

# El universo en expansión

David G. Cerdeño



(Basada en transparencias de Alberto Casas)

# Incógnitas

---

- ¿El Universo ha tenido un comienzo?

... ¿O es algo inmutable que ha existido desde siempre?

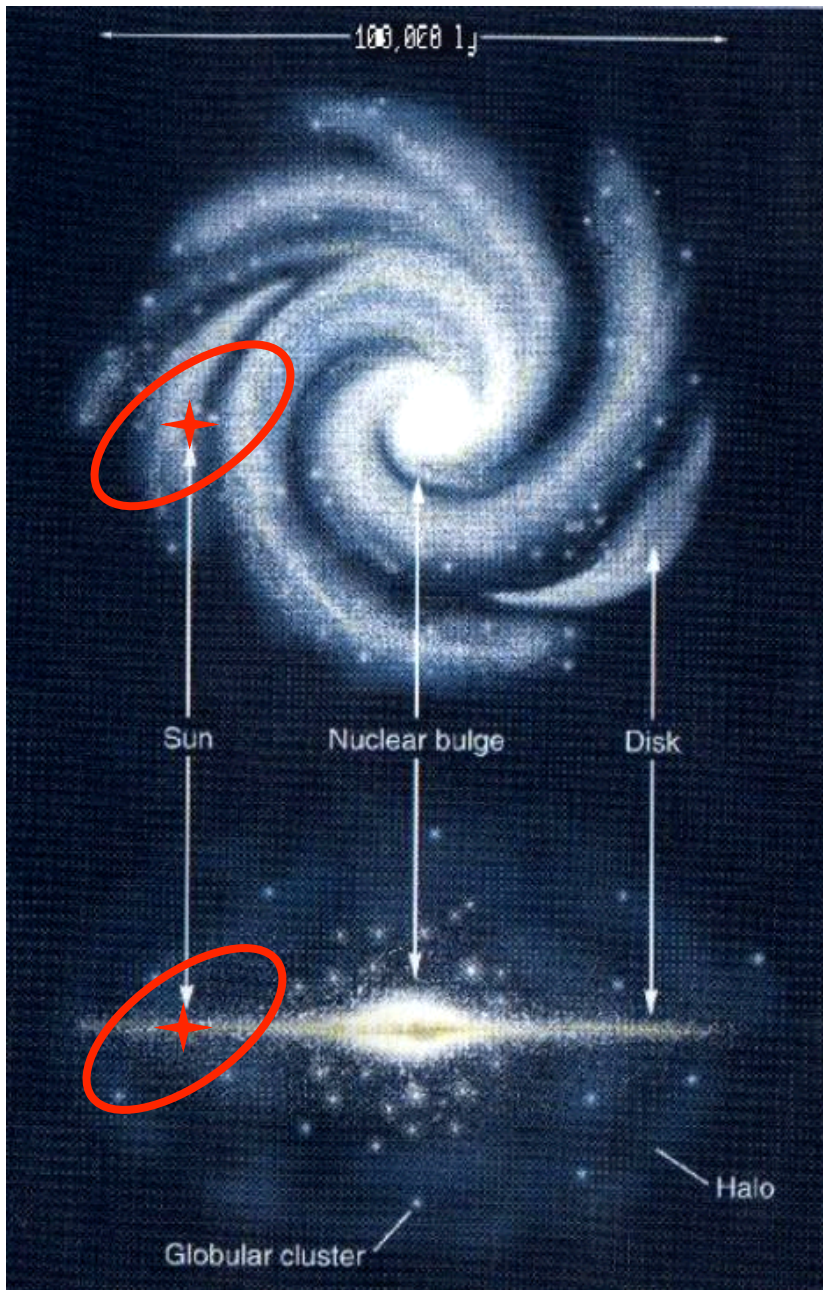
- ¿Tendrá un final?

- ¿De qué está formado el Universo?

... ¿conocemos su composición?

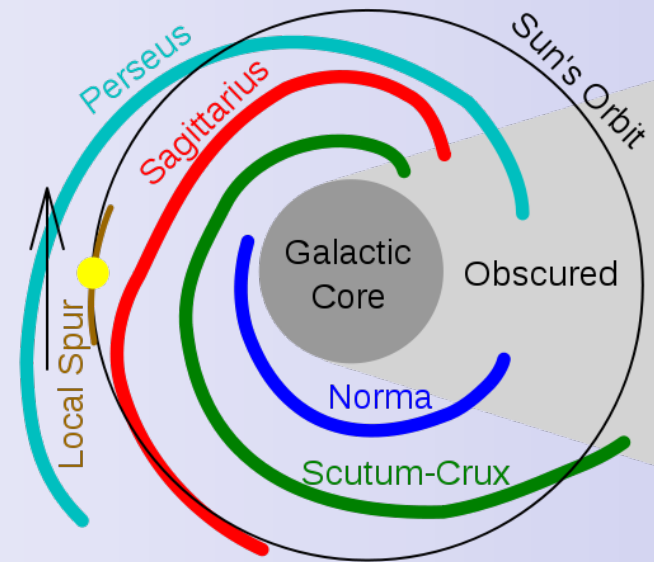
- ¿Cómo se originó la materia del Universo?

- ¿Cómo se originó el propio Universo?



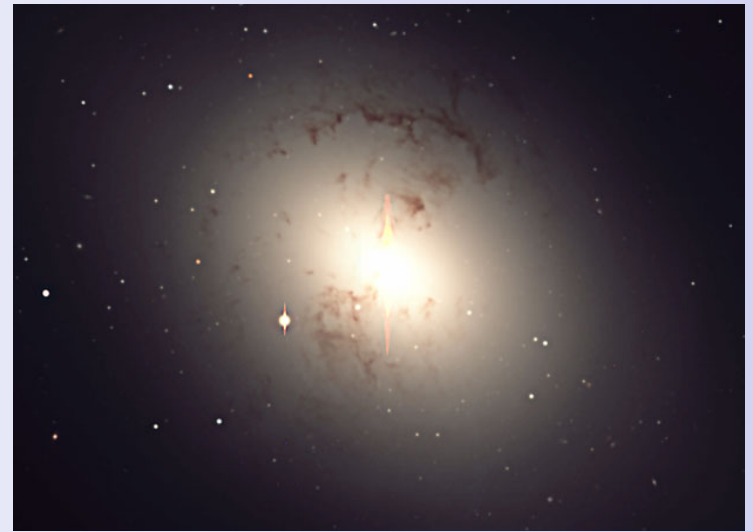
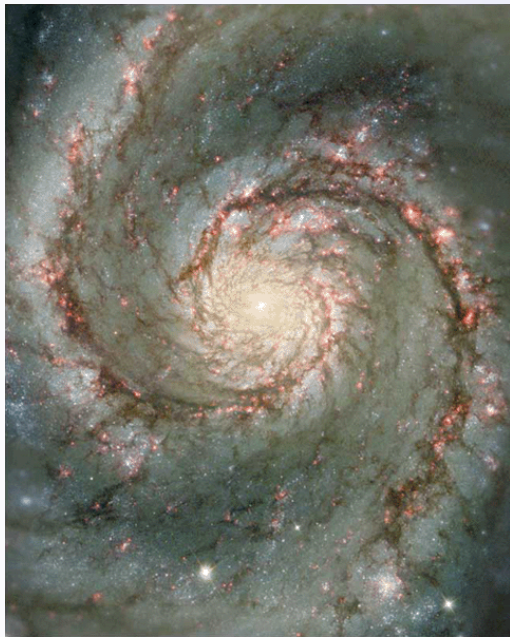
¿Cuál es nuestra posición en el Universo?

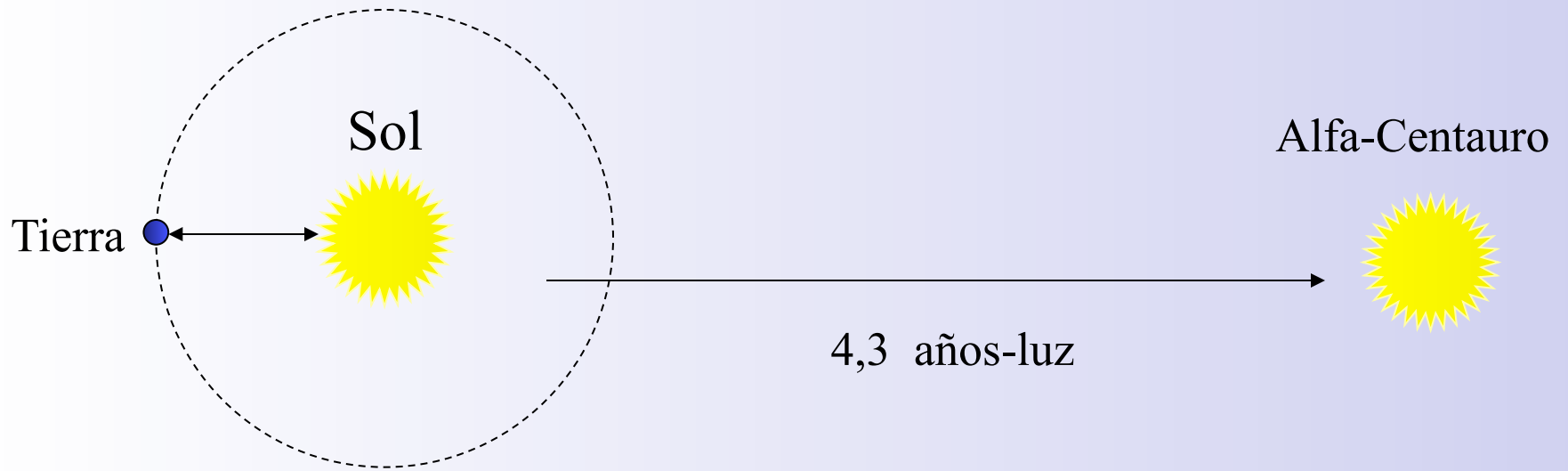
La Tierra orbita en torno al Sol, una estrella del grupo principal...



... que se encuentra en uno de los brazos de una galaxia espiral... La Vía Láctea





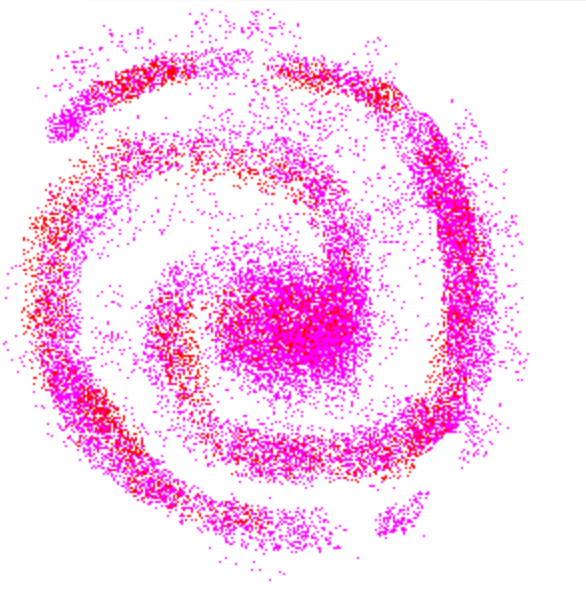


150 millones de Km

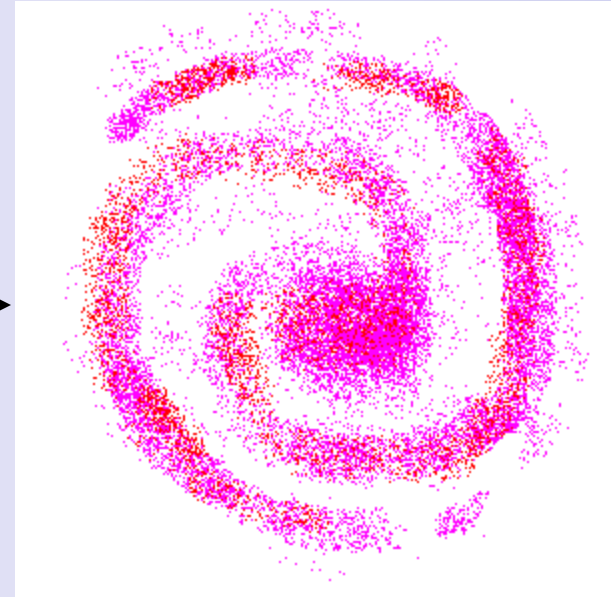
= 8 minutos-luz

4,3 años-luz

Vía Láctea



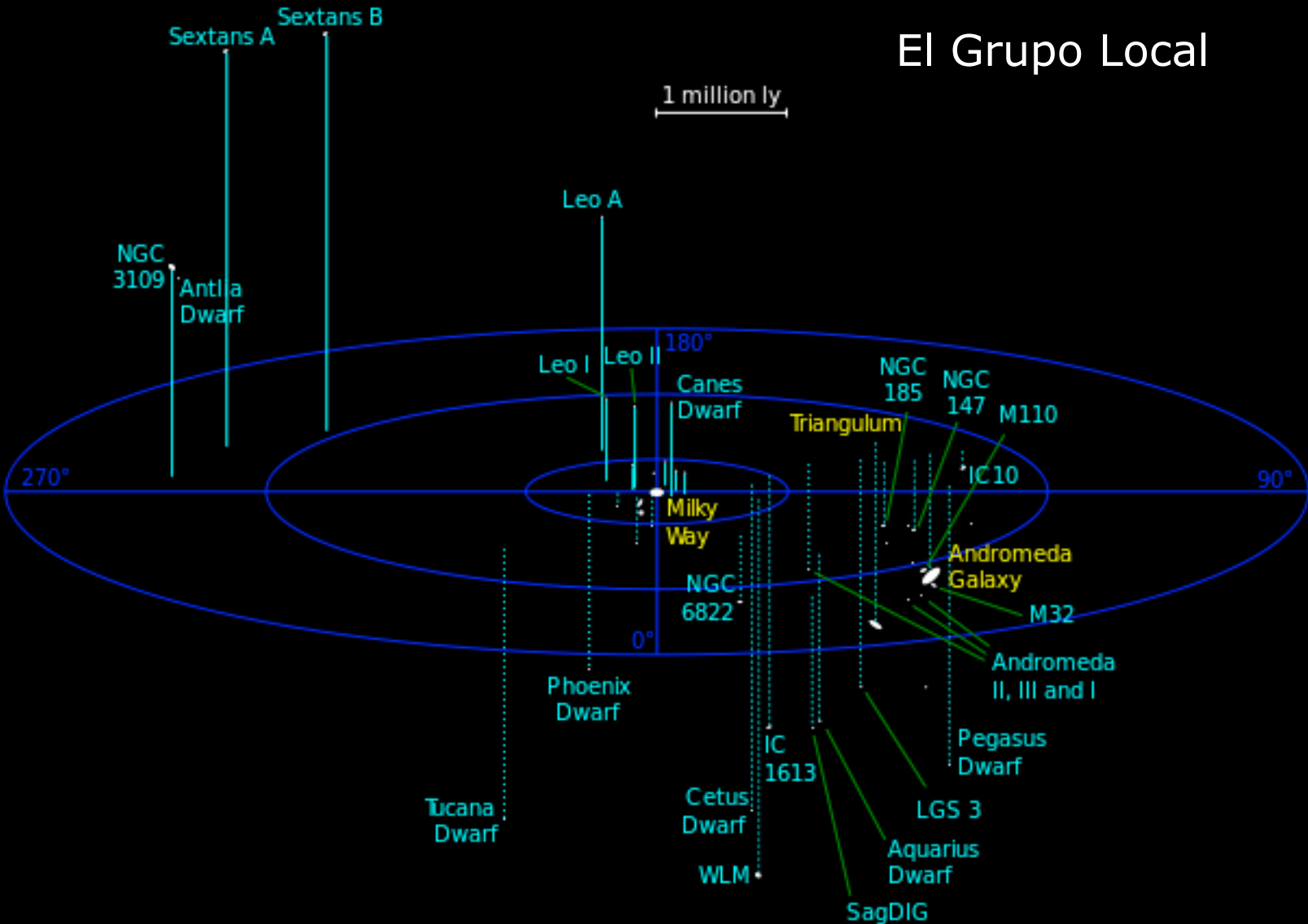
Andrómeda



2,3 millones de años-luz

100.000  
años-luz

# El Grupo Local



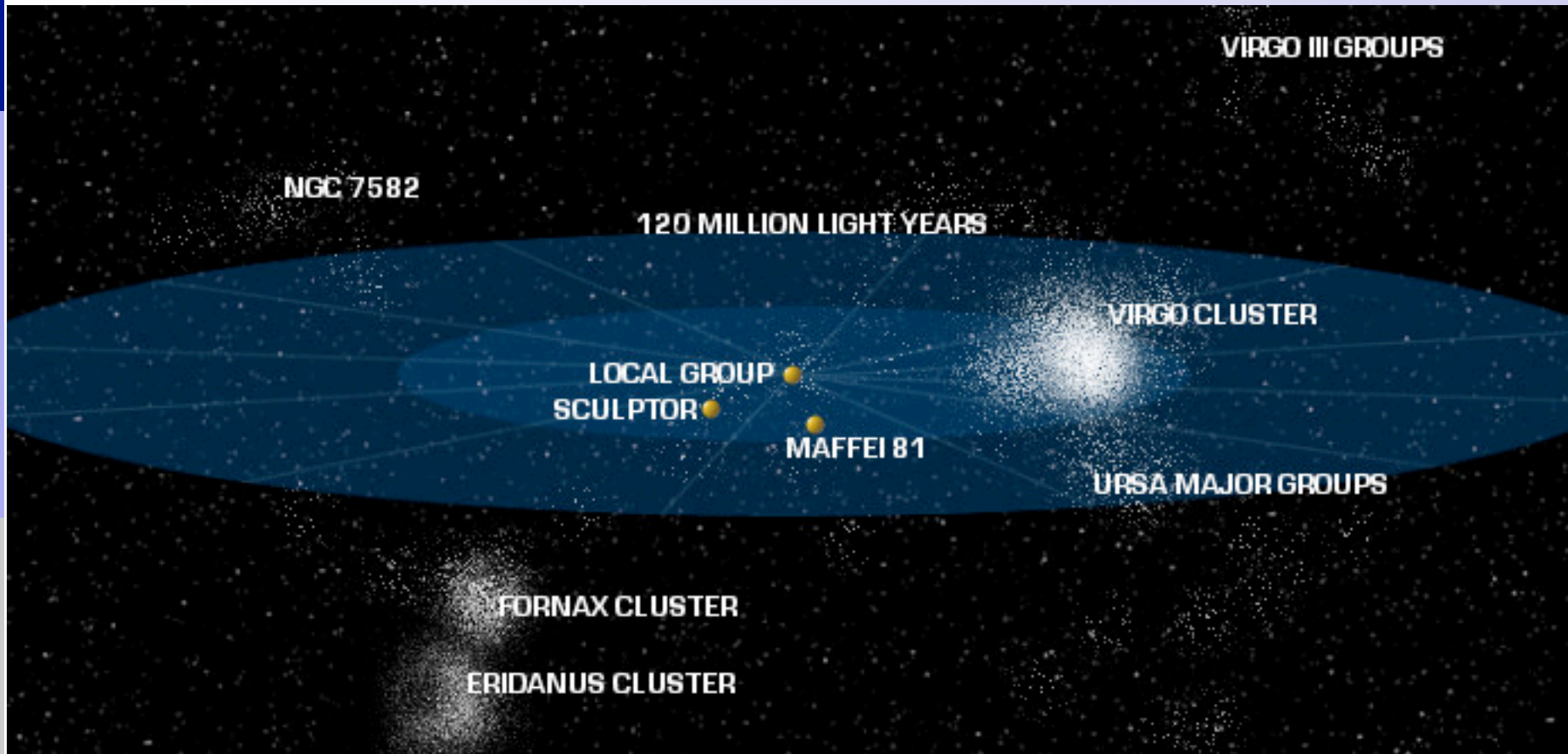


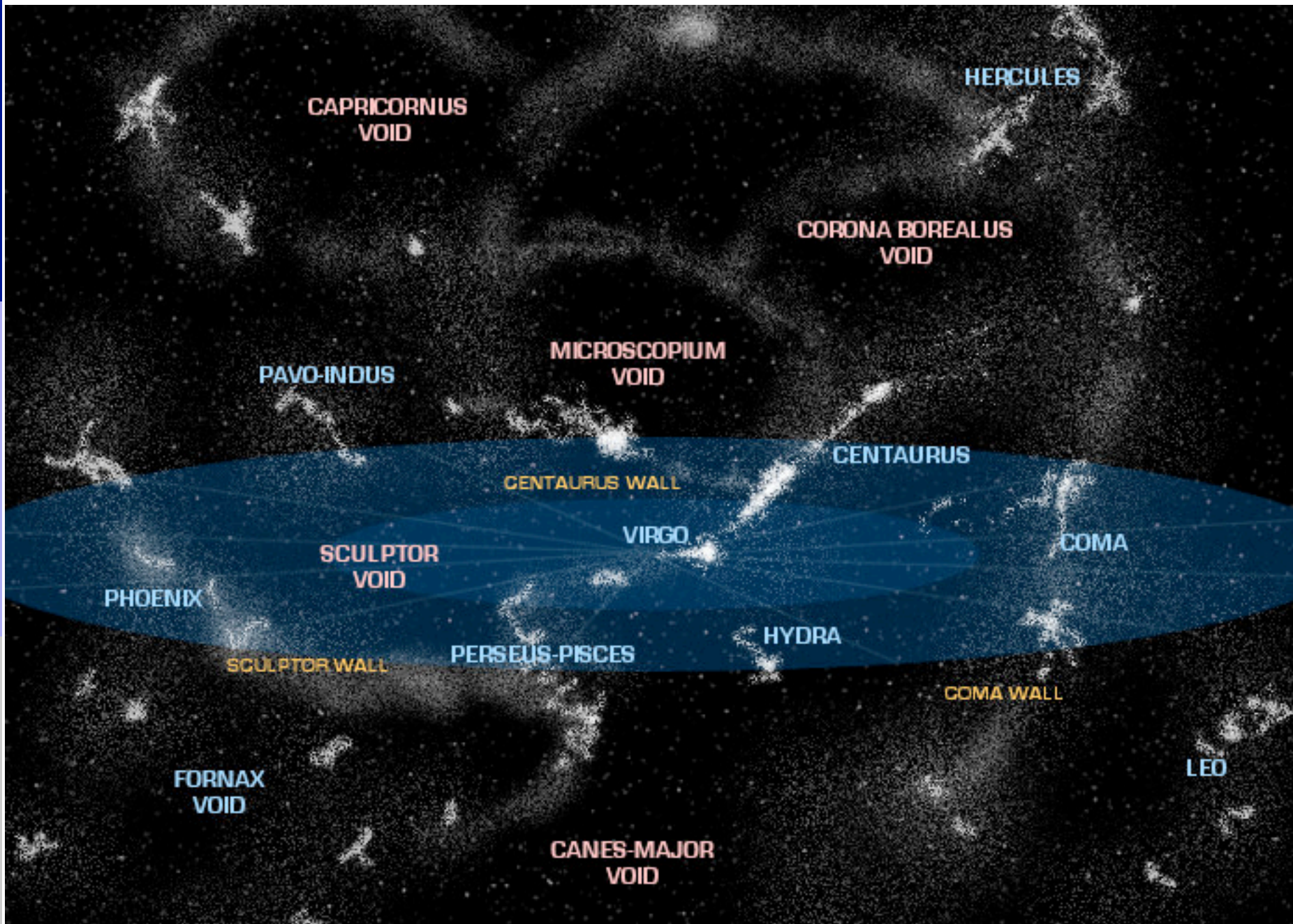
Sagitario

Vía Láctea

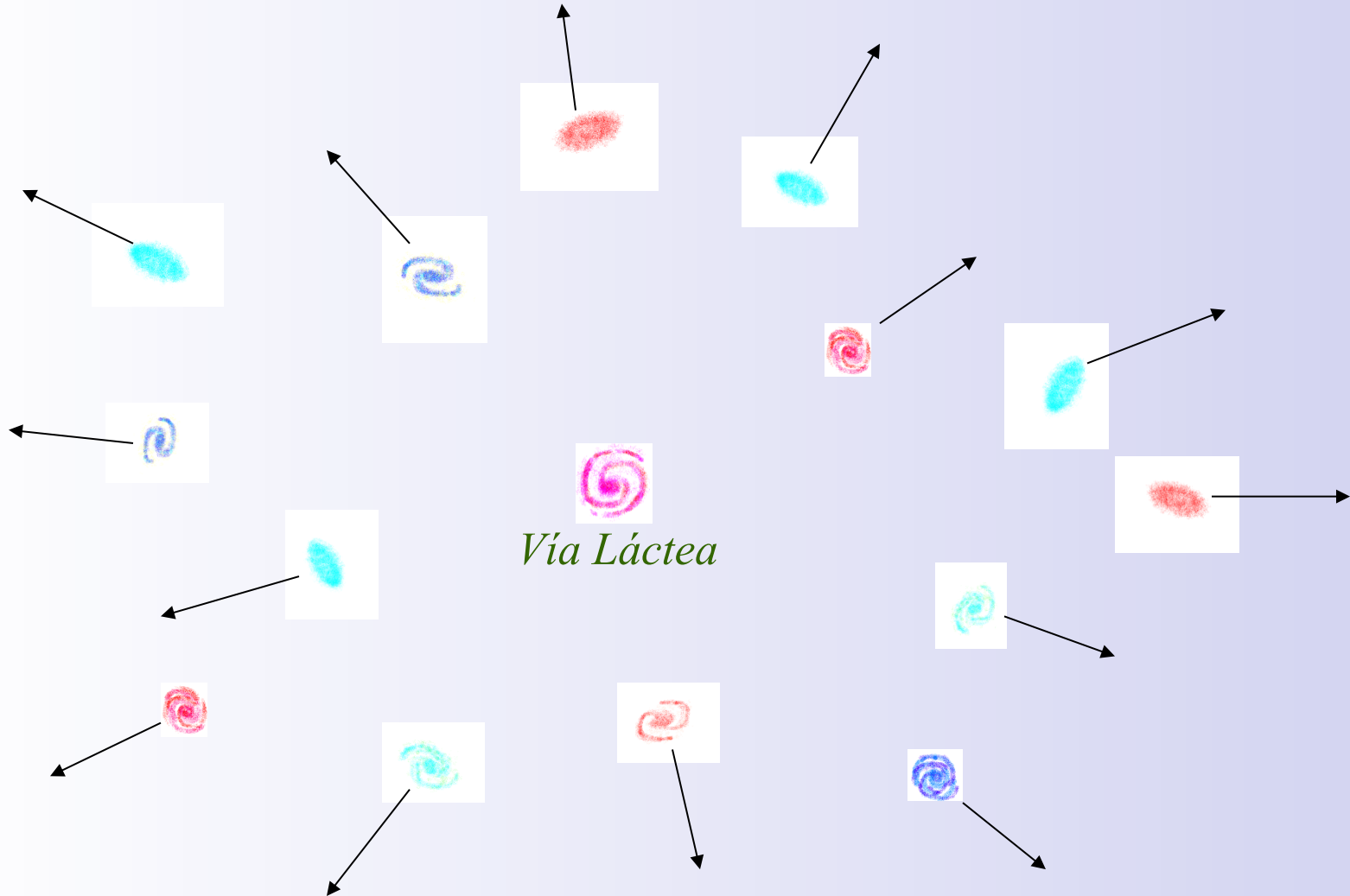


El cúmulo de Virgo está formado por unas 2000 galaxias y está situado a unos 60 millones de años luz – El grupo local está siendo atraído por el cúmulo de Virgo





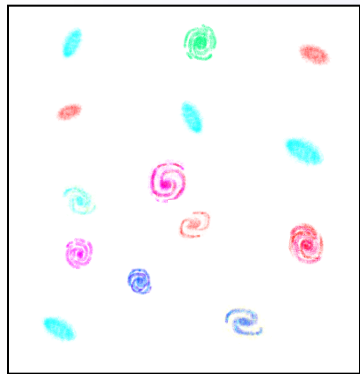
Si miramos a las galaxias a nuestro alrededor, nos damos cuenta de que... el universo está en **EXPANSIÓN**



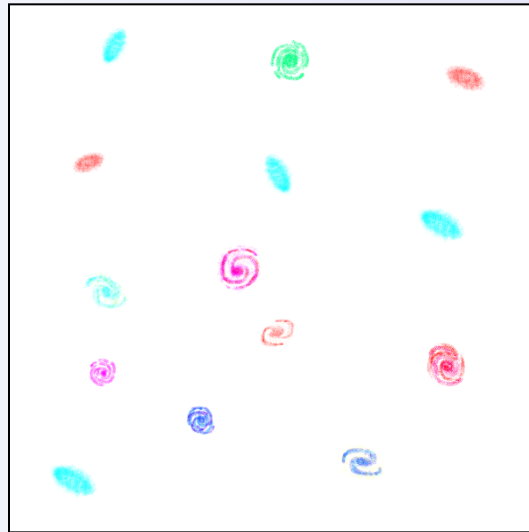
...pero nuestro punto de vista **NO** es privilegiado

Todas las galaxias se alejan las unas de las otras...

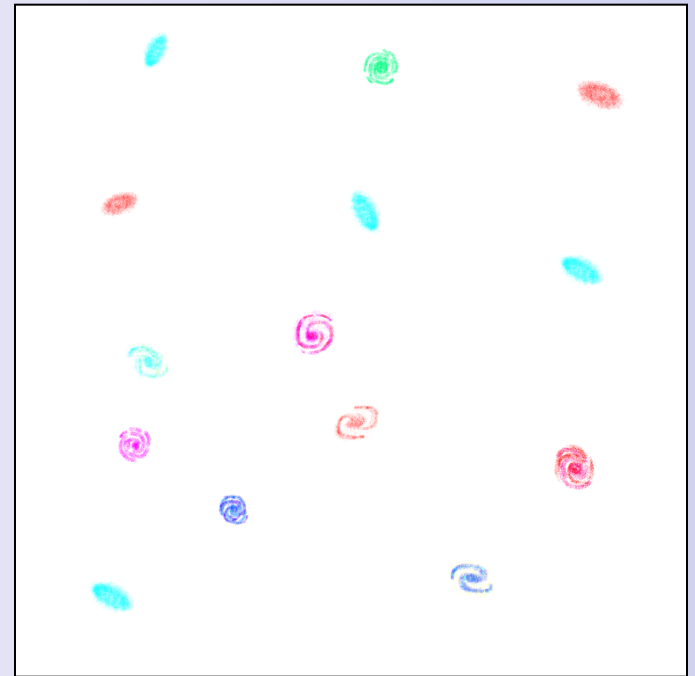
Es el propio espacio el que se "expande"



$t_1$



$t_2$

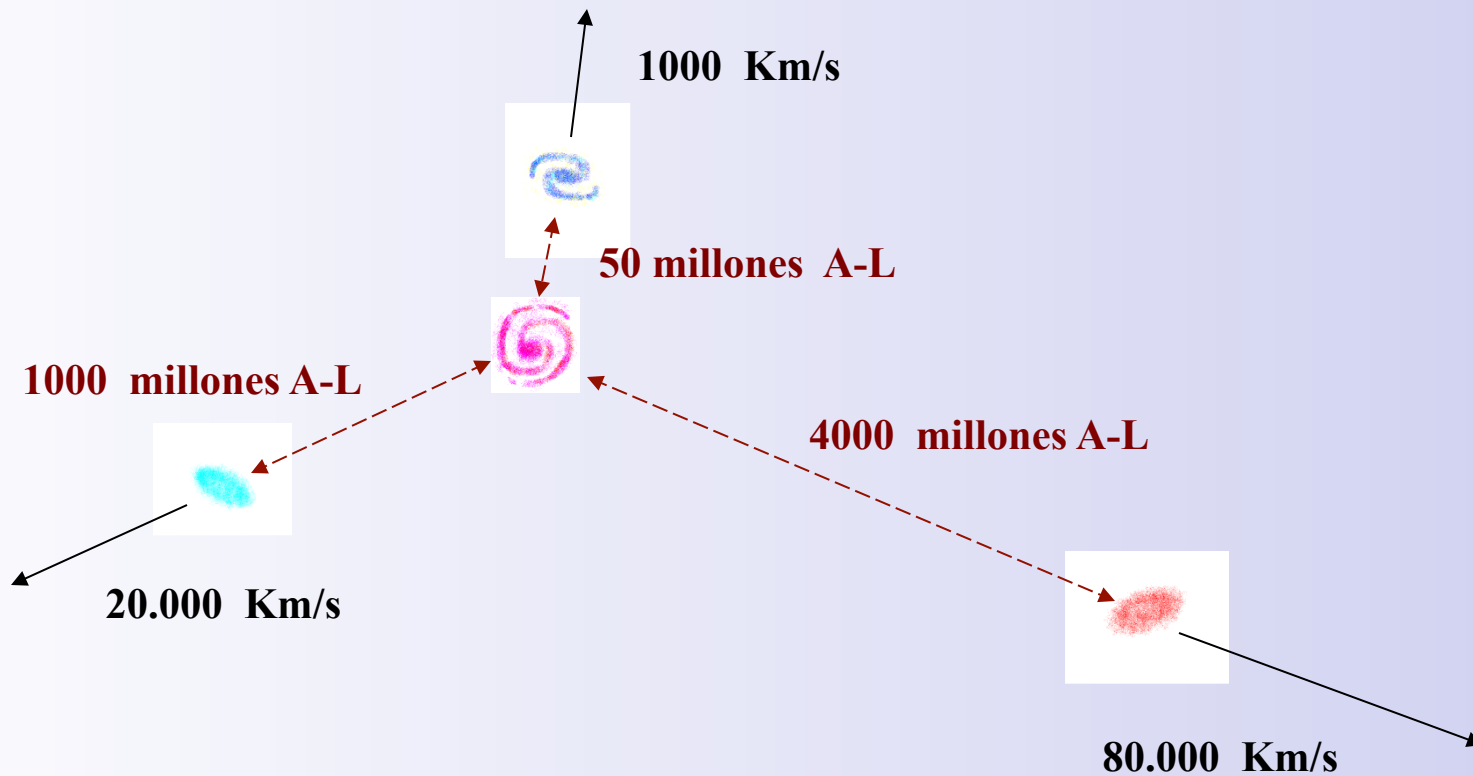


$t_3$

Expansión Homogénea e Isótropa

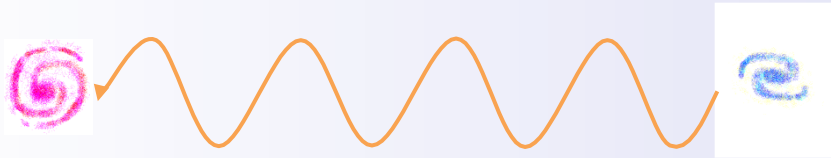
Una **observación** crucial es que la velocidad de alejamiento es **PROPORCIONAL** a la distancia

$\approx 20 \text{ Km/s} / \text{Millón de años-luz}$



¿Cómo podemos conocer la velocidad a la que se aleja una galaxia de nosotros?

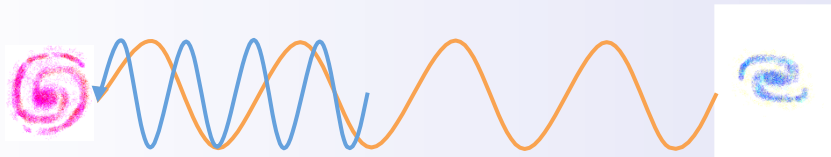
¡Estudiando la luz que emiten sus estrellas!



La frecuencia OBSERVADA de la luz que emite un objeto varía con la velocidad relativa de éste

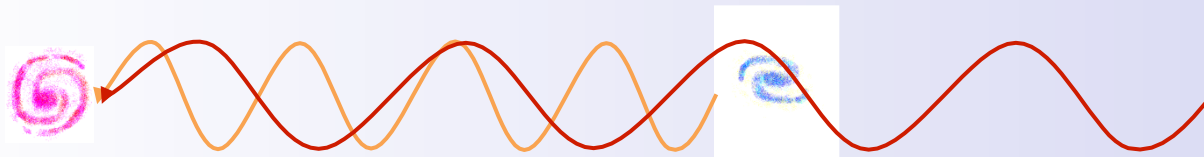
(efecto Doppler)

Al cambiar la longitud de ondas (o equivalentemente, la frecuencia) de la luz que nos llega, cambia su **COLOR**



Si el objeto se acerca la frecuencia aumenta y la luz se ve más **AZUL**

Si el objeto se aleja la frecuencia disminuye y la luz se ve más **ROJA**

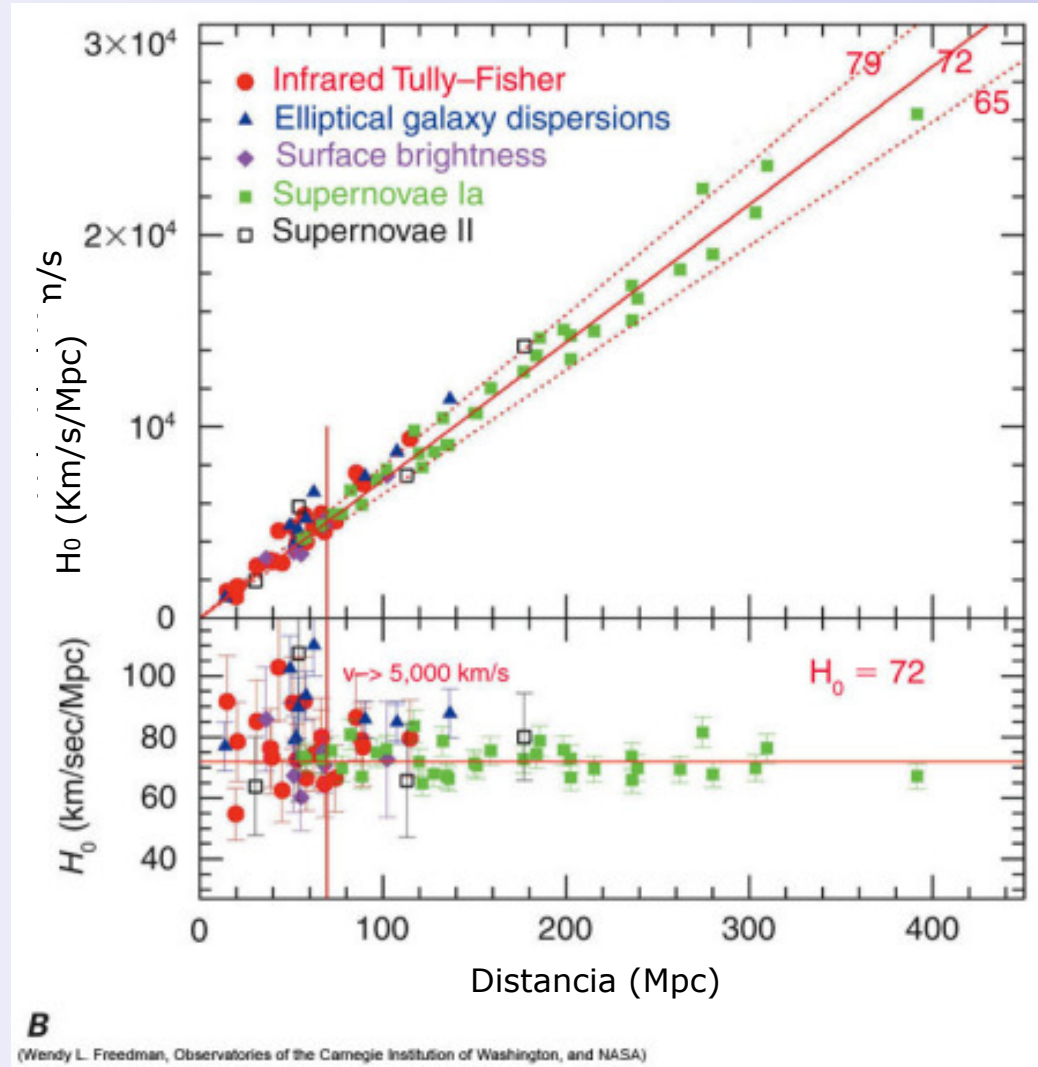


# Observaciones de supernovas en galaxias lejanas evidencian claramente la expansión del Universo

La constante de proporcionalidad se conoce como

constante de Hubble

$$H_0 = 70 \text{ Km/s/Mpc}$$







La expansión del Universo ya había sido “encontrada” por los físicos teóricos

Albert Einstein  
(1879-1955)

Había ya propuesto la Teoría de la Relatividad Especial

$$E = m c^2 \quad (1905)$$

Pero su contribución más importante es la Teoría de la Relatividad General

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = T_{\mu\nu}$$

(1916)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = T_{\mu\nu}$$

Curvatura y Métrica

Del Espacio-Tiempo

El Espacio-Tiempo no es algo rígido, sino que se puede deformar

Tensor de Energía-momento

Representa la materia y energía que hay en el Universo

La forma del Espacio-Tiempo está determinada por lo que contiene: la cantidad (y el tipo) de materia

(por ejemplo, en la cercanía de grandes masas, como una estrella, el Espacio-Tiempo se curva de forma apreciable)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = T_{\mu\nu}$$

Cuando se resuelve para un Universo homogéneo como el nuestro, el resultado es una expansión!

El propio espacio-tiempo se expande, con todo su contenido.



Universo en  
**EXPANSIÓN**



Big  
+  
Bang

El Big Bang no ha de ser entendido como una explosión en el espacio, sino como la propia creación del espacio-tiempo

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

En un principio, Einstein se dio cuenta de estas implicaciones, pero las observaciones parecían indicar un Universo estático...

Para "arreglar" la teoría introdujo una **Constante Cosmológica**...

... que posteriormente retiró cuando se confirmó experimentalmente la expansión del Universo.

Actualmente, la constante cosmológica **HA VUELTO**... En forma de energía oscura

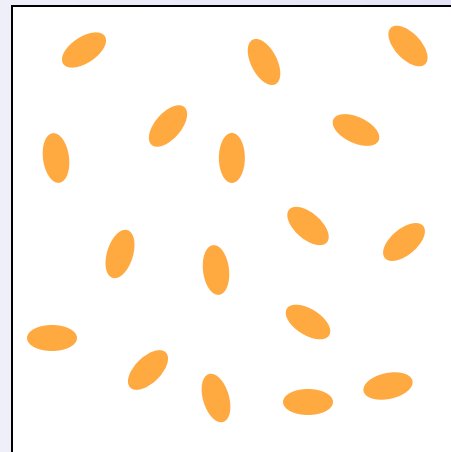
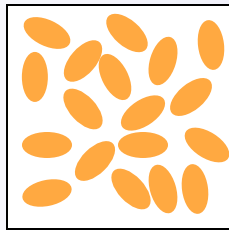
# Cuándo ocurrió el Big Bang?

Conociendo la velocidad de expansión del Universo, podemos ir hacia atrás en el tiempo...

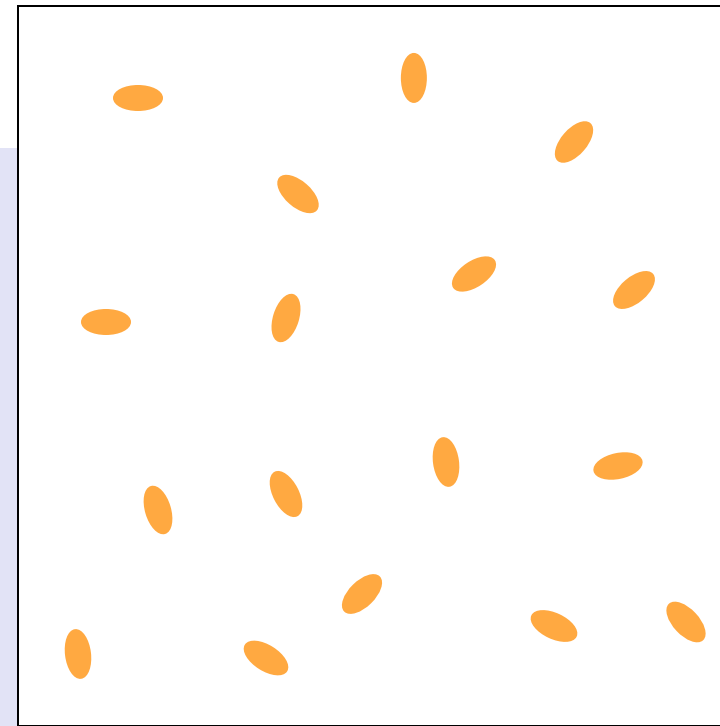
Hace 13.700 millones de años



Hace 10.000 millones de años



Hace 5.000 millones de años



Ahora

... y calcular cuándo TODA la materia se encontraba en un único punto de densidad infinita

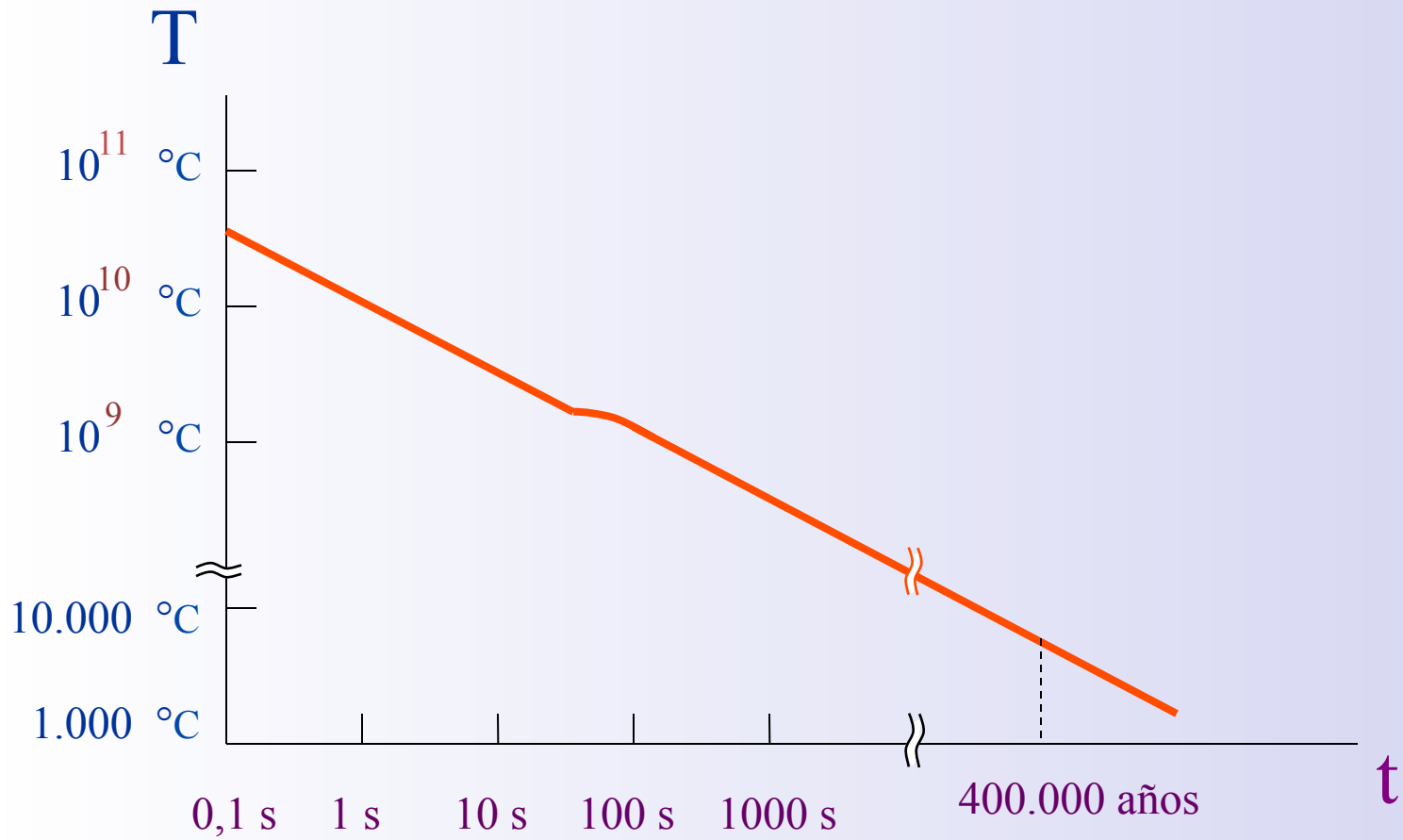
La teoría del Big Bang **NO ES SÓLO** una descripción cualitativa del comienzo del Universo

Permite hacer predicciones CUANTITATIVAS acerca de la abundancia relativa de los elementos presentes en el Universo

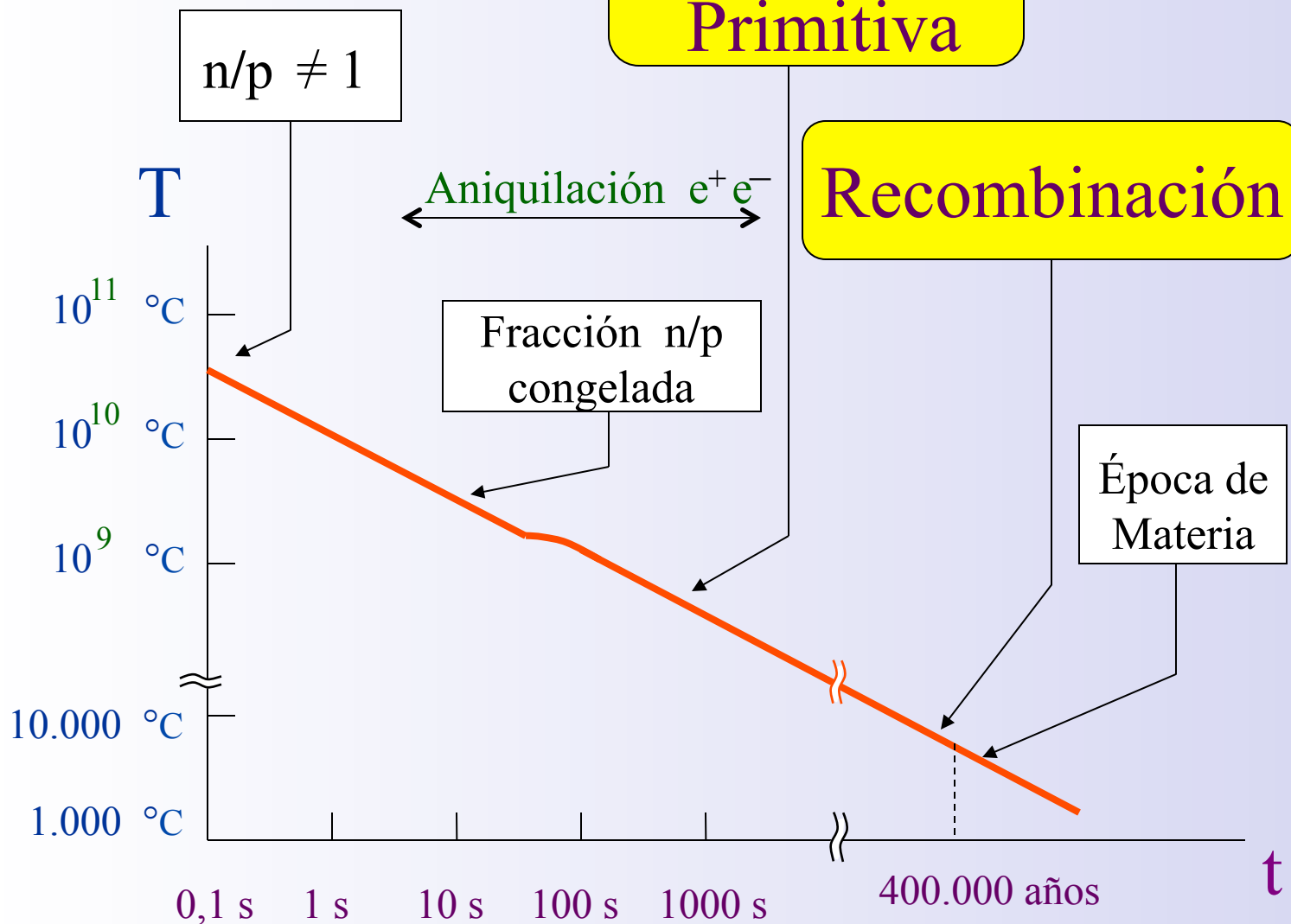
Una primera implicación es que el Universo primitivo era extremadamente **DENSO** y **CALIENTE**

En esas condiciones la materia se disocia en sus componentes fundamentales (**EN PARTÍCULAS ELEMENTALES**)

**Para entender los primeros momentos del Universo es necesario recurrir a la Física de Partículas**



# Nucleosíntesis Primitiva



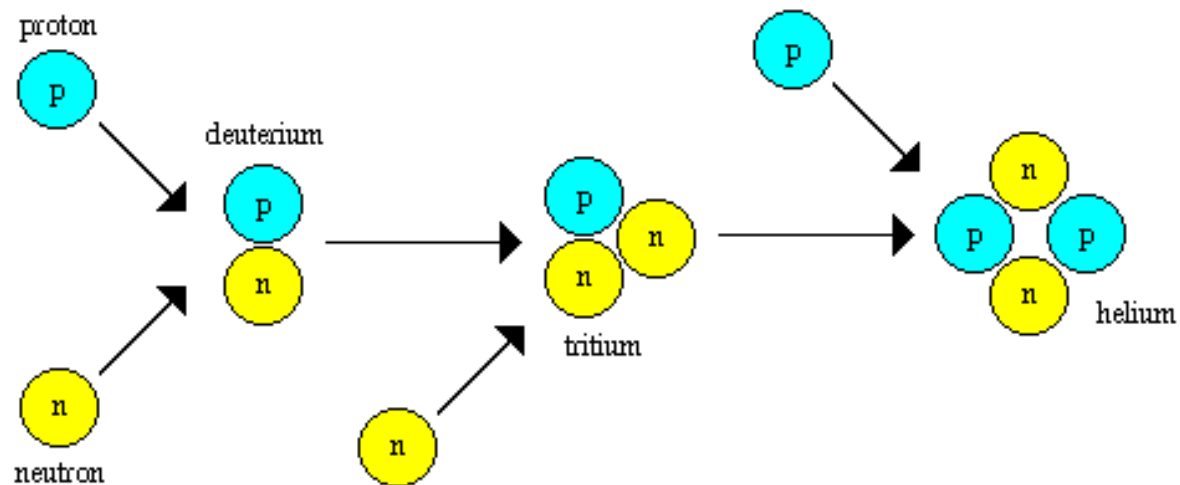


# NUCLEOSÍNTESIS PRIMITIVA

$t \approx 100 \text{ s}$

$T = 10^9 \text{ } ^\circ\text{C}$

Conforme el universo se enfria, los protones y los neutrones se combinan para formar los NÚCLEOS de elementos ligeros



La abundancia de estos elementos se puede calcular teóricamente

El primer cálculo, debido a Alpher y Gamow ha sido posteriormente refinado

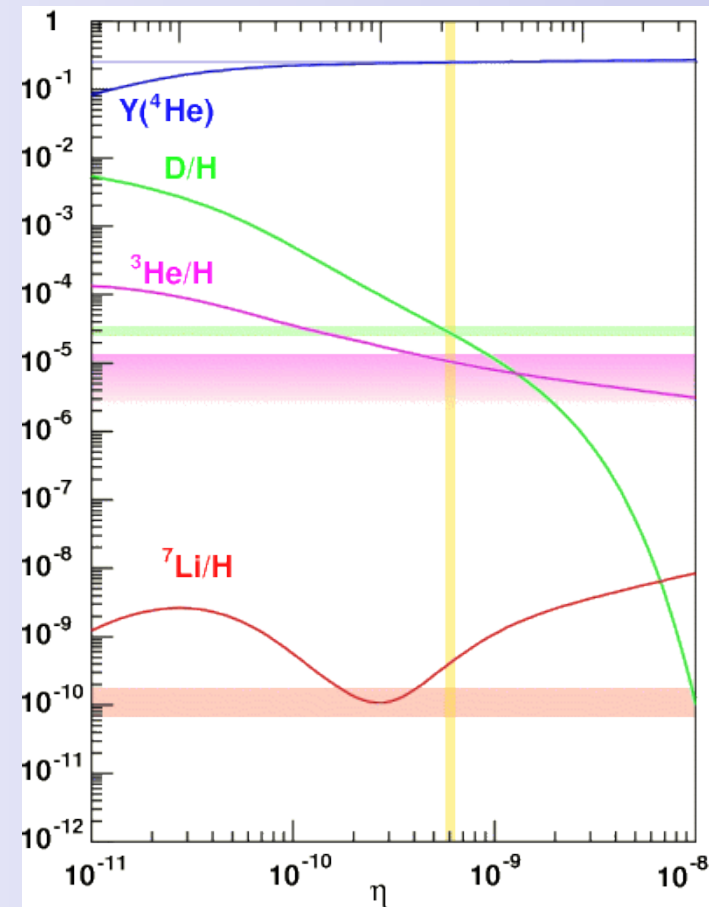
Abundancias relativas con respecto al Hidrógeno

Helio ( ${}^4\text{He}$ )  $\sim 24.5\%$  ☺

Deuterio ( ${}^2\text{H}$ )  $\sim 6 / 10^5$  ☺

Helio-3 ( ${}^3\text{He}$ )  $\sim 2 / 10^5$  ☺

Litio ( ${}^7\text{Li}$ )  $\sim 5 / 10^{10}$  ☺



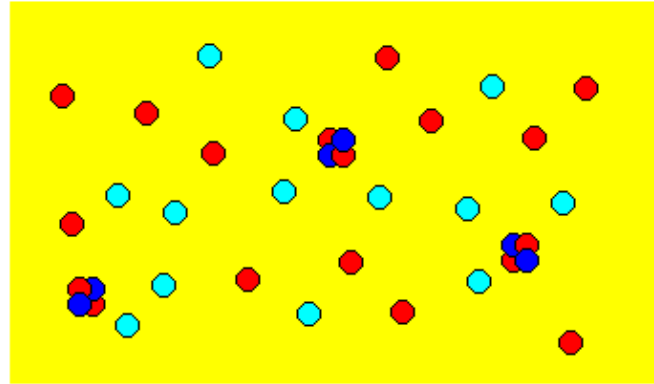
Esta predicción es un enorme éxito que confirma la teoría del Big Bang

# RECOMBINACIÓN

$t \approx 380.000$  años

$T = 3.000$  °C

El Universo se continua enfriando...



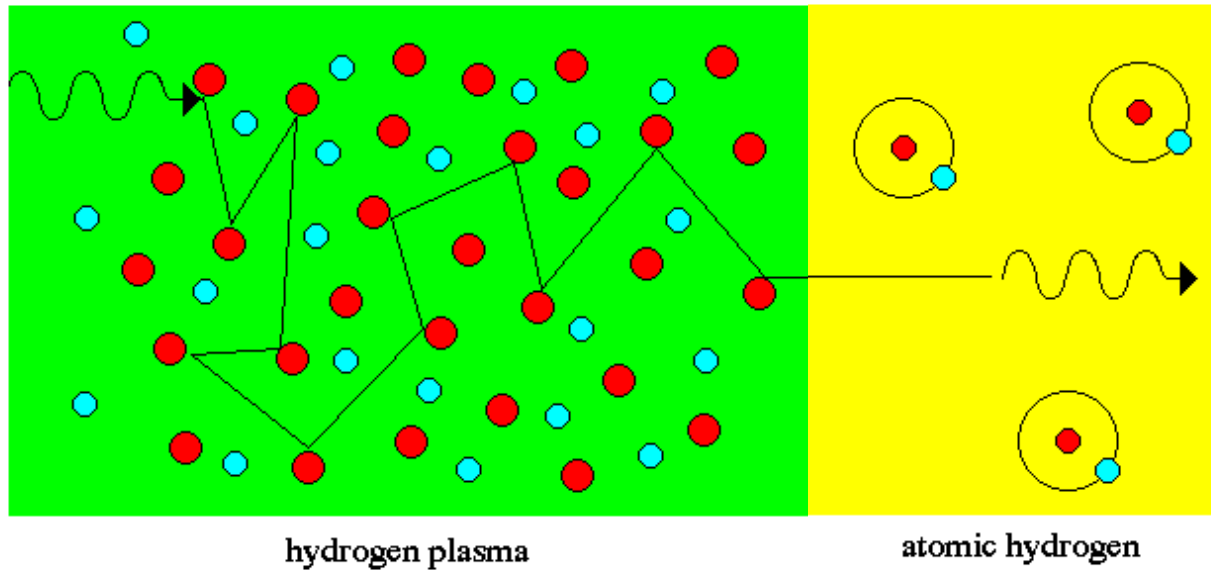
● electrón

● protón

● núcleo de Helio

Y llega a una temperatura a la cual los núcleos capturan electrones para formar átomos

Es un momento crucial... el universo estaba en un estado de **PLASMA**, en el cual los fotones chocaban con partículas cargadas (electrones y protones) y no podían propagarse libremente...



Tras la formación de átomos, el Universo se vuelve **TRANSPARENTE** a los fotones y estos por fin pueden viajar en línea recta y en todas las direcciones

Con la expansión del universo, su longitud de onda se "estira" y los fotones se "enfían" (son menos energéticos) hasta una temperatura de  **$T \approx -270 \text{ } ^\circ\text{C}$**

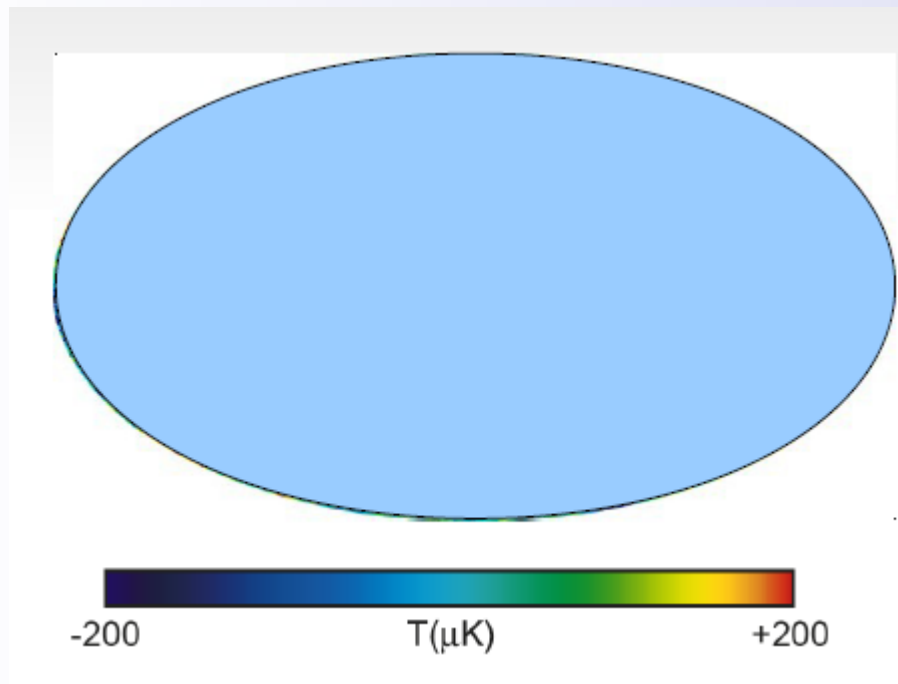
**RADIACIÓN DE FONDO DE MICROONDAS**



La Radiación de Fondo de Microondas fue medida por Penzias y Wilson en 1964 con una antena para la detección de ondas de radio.

(por lo que les fue concedido el premio Nobel en 1978)

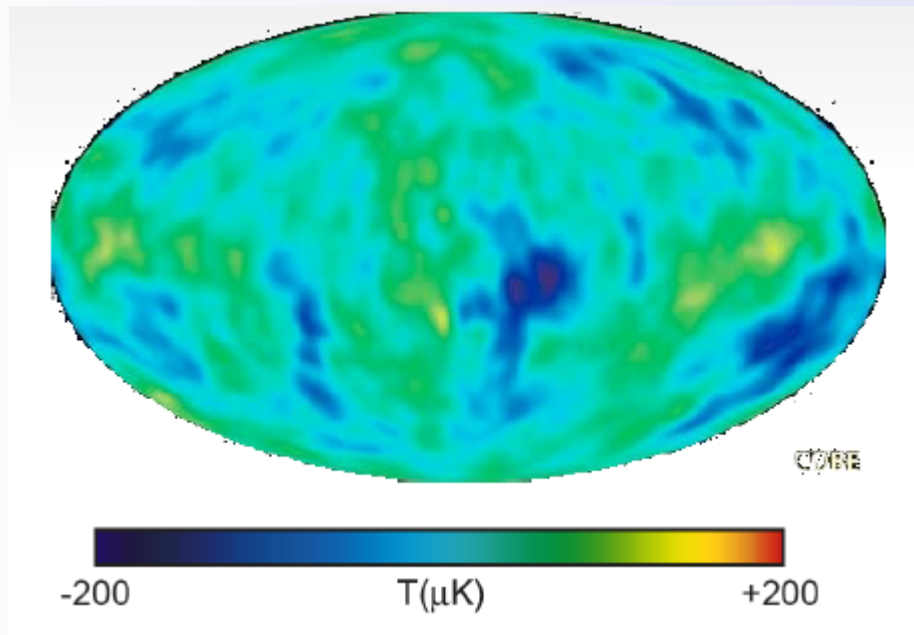
Observaron una radiación **HOMOGÉNEA** con temperatura de  $-270^{\circ}\text{C}$



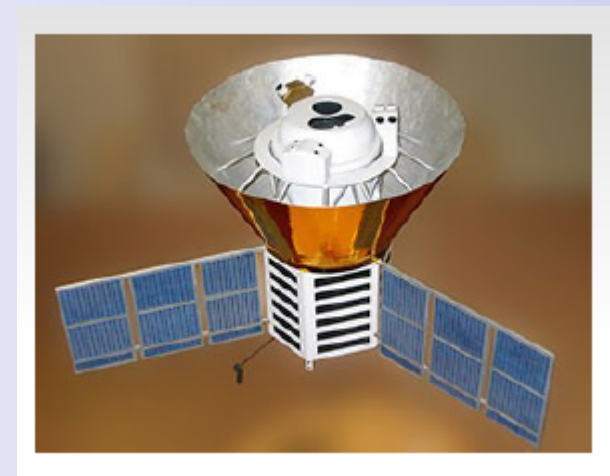
La Radiación de Fondo de Microondas fue medida por Penzias y Wilson en 1964 con una antena para la detección de ondas de radio.

(por lo que les fue concedido el premio Nobel en 1978)

Observaron una radiación **HOMOGÉNEA** con temperatura de  $-270^{\circ}\text{C}$



(Nobel para Smoot y Mather en 2006 por el experimento COBE)

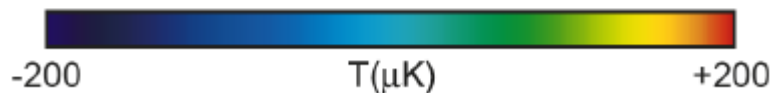
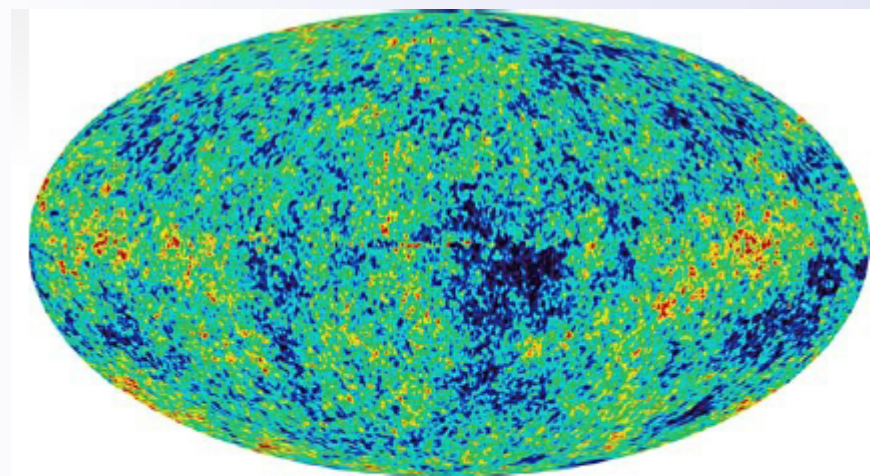


Las medidas del satélite COBE (1989) mostraron pequeñísimas inhomogeneidades de temperatura

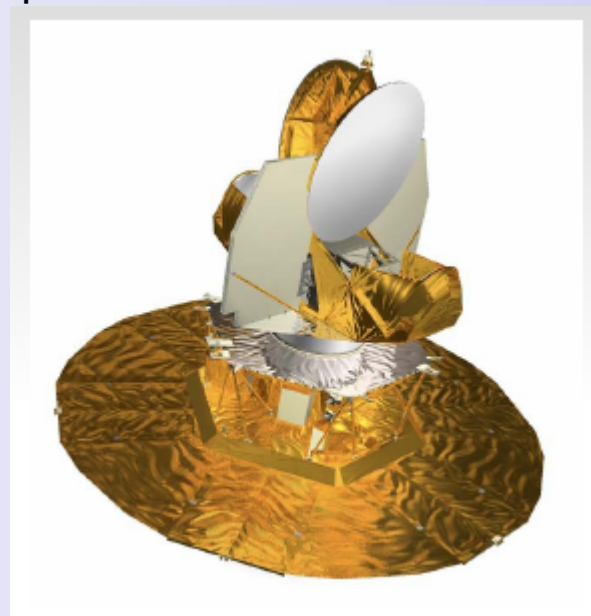
La Radiación de Fondo de Microondas fue medida por Penzias y Wilson en 1964 con una antena para la detección de ondas de radio.

(por lo que les fue concedido el premio Nobel en 1978)

Observaron una radiación **HOMOGÉNEA** con temperatura de  $-270^{\circ}\text{C}$



Variaciones de pocas millonésimas de grado!



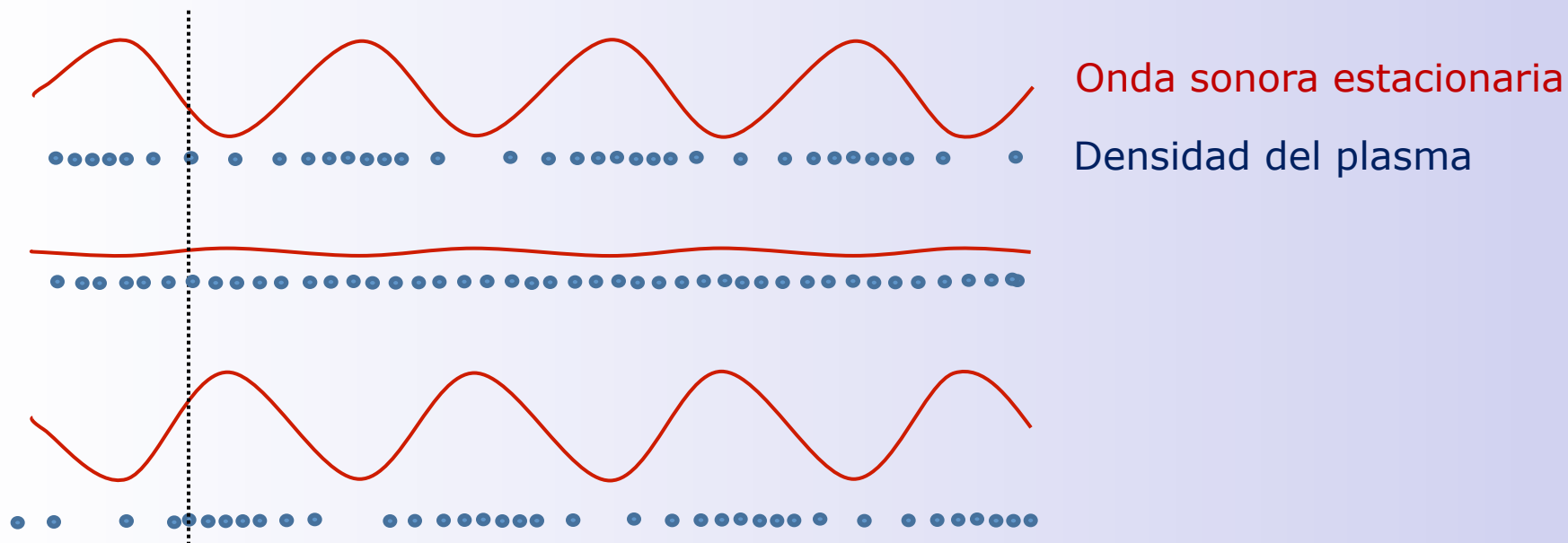
El satélite **WMAP** ha medido la temperatura del fondo de radiación de microondas con gran precisión



Las inhomogeneidades en temperatura (de los fotones liberados en recombinación) son una impronta de inhomogeneidades en la densidad del plasma del Universo primitivo.

Las densidades de la materia han continuado creciendo (hasta nuestros días), pero la radiación ha mantenido intacta esa "instantánea".

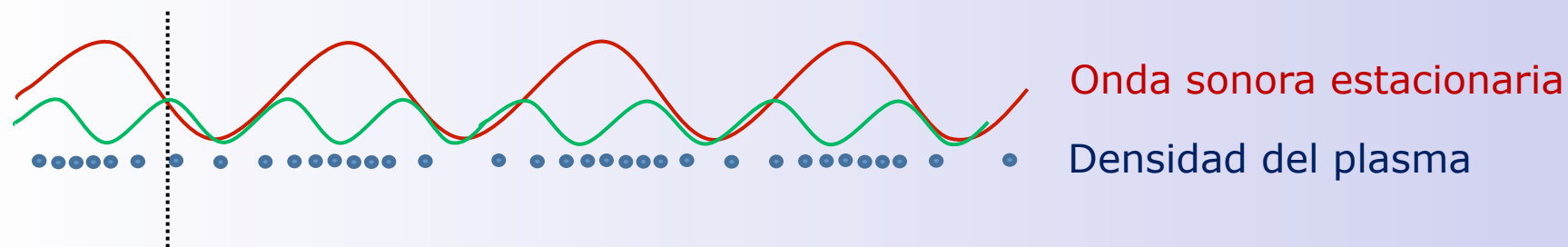
Esas fluctuaciones en la densidad son ONDAS SONORAS EN EL PLASMA



Las inhomogeneidades en temperatura (de los fotones liberados en recombinación) son una impronta de inhomogeneidades en la densidad del plasma del Universo primitivo.

Las densidades de la materia han continuado creciendo (hasta nuestros días), pero la radiación ha mantenido intacta esa "instantánea".

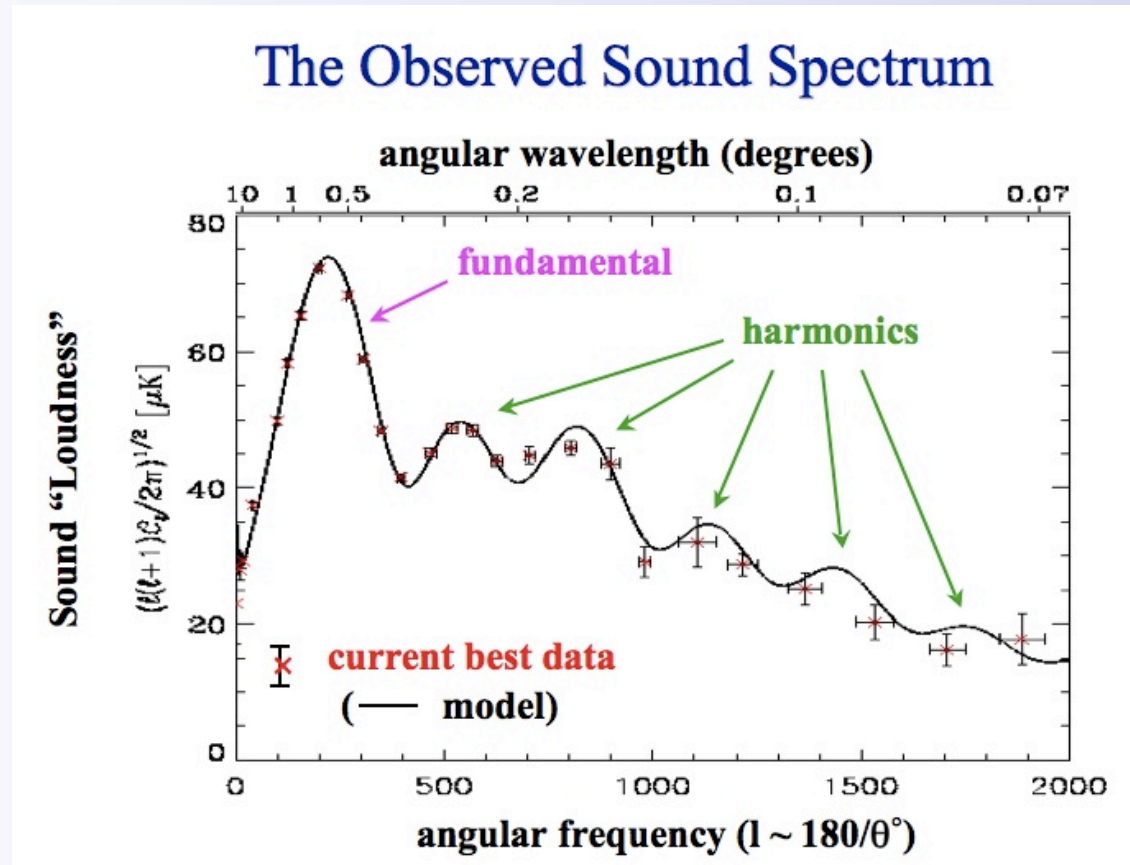
Esas fluctuaciones en la densidad son ONDAS SONORAS EN EL PLASMA



Los armónicos superiores contribuyen cada vez menos (con menos intensidad)

Dado el tiempo pasado desde el Big Bang hasta Recombinación, en este momento hay un **modo fundamental (cuyo periodo es  $2 \times 38.000.000$  años)** y armónicos que dan contribuciones más pequeñas

# Espectro de potencias del Fondo de Radiación de Microondas



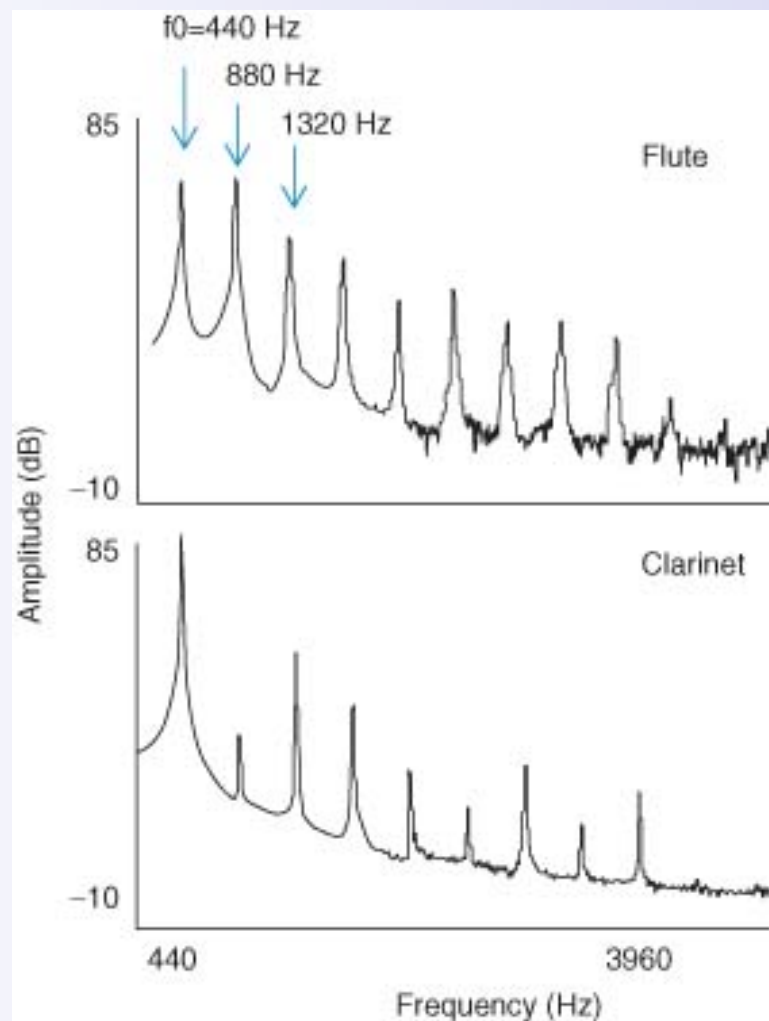
El modo fundamental es aproximadamente  $1^\circ$

Oigamos el sonido del Universo

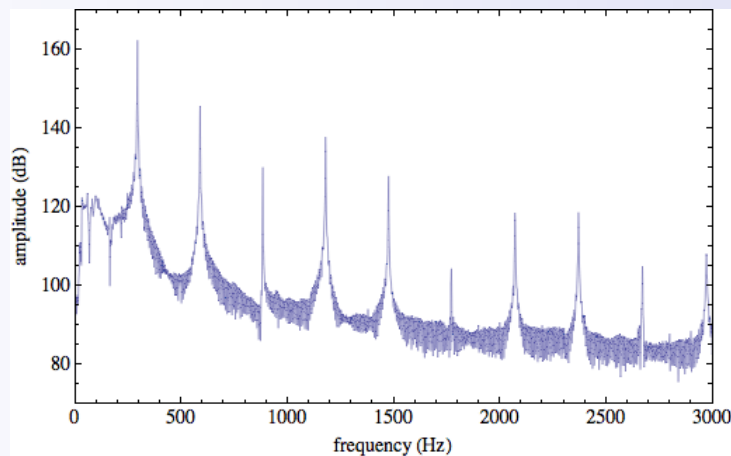
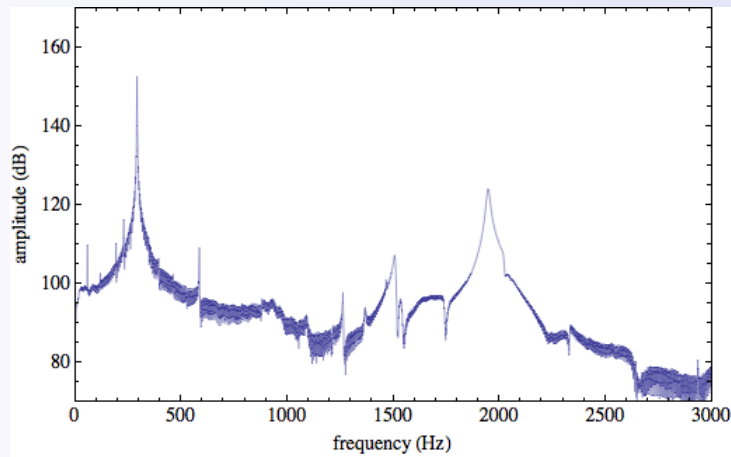


s\_cofl\_conc\_R\_5s.mp3

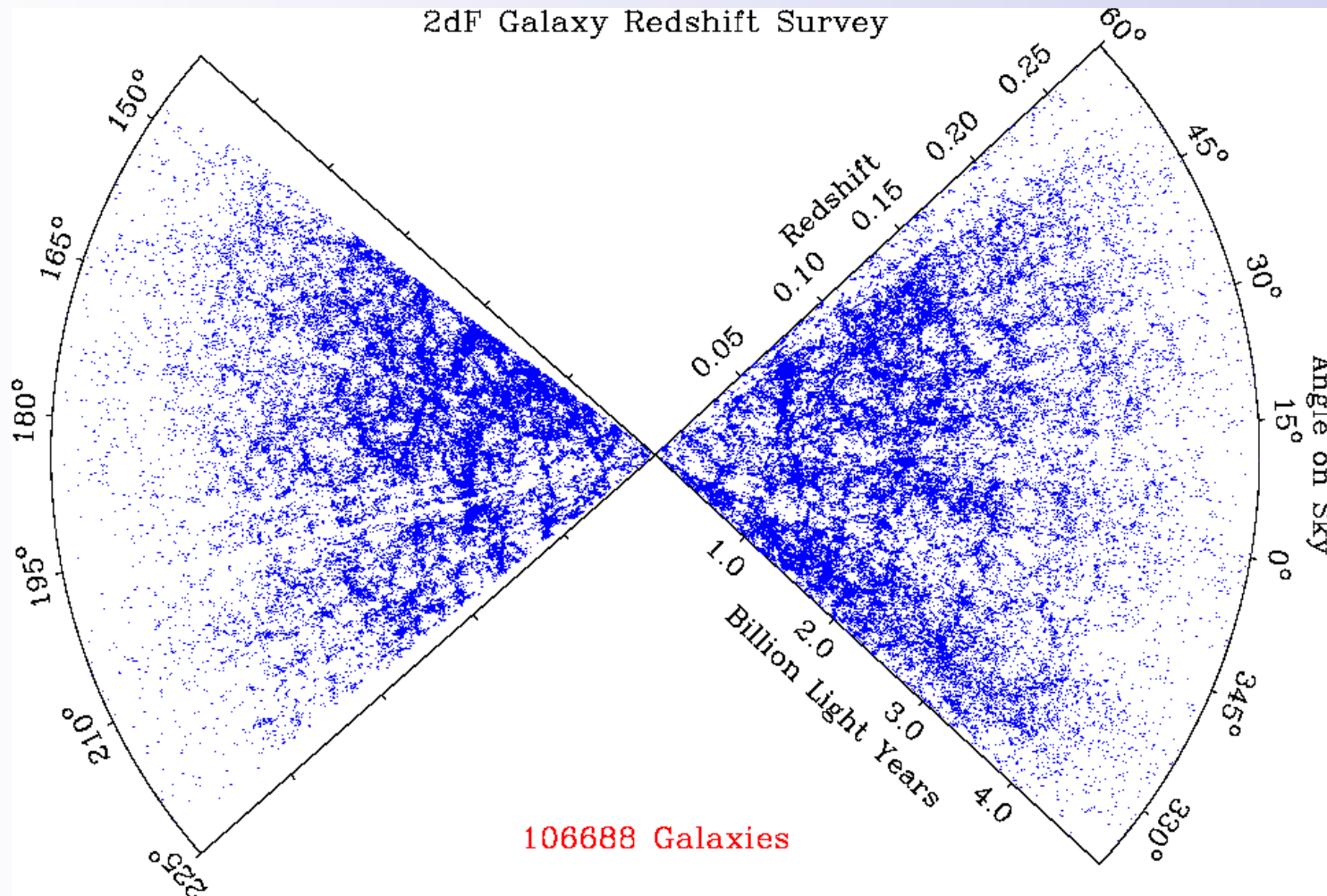
Del mismo modo, los instrumentos musicales vibran con una frecuencia fundamental y una serie de armónicos **que difieren según el instrumento y determinan el "timbre" del mismo.**



Del mismo modo, los instrumentos musicales vibran con una frecuencia fundamental y una serie de armónicos **que difieren según el instrumento y determinan el "timbre" del mismo.**



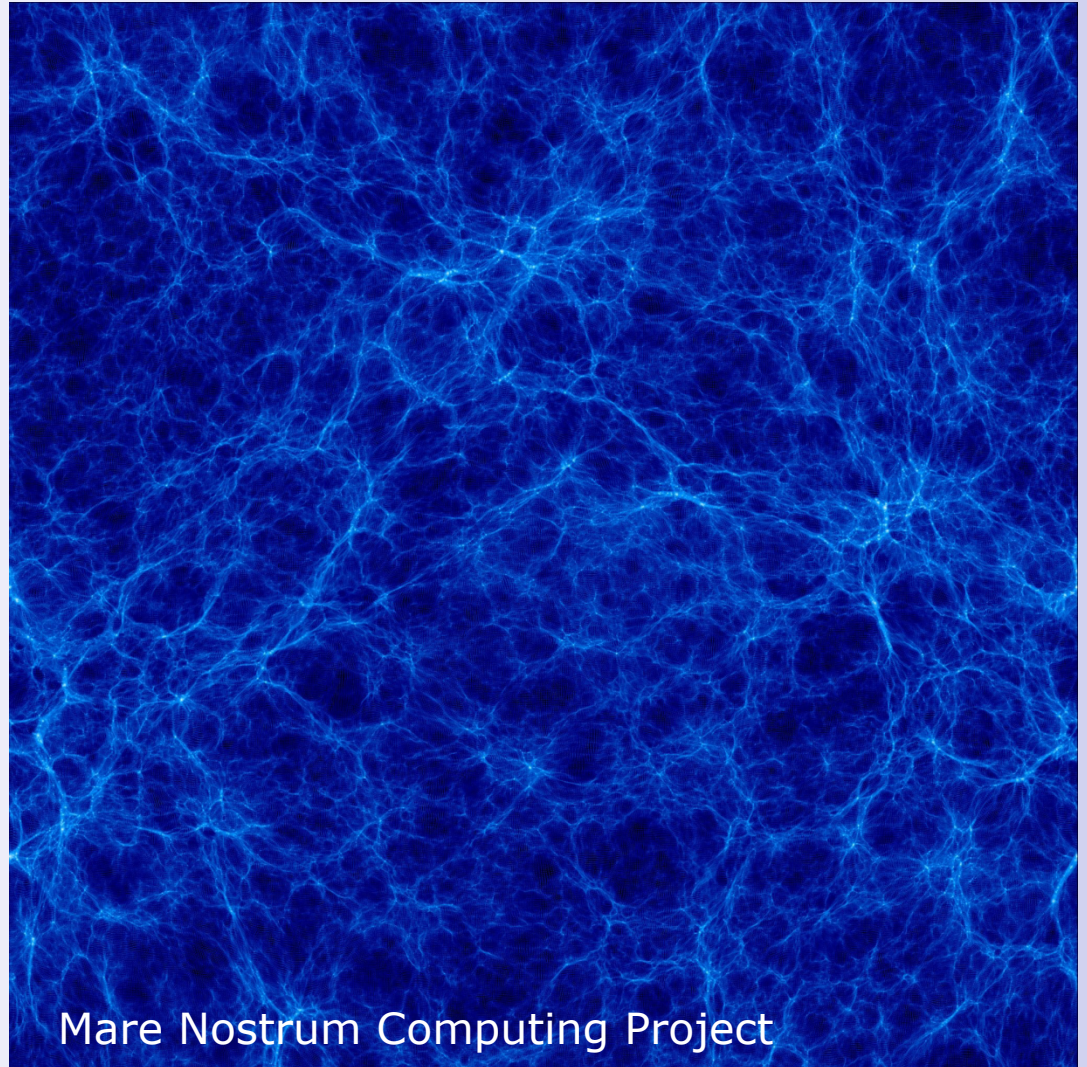
Posteriormente a recombinación la materia comenzó a colapsar gravitacionalmente, formando las estructuras (galaxias, clusters, etc que vemos hoy en día)



Este proceso se estudia con ayuda de supercomputadores

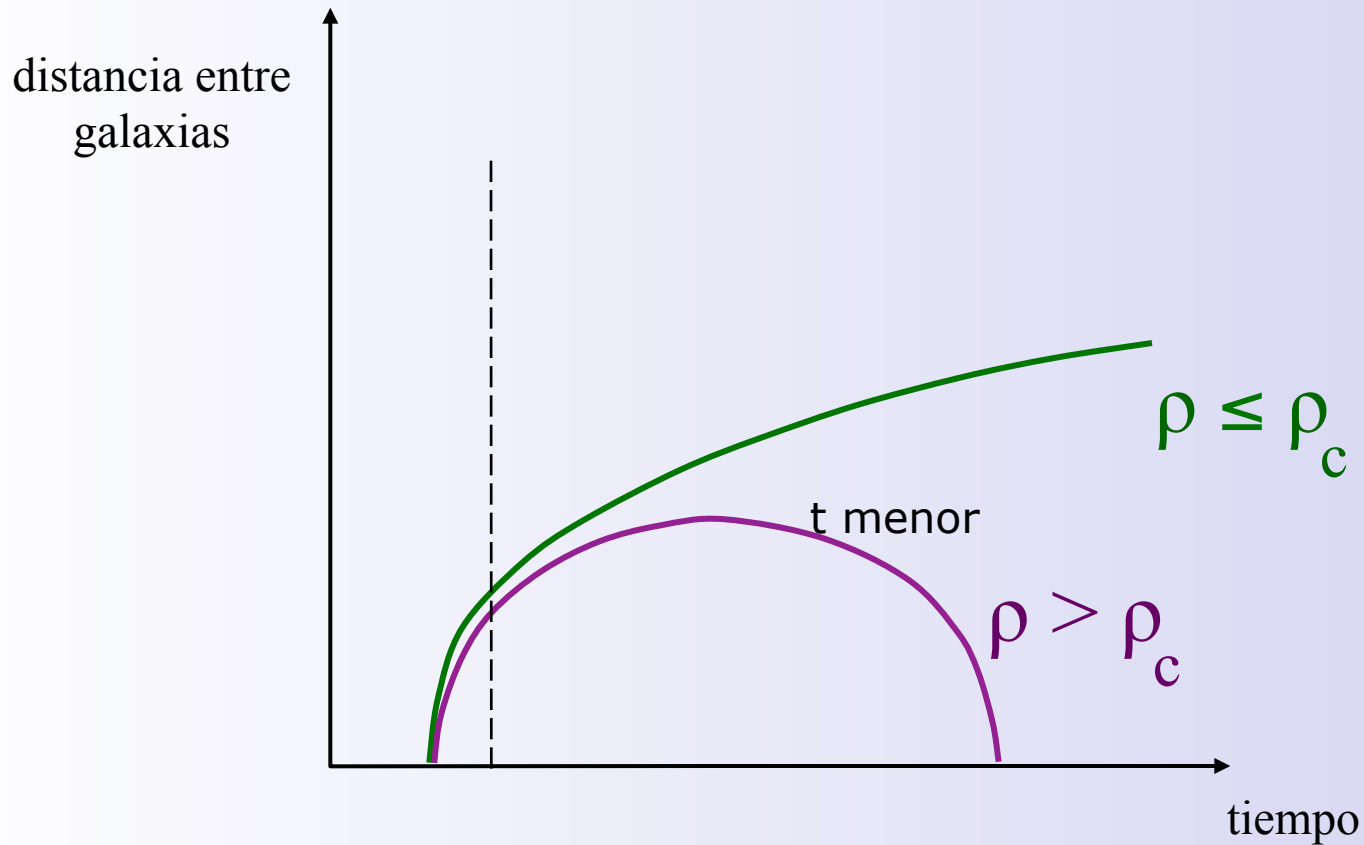
La distribución de  
materia oscura forma  
una estructura  
Filamentosa

Las galaxias se formarían  
en las regiones con  
mayor densidad  
Simulación



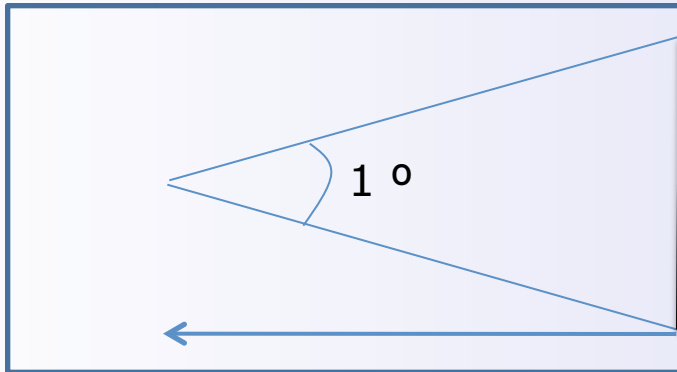
# ¿Cuál es el futuro del universo?

Todo depende de la densidad de materia del Universo:  $\rho$





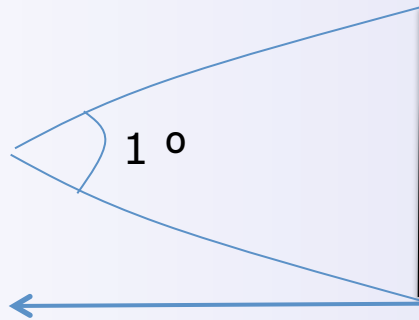
Conociendo la edad del Universo y la amplitud del modo fundamental podemos también determinar la geometría



El Universo es extremadamente plano

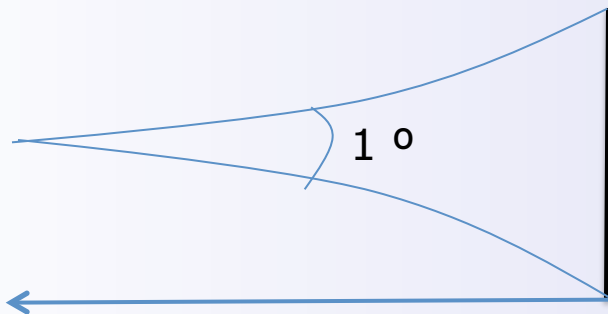
Universo Plano

$t=13.700$  millones de años



Universo Cerrado

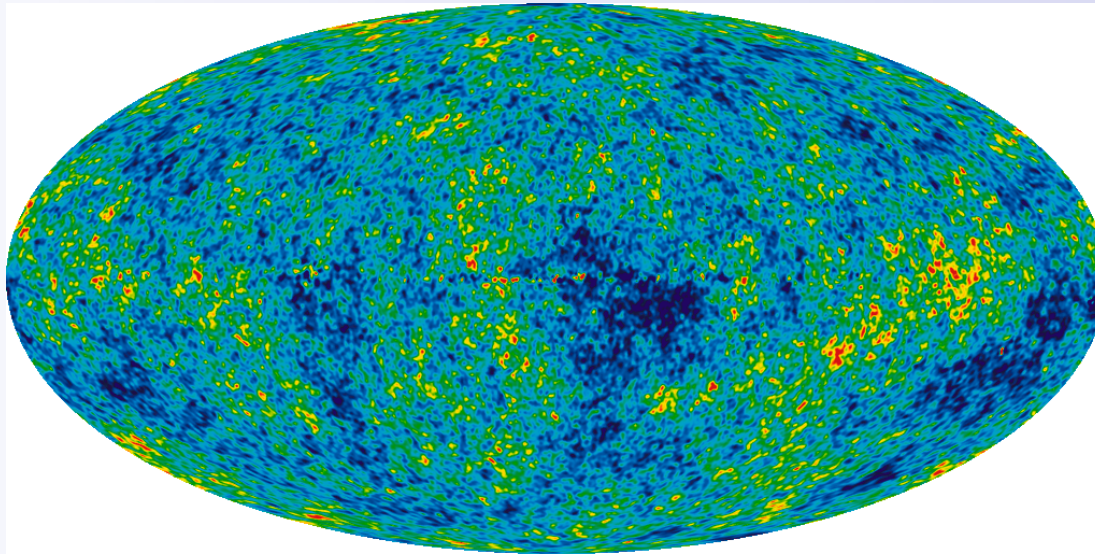
$t$  menor



Universo Abierto

$t$  mayor

La observación del Fondo de Radiación de Microondas supone la confirmación experimental del Big Bang, la fotografía más antigua del Universo, y la huella de sus componentes fundamentales



¡Estudiando las inhomogeneidades (extremadamente pequeñas) en la temperatura se puede determinar cuáles son los componentes del Universo!

# Composición del Universo

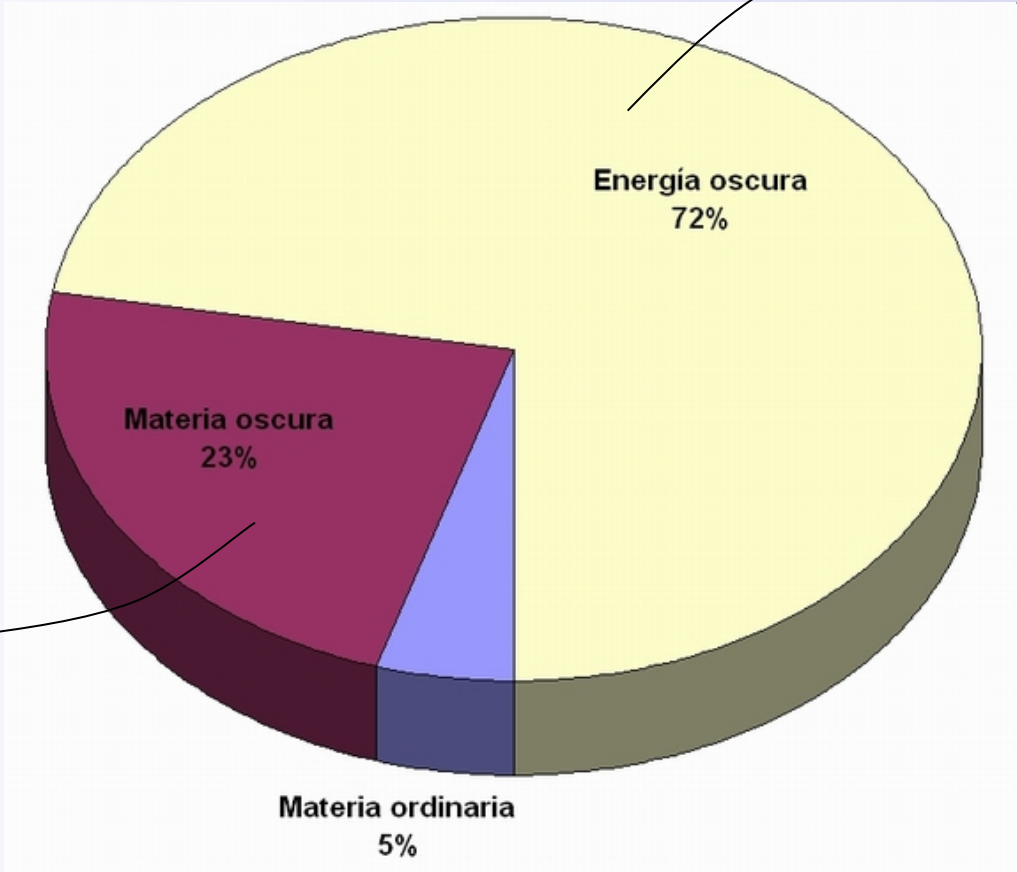
$\rho_{\text{Materia Ordinaria}} \sim 3\% \rho_c$

?  $\rho_{\text{Materia Oscura}} \sim 23\% \rho_c$

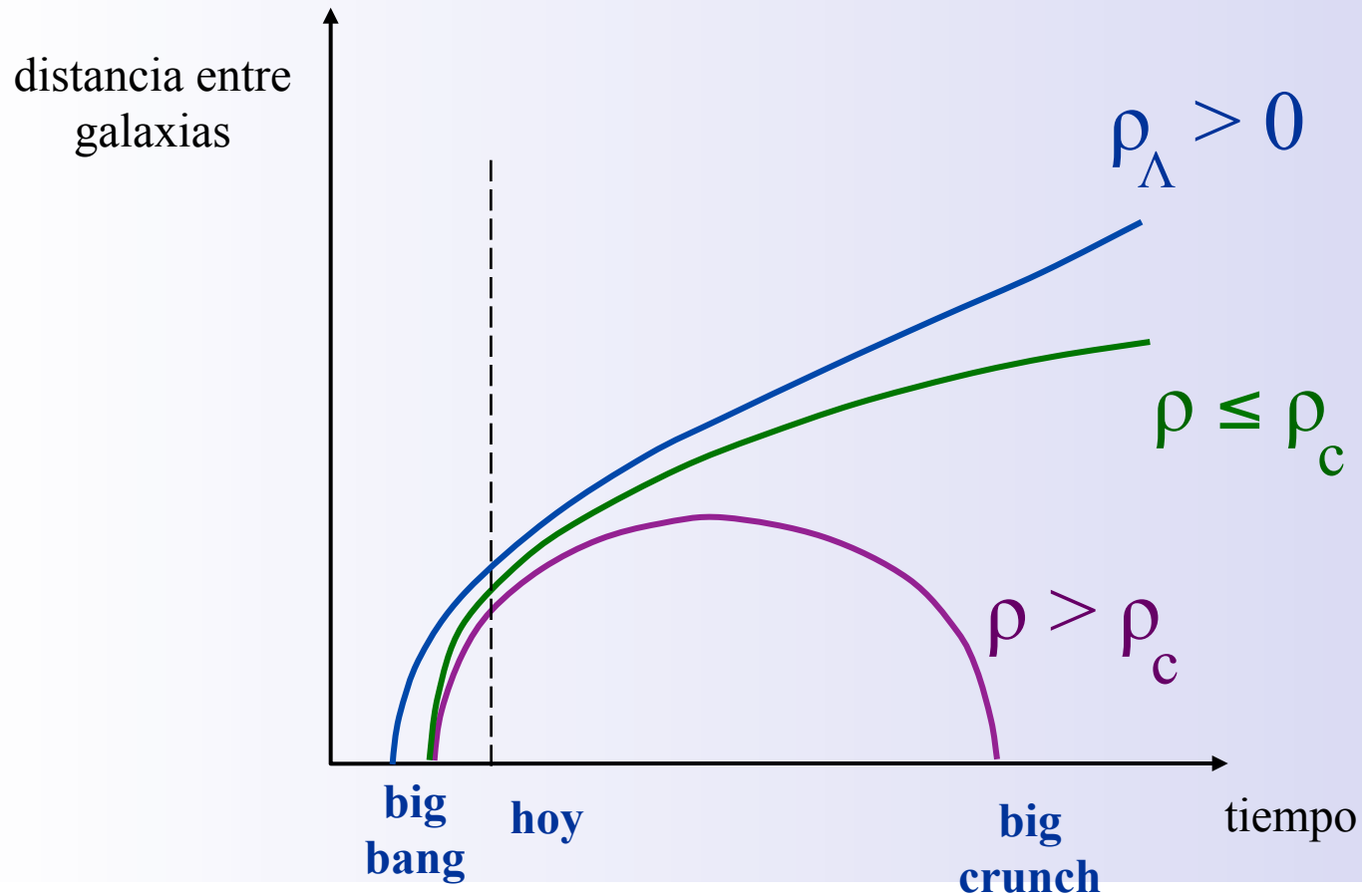
???  $\rho_{\Lambda} \sim 73\% \rho_c$

---

$\rho_{\text{Universo}} \sim \rho_c$

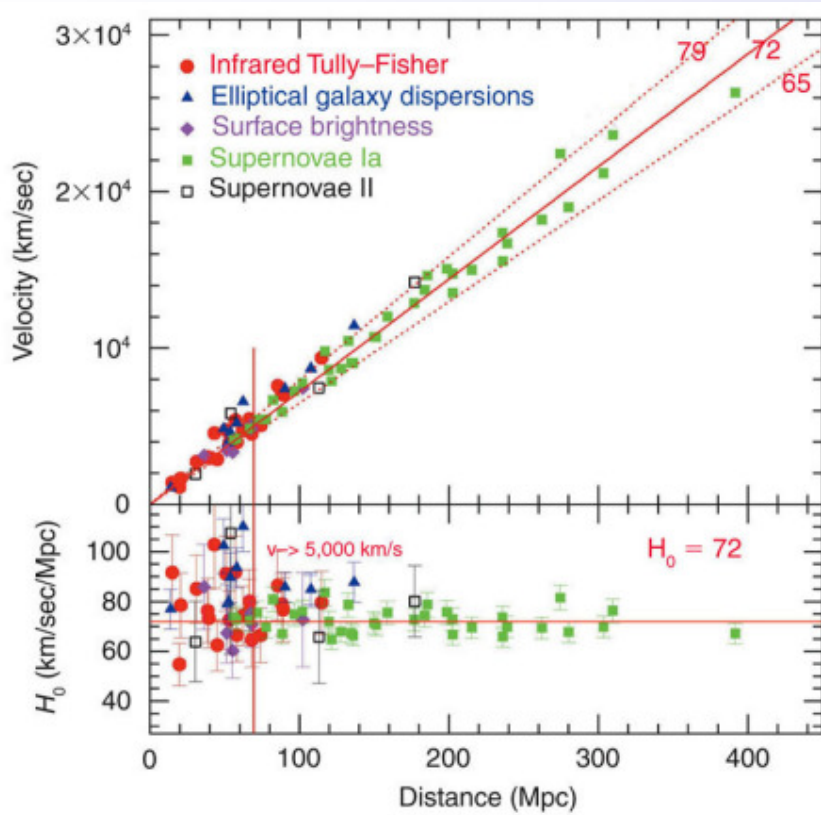


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = T_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \Lambda$$

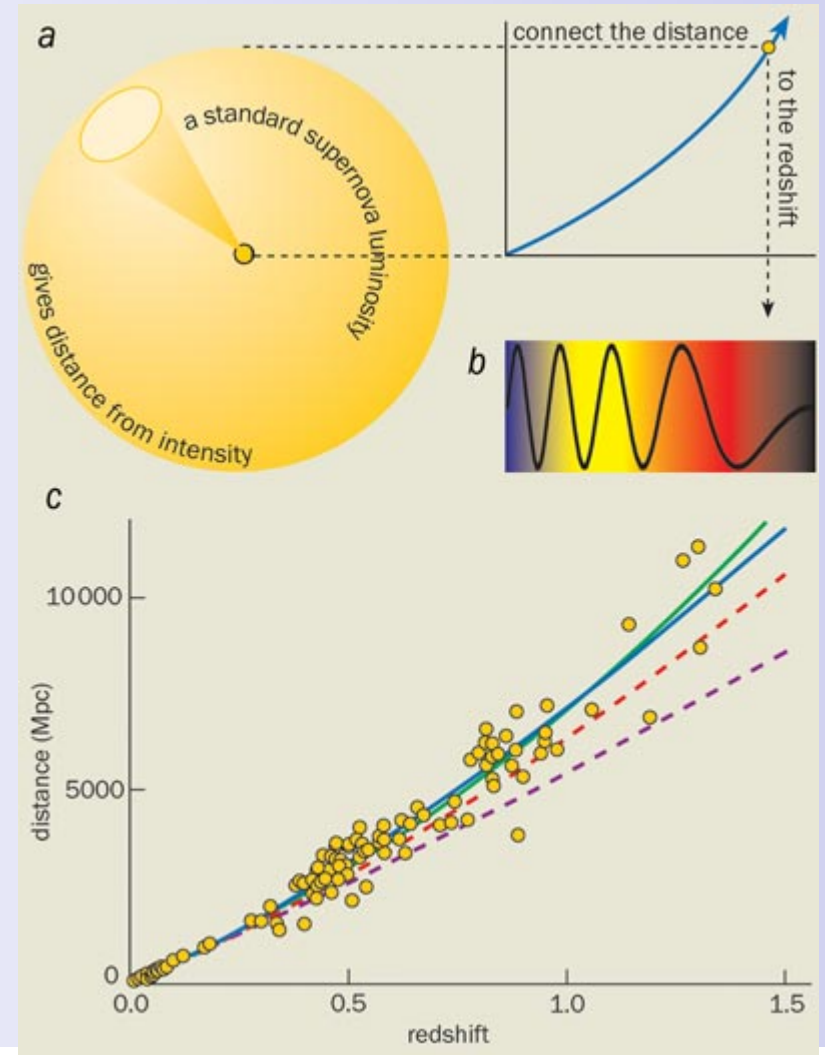


El Universo se expande... Pero en realidad esa expansion es...

**ACELERADA**



**B**  
(Wendy L. Freedman, Observatories of the Carnegie Institution of Washington, and NASA)





¿Qué pasó **antes** del **instante inicial**?





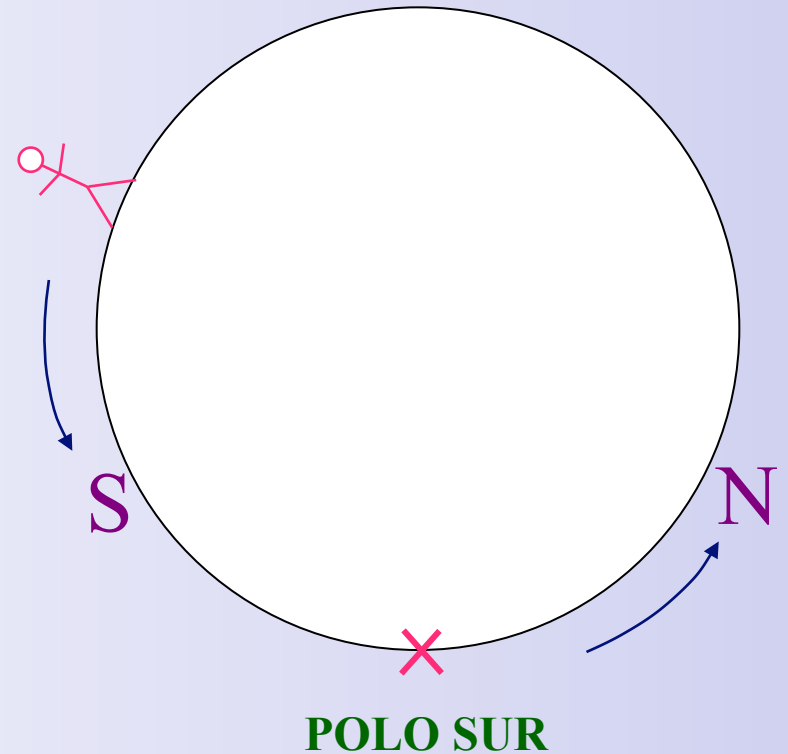
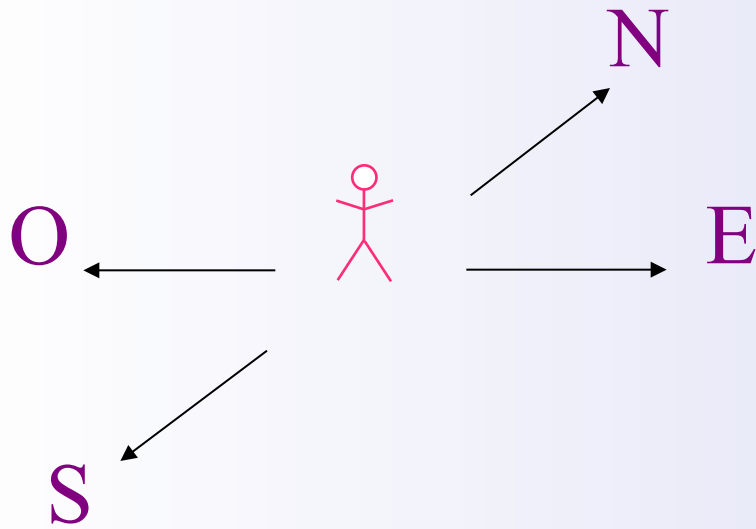
¿Qué hacía Dios **antes** de crear los cielos y la Tierra?

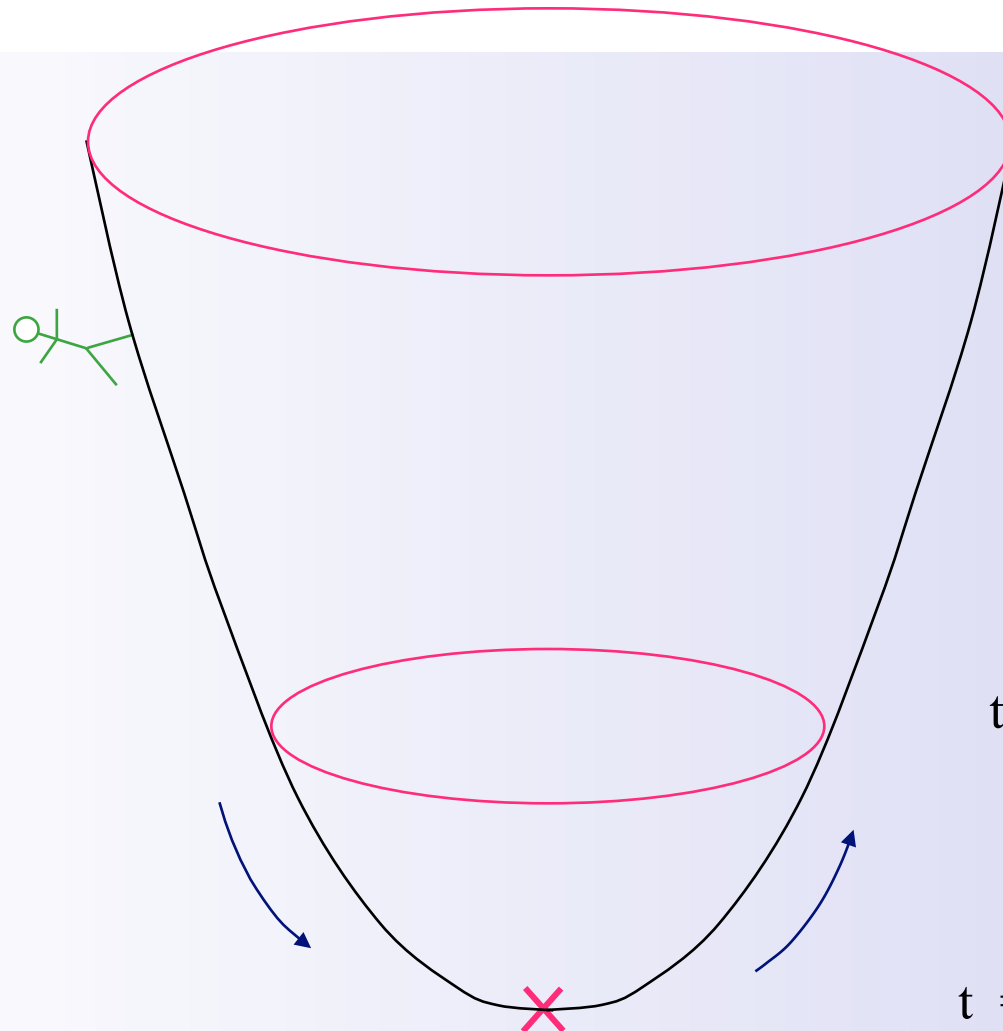
Preparaba el **Infierno** para los que hacen ese tipo de preguntas

San Agustín, 400 d.C.

¿Qué pasó **antes** del instante inicial?

... Es una pregunta sin mucho sentido





$t = 14 \times 10^9$  años  
(ahora)

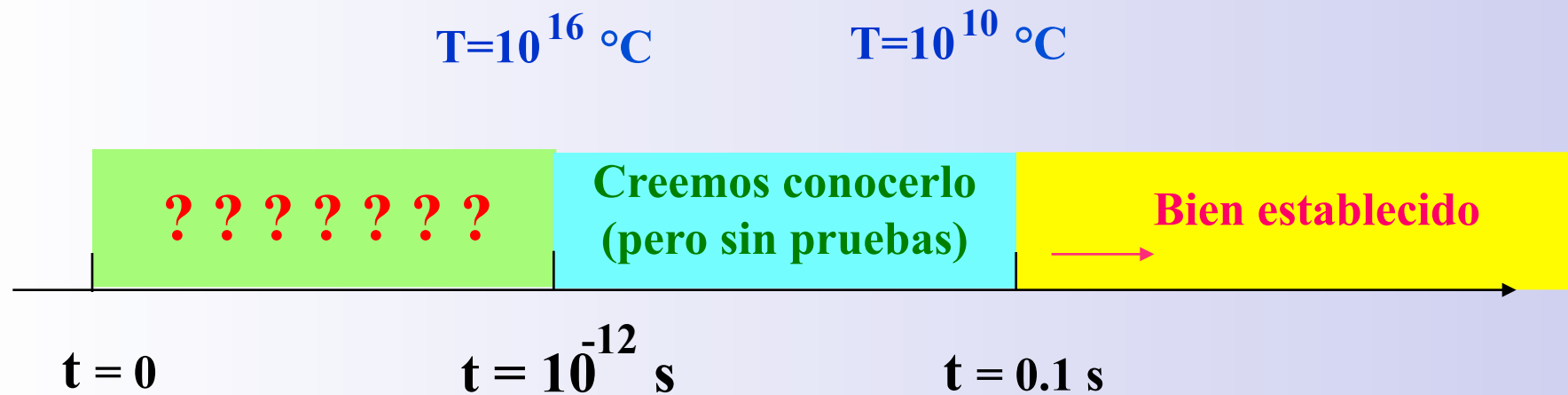
$t =$  mil millones de años

$t = 0$

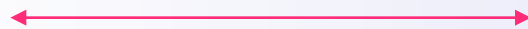
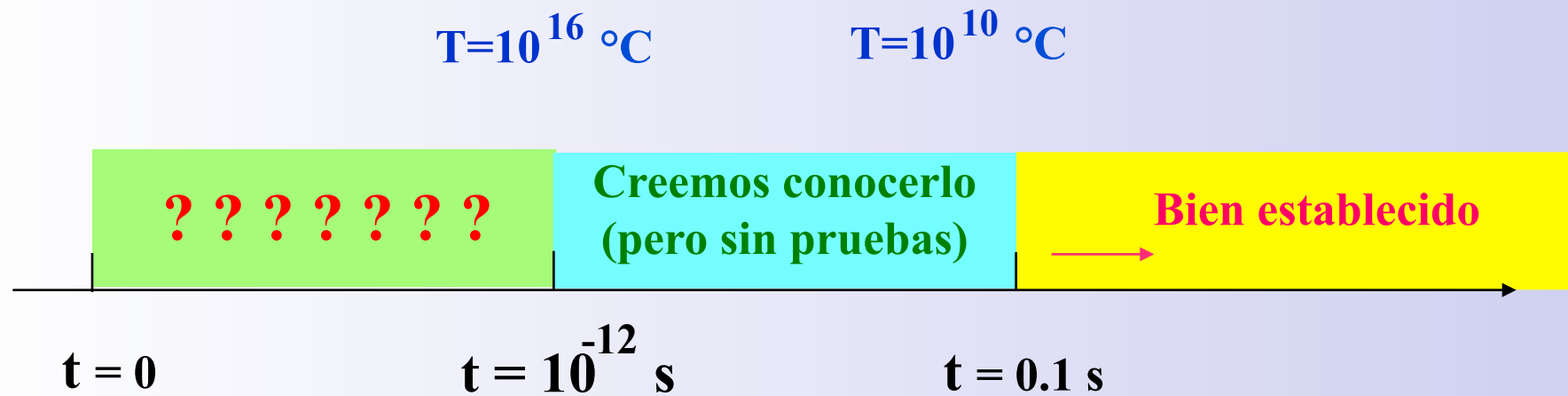
**ORIGEN DEL  
TIEMPO**

¿Es **FIABLE** la descripción del  
Big-Bang hasta el preciso **instante inicial**?

¿Es **FIABLE** la descripción del Big-Bang hasta el preciso **instante inicial**?



# ¿Es **FIABLE** la descripción del Big-Bang hasta el preciso **instante inicial**?



**Esta fracción de segundo puede ser crucial para resolver enigmas pendientes**

## ALGUNOS PROBLEMAS PENDIENTES

- ¿Por qué  $\rho \approx \rho_c$  ?
- ¿De dónde surgió la materia que llena el Universo ?
- ¿Por qué hay un Universo en vez de no haber nada?

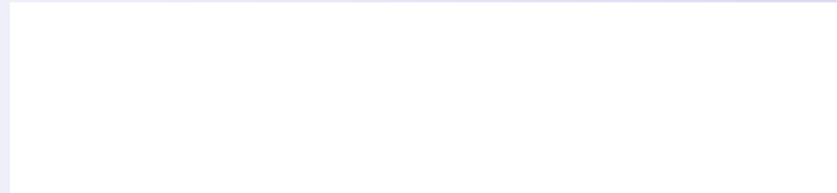
etc.



## ENERGÍA POSITIVA



## ENERGÍA NEGATIVA



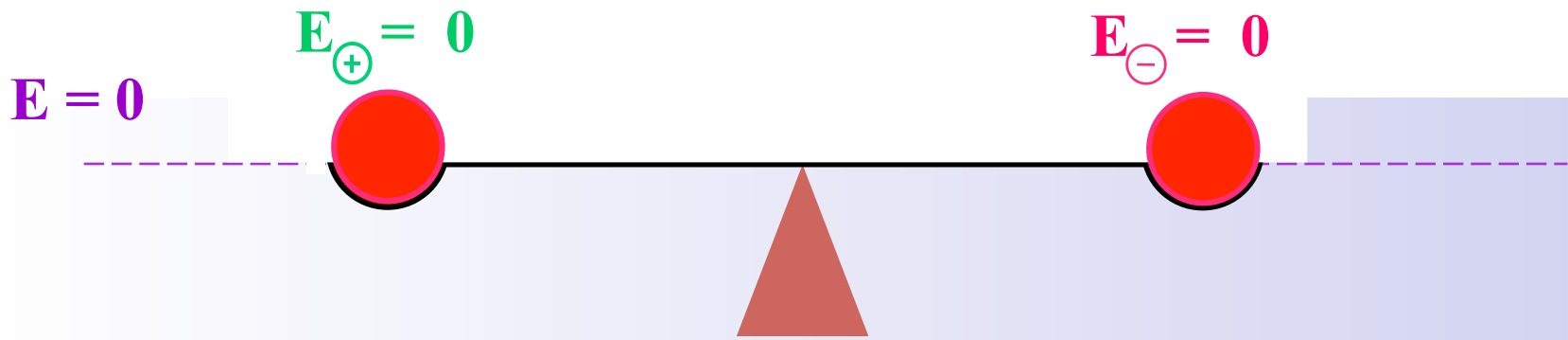
*A escala cósmica :*

$$E_{\oplus} + E_{\ominus} \approx 0$$

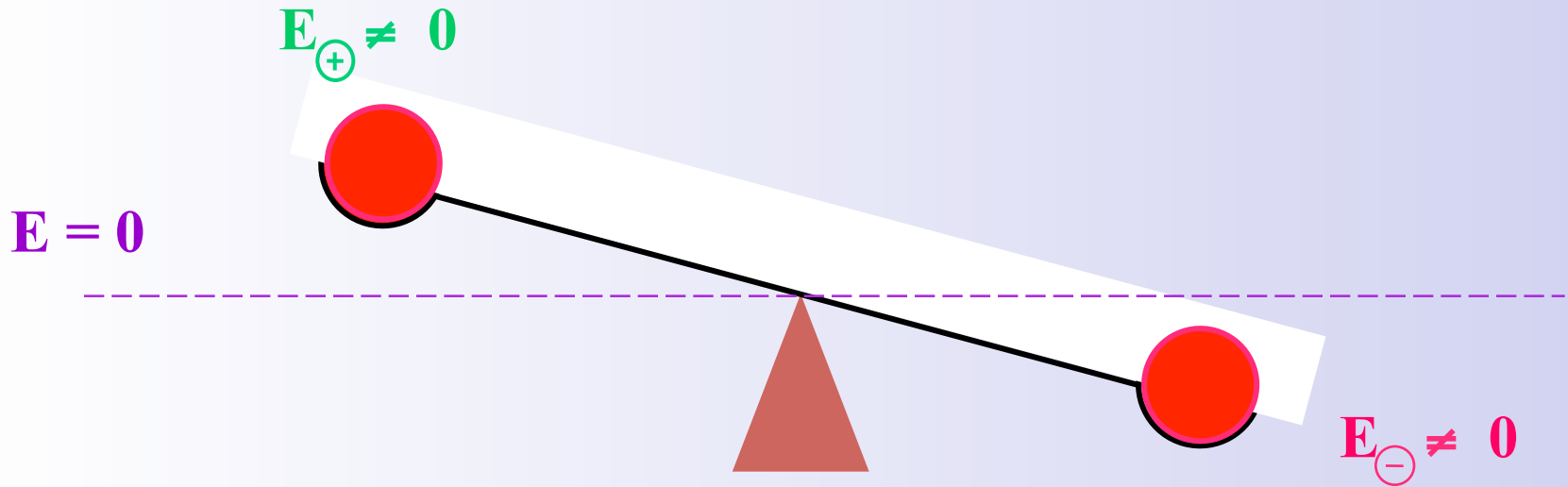




*Nada*

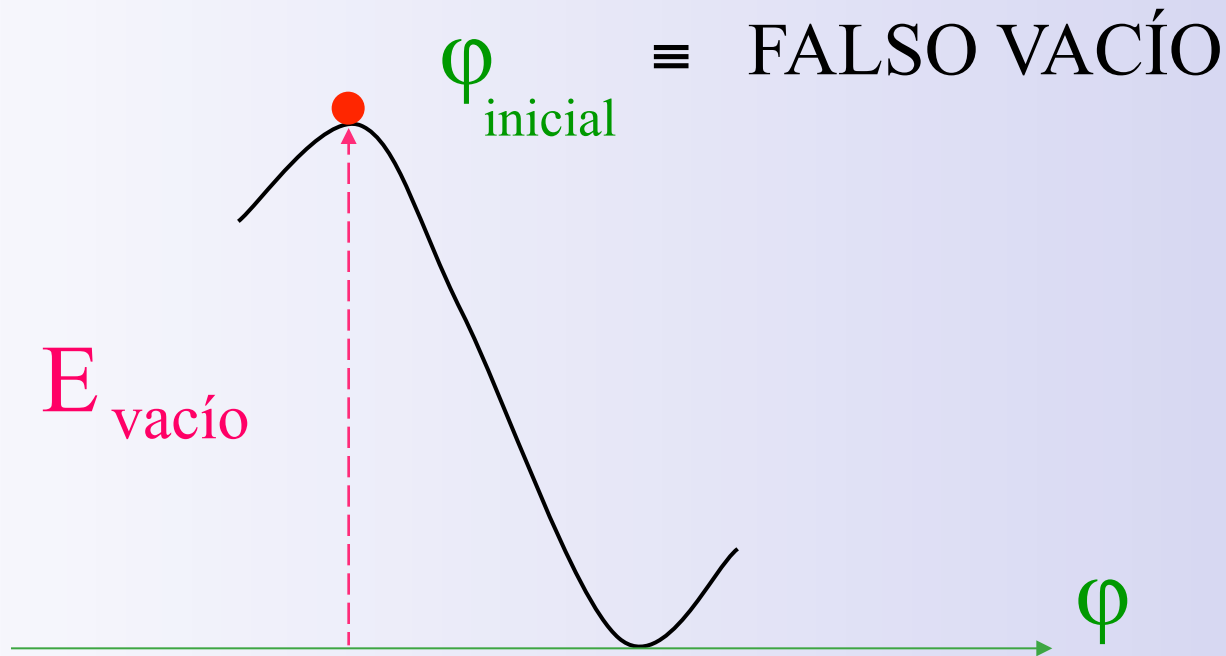


*Nada*



*Universo con  
materia*

# UNIVERSO INFLACIONARIO



Expansión  
Vertiginosa

$\equiv$

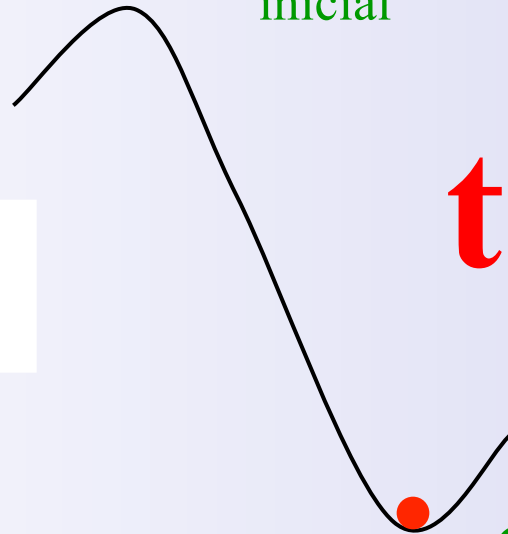
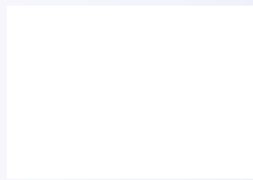
INFLACIÓN

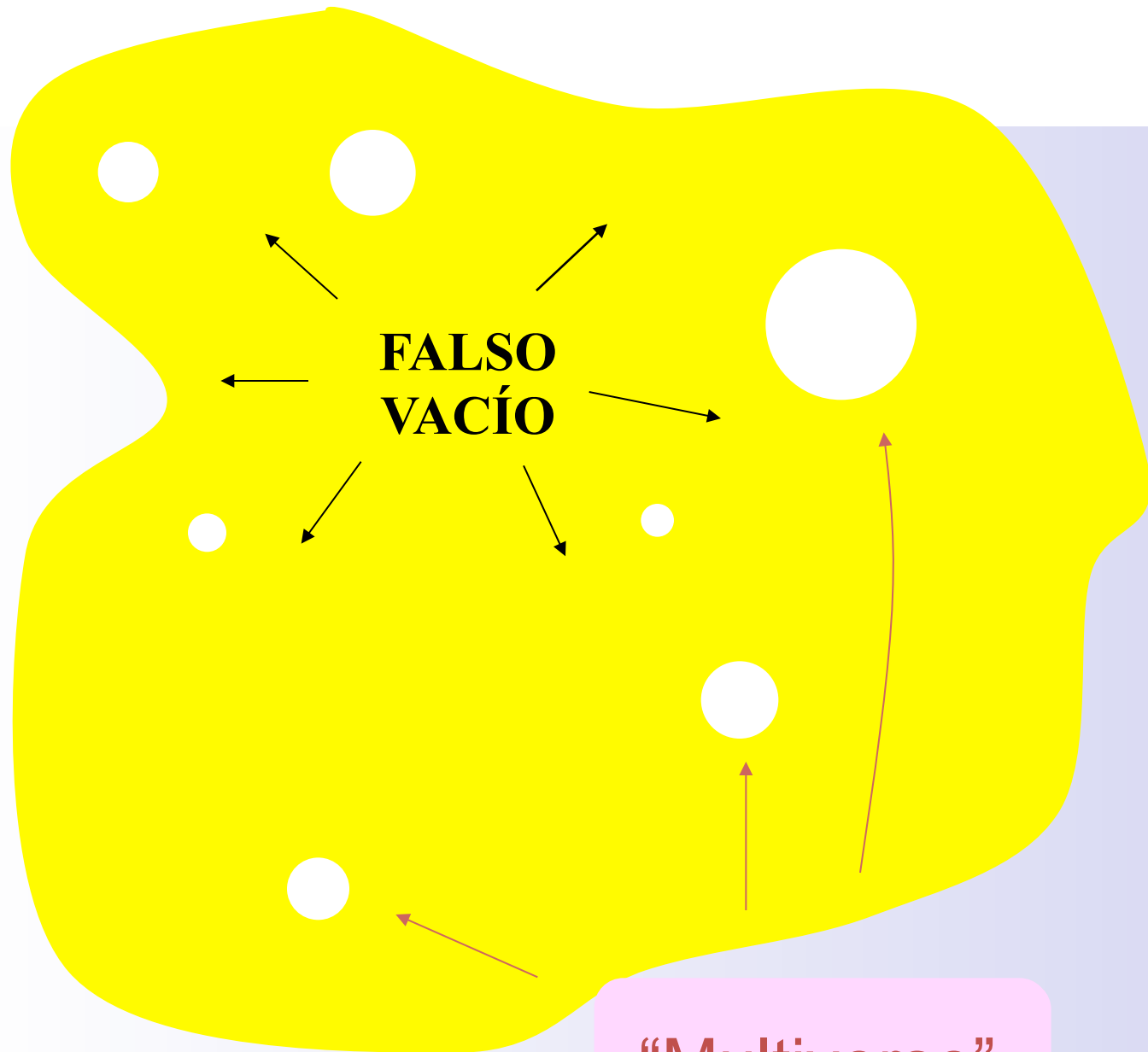
# UNIVERSO INFLACIONARIO

$\varphi_{\text{inicial}}$   $\equiv$  FALSO VACÍO

$t = 10^{-34} \text{ s}$

$\varphi_{\text{final}}$   $\equiv$  VACÍO VERDADERO





“Multiverso”