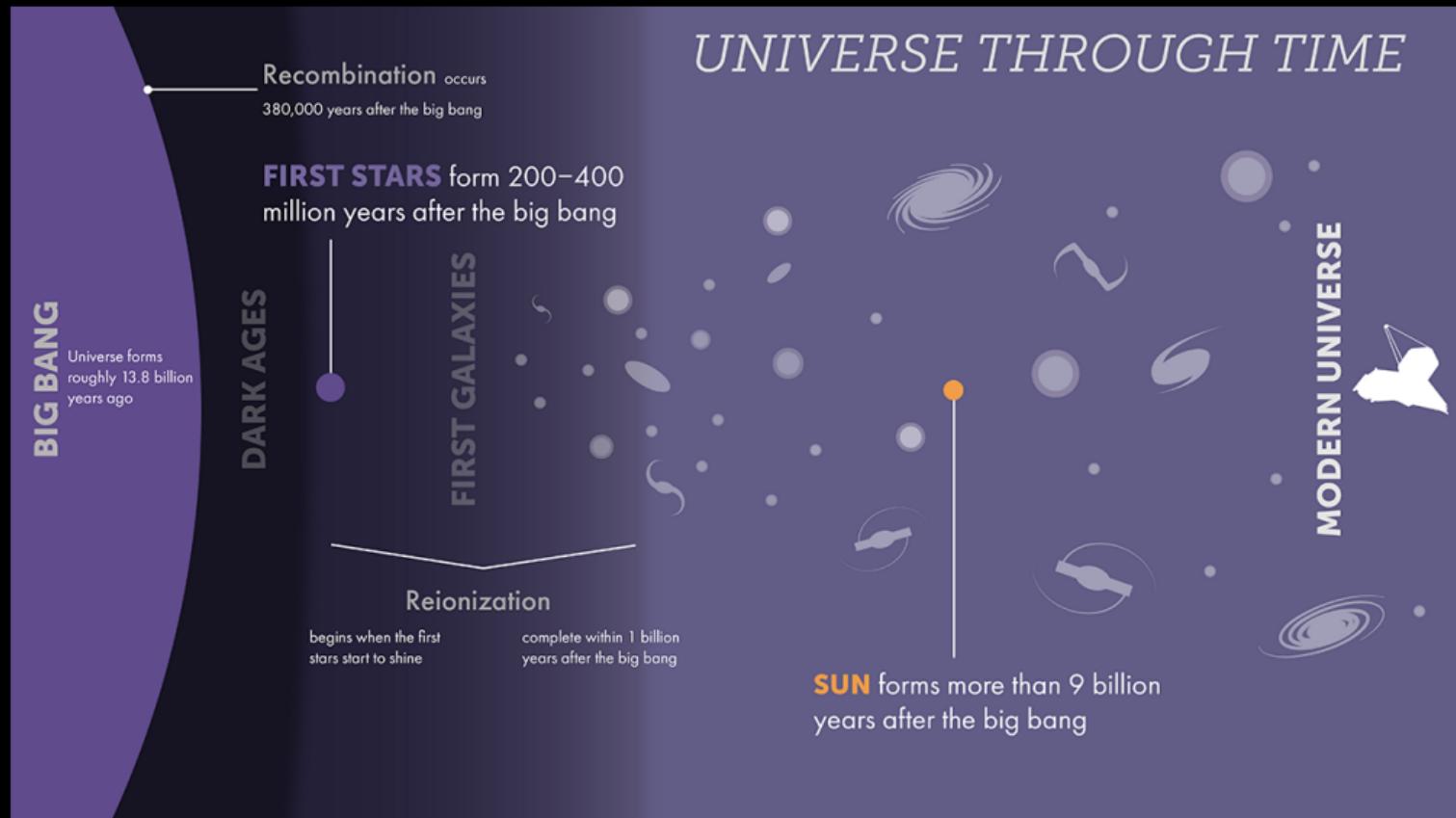
## 1 Era Oscura

- Entre  $\sim 375.000$  años y  $\sim 400$  millones de años después del Big Bang

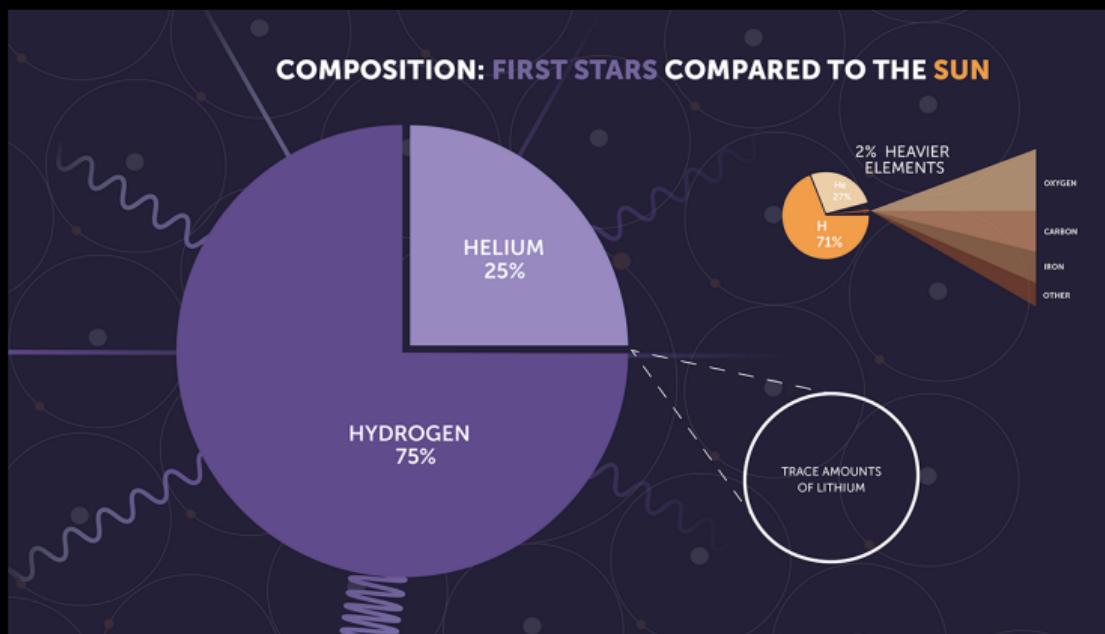
## 2 Formación de las primeras estrellas y galaxias (la "reionización")

- Entre  $\sim 400$  y  $\sim 1000$  millones de años después del Big Bang

# La formación de las primeras estrellas



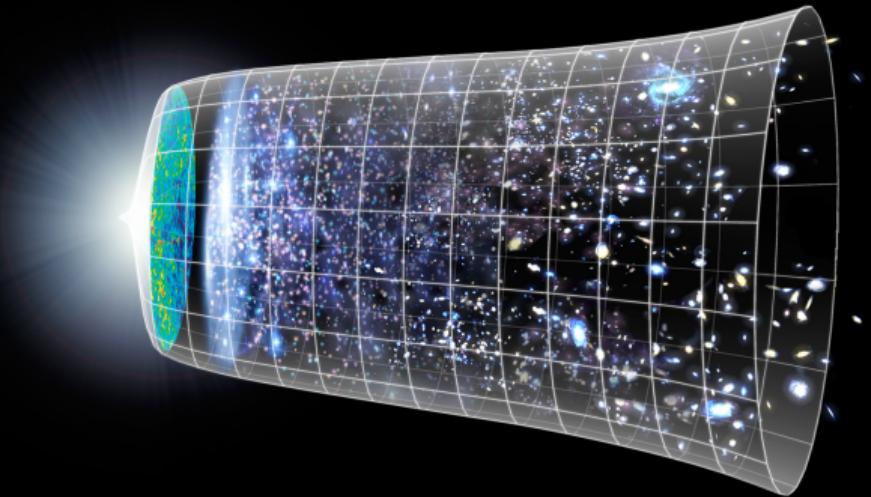
# Composición de las primeras estrellas



NASA/ESA/CSA/STSI

- Las primeras estrellas solo contenían Hidrógeno y Helio
- Las primeras estrellas podían ser mucho más grandes que las actuales
  - primeras estrellas de  $1000$  a  $10.000 M_{Sol}$
  - estrellas actuales  $\approx 150 M_{Sol}$

# ¿Preguntas?

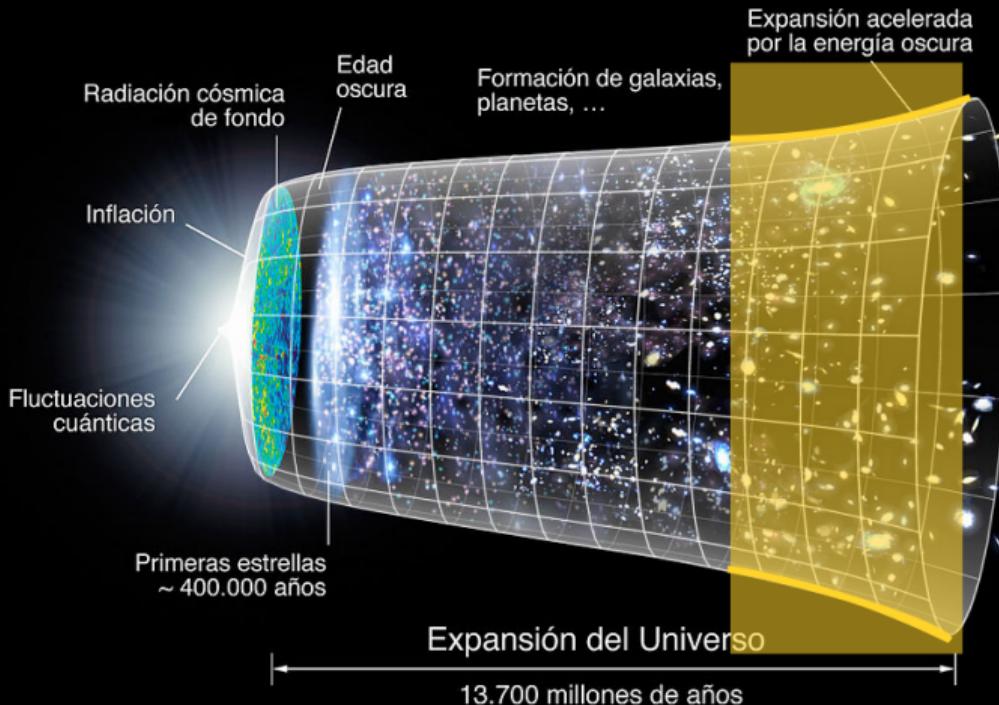


Adaptado de NASA / WMAP Science Team

## 2 Evolución del universo

### 2.6 Expansión acelerada del universo

# La expansión acelerada del universo (la era actual)

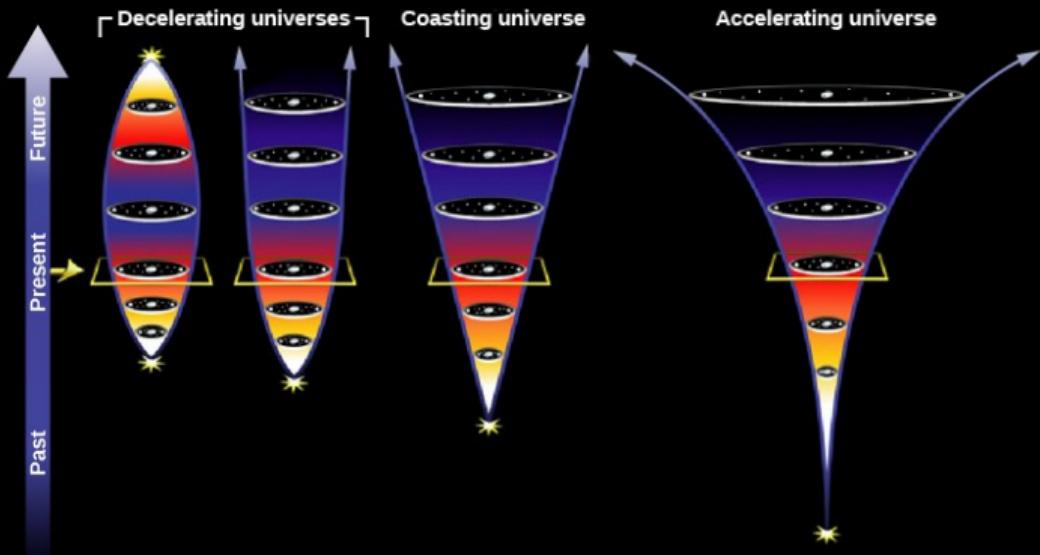


- **Era de la energía oscura:** expansión acelerada del universo.
  - Etapa dominada por la energía oscura
  - Incluye el presente y el futuro

Adaptado de NASA / WMAP Science Team

# La expansión acelerada del universo y la energía oscura

¿Qué provoca la expansión acelerada del universo?



- La **energía oscura** actúa como una especie de "anti-gravedad" que hace que objetos masivos se repelan (Recordar que la fuerza de la gravedad es siempre atractiva, nunca repulsiva).
- La energía oscura solo actúa si los objetos son muy lejanos y es imperceptible entre objetos cercanos.

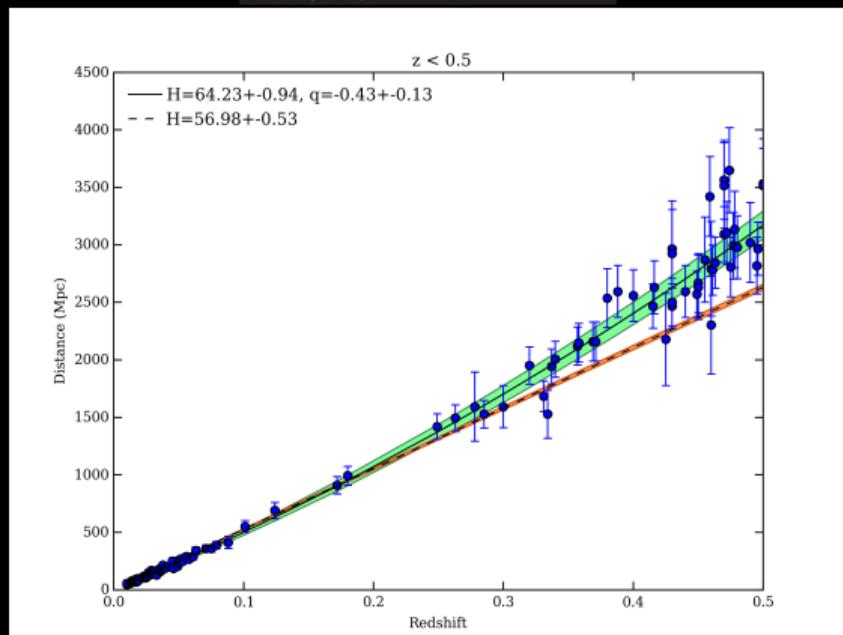
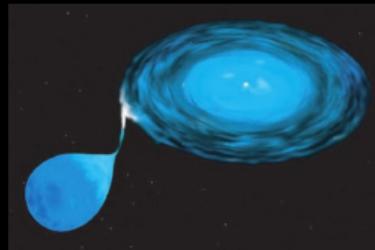
## 2.6 Expansión acelerada del universo

*Historia:* La expansión acelerada del universo y la energía oscura

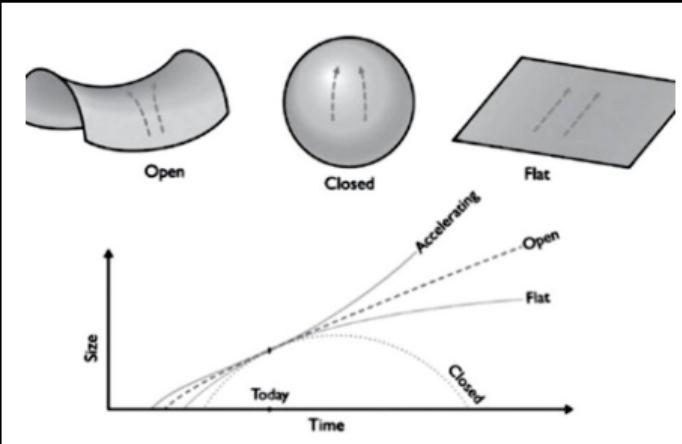
# Perlmutter, Riess y Schmidt 1998: Expansión Acelerada

## ■ Descubrimiento de la **expansión acelerada del universo**

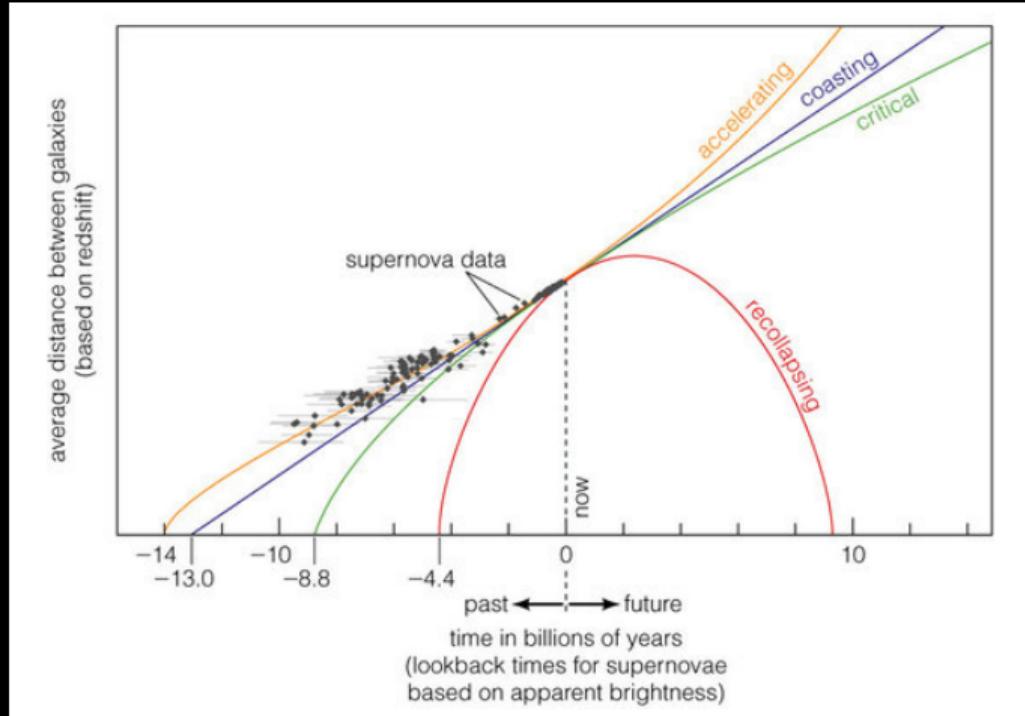
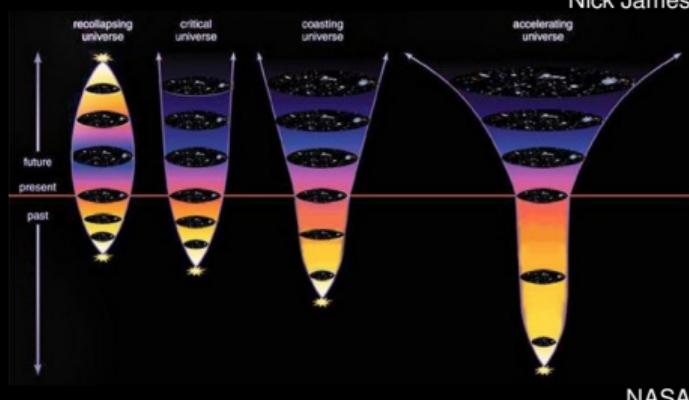
- En el año 1998 dos grupos distintos descubren que el universo se expande a una velocidad cada vez mayor.
- La expansión del universo ha ido acelerándose desde hace unos 6.000 millones de años.
- Observaron supernovas de tipo 1a (sistemas binarios, donde una de las dos estrellas es una enana blanca).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



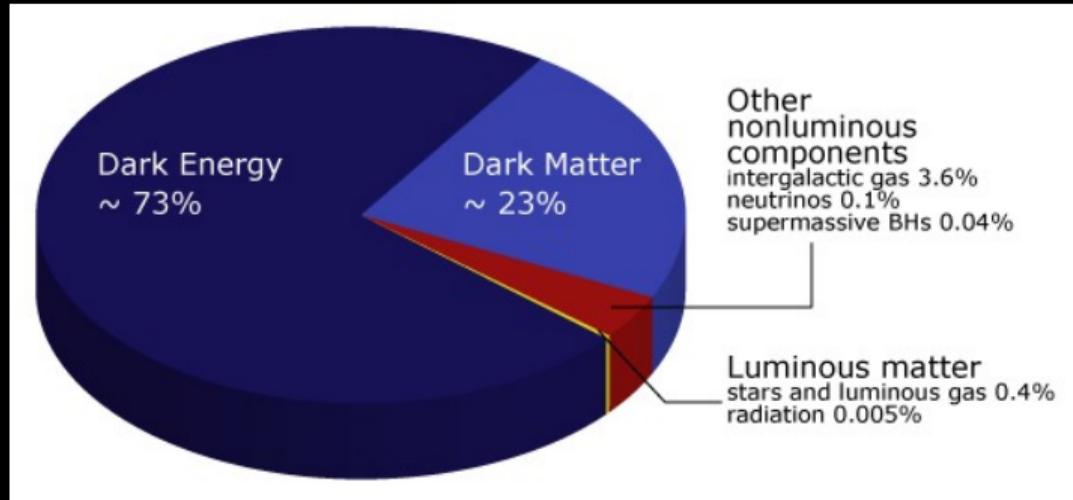
# Evolución temporal del universo



Nick James



# La expansión acelerada del universo y la energía oscura



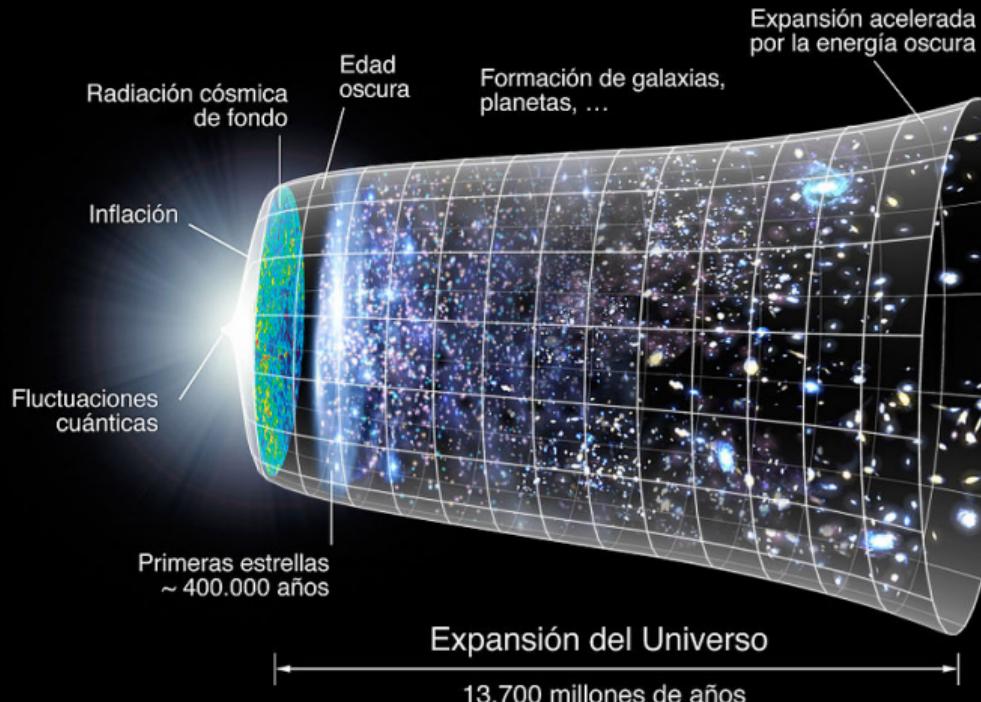
¿Qué provoca la expansión acelerada del universo?

- 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.

## 2 Evolución del universo

### 2.7 El futuro del universo

# El futuro del universo

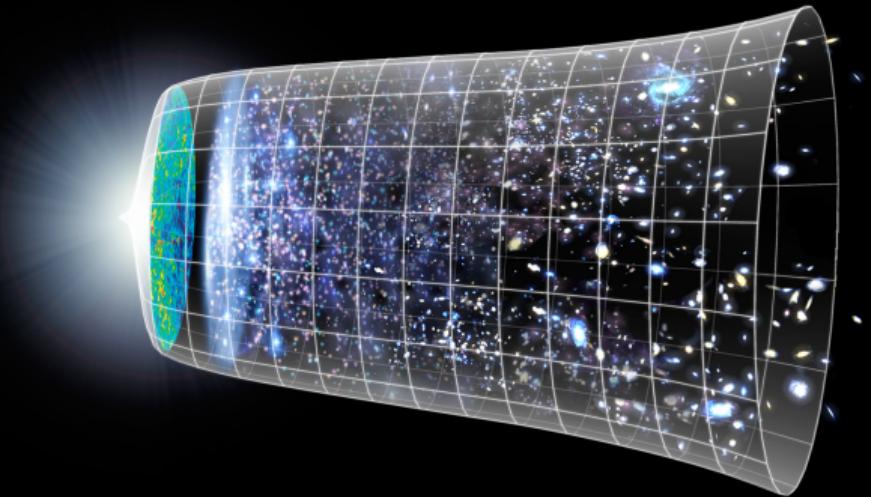


Adaptado de NASA / WMAP Science Team

## Destino del Universo:

- 1 Creemos que el universo se expandirá para siempre
- 2 Las estrellas eventualmente dejarán de existir y el universo pasará a estar dominado por agujeros negros
- 3 Más tarde, los agujeros también decaerán dejando un universo totalmente vacío.

# ¿Preguntas?



Adaptado de NASA / WMAP Science Team

### 3 Desmontando confusiones sobre cosmología

# 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 empezado de un estado anterior muy caliente y denso.**
- ¡Hay muchísima evidencia de que esta hipótesis es cierta!

## 2 Evento del Big Bang:

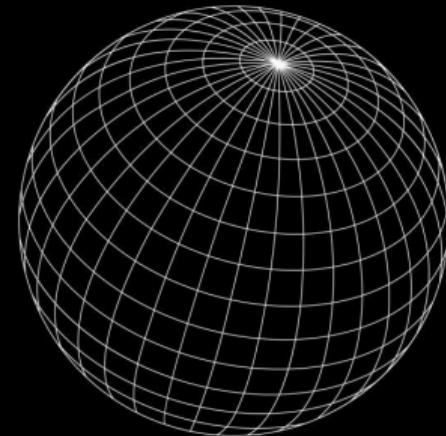
- El evento del Big Bang es un **momento en el tiempo en el cual el universo empieza a existir.**
- ¡**El evento del Big Bang no ocurre en un punto específico del espacio!** El espacio que nace en el Big Bang puede haber sido infinito.
- Es una hipótesis que no es necesariamente verdadera (se trata de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

# ¿Qué hubo antes del evento 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: "*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*"



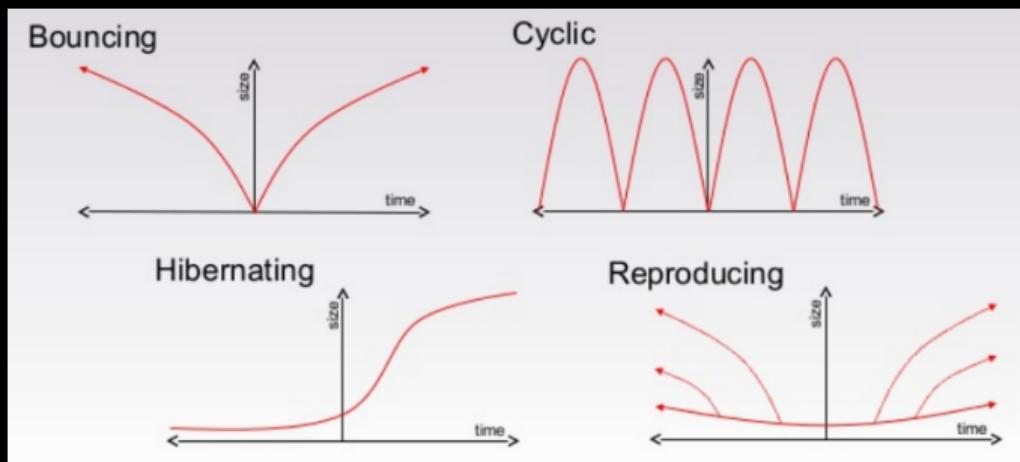
¿Qué hay al norte del Polo Norte?

# ¿Qué hubo antes del evento del Big Bang?

## ¿Qué hubo antes del evento del Big Bang?

Esta pregunta puede contestarse de distintas maneras:

- ¡Esta pregunta no tiene sentido según la relatividad general!
- Posibles respuestas según ampliaciones de las leyes de la física conocidas (e.g. teoría de cuerdas):



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

# El Big Bang en el espacio y el tiempo

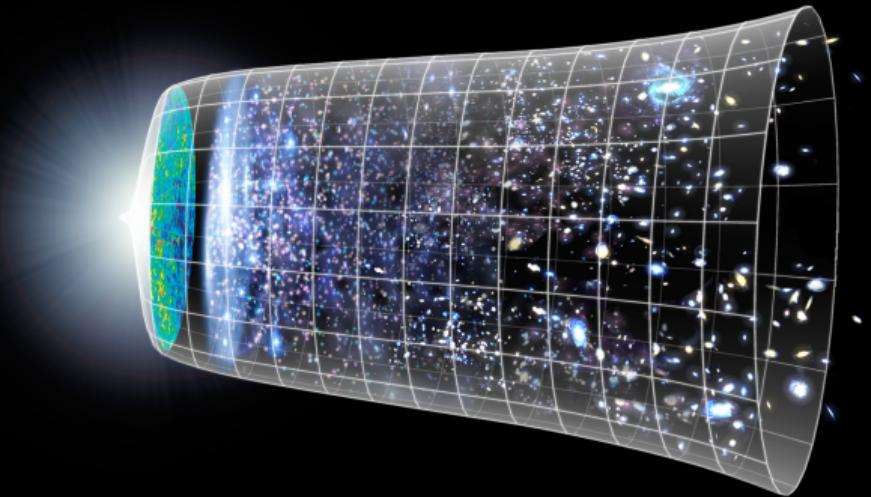
## 1 Espacio:

- 1 El evento del Big Bang ocurrió en un momento dado del tiempo pero no en un sitio específico del espacio
- 2 ¡El universo no tiene un centro!
- 3 El Big Bang no fue una "explosión" en un punto de un espacio pre-existente. Al inicio del evento del Big Bang el espacio mismo empieza a existir
- 4 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 Tamaño del universo

- 1 El modelo del Big Bang es compatible con un universo infinito (¡incluso en el momento de su creación!)
- 2 El universo observable es una bola alrededor de la Tierra con un radio de 46.500 millones de años luz. ¡Recordar qué el Big Bang ocurrió hace 13.800 millones de años!

# ¿Preguntas?



Adaptado de NASA / WMAP Science Team