DEL PLANETARIO AL COSMOS

Del 6 de marzo al 24 de abril

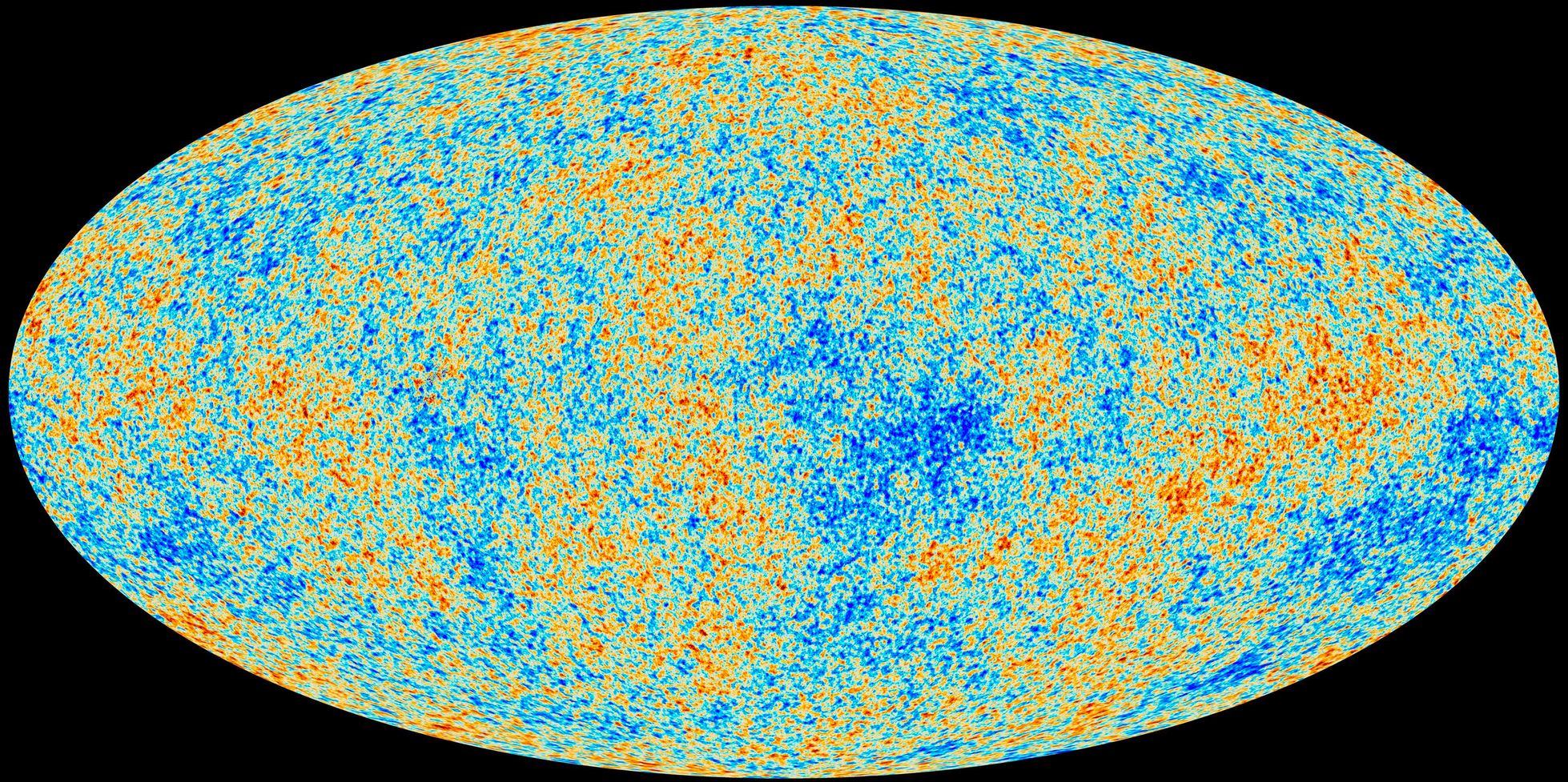
Edición 2025

PLANETARIO DE MADRID

AIRBUS

Imagen: Los Pilares de la Creación
Crédito: JWST (NASA, ESA, CSA, STScI)

EL DESAFÍO DE LA COSMOLOGÍA MODERNA



https://apod.nasa.gov/apod/ap130325.html

Nicolás Cardiel
Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica
Universidad Complutense de Madrid

DEL PLANETARIO AL COSMOS 2025

PLANETARIO DE MADRID

AIRBUS



https://www.eso.org/public/images/potw1938a/

SESION 4

ASTROFISICA

- **Medida de la distancia a las estrellas.**
- **Magnitudes aparentes y magnitudes absolutas.**
- **Clasificación espectral. Temperaturas y colores de las estrellas.**
- **Evolución estelar. Diagrama de Hertzsprung-Russell.**
- **Últimas etapas de la evolución estelar.**
- **Estrellas variables.**
- **Estrellas binarias.**
- **Nebulosas y Cúmulos.**
- **La Vía Láctea y las galaxias. Clasificación de Hubble.**
- **La expansión del Universo.**
- **Dimensiones del Universo.**
- **El *Big Bang*. Otras teorías.**
- **La radiación de fondo. El COBE.**

Este curso, organizado por el Planetario de Madrid, ofrece una introducción general a la Astronomía, e intenta, partiendo de un nivel elemental, acercarnos a aquellos aspectos que, sin duda, proporcionan una mejor comprensión de los fenómenos celestes.

La utilización de un medio especialmente desarrollado para este fin, como es el Planetario, facilita en gran medida la visualización y asimilación de estos conceptos.

El curso será impartido por:

Telmo Fernández. Astrofísico.
Subdirector del Planetario de Madrid y Coordinador del Curso.
Nicolás Cardiel. Astrofísico.
Departamento de Astrofísica.
Universidad Complutense, Madrid
Pedro Velasco. Astrónomo aficionado.
Monitor de Astronomía y
Colaborador del Planetario de Madrid.
Toño Bernedo. Ingeniero. Responsable técnico del Planetario de Madrid.

Duración: 8 horas (4 sesiones de 2 horas).
Fechas: 15, 17, 22, 24 de noviembre, a las 20:00 horas.
Lugar: Sala de Proyección del Planetario.
Matrícula: 5.000 ptas. a abonar en el momento de la inscripción (18 octubre - 11 noviembre), en el Planetario de Madrid.
Plazas limitadas a 250, por orden de inscripción.
Teléfono de información: 467 34 61

Planetario de Madrid

ACTIVIDADES DE OTOÑO 1994

CURSO DE INTRODUCCION A LA ASTRONOMIA

Ayuntamiento de Madrid
Concejalía de Cultura

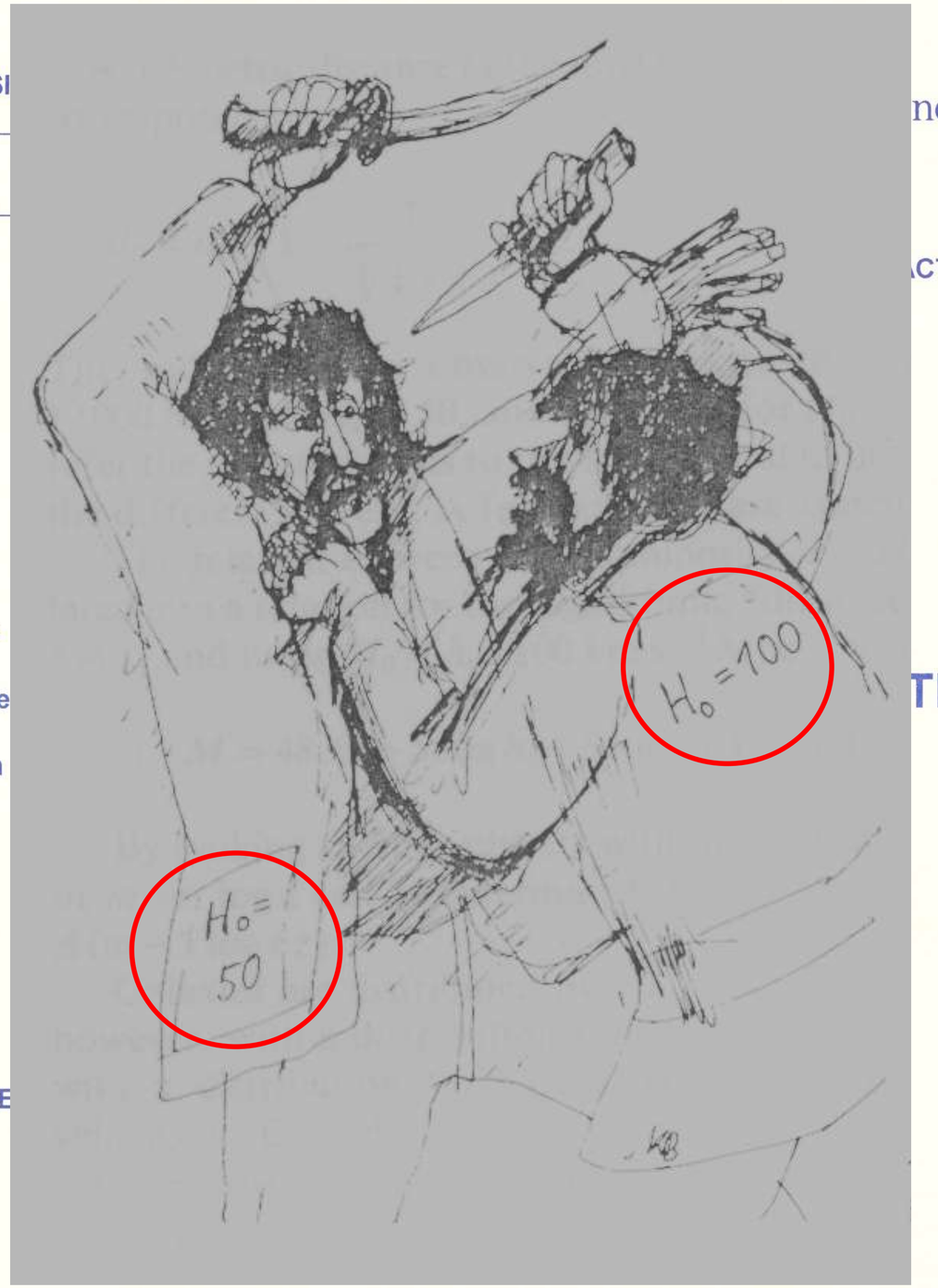
SESI

netario de Madrid

ACTIVIDADES DE OTOÑO 1994

ASTROFISICA

- Medida de la distancia a las estrellas.
- Magnitudes aparentes y magnitudes absolutas.
- Clasificación espectral. Temperaturas y colores de las estrellas.
- Evolución estelar. Diagrama de Hertzsprung-Russell.
- Últimas etapas de la evolución estelar.
- Estrellas variables.
- Estrellas binarias.
- Nebulosas y Cúmulos.
- La Vía Láctea y las galaxias. Clasificación de Hubble.
- La expansión del Universo.
- Dimensiones del Universo.
- El *Big Bang*. Otras teorías.
- La radiación de fondo. El COBE

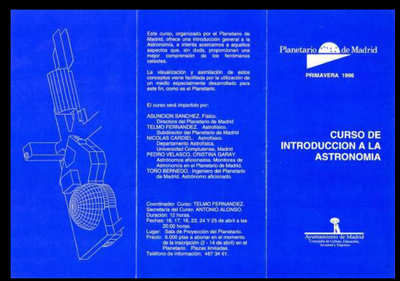


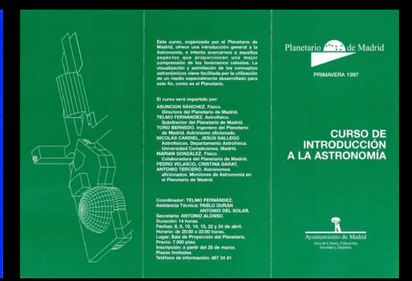
CURSO DE TRODUCCION A LA ASTRONOMIA

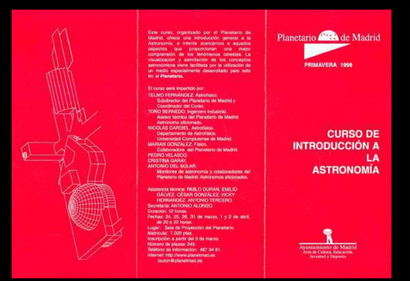
Ayuntamiento de Madrid
Concejalía de Cultura


SESION 4
ASTROFISICA
Planetario de Madrid
ACTIVIDADES DE OTOÑO 1994
CURSO DE INTRODUCCION A LA ASTRONOMIA


Planetario de Madrid
PRIMAVERA 1995
CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA


Planetario de Madrid
PRIMAVERA 1996
CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA

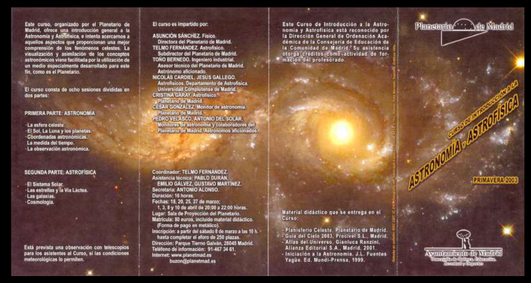

Planetario de Madrid
PRIMAVERA 1997
CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA


Planetario de Madrid
PRIMAVERA 1998
CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA


Planetario de Madrid
PRIMAVERA 1999
CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA ASTROFÍSICA

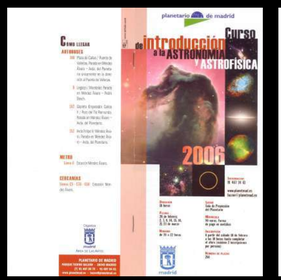

Planetario de Madrid
CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA


Planetario de Madrid
CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA
PRIMAVERA 2002

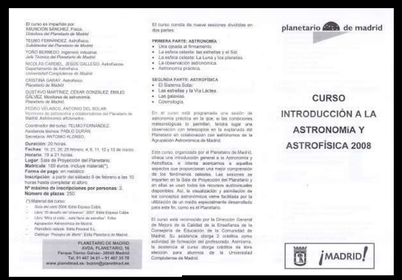

Planetario de Madrid
CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA
PRIMAVERA 2003


Planetario de Madrid
CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA
PRIMAVERA 2004


planetario de madrid
Curso de introducción a la astronomía y astrofísica
curso 2005


planetario de madrid
Curso de Introducción a la Astronomía y Astrofísica
2006


planetario de madrid
Curso de introducción a la astronomía y astrofísica
2007


planetario de madrid
CURSO INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA 2008


planetario de madrid
CURSO INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA 2009


CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA 2010
CVA2010


CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA 2011


CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA 2012


PROGRAMA DEL CURSO


CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA 2014


CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA 2015


CURSO DE INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA
2016

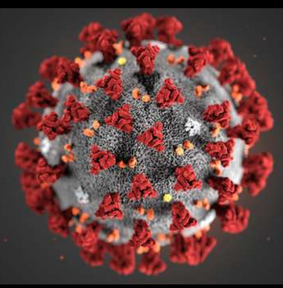

PELIGRO
ZONA DE
OBRAS


CURSO
DE ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA
DEL
PLANETARIO
AL COSMOS
Del 04 de abril al 30 de mayo 2024
EDICIÓN 2024


DEL
PLANETARIO
AL COSMOS
Del 6 de marzo al 24 de abril
Edición 2025
PLANETARIO DE MADRID
AIRBUS


CURSO DE ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA
2018
Todo un Universo por conocer


CURSO DE ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA 2019
Un Universo sin fronteras




PLANETARIO DE MADRID
AIRBUS


PLANETARIO DE MADRID
AIRBUS
Imagen: Los Pilares de la Creación
Credits: ESA/Hubble & NASA, J. Kalirai (STScI)

La Cosmología precisa utilizar una aproximación multidisciplinar

Siglo XIX — Siglo XX — Siglo XXI



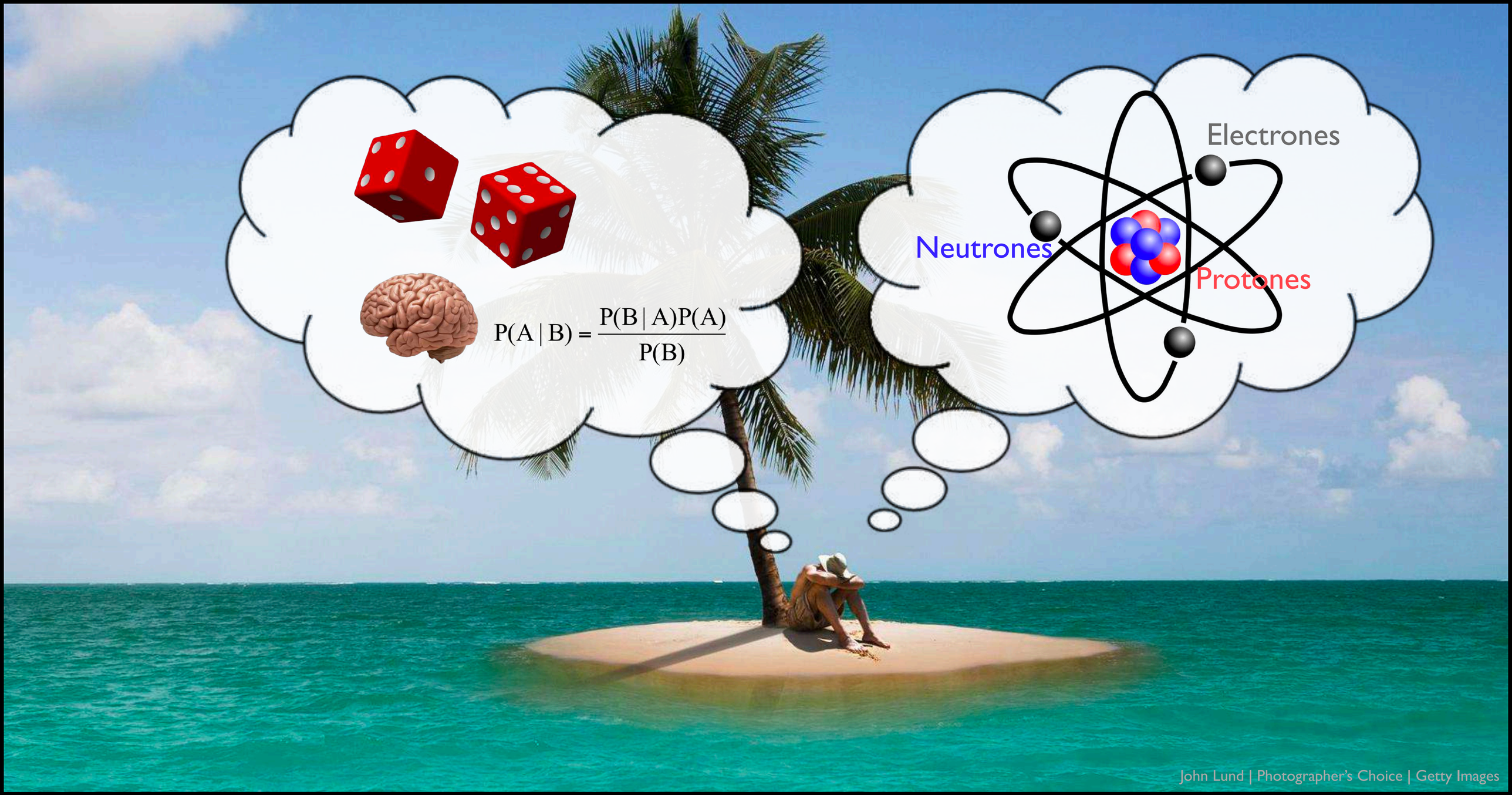
AUTOR: DOMINIC WALLIMAN

https://i2.wp.com/molasaber.files.wordpress.com/2016/12/dominic-walliman-espac3b1ol.jpg

TRADUCIDO POR: MOLASABER.ORG

- Construimos modelos: aproximaciones de la realidad que nos permiten hacer predicciones cuantitativas (¡necesitamos las mátemáticas!)
- Método científico: consenso entre científicos: aceptamos el modelo más probable (¡tiene que haber varios!)
- La Ciencia no demuestra que un modelo es correcto (¡hace lo contrario! ¡queremos teorías falsables!)
- Puede ir en contra del sentido común
- No tiene por qué gustarnos cómo es el Universo
- ¿Estamos capacitados para entenderlo?

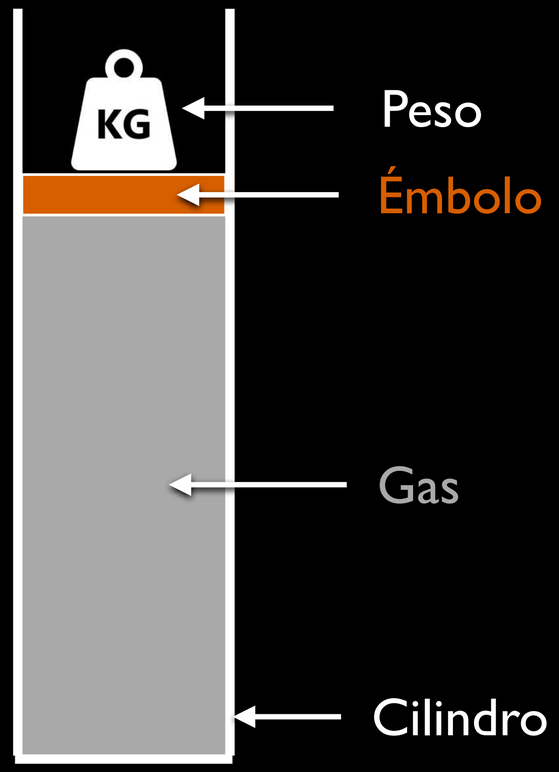
AUTOR: DOMINIC WALLIMAN https://i2.wp.com/molasaber.files.wordpress.com/2016/12/dominic-walliman-espac3b1ol.jpg TRADUCIDO POR: MOLASABER.ORG



John Lund | Photographer's Choice | Getty Images

Existe una temperatura mínima en el Universo

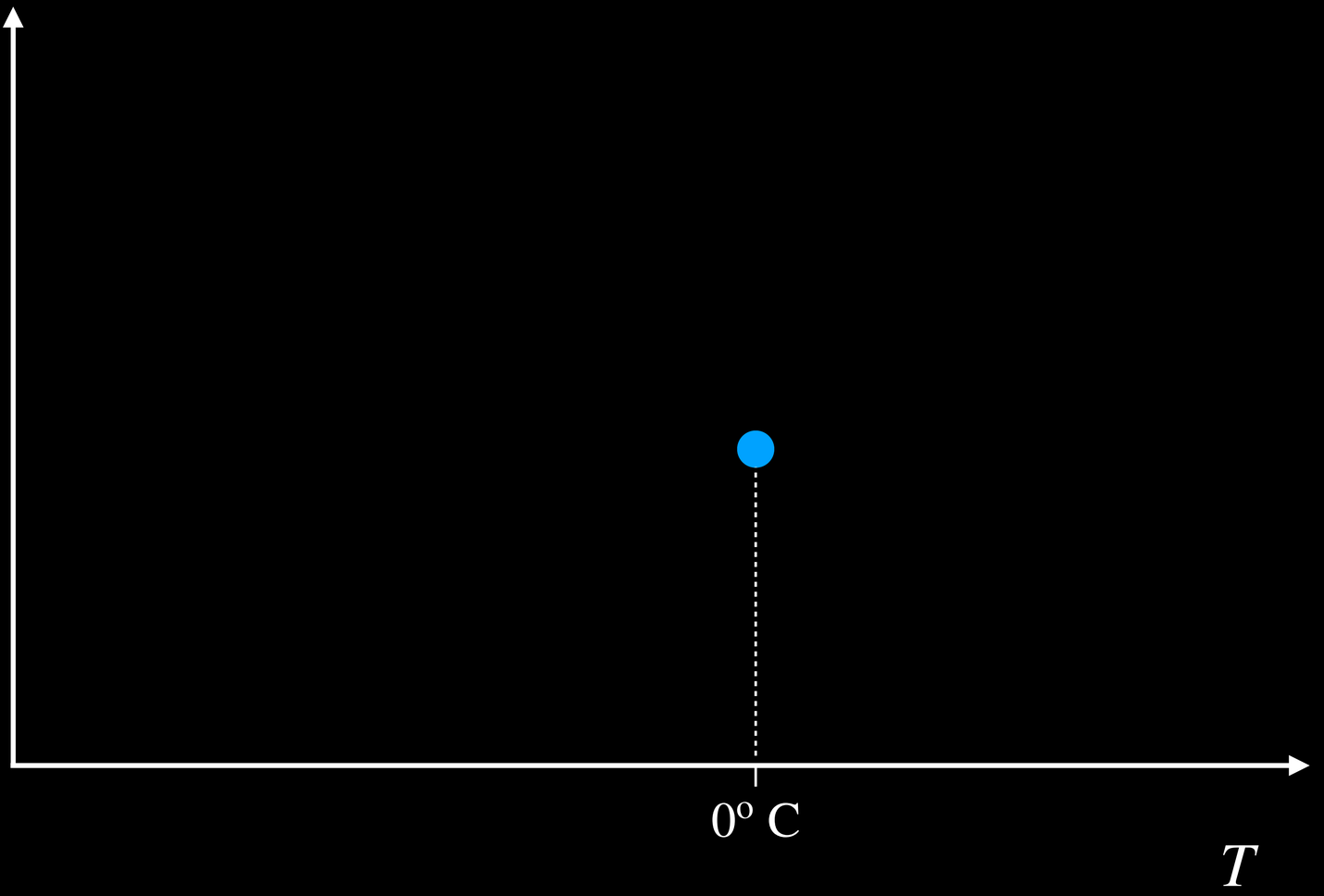
Termómetro de gas



Existe una temperatura mínima en el Universo

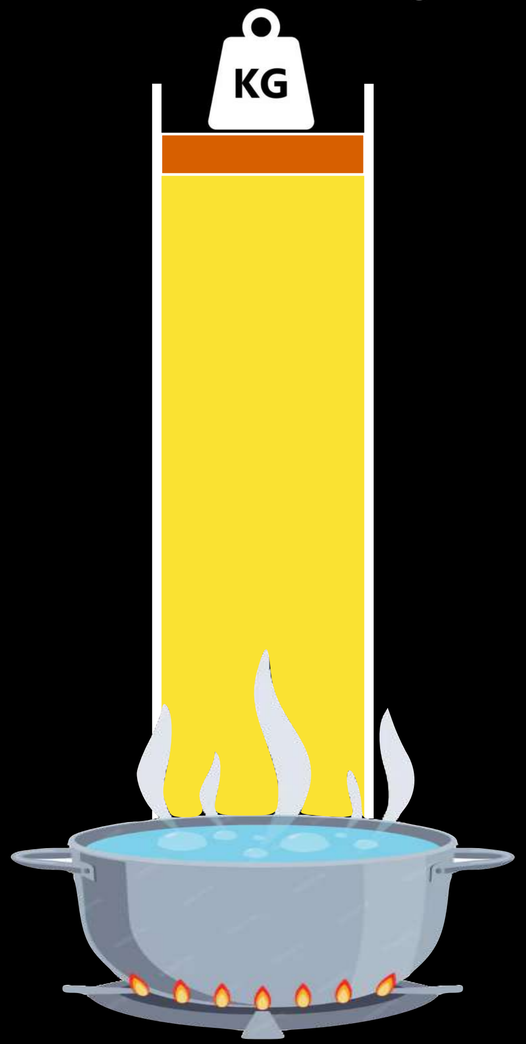
Termómetro de gas

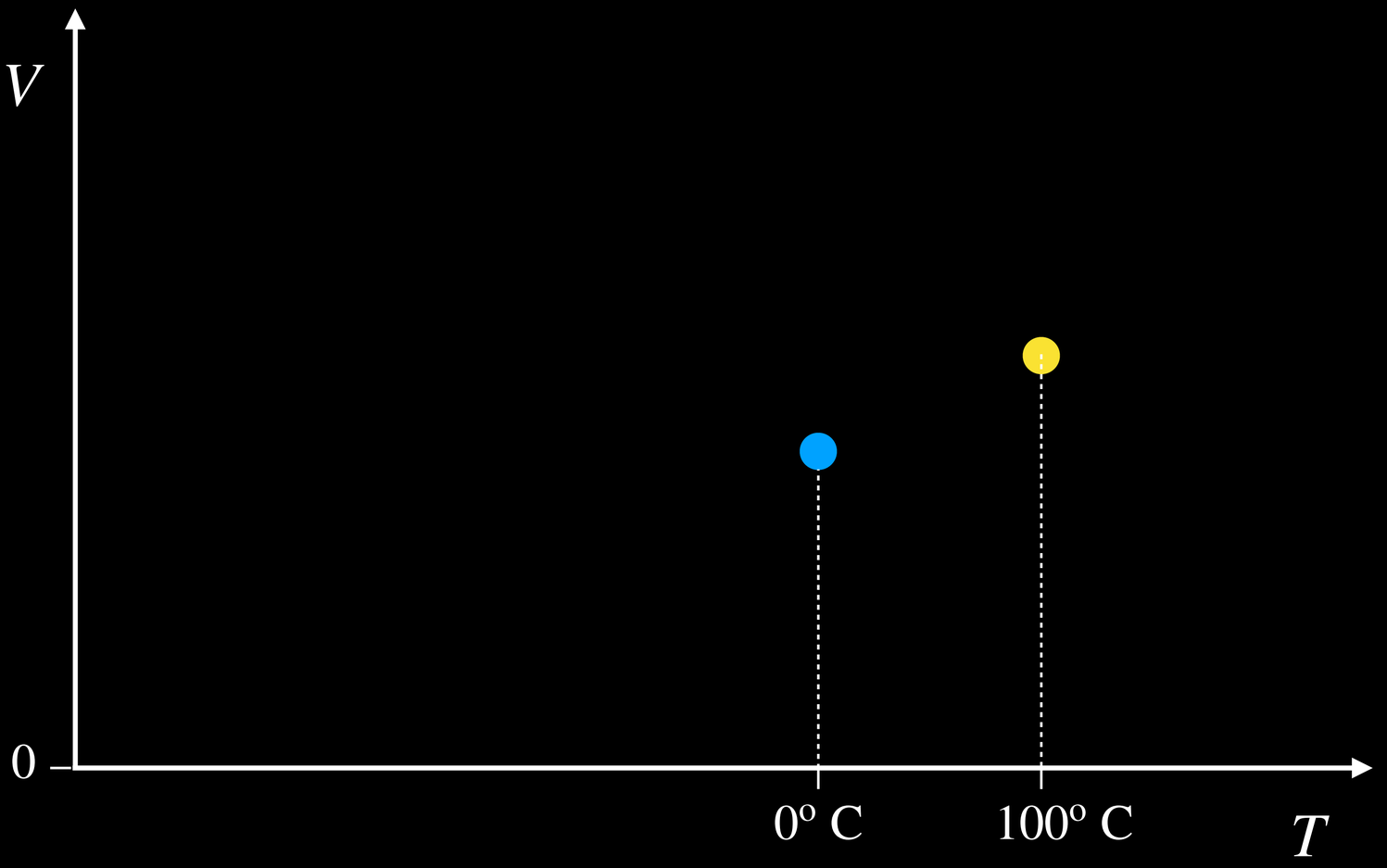




Existe una temperatura mínima en el Universo

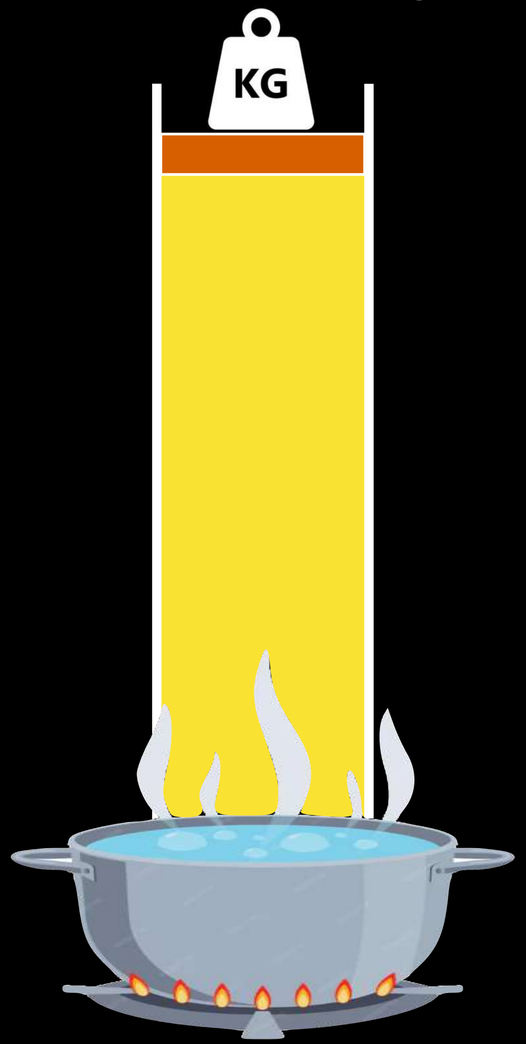
Termómetro de gas

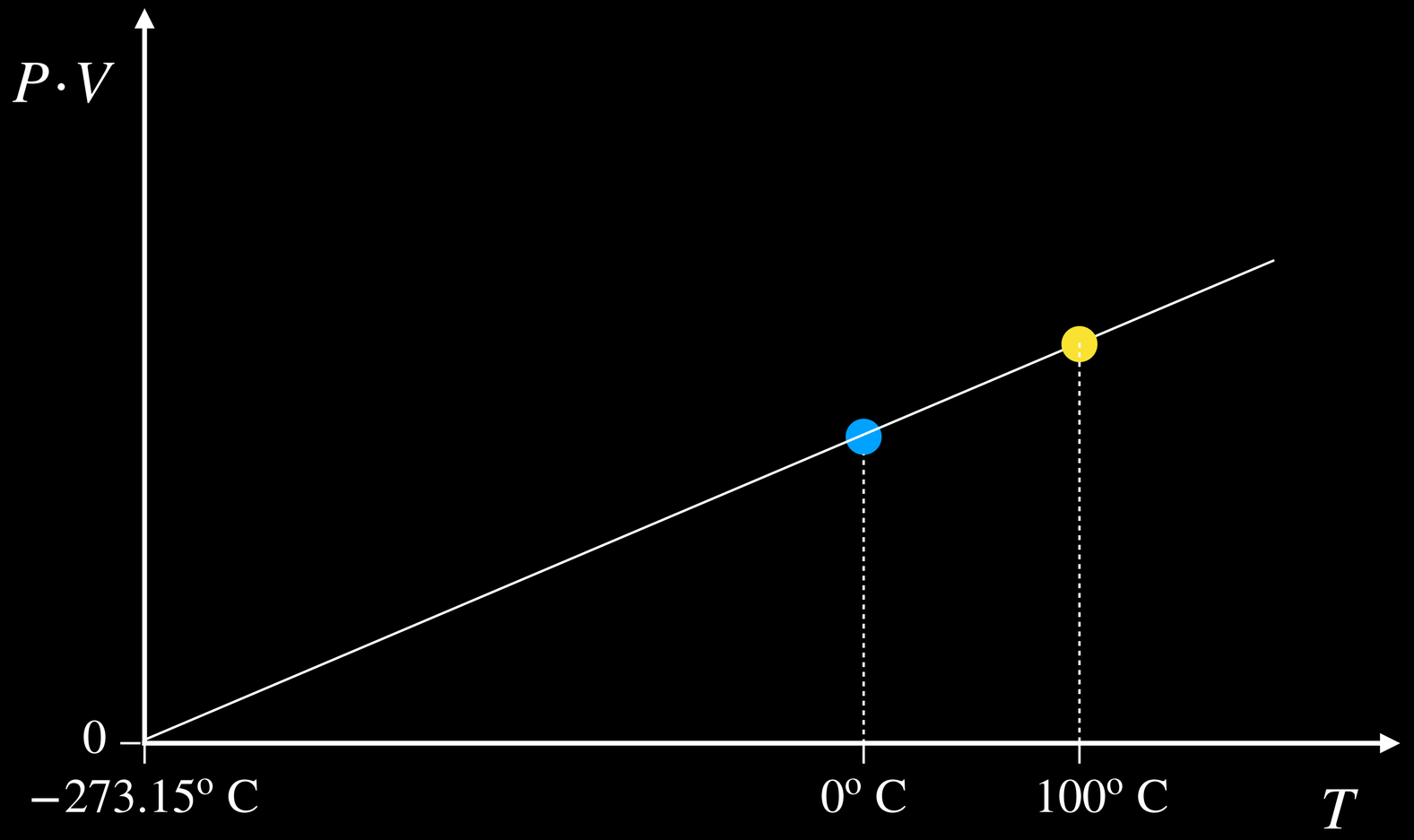




Existe una temperatura mínima en el Universo

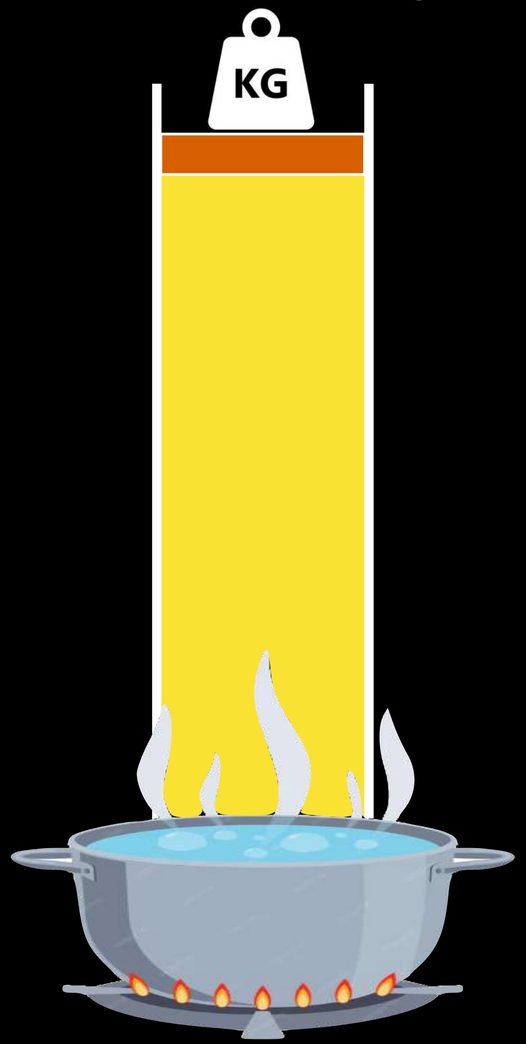
Termómetro de gas

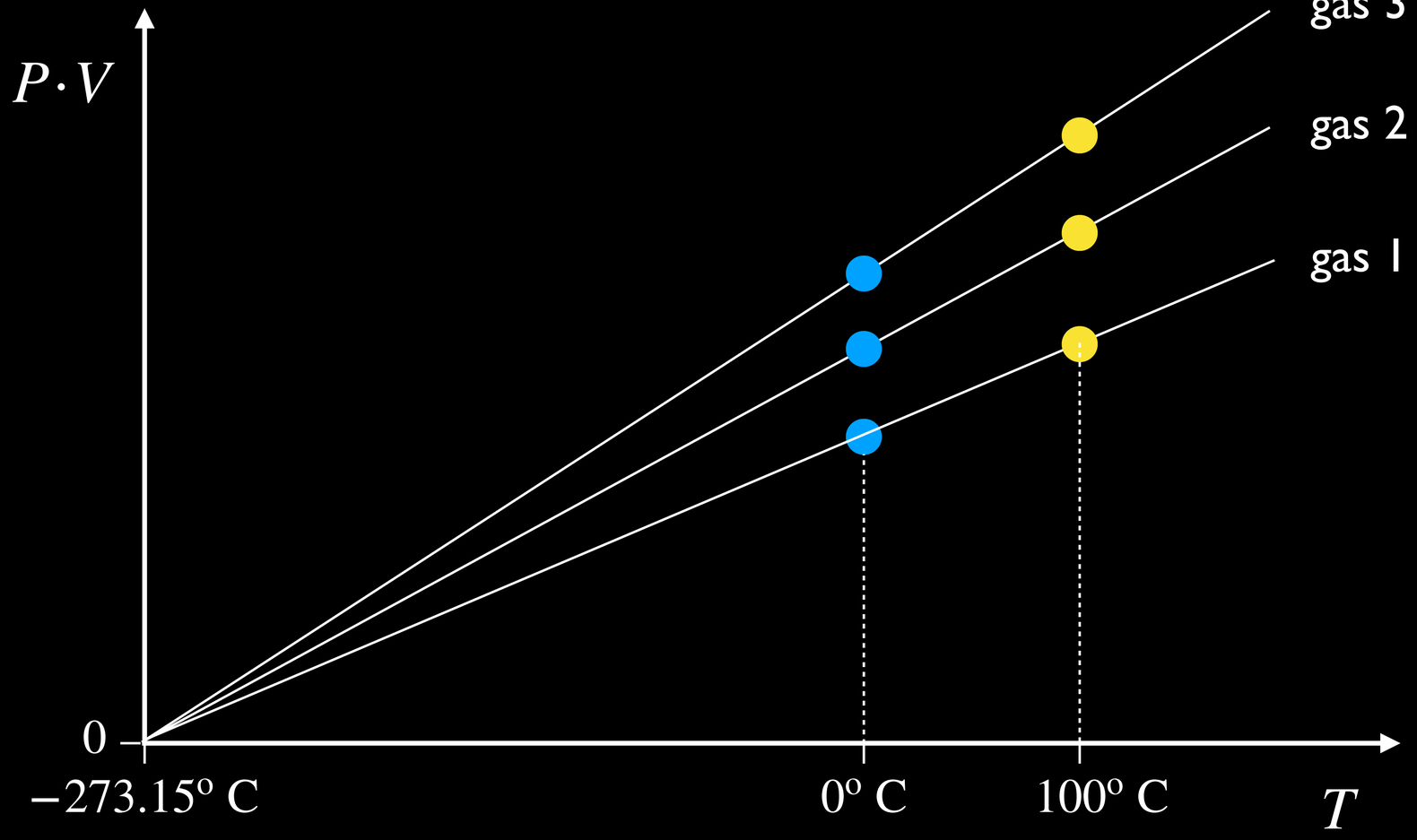




Existe una temperatura mínima en el Universo

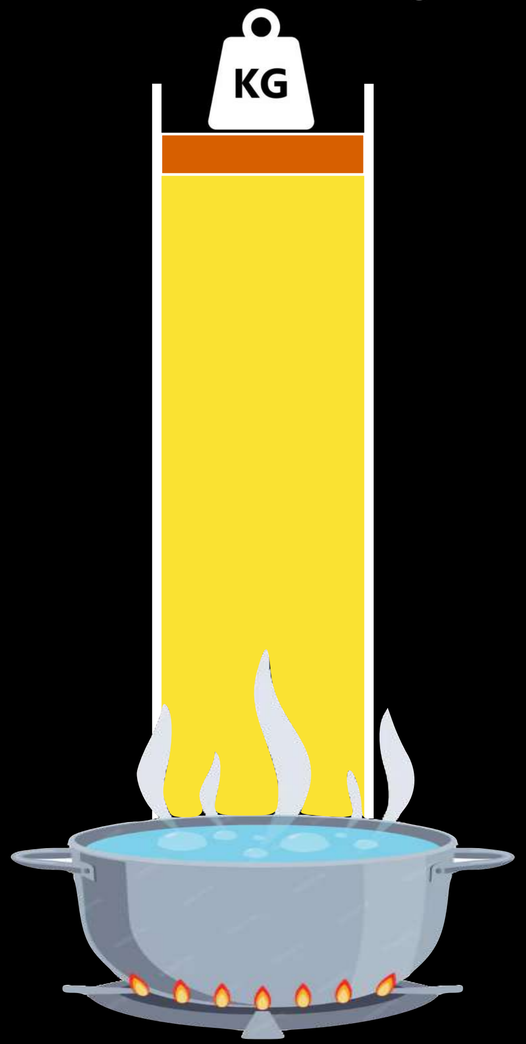
Termómetro de gas

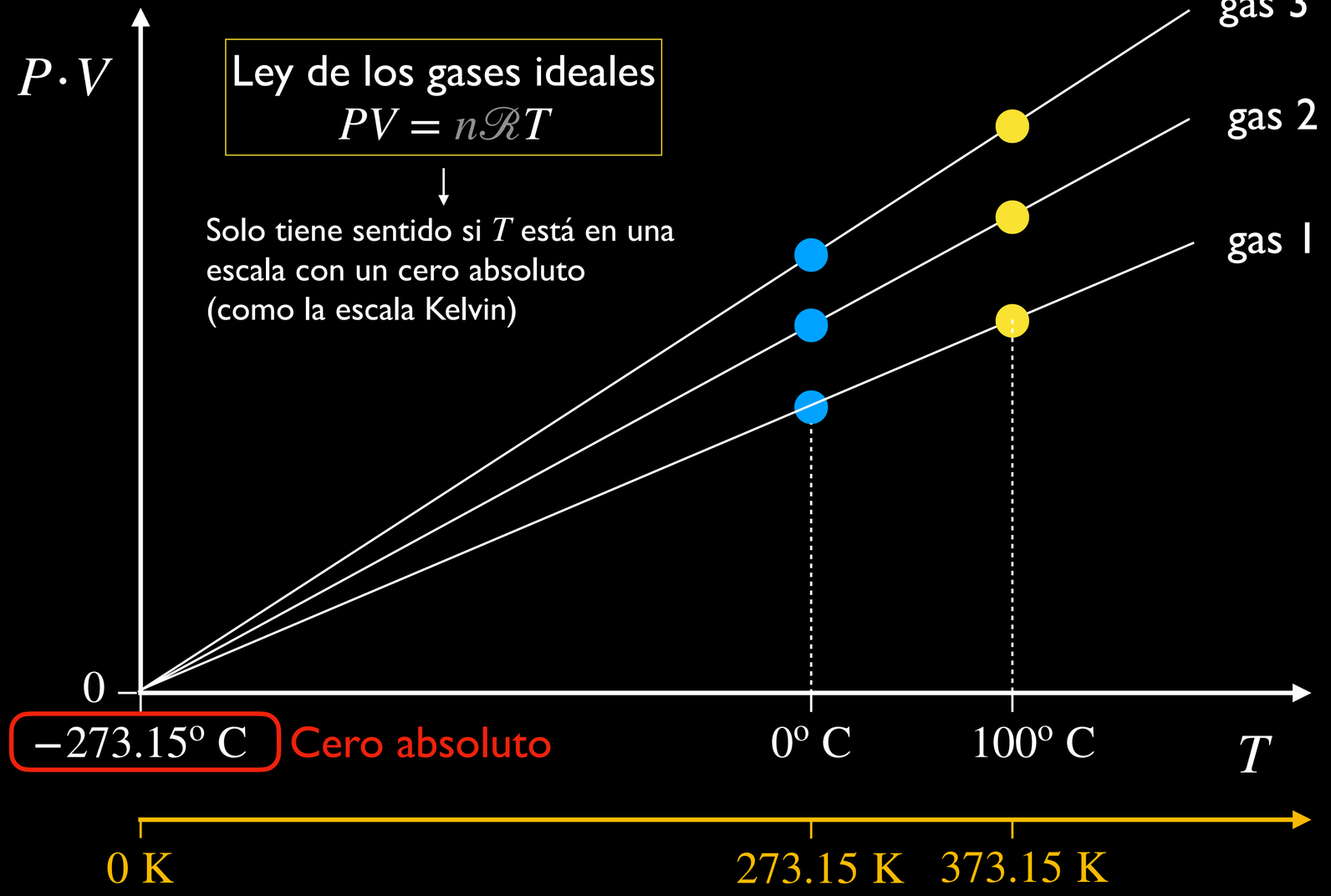




Existe una temperatura mínima en el Universo

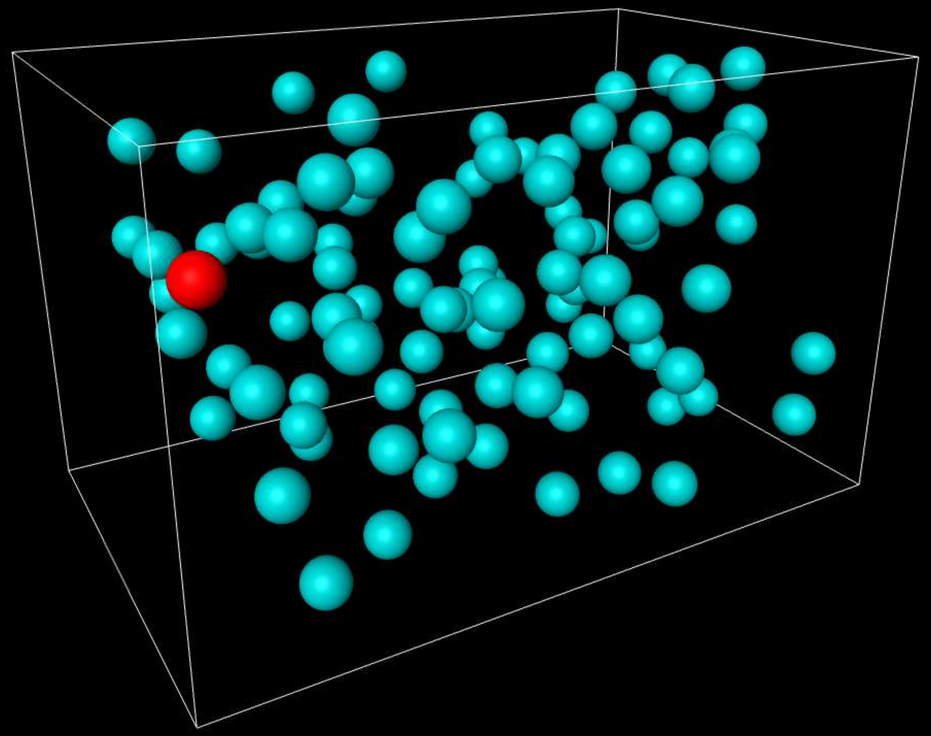
Termómetro de gas

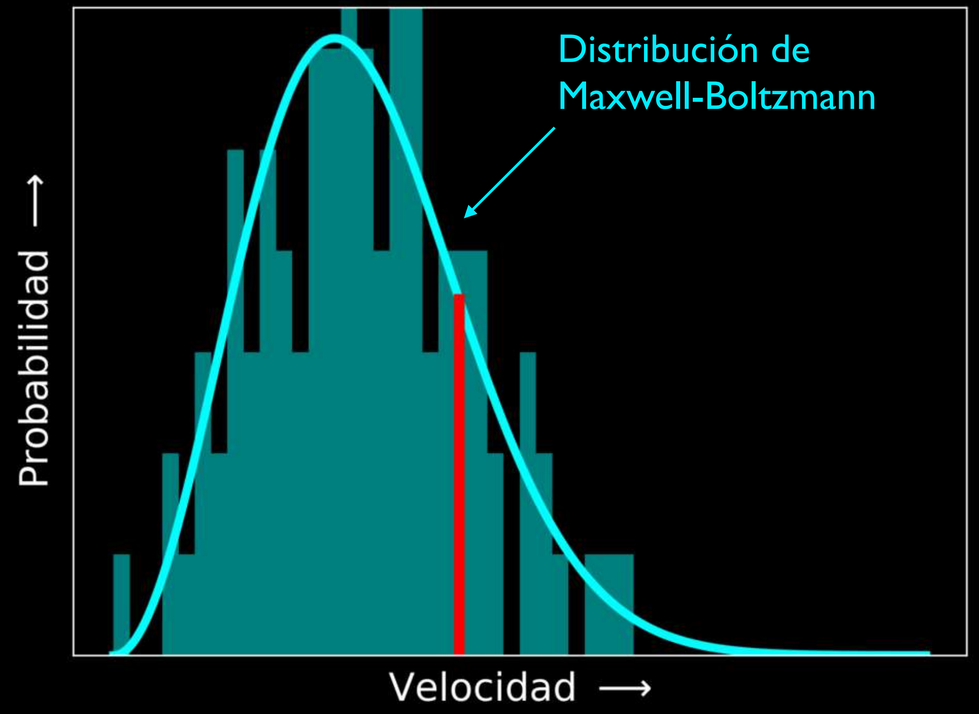




Experimento 1

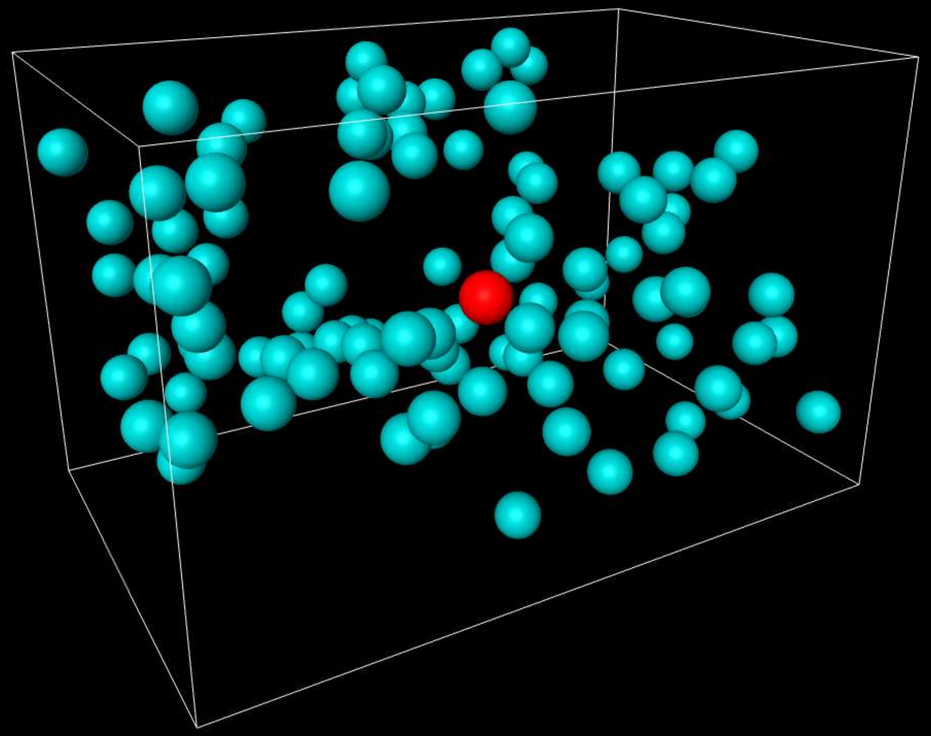
Frame = 1099 ΣK = 0.5000 Time = 999.0000 phi = 60.00 theta = 20.00 r = 25.0000

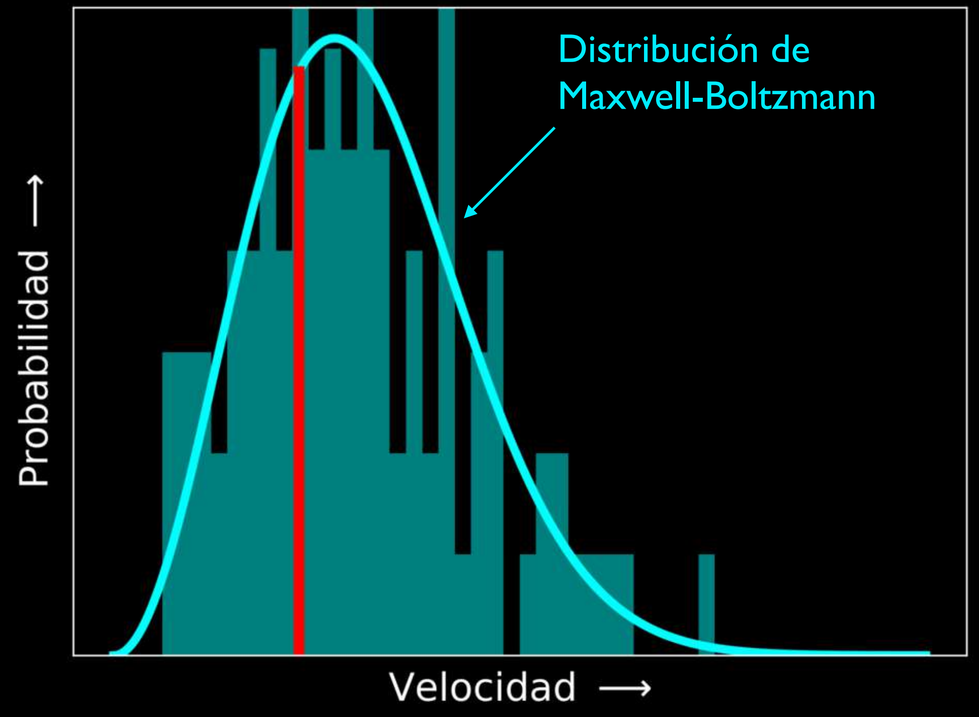




Experimento 2

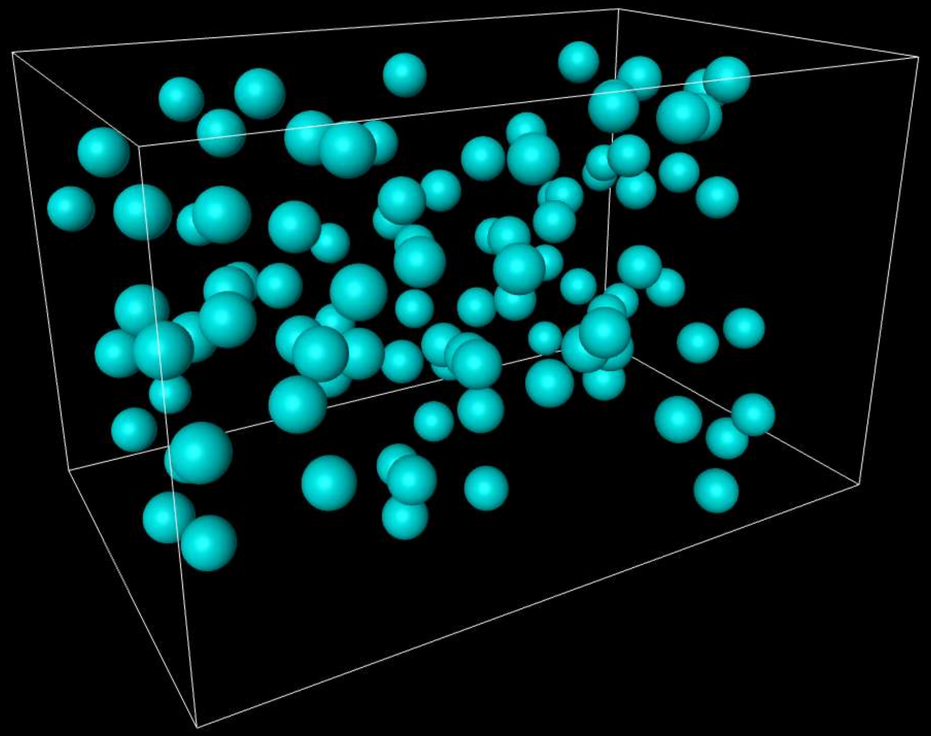
Frame = 1099 ΣK = 0.5000 Time = 999.0000 phi = 60.00 theta = 20.00 r = 25.0000

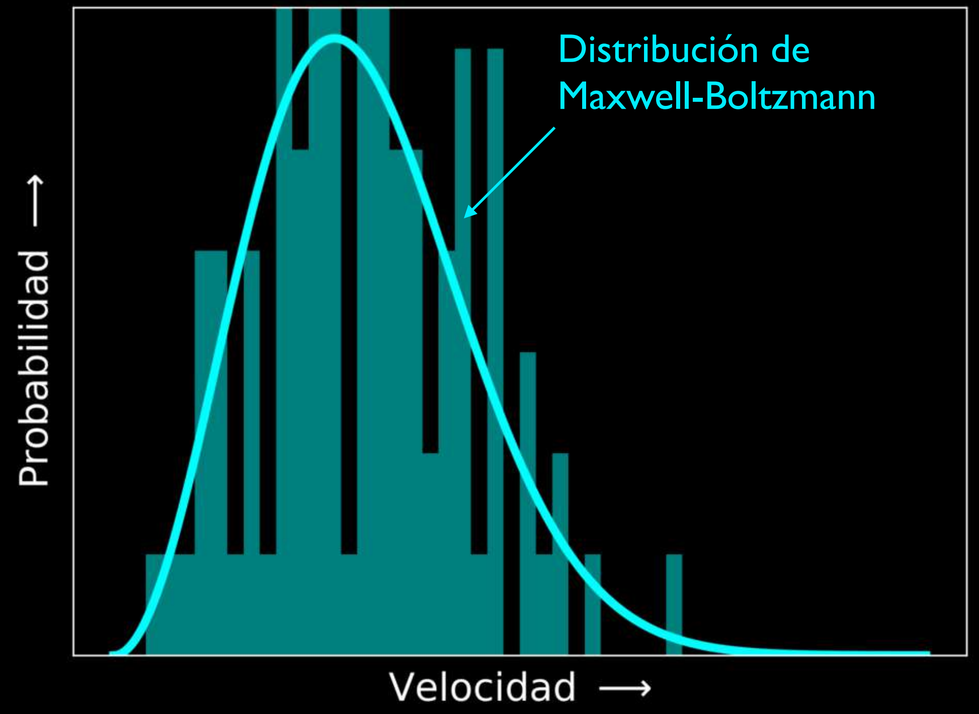




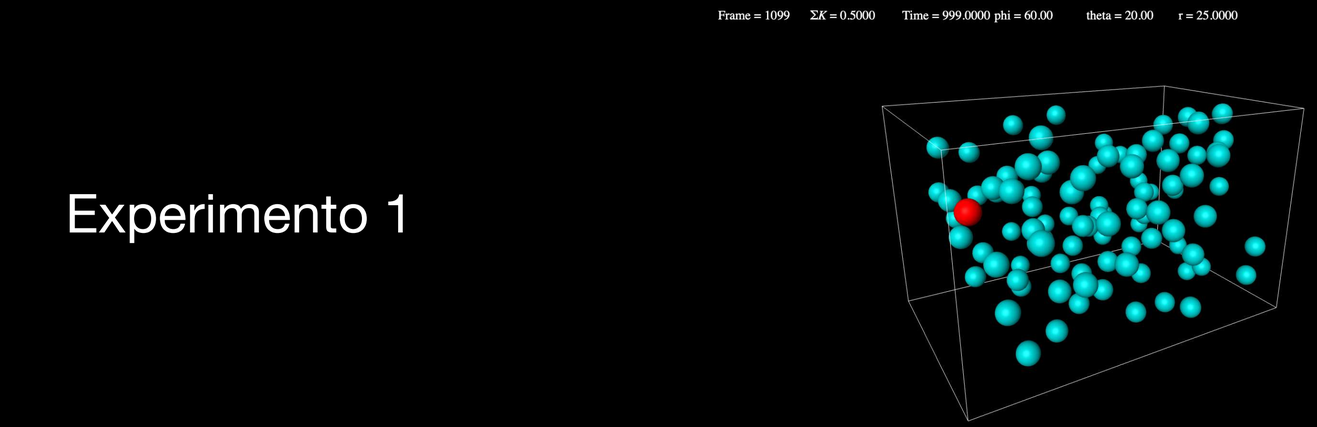
Experimento 3

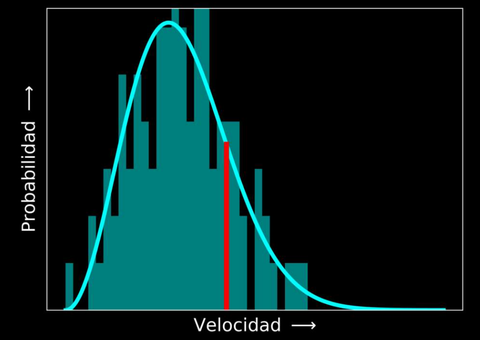
Frame = 1099 ΣK = 0.5000 Time = 999.0000 phi = 60.00 theta = 20.00 r = 25.0000



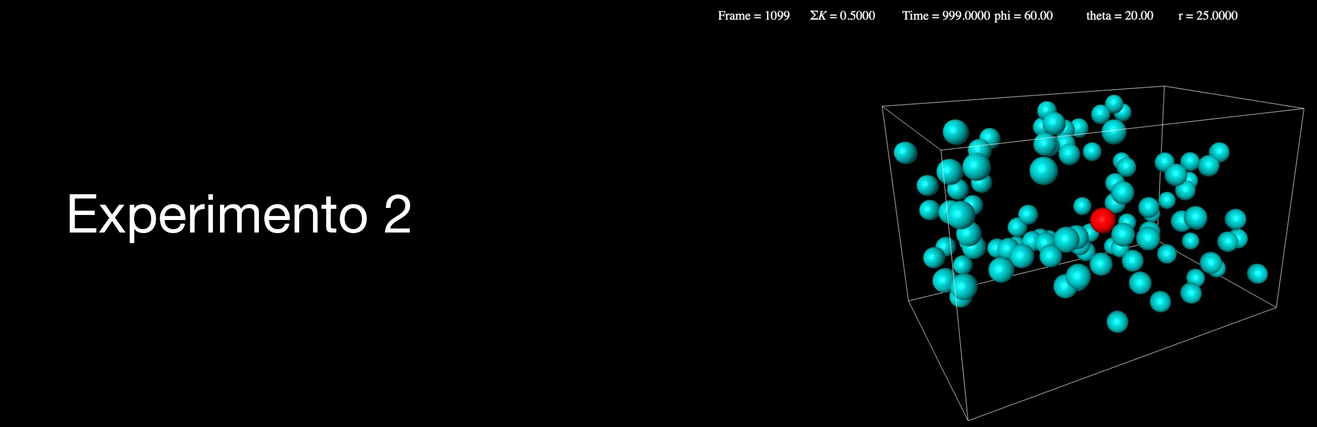


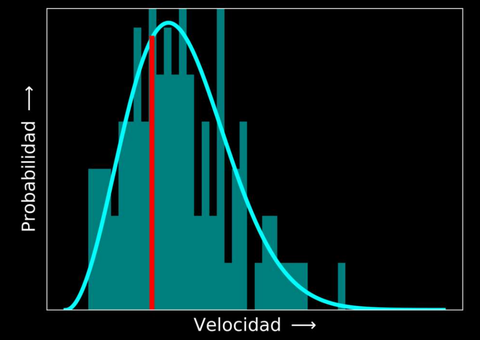
Experimento 1



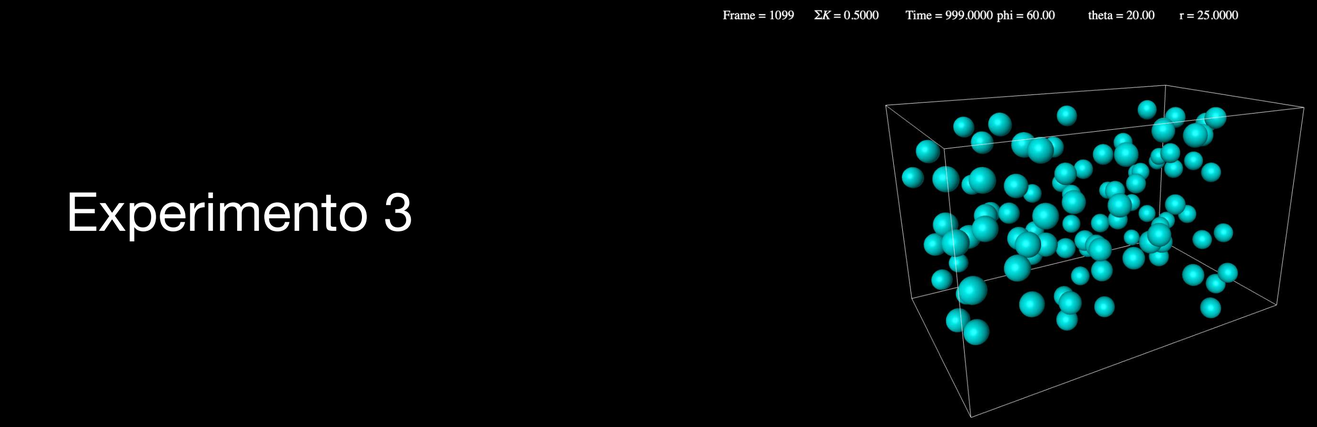


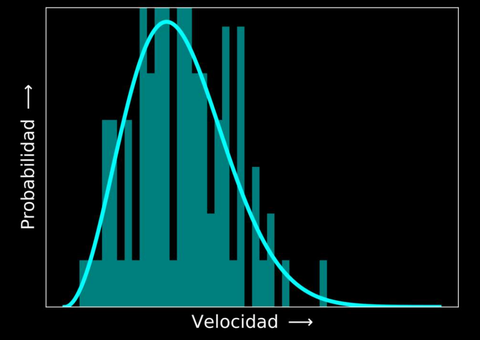
Experimento 2



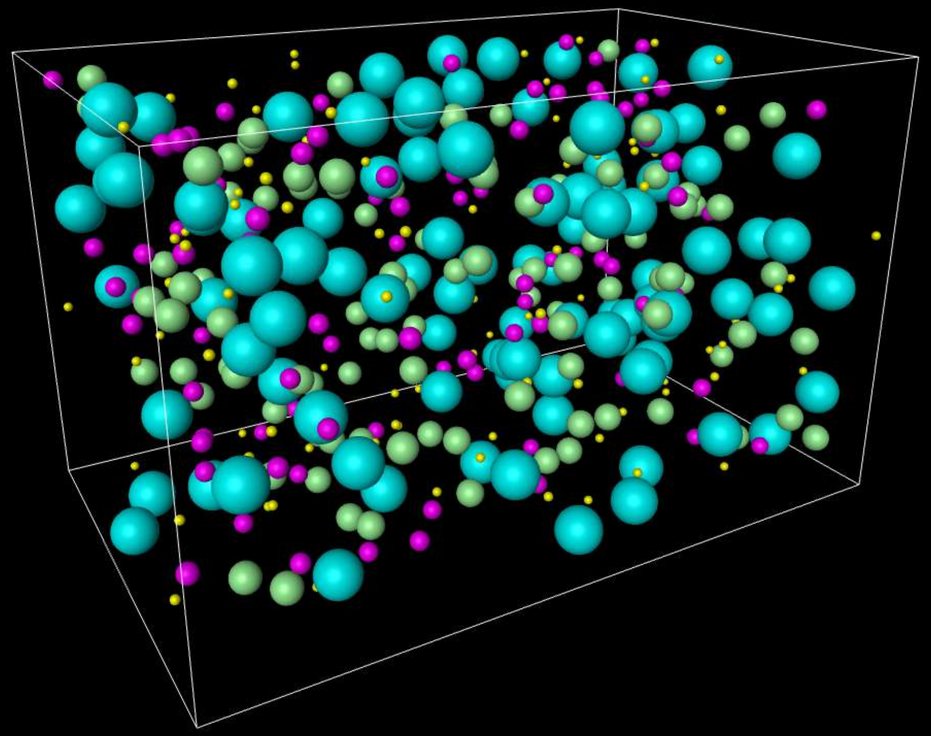


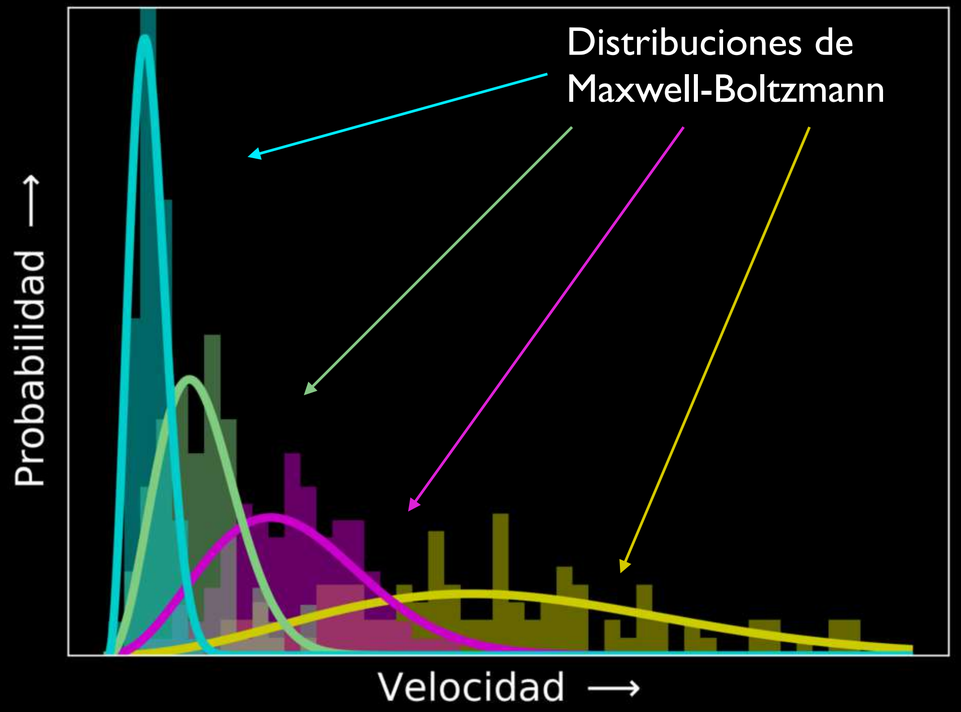
Experimento 3





Frame = 1099 ΣK = 6.3000 Time = 999.0000 phi = 60.00 theta = 20.00 r = 25.0000

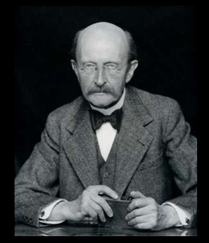




¡Se produce equipartición de la energía! ⟶ Tiene sentido definir una temperatura

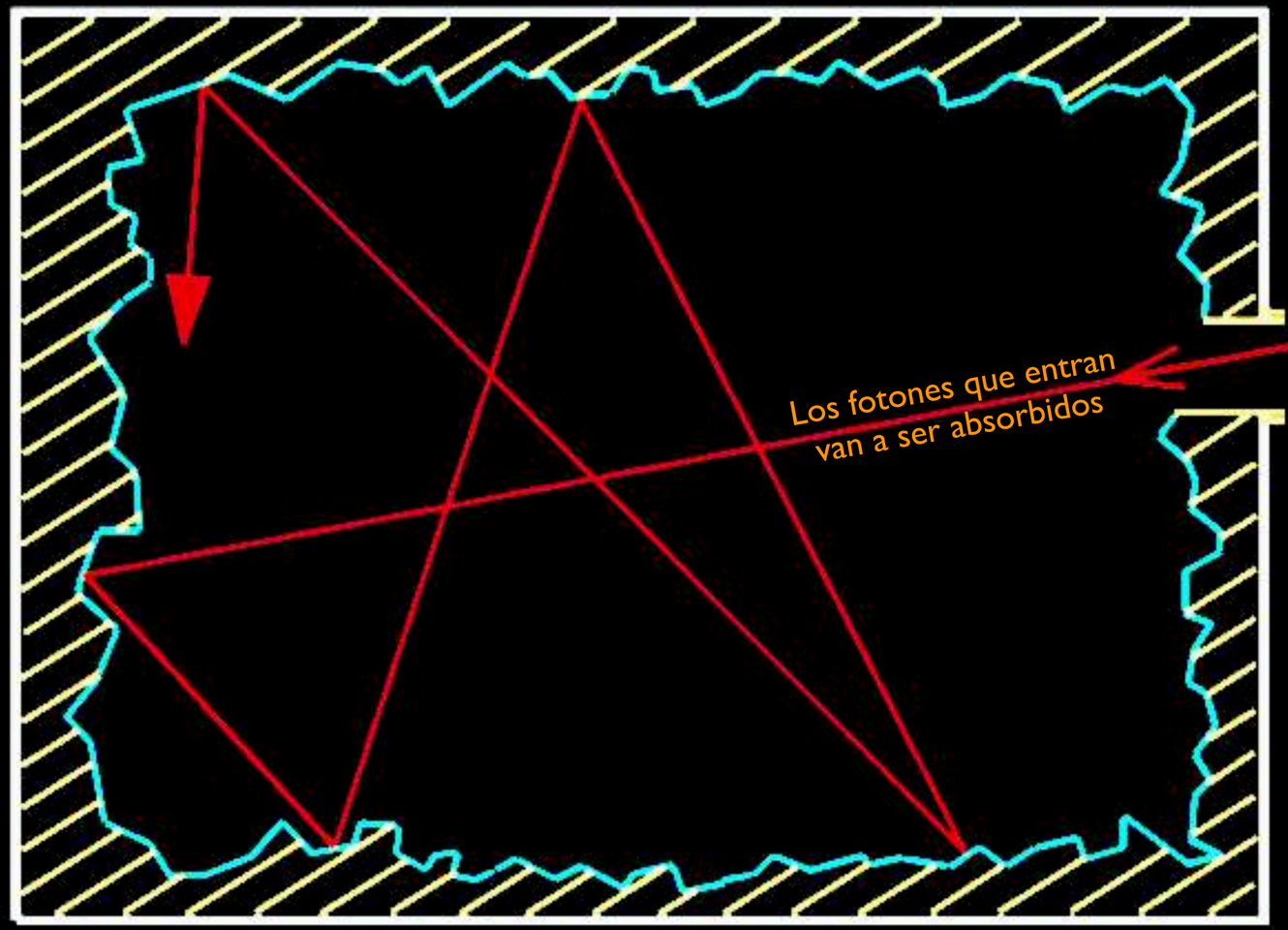
El cuerpo negro

¡Una caja (vacía) con un agujero!



Max Planck
(1858 - 1947)

Cualquier partícula de luz (fotón) que entra en un cuerpo negro tiene muchas más probabilidades de rebotar y ser absorbido que de volver a salir por el pequeño orificio de entrada. La luz que consigue salir ha sido generada en el interior del cuerpo negro y ha sido producida por las vibraciones del material de las paredes interiores debido a que se encuentran a una cierta temperatura.



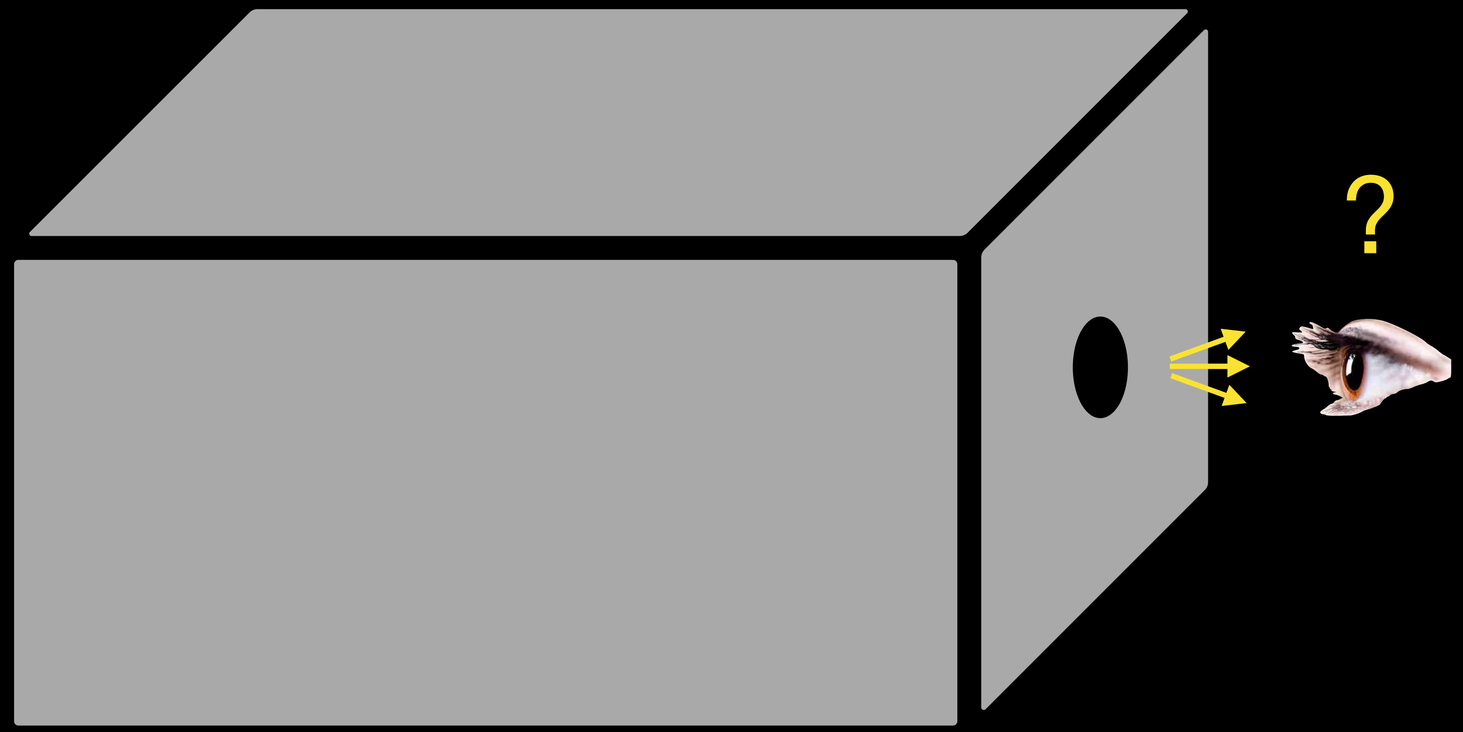
Podemos medir la luz que sale del interior.



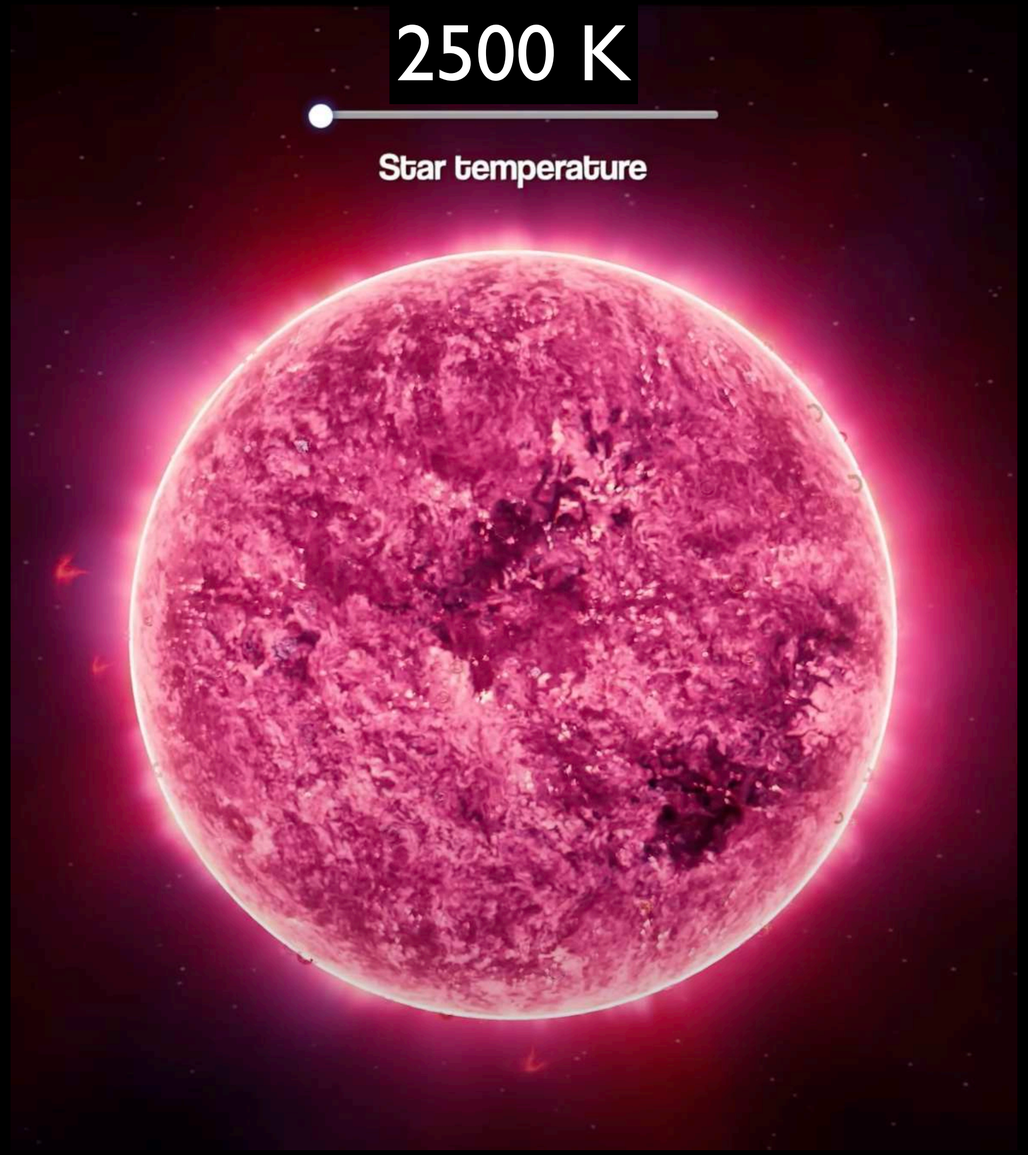
El espectro que se observa no depende del material de la caja. Solo depende de la temperatura de la caja.

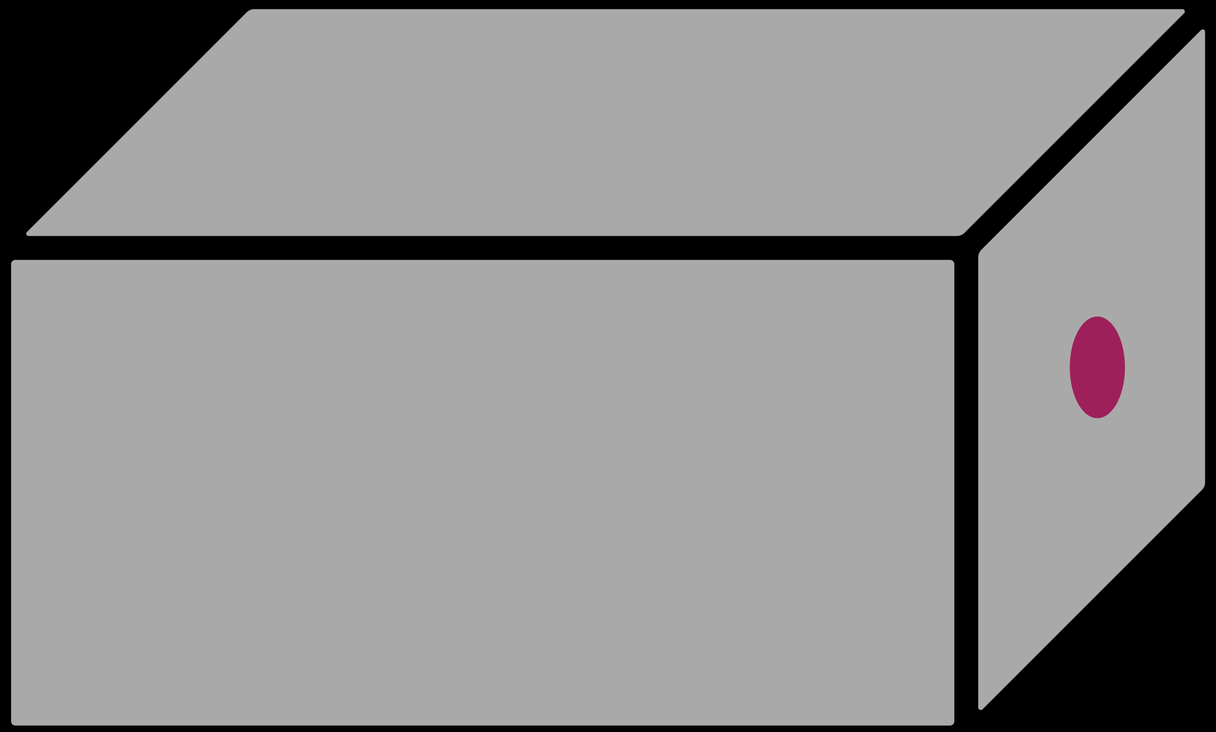
Caja con agujero en una habitación a oscuras (temperatura ambiente)

¡No vemos nada a simple vista!



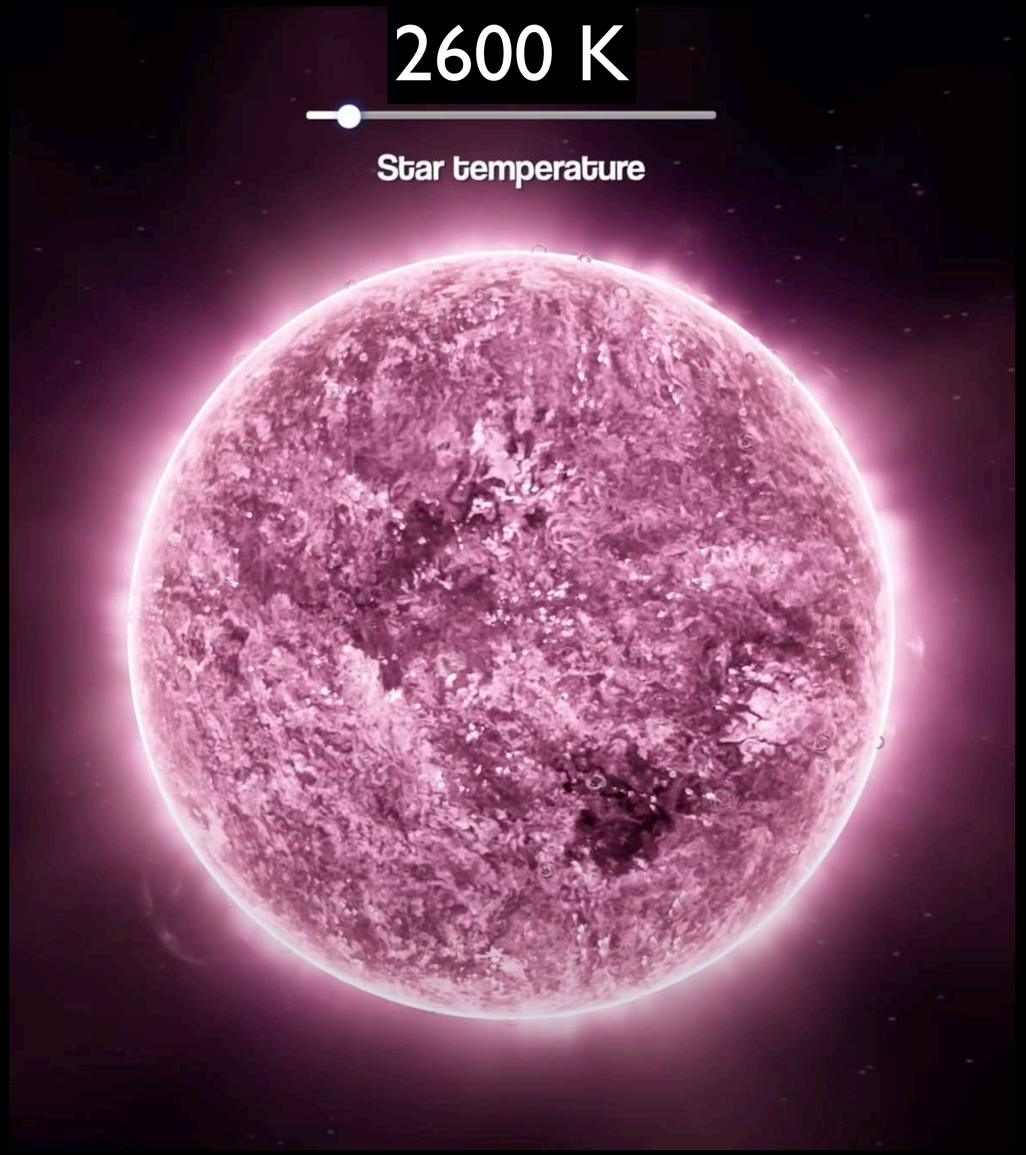
Calentamos la caja: ¡empezamos a ver luz!

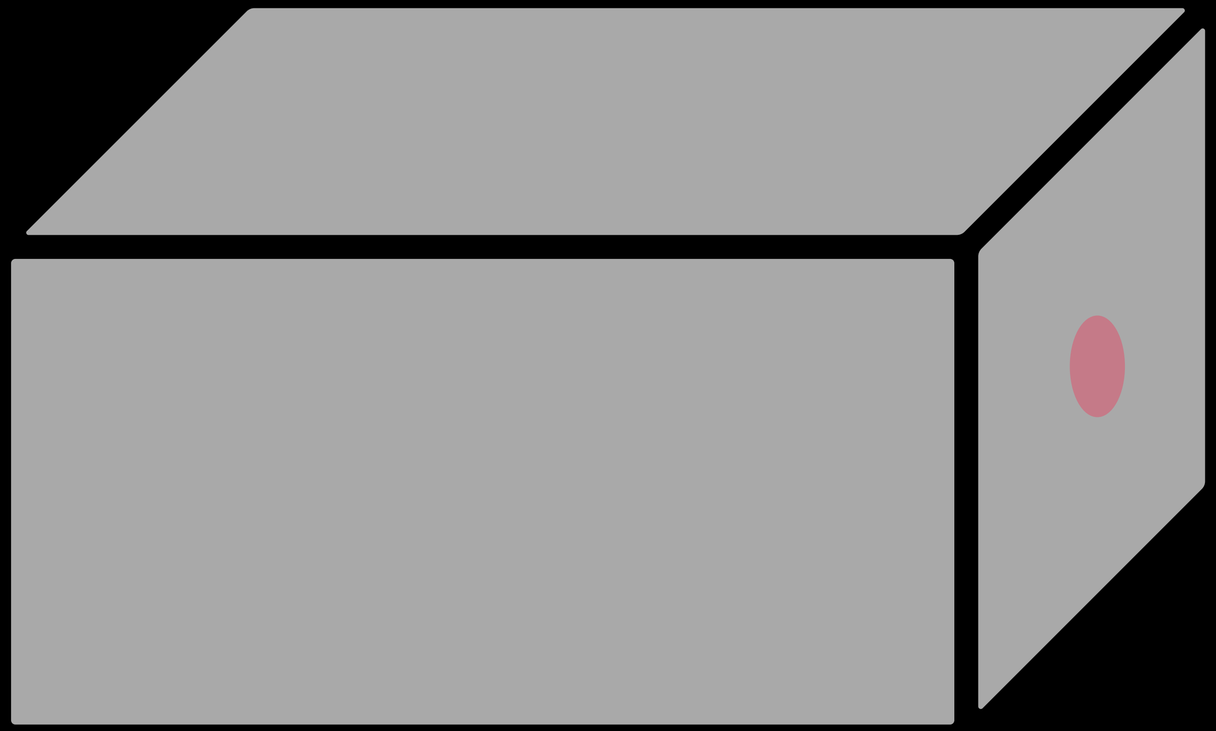






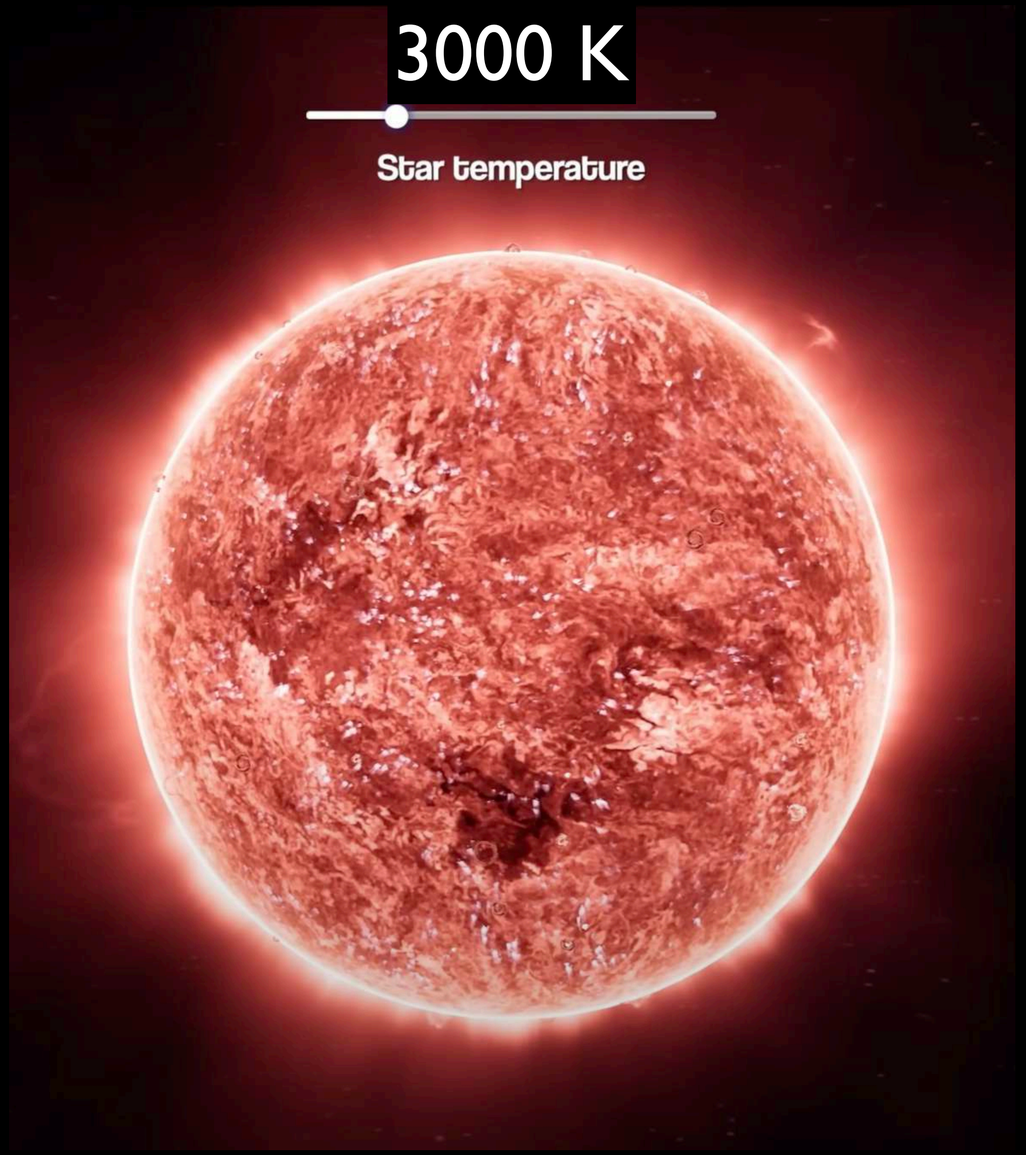
Aumentamos más la temperatura: ¡la luz cambia de color!

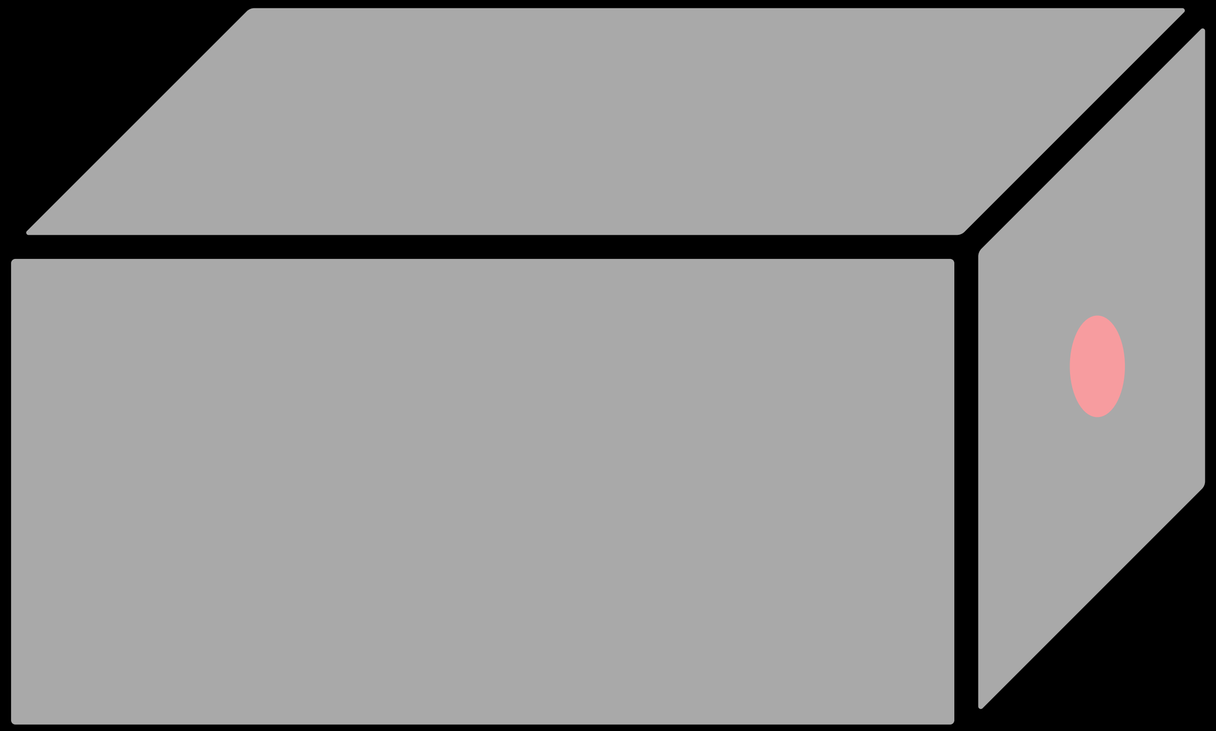






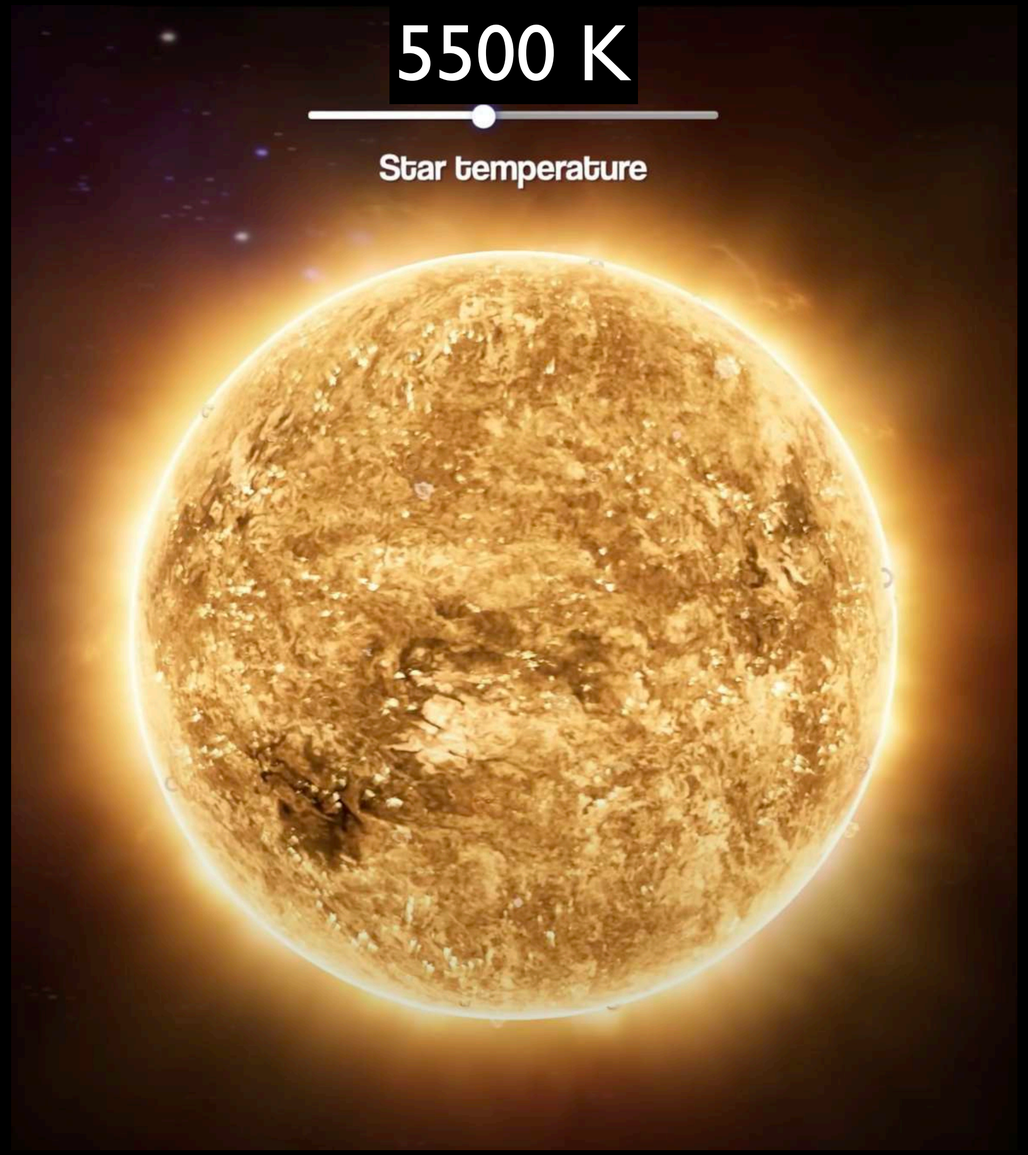
Aumentamos más la temperatura: ¡la luz cambia de color!

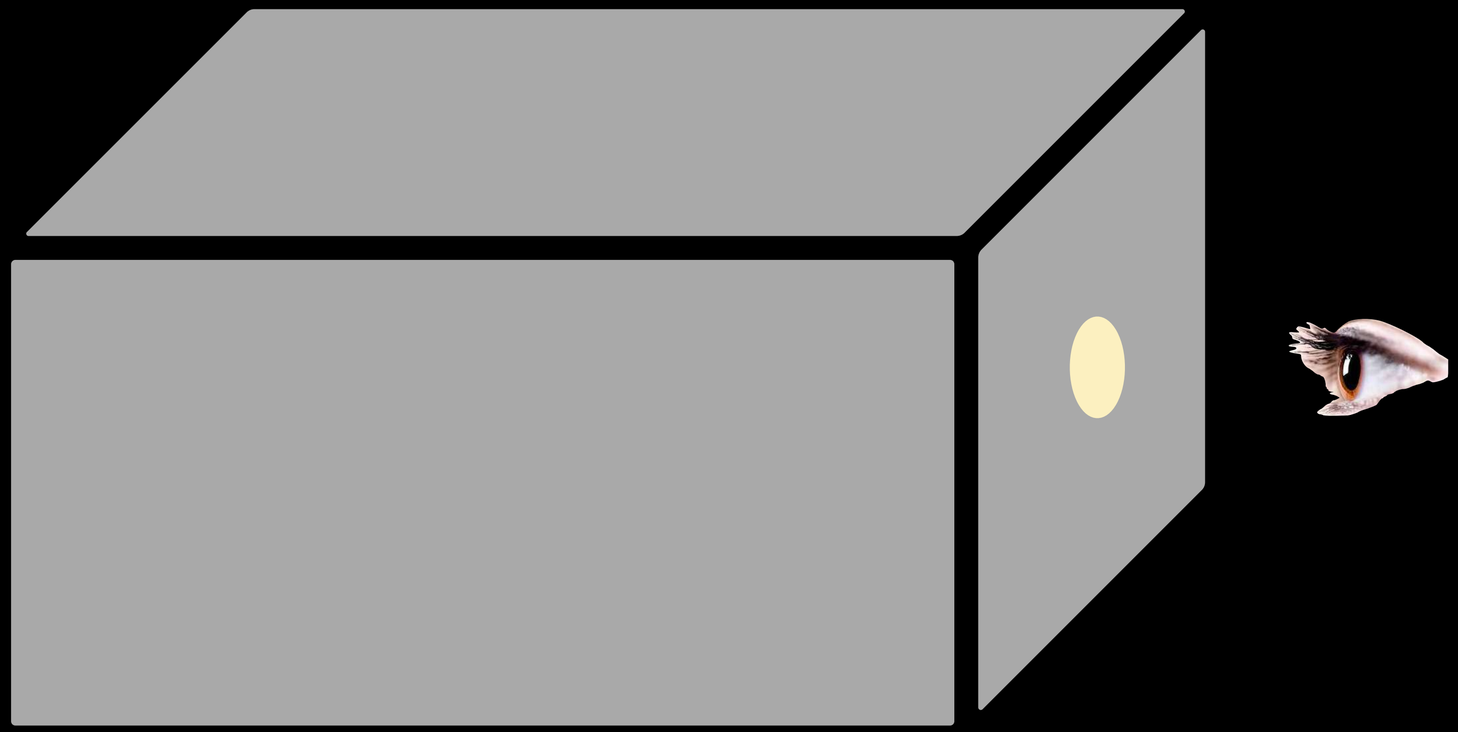




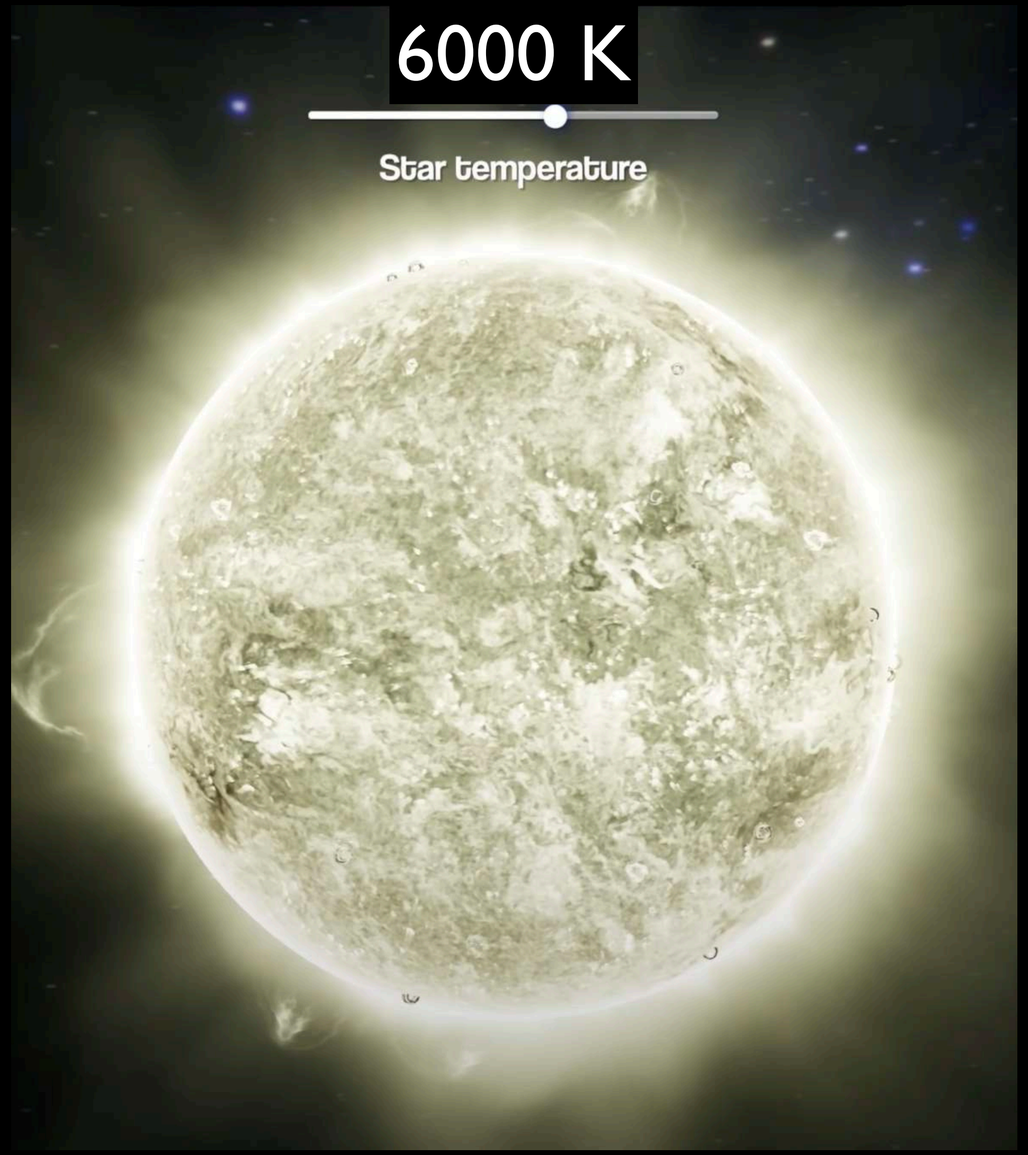


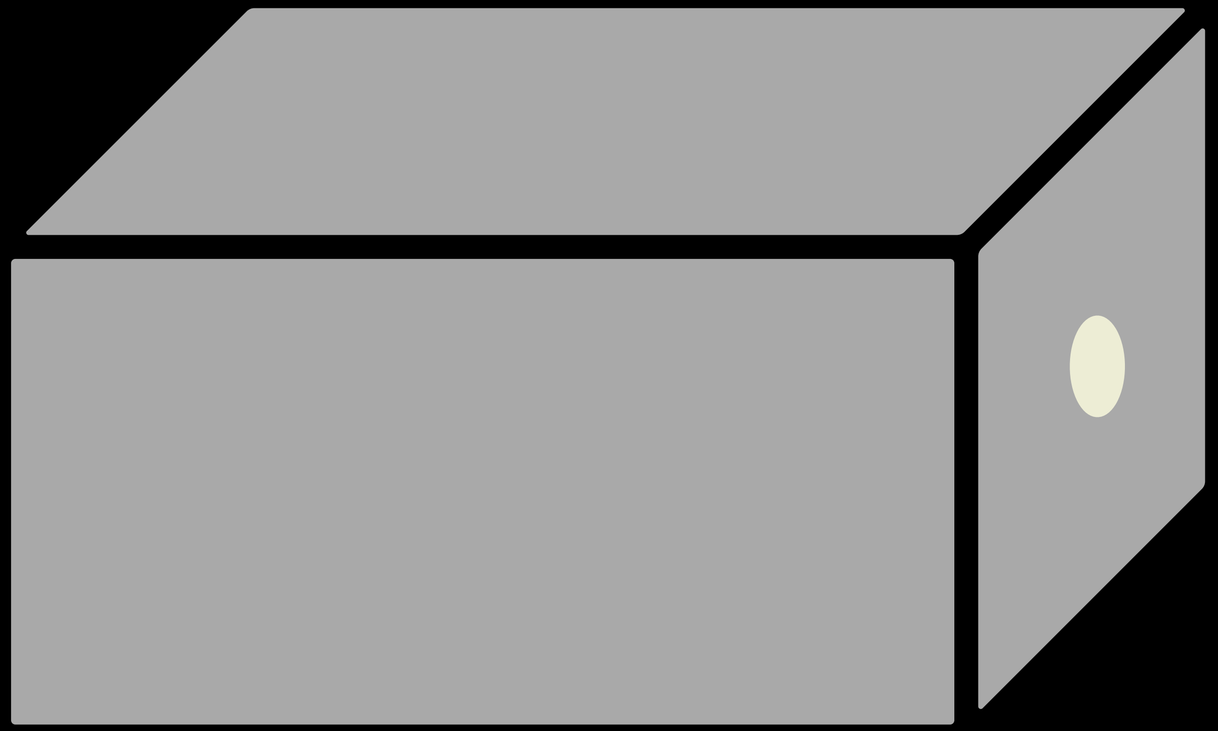
Aumentamos más la temperatura: ¡la luz cambia de color!





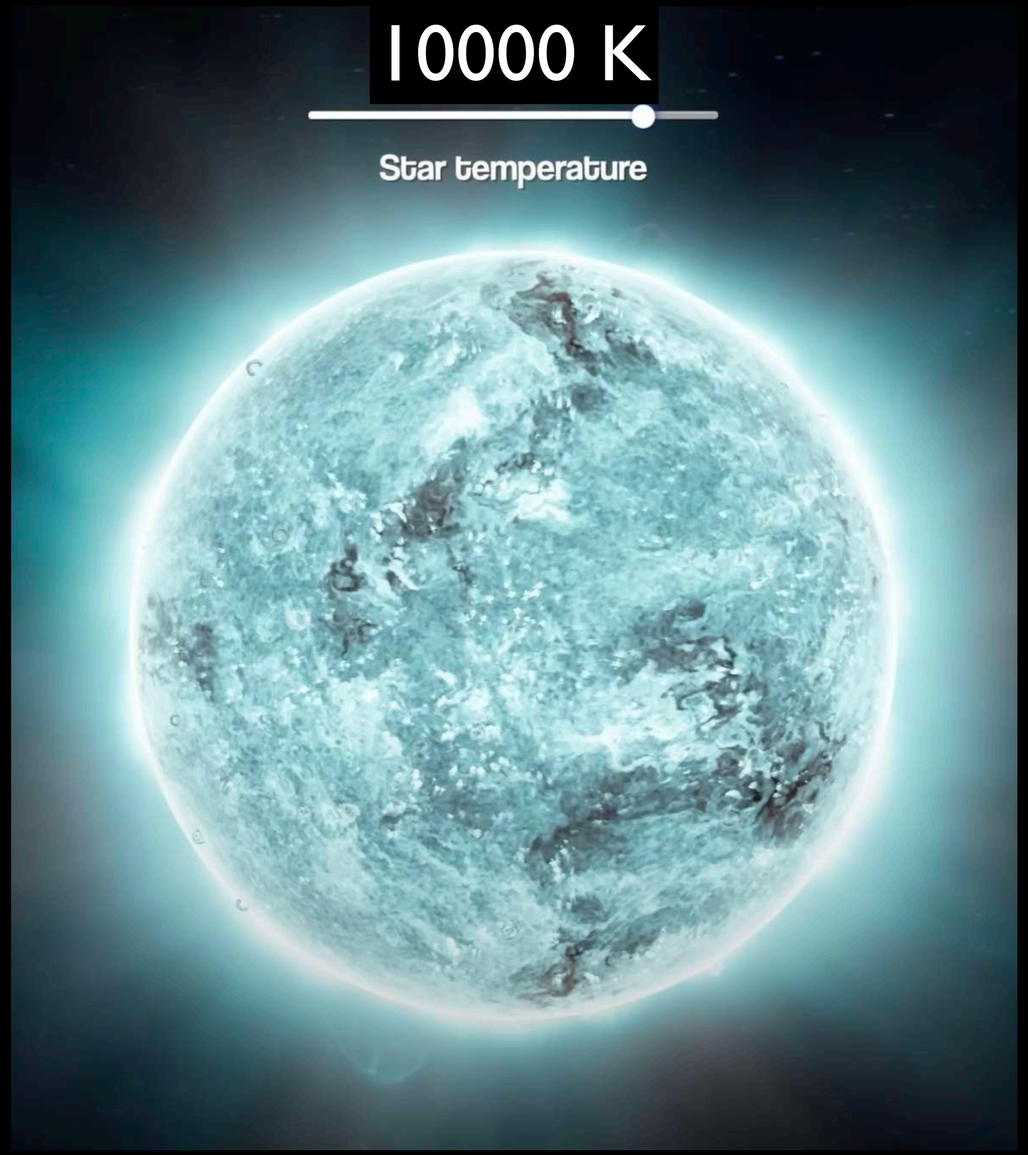
Aumentamos más la temperatura: ¡la luz cambia de color!

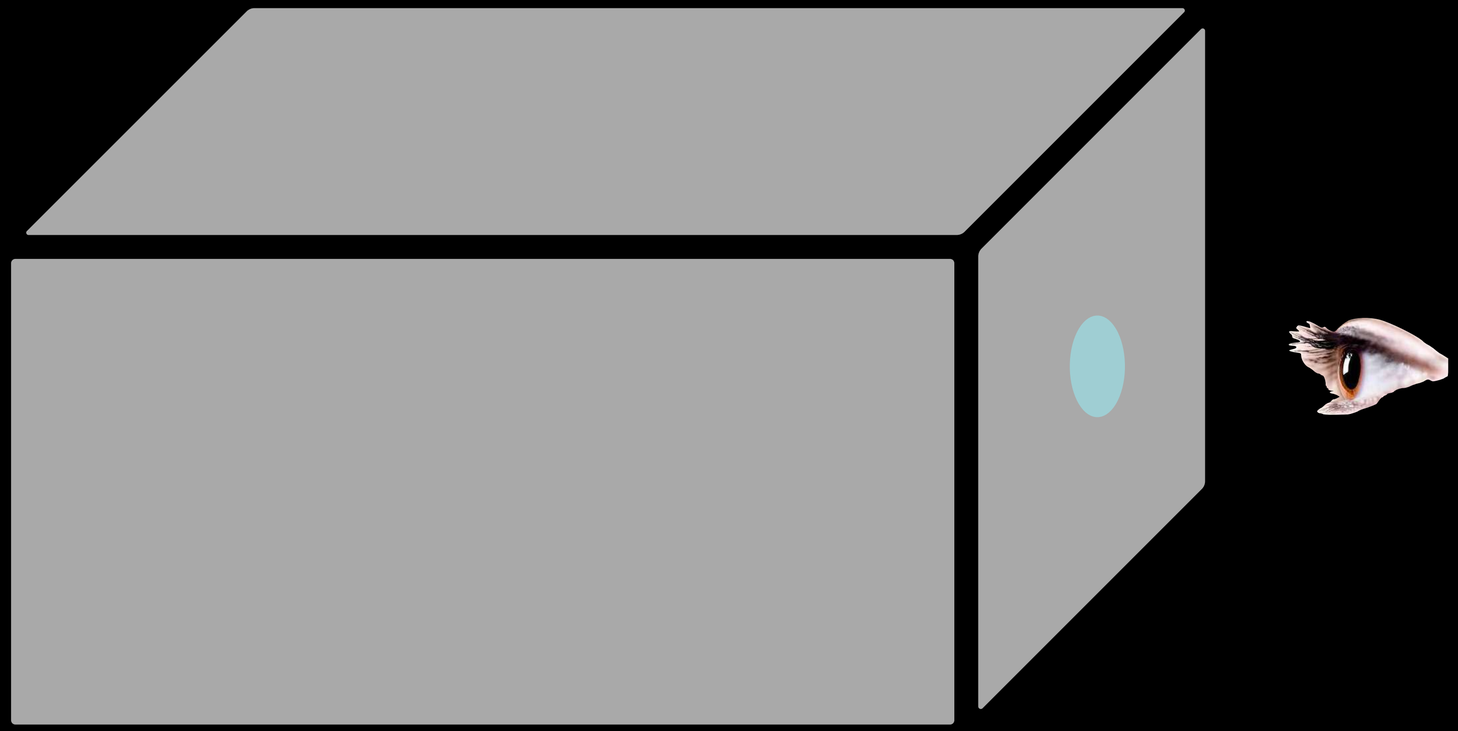




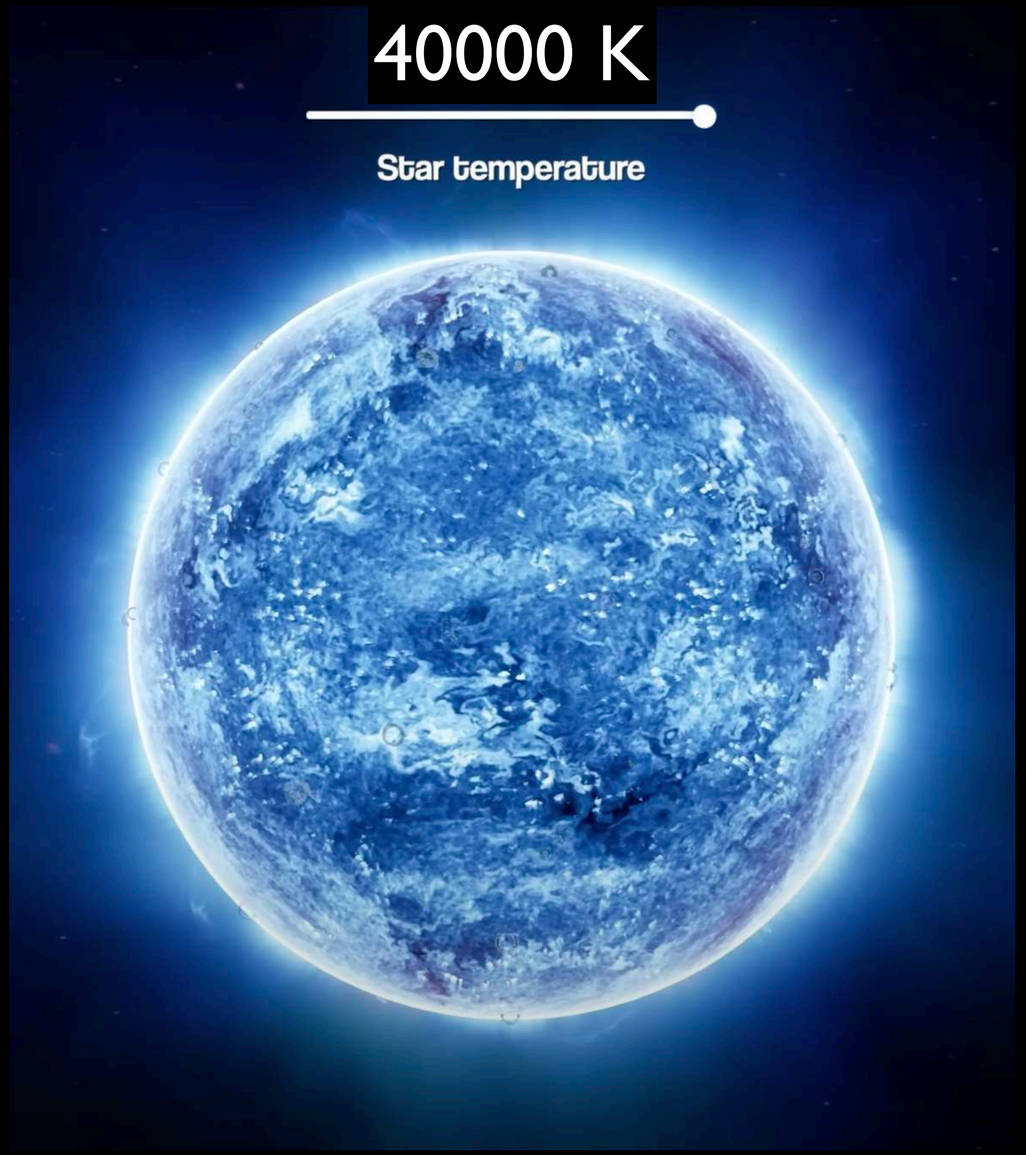


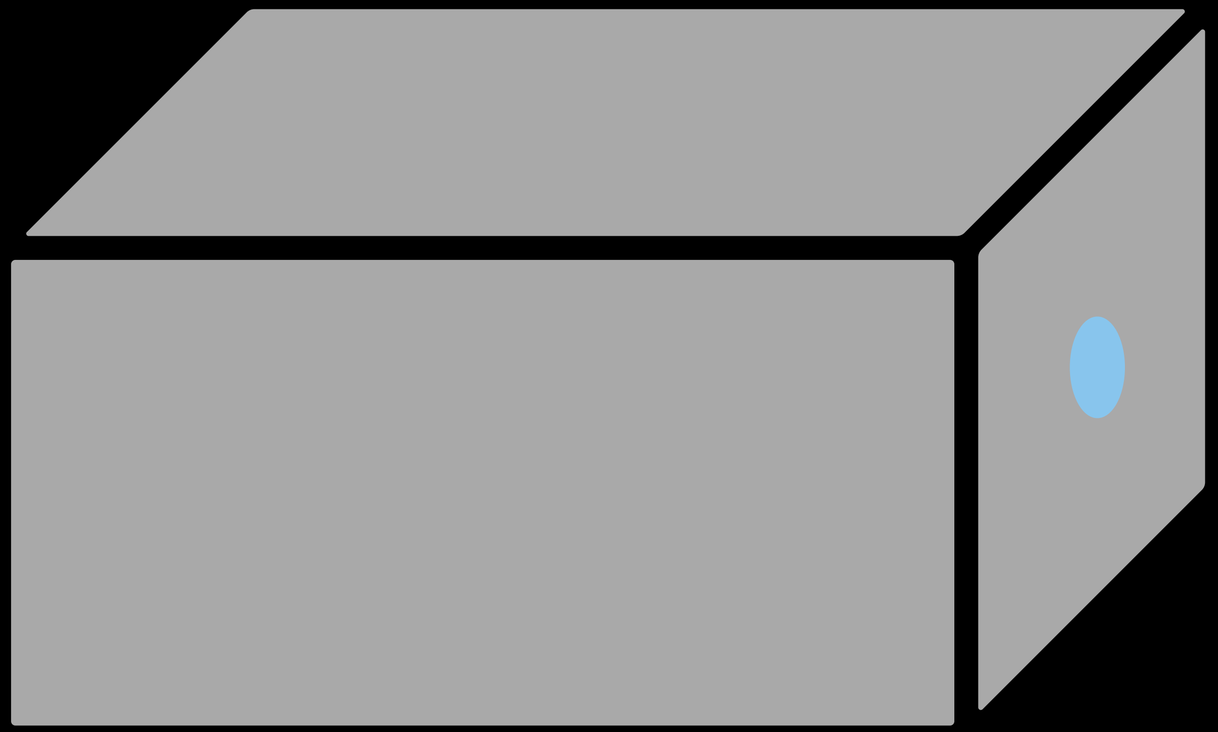
Aumentamos más la temperatura: ¡la luz cambia de color!





Aumentamos más la temperatura: ¡la luz cambia de color!

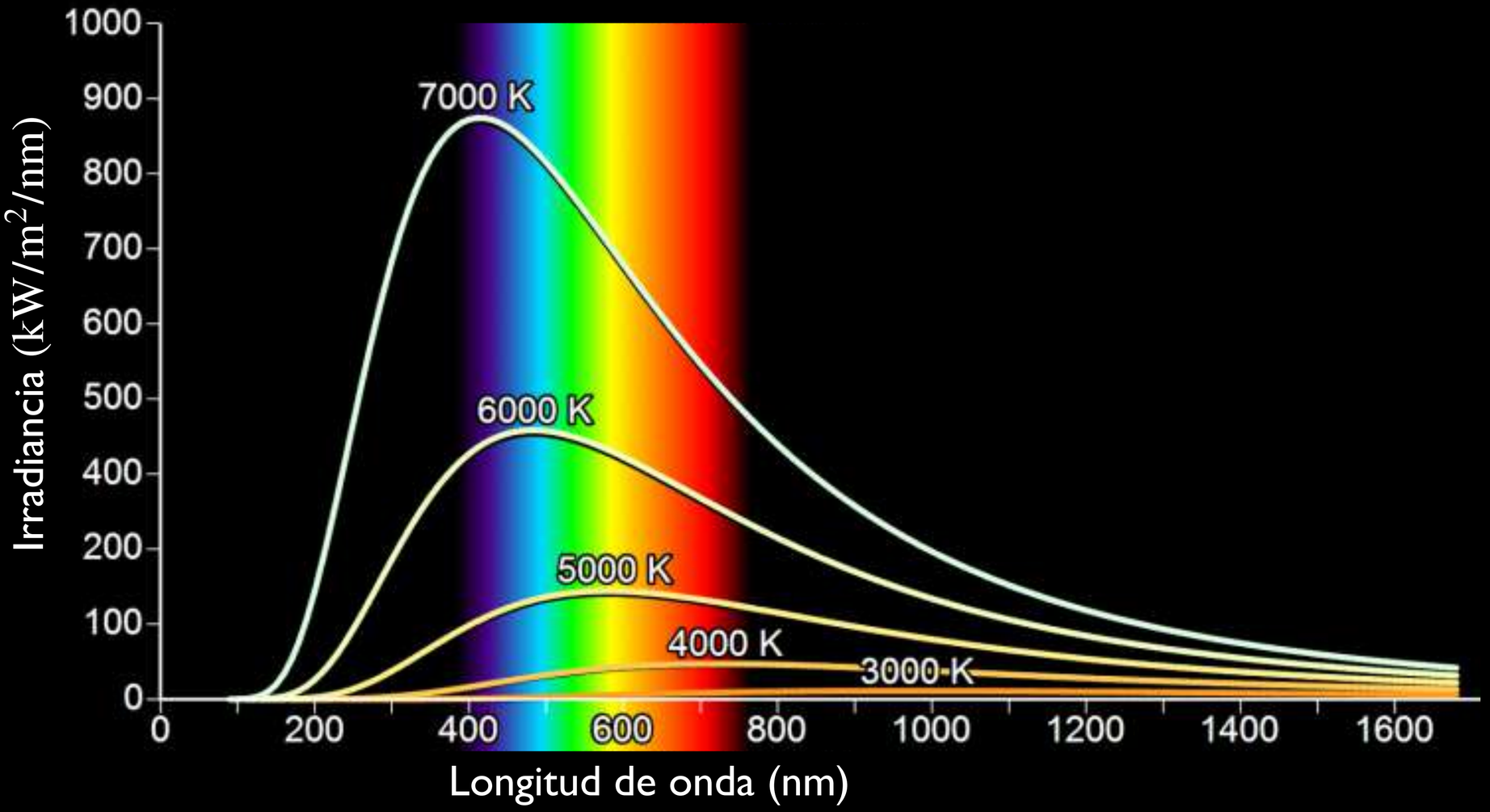






El cuerpo negro

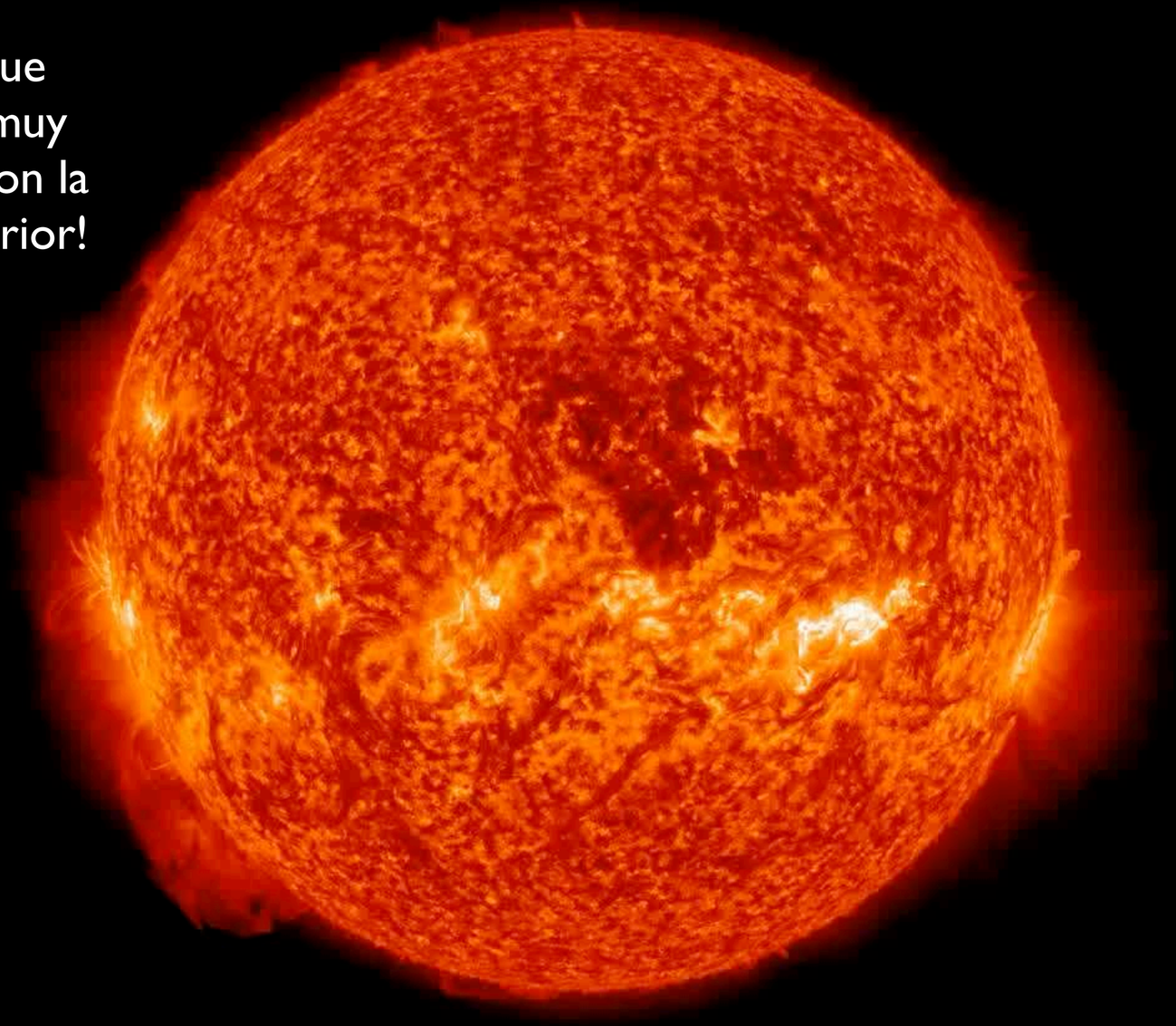
Las estrellas emiten radiación siguiendo de forma aproximada la ley de un cuerpo negro



Ver simulador de cuerpo negro en: https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_en.html

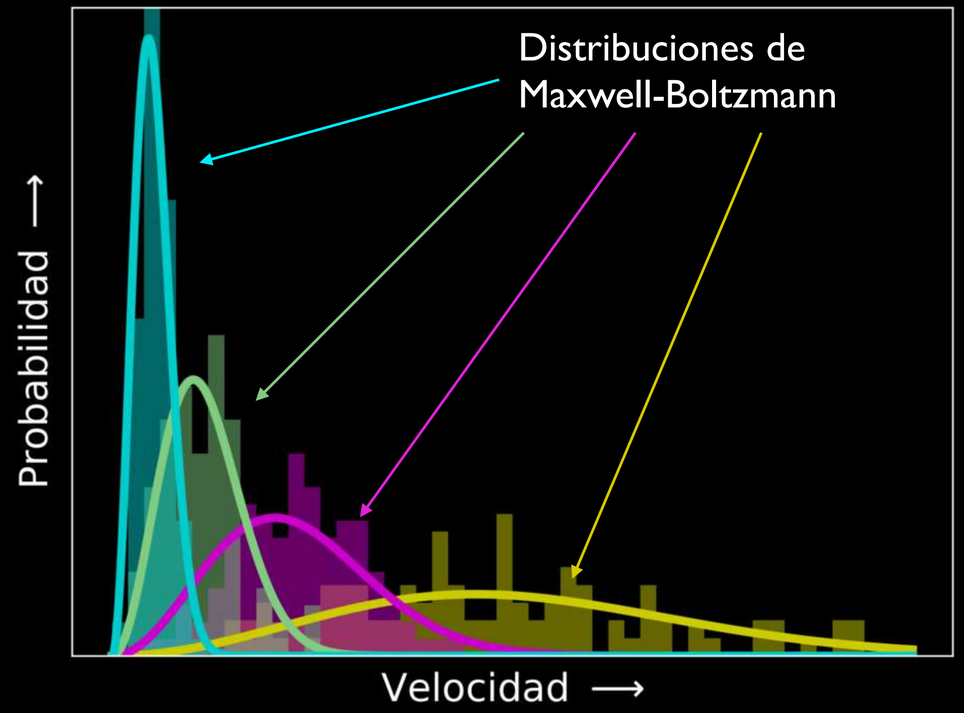
¿En qué se parece una estrella a una caja con un agujero?

¡La cantidad de energía que escapa de una estrella es muy pequeña en comparación con la energía que viaje en su interior!



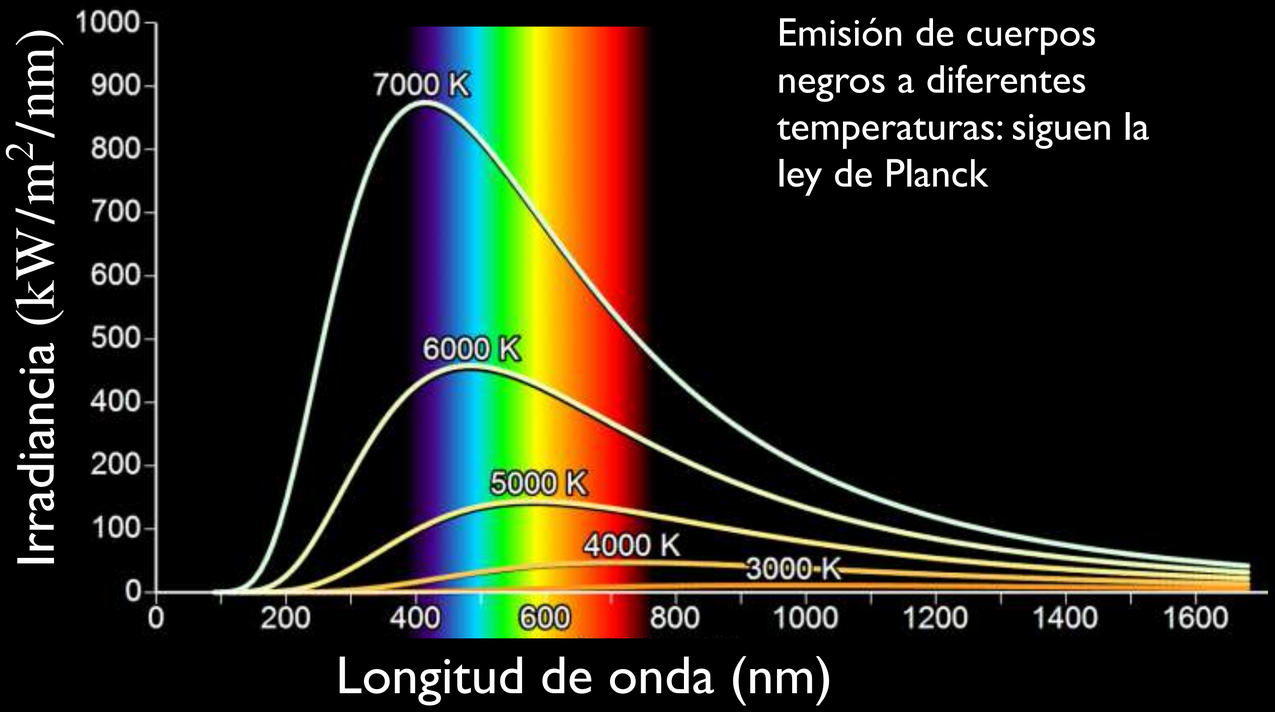
Poco después del origen del Universo y mucho antes de la aparación de estructuras como estrellas y galaxias, lo único que había eran partículas con masa y luz (partículas sin masa).

Partículas materiales



Si fijo la masa de las partículas, la distribución solo depende de la temperatura.

Partículas de luz: fotones

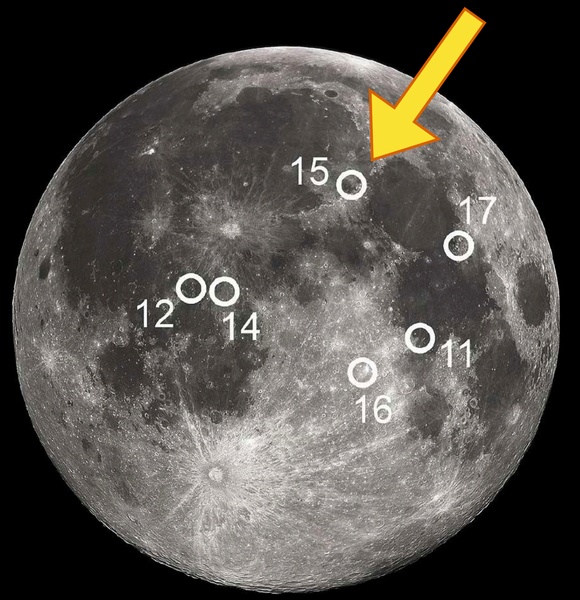


Emisión de cuerpos negros a diferentes temperaturas: siguen la ley de Planck

La energía emitida solo depende de la temperatura.

¡Tenemos leyes universales para hacer modelos del universo primitivo!

https://www.youtube.com/watch?v=KDp1tiUsZw8

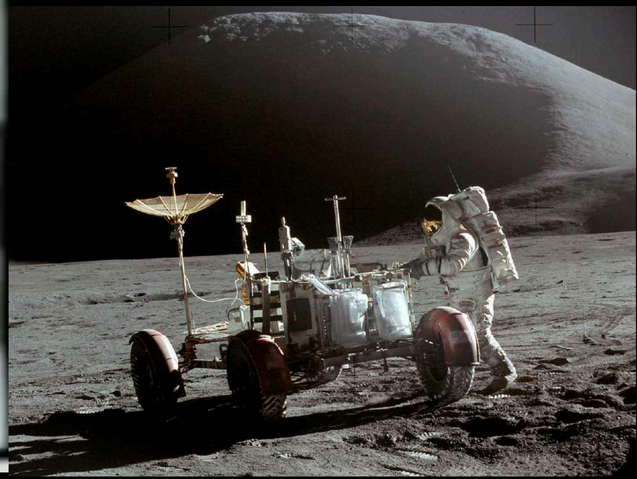


https://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_program#/media/File:Apollo_landing_sites.jpg



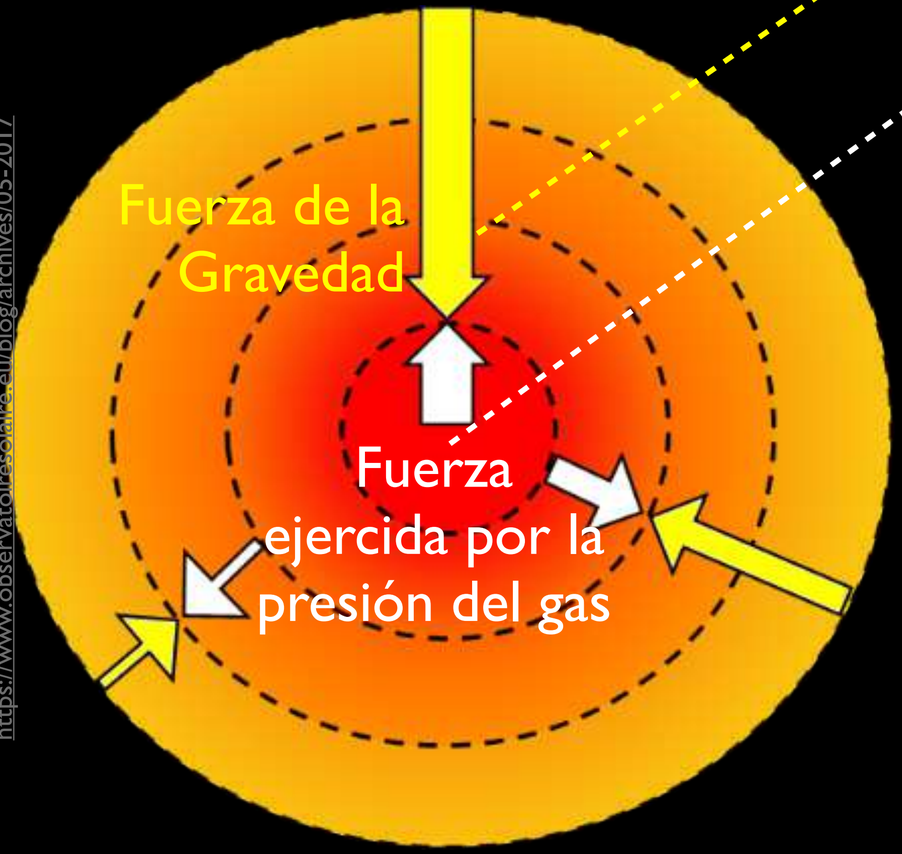


https://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_15



Las 4 fuerzas de la Naturaleza

Las 4 fuerzas de la naturaleza son necesarias para entender cómo funciona una estrella como el Sol.

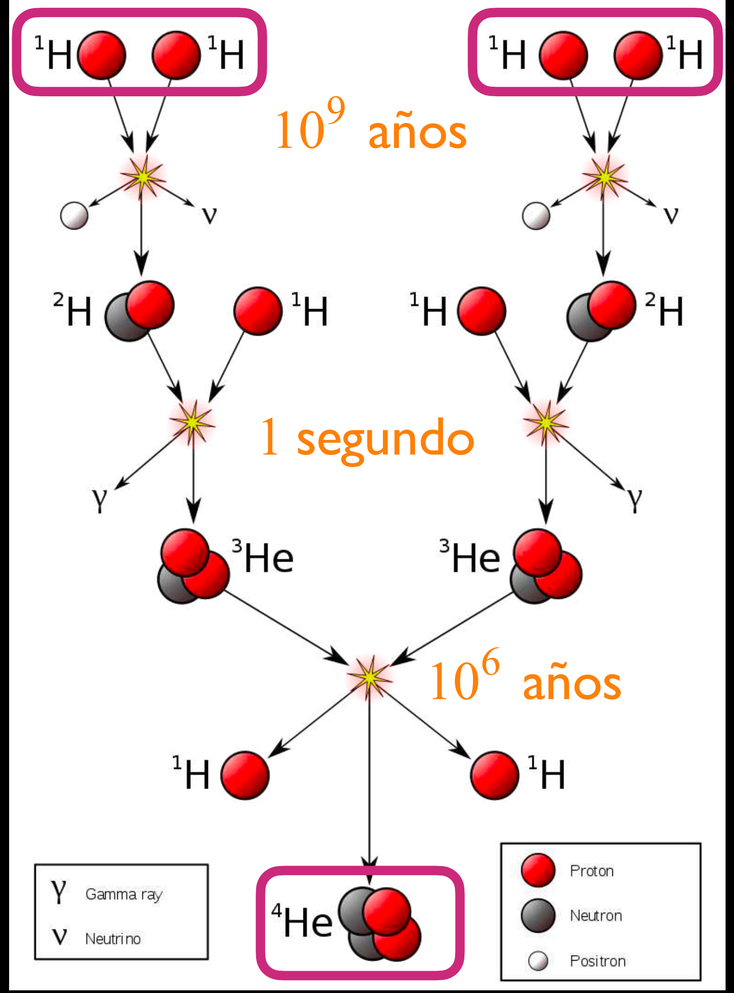


Durante la vida normal de una estrella la fuerza de la gravedad es compensada por la presión que ejerce el gas caliente.

https://www.observatoiresolaire.eu/blog/archives/05-2017

1) Gravedad: Fuerza siempre atractiva, de largo alcance.

La presión del gas se debe al movimiento muy rápido de las partículas, causado a su vez por la elevada temperatura.
¿Qué genera esa temperatura tan elevada?
Las reacciones nucleares en el núcleo del Sol.



https://en.wikipedia.org/wiki/Proton%E2%80%93proton_chain_reaction

2)Fuerza electromagnética: puede ser atractiva o repulsiva, de largo alcance.

Dificulta conseguir que dos protones ^1H (misma carga) se aproximen.

3) Fuerza nuclear débil: de corto alcance, es la responsable de la desintegración β.

La desintegración es probabilística: convierte un protón en un neutrón + positrón + neutrino. Es responsable de que dos protones (^1H) se conviertan en deuterio (^2H).

4) Fuerza nuclear fuerte: de corto alcance, mantiene unidos a los nucleones (protones y neutrones) en los núcleos atómicos.

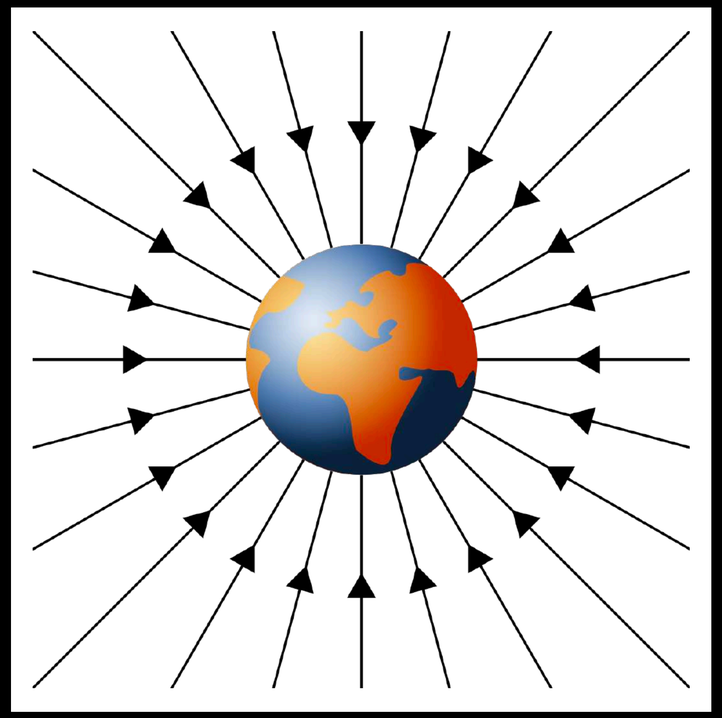
Un concepto fundamental en Física es el de "campo"

Un campo es una propiedad que asignamos a cada punto del espacio y que nos permite, por ejemplo, calcular fuerzas. Así, en Física hablamos de:

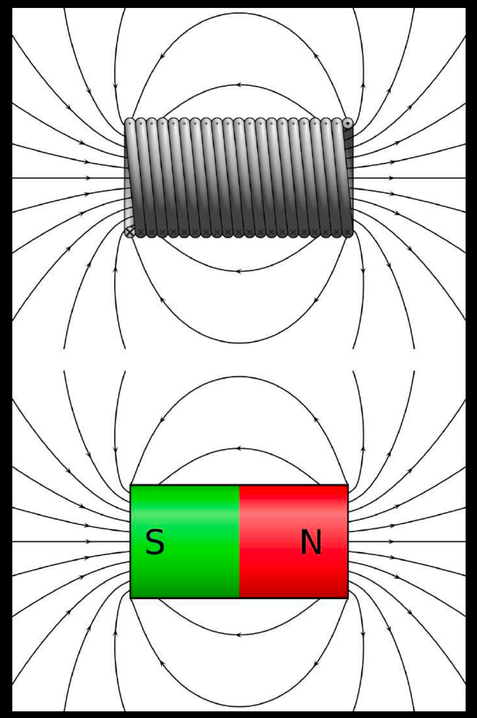
- Campo gravitatorio
- Campo eléctrico
- Campo magnético
- …

Rompemos el problema en 2 partes:

1. primero calculamos el campo producido por uno o varios objetos
2. luego calculamos el efecto que el campo tiene en otro(s) objeto(s)



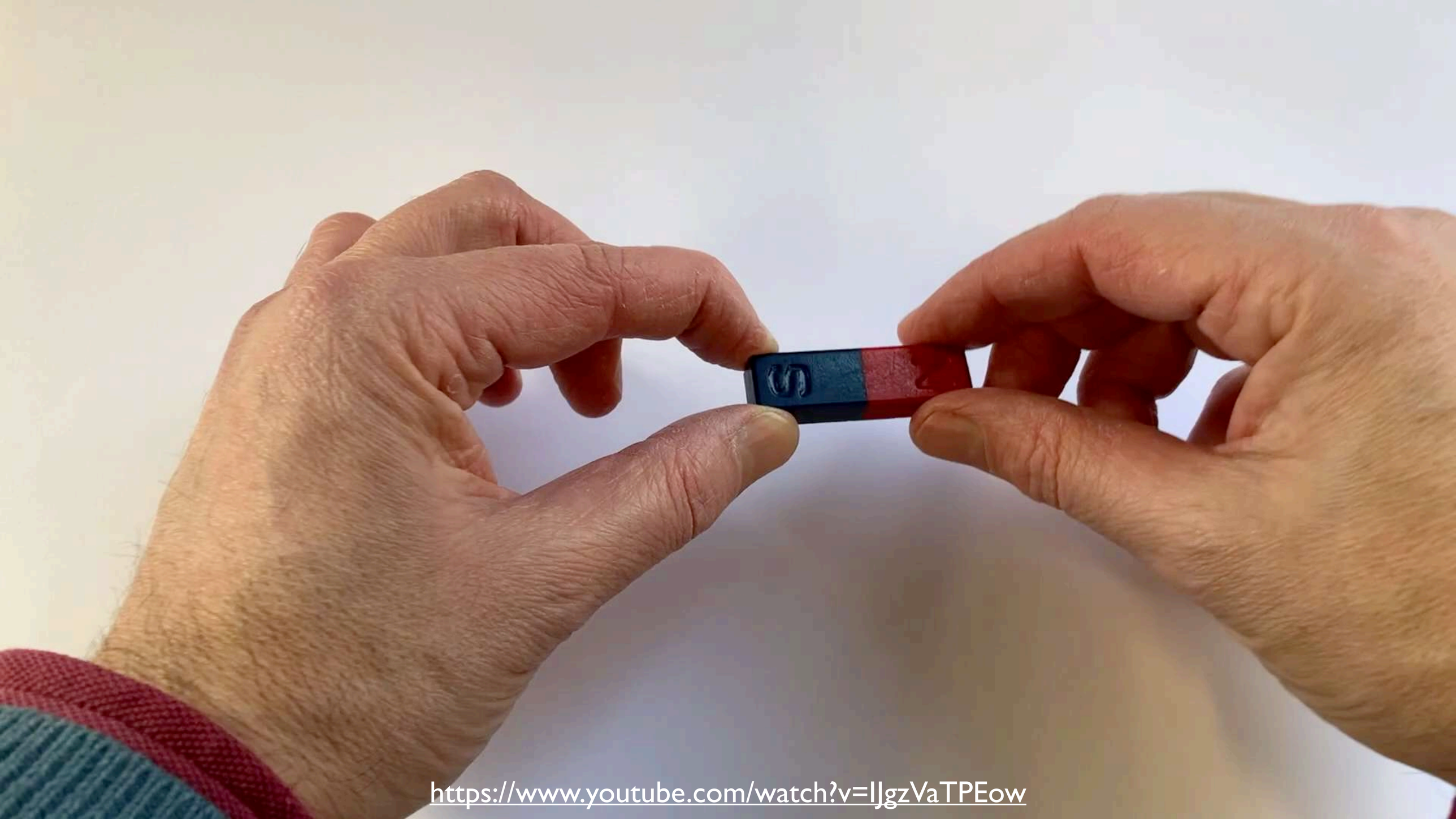
Campo gravitatorio terrestre



Campo magnético



Campo magnético terrestre



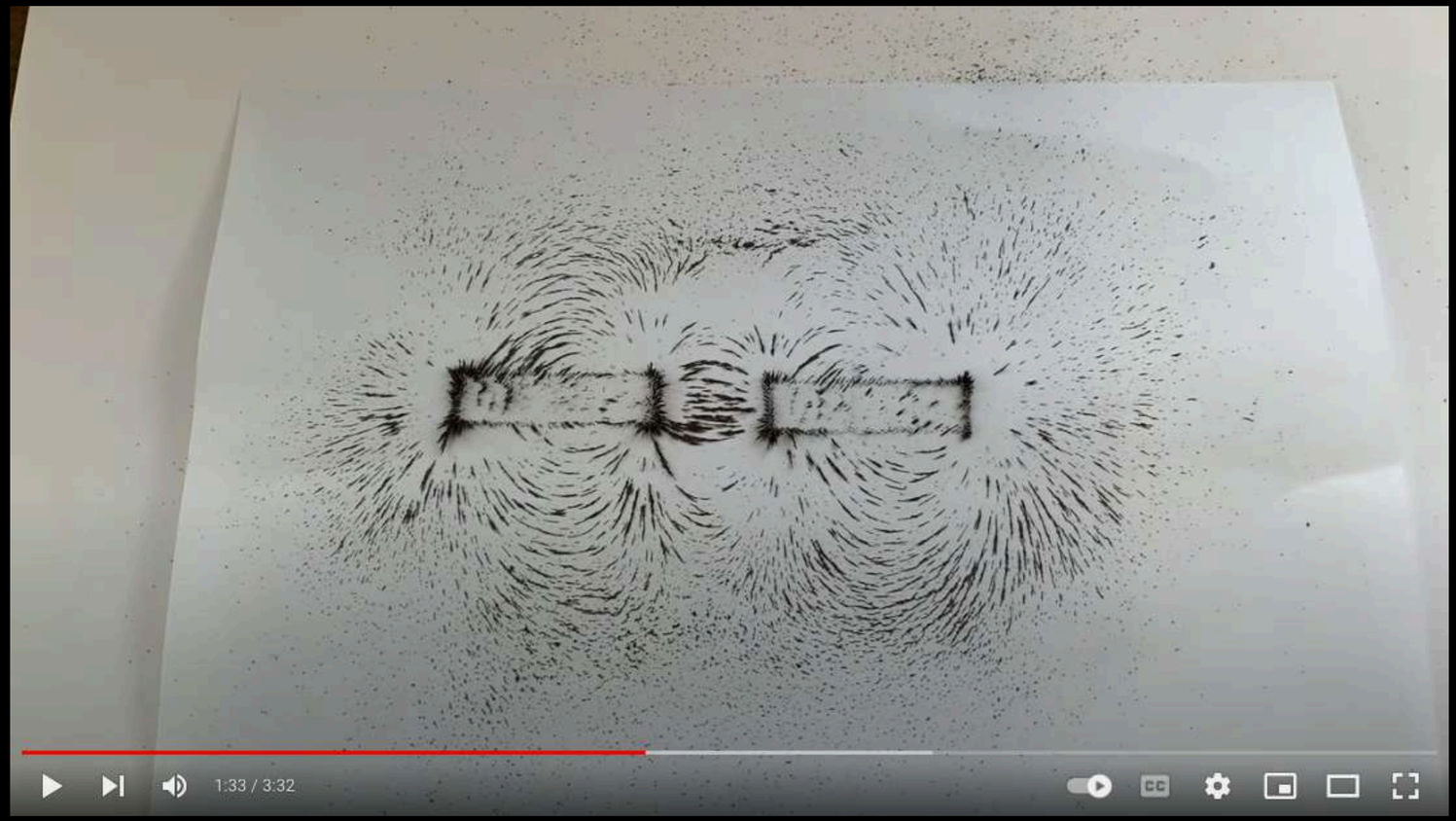
https://www.youtube.com/watch?v=IJgzVaTPEow

Un concepto fundamental en Física es el de "campo"

¡La acción a distancia no existe!

El espacio puede contener campos que son los responsables de transmitir las fuerzas.

En el caso del magnetismo, cada imán genera un campo magnético que se extiende alrededor del propio imán. Es ese campo el que interacciona con otros objetos.

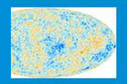


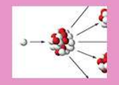
https://www.youtube.com/watch?v=IJgzVaTPEow



https://www.youtube.com/watch?v=FWCN_ul5ygY

La Astrofísica aborda el origen de los elementos químicos

Big Bang (Nucleosíntesis 

Fisión por rayos 

Gráfica creada por Jennifer
http://www.astronomy.ohio-state.edu/~jaj/

Fusión de 

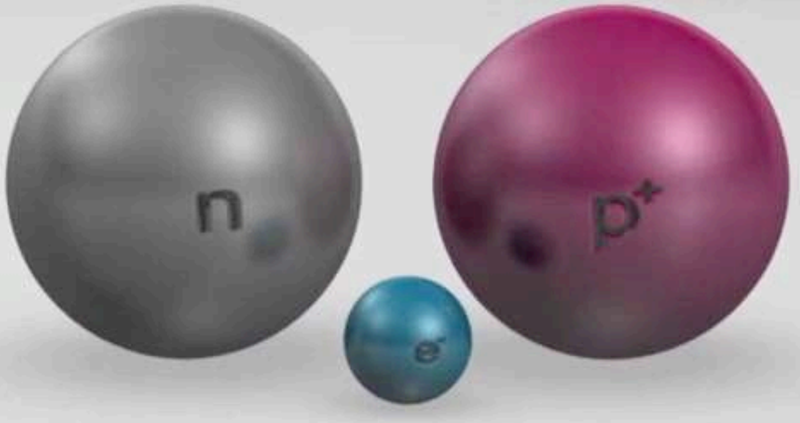
Explosión de 

Evolución de estrellas 

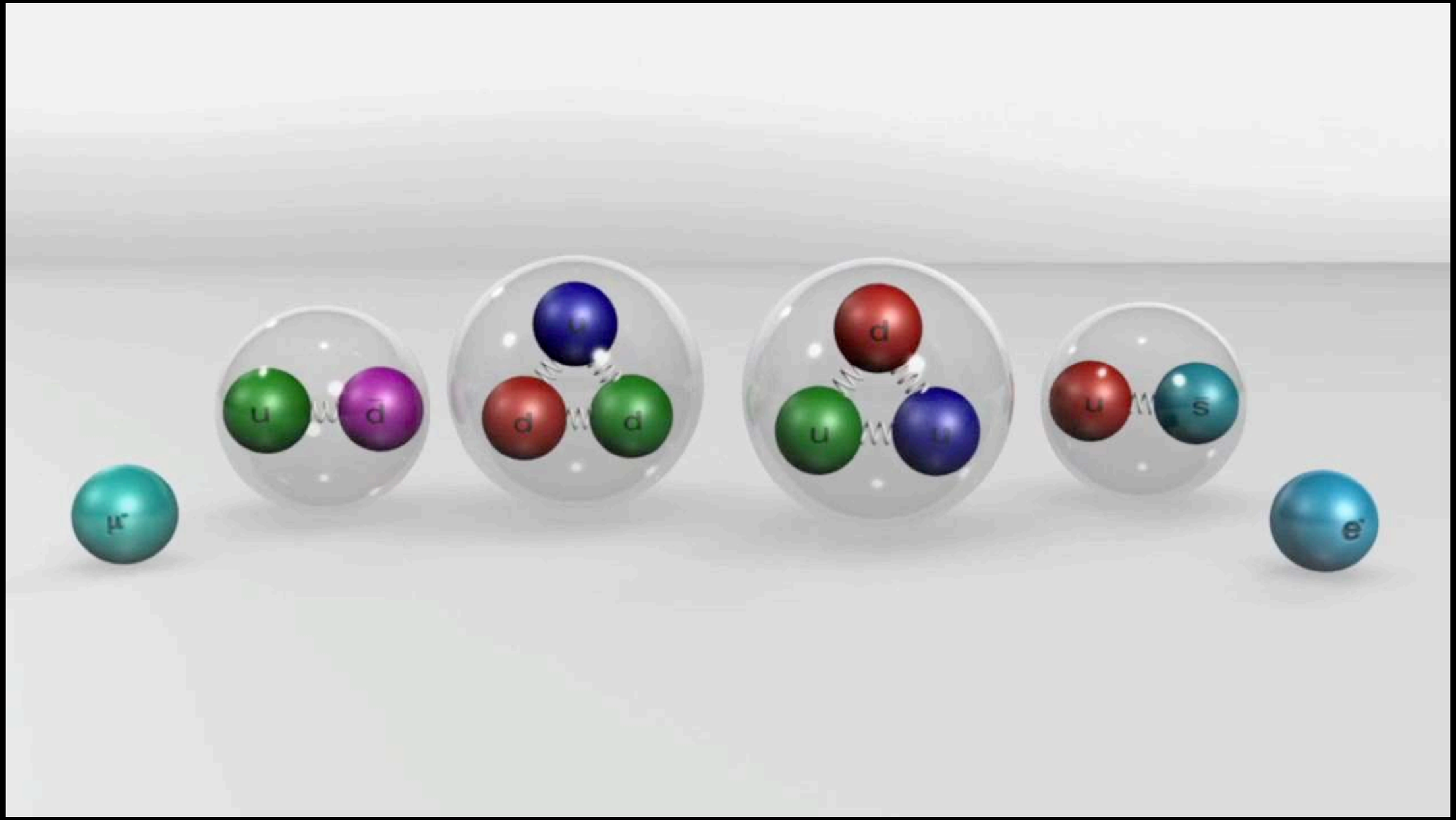
Explosión de 

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	Very radioactive isotopes; nothing left from stars								



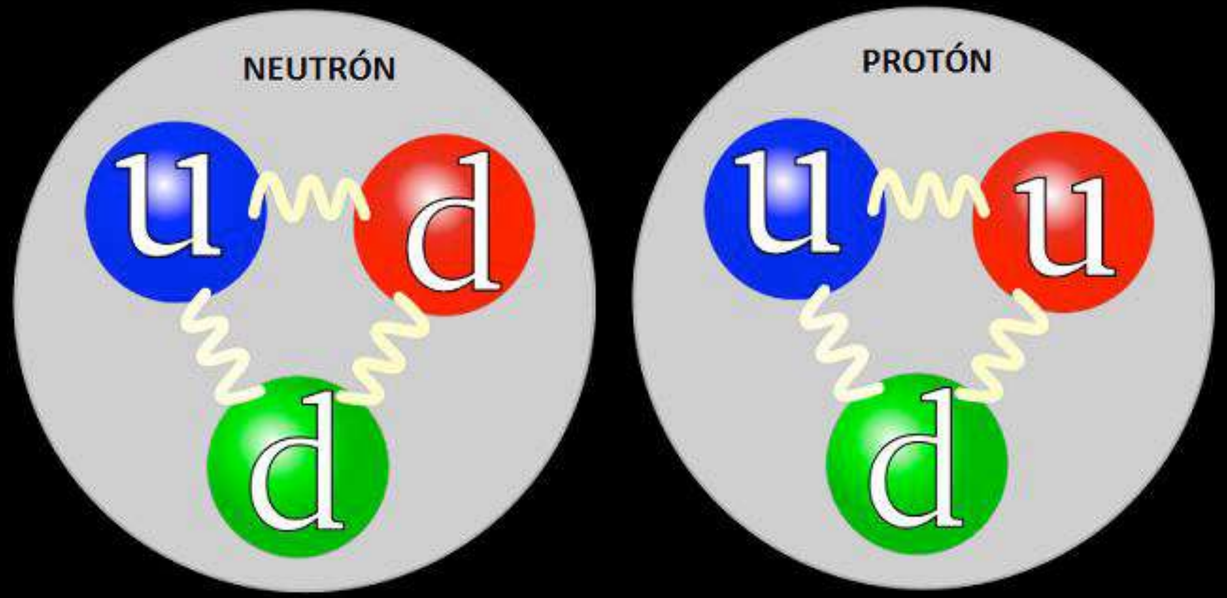
http://cds.cern.ch/record/1279356



http://cds.cern.ch/record/1279356



Necesitamos 2 quarks para
explicar los protones y los neutrones



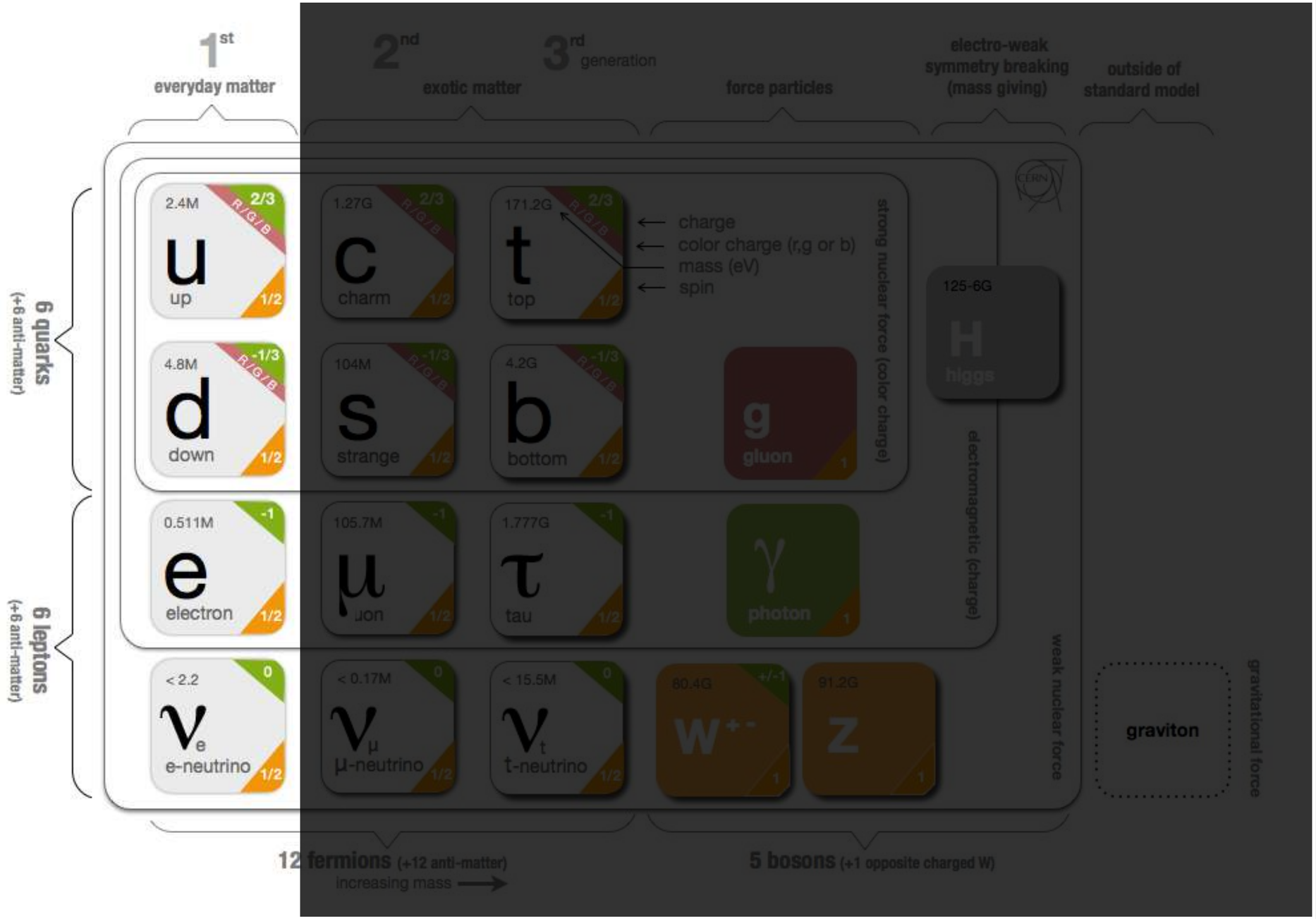


Necesitamos 2 quarks para
explicar los protones y los neutrones

Los electrones completan los átomos

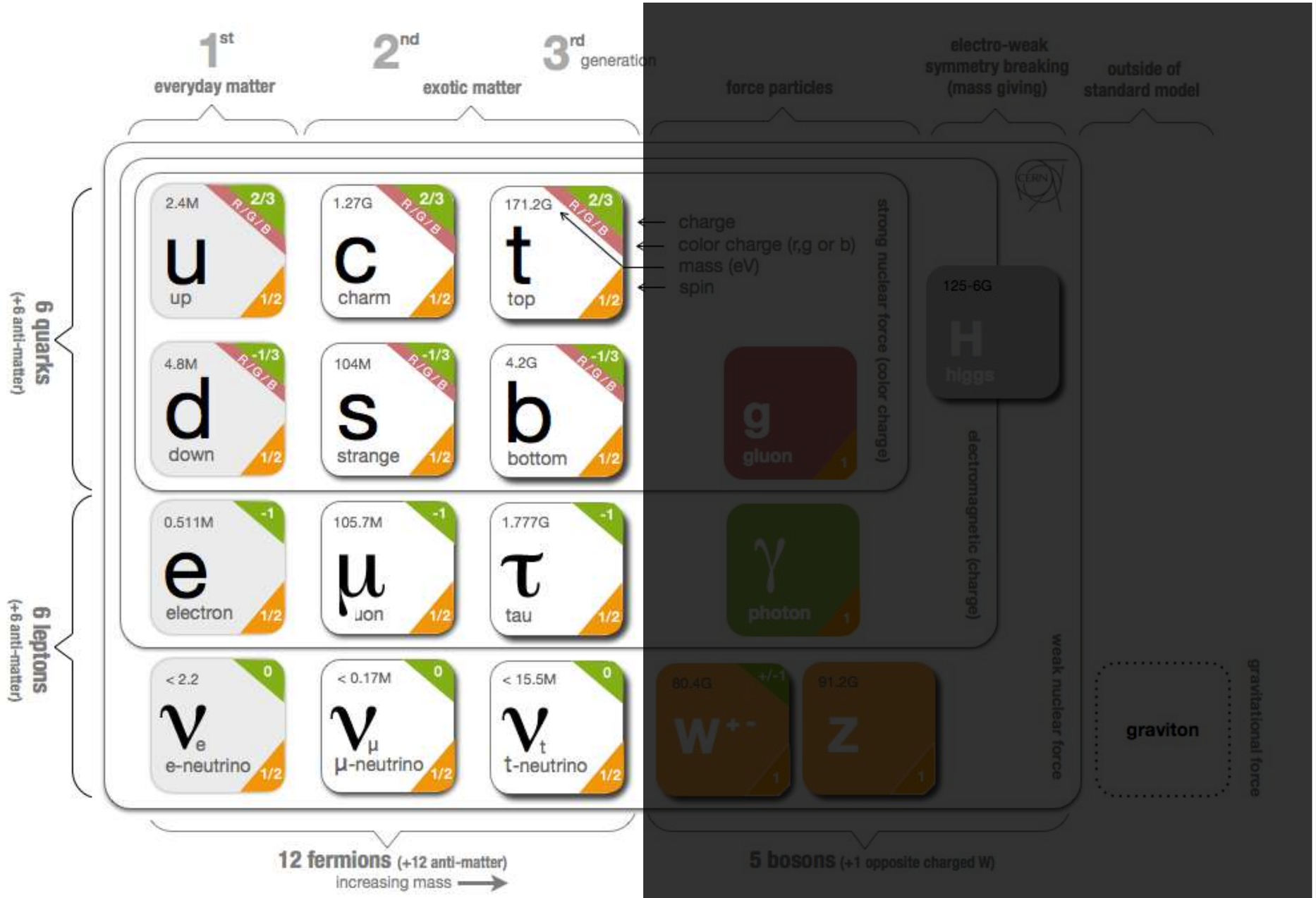
Los neutrinos explican:

$$n \rightarrow p + e^{-} + \overline{\nu}$$



Modelo Estándar de Partículas

http://www.isgtw.org/spotlight/go-particle-quest-first-cern-hackfest



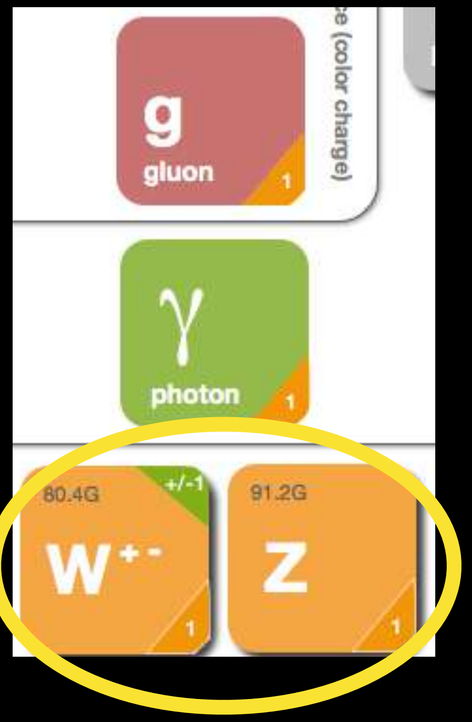
Modelo Estándar de Partículas

http://www.isgtw.org/spotlight/go-particle-quest-first-cern-hackfest

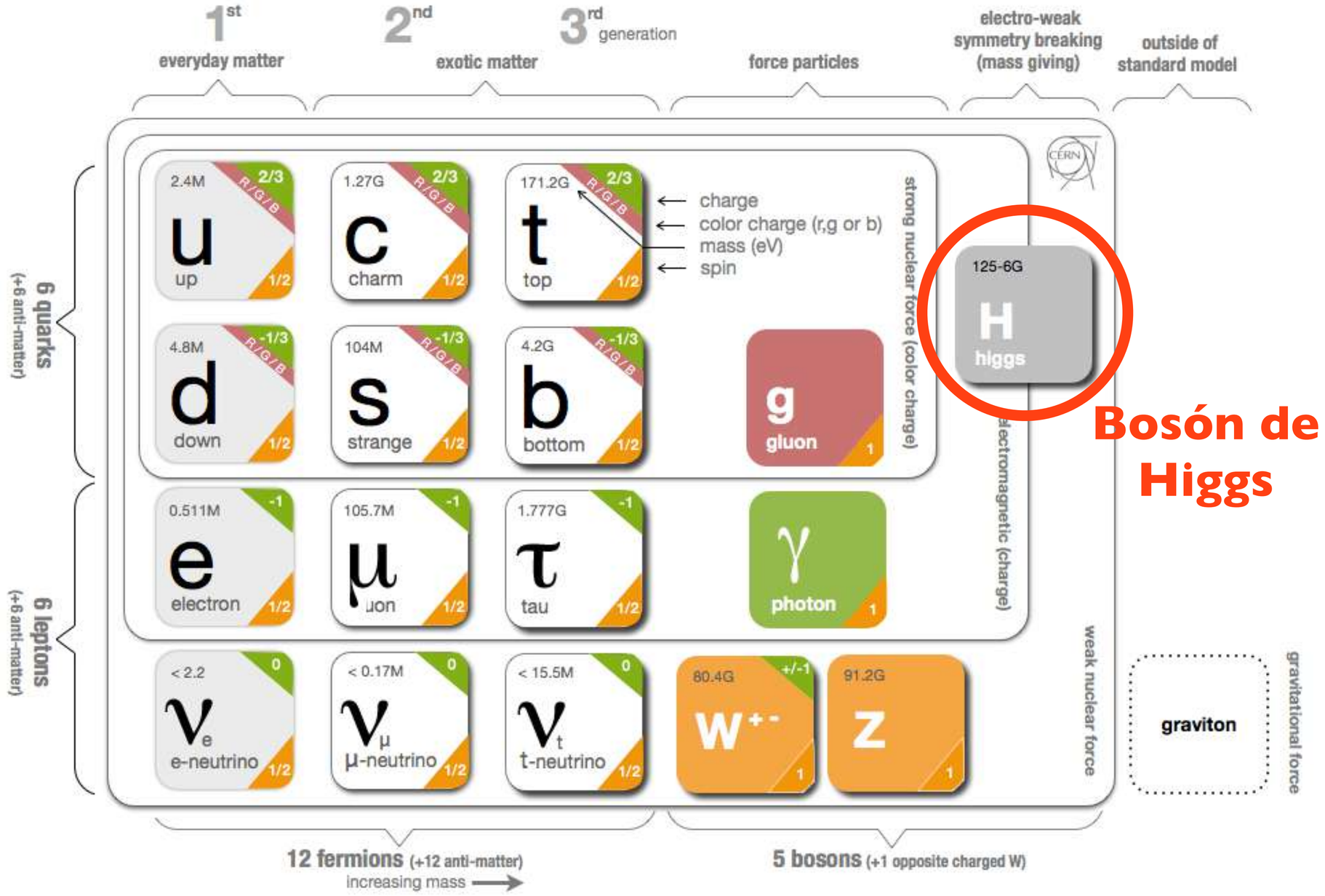
Fuerza nuclear fuerte

Fuerza electromagnética

Fuerza nuclear débil



¡Tienen masa!

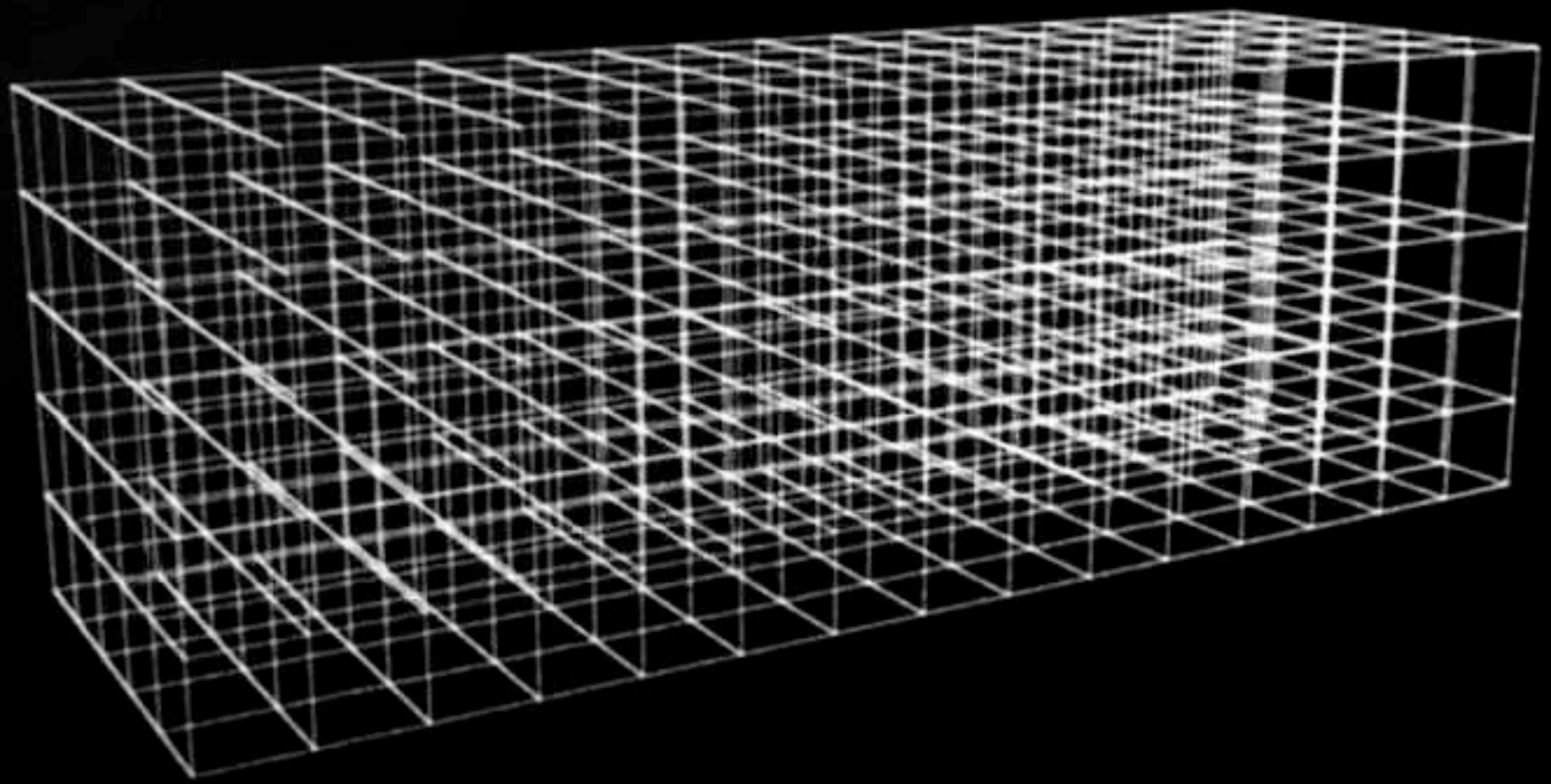


Bosón de Higgs

Modelo Estándar de Partículas

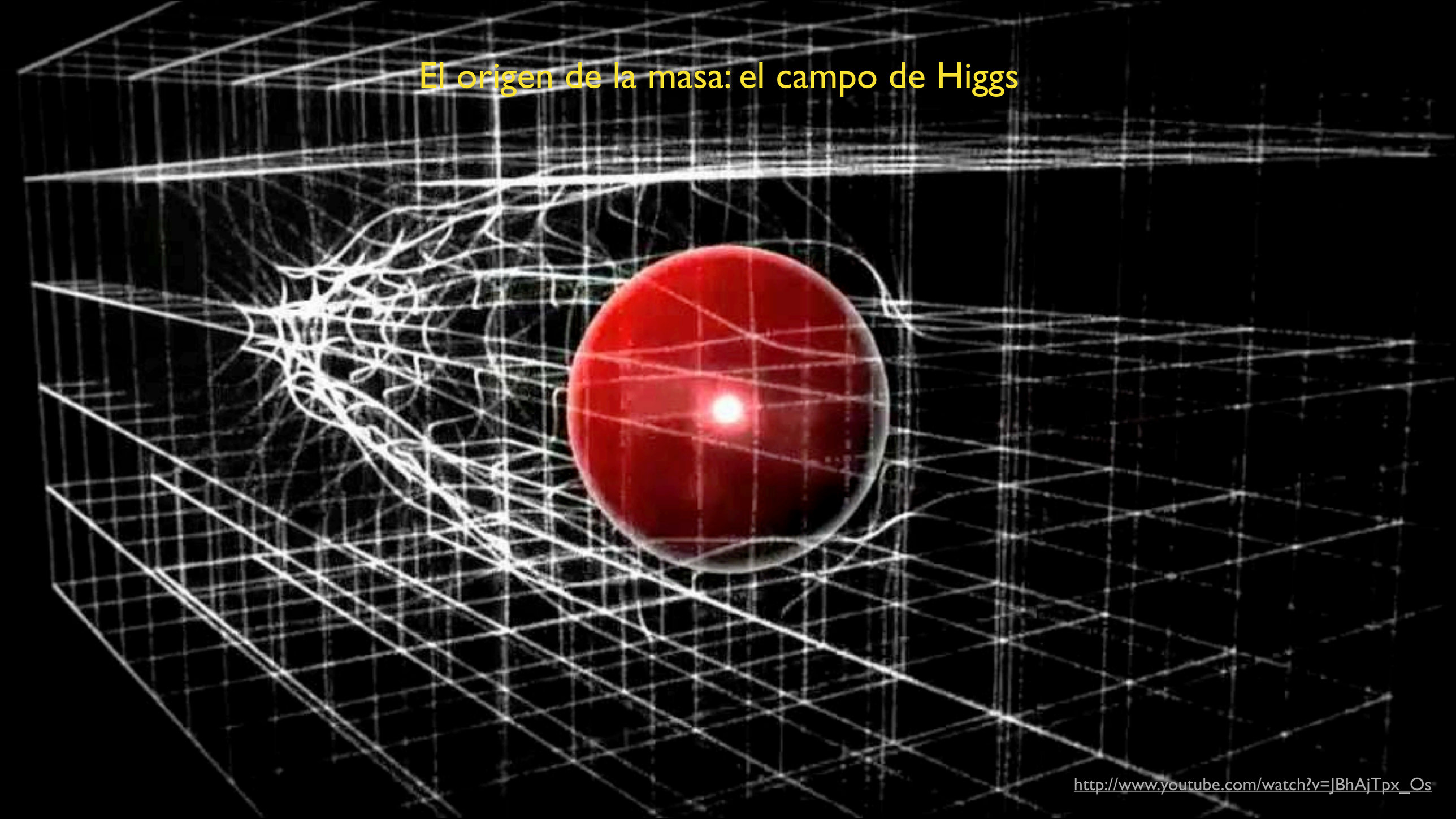
http://www.isgtw.org/spotlight/go-particle-quest-first-cern-hackfest

El origen de la masa: el campo de Higgs



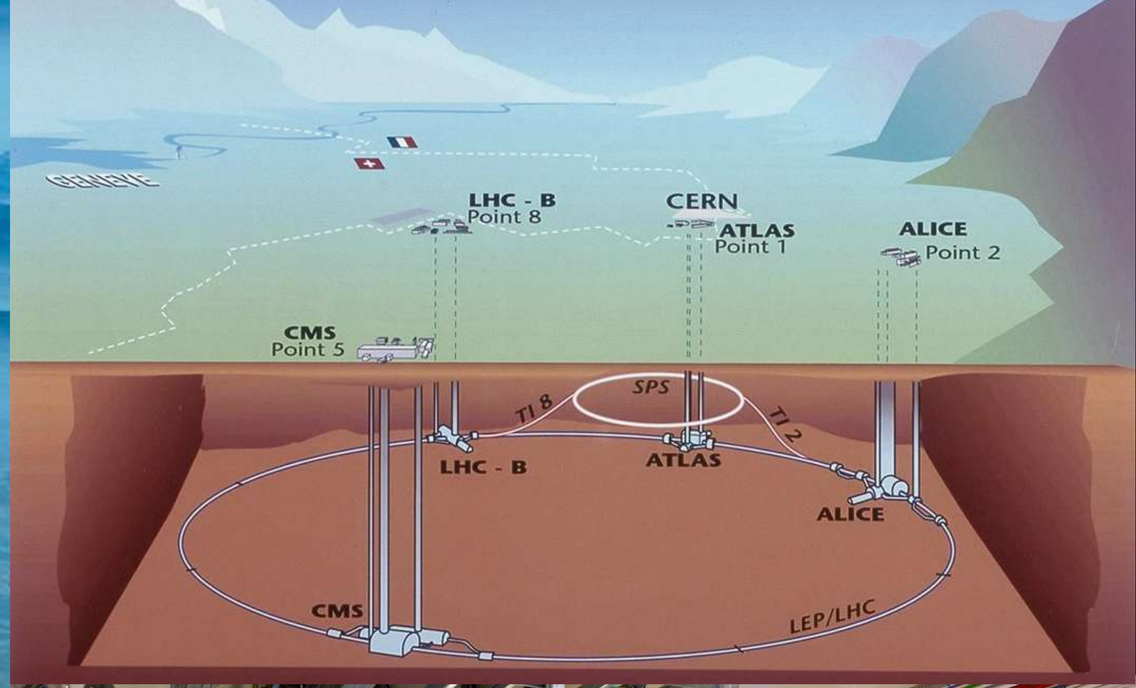
http://www.youtube.com/watch?v=JBhAjTpx_Os

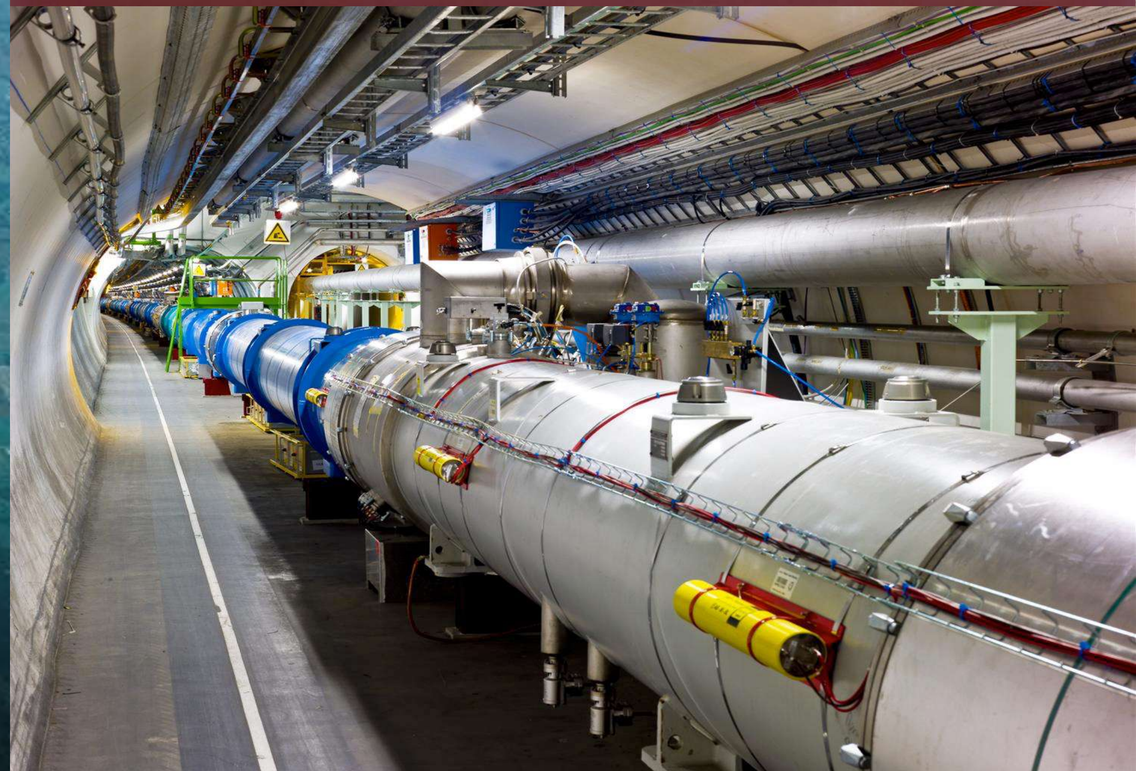
El origen de la masa: el campo de Higgs



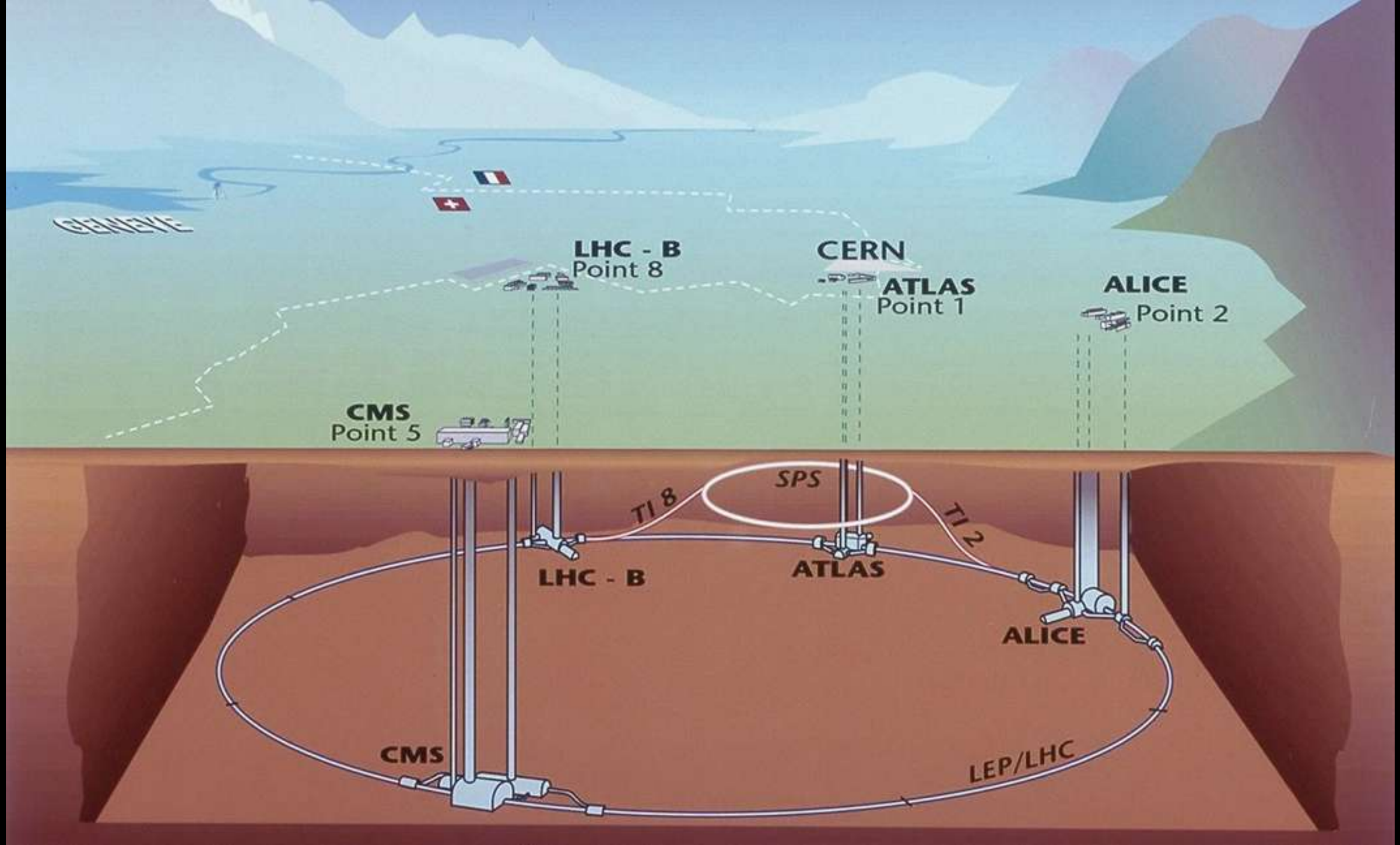
http://www.youtube.com/watch?v=JBhAjTpx_Os

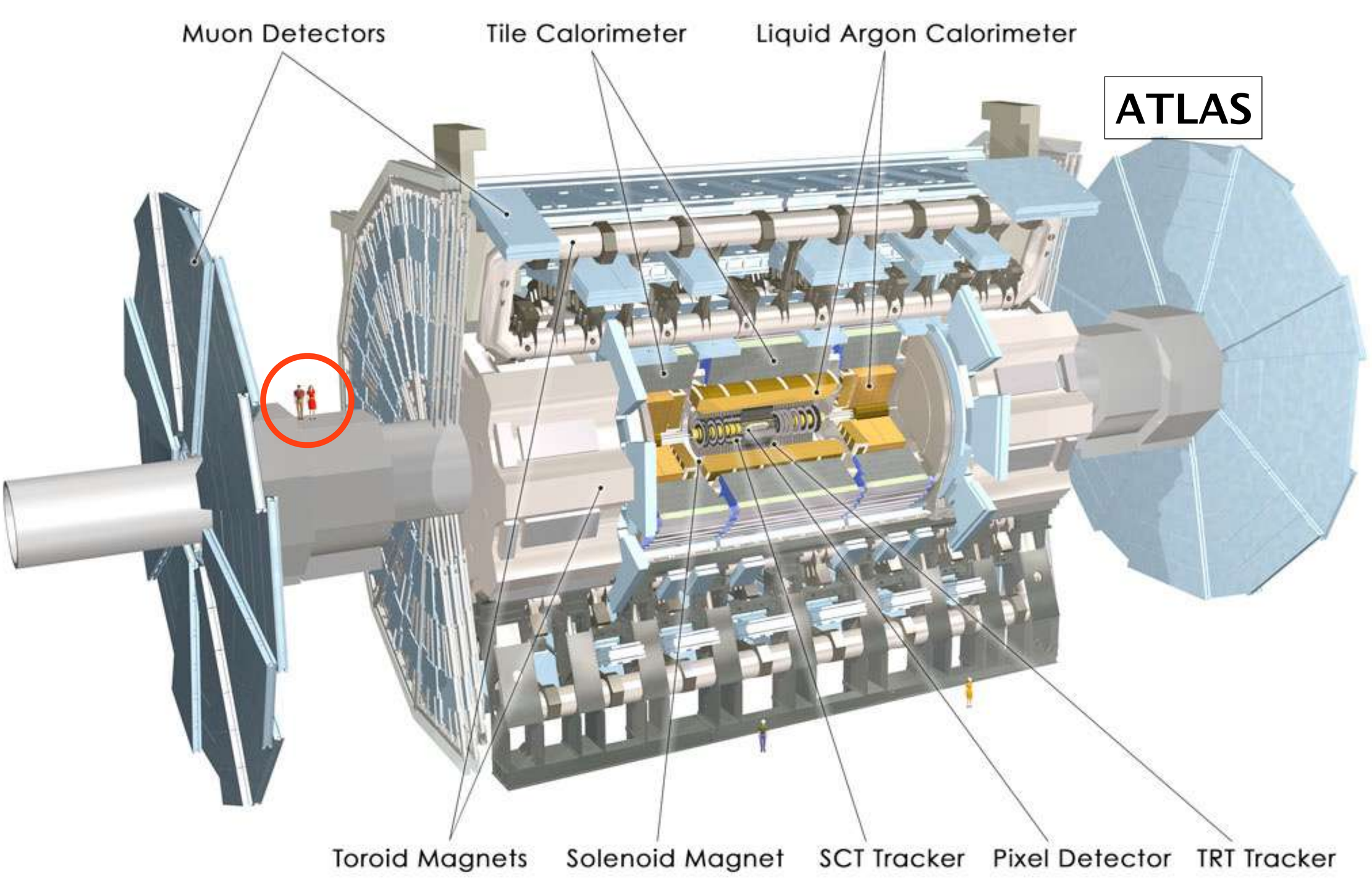
CERN: Organización Europea para la Investigación Nuclear
(*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*)

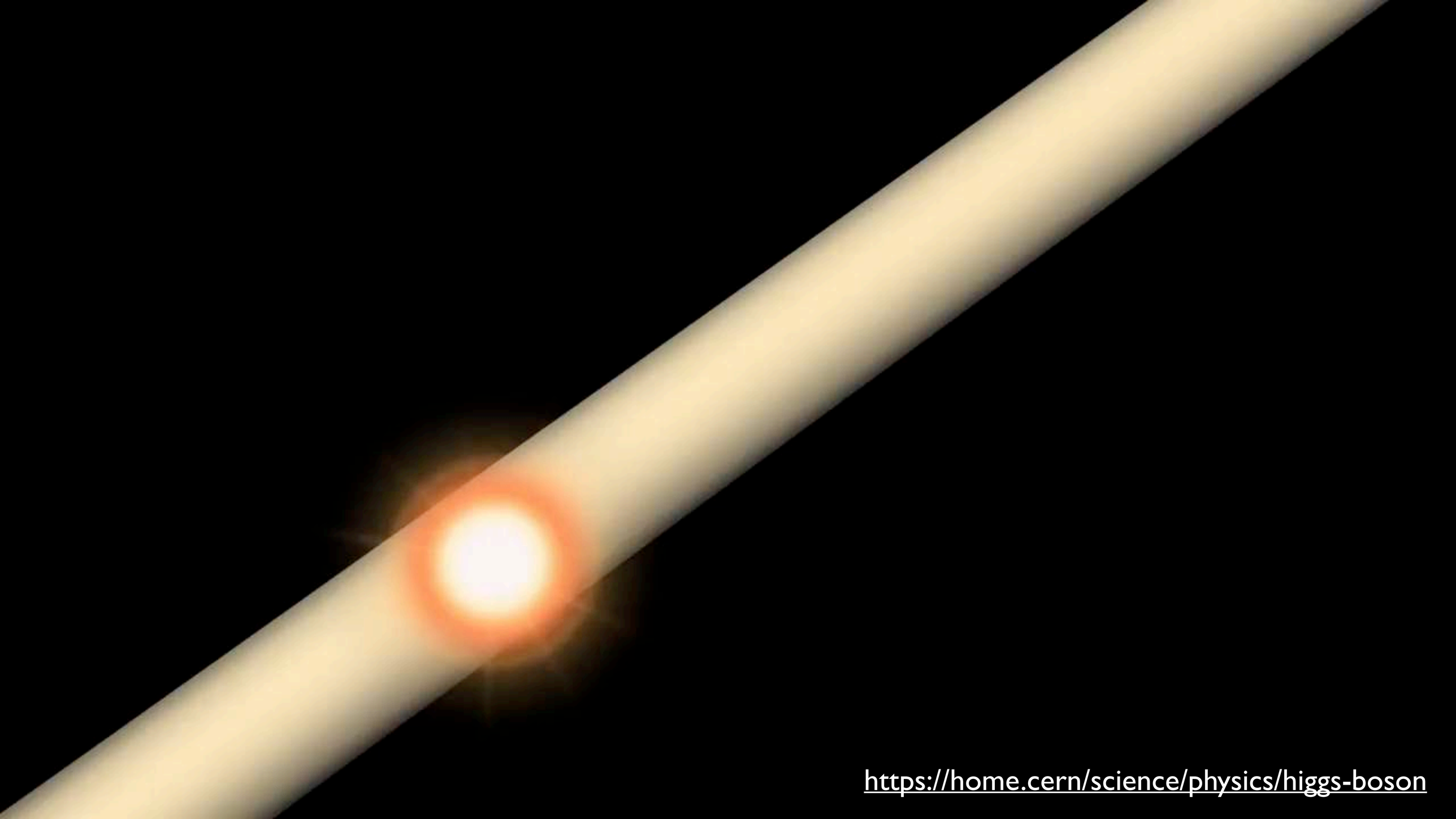




LHC: Gran Colisionador de Hadrones
(*Large Hadron Collider*)


GENEVE
LHC - B
Point 8
CERN
ATLAS
Point 1
ALICE
Point 2
CMS
Point 5
SPS
TI 8
TI 2
LHC - B
ATLAS
ALICE
CMS
LEP/LHC


Muon Detectors
Tile Calorimeter
Liquid Argon Calorimeter
ATLAS
Toroid Magnets
Solenoid Magnet
SCT Tracker
Pixel Detector
TRT Tracker



https://home.cern/science/physics/higgs-boson



https://home.cern/science/physics/higgs-boson

Muon Detectors

Tile Calorimeter

Liquid Argon Calorimeter

ATLAS

ABOUT NEWS SCIENCE RESOURCES SEARCH | EN

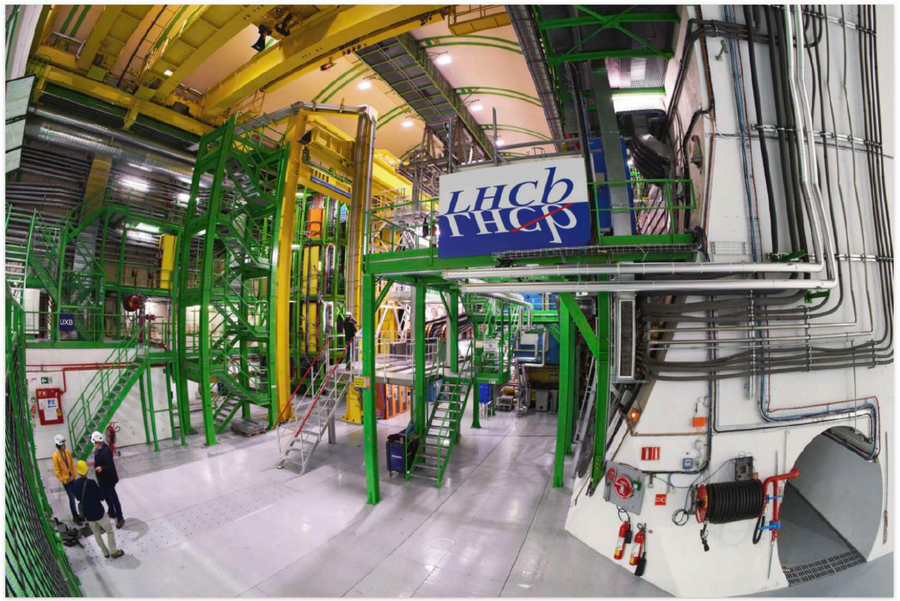
https://home.cern/news/press-release/physics/new-piece-matter-antimatter-puzzle

Voir en français

A new piece in the matter–antimatter puzzle

The LHCb experiment at CERN has revealed a fundamental asymmetry in the behaviour of particles called baryons

25 MARCH, 2025



View of the LHCb experiment in its underground cavern (image: CERN)

Related Articles



The LHC experiment collaborations at CERN rec...

Knowledge sharing | Press release | 7 April, 2025



LHCb sheds light on two pieces of the matter–...

Physics | News | 16 December, 2024



LHCb announces its 2024 collaboration prizes

Experiments | News | 12 August, 2024

View all news

Toroid Magnets

Solenoid Magnet

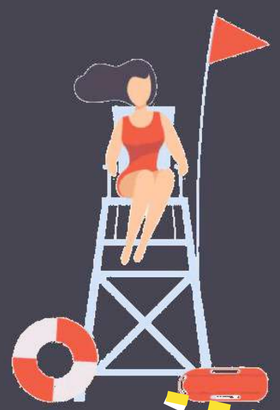
SCT Tracker

Pixel Detector

TRT Tracker

¿Hay algún nexo común entre diferentes leyes de la Física?

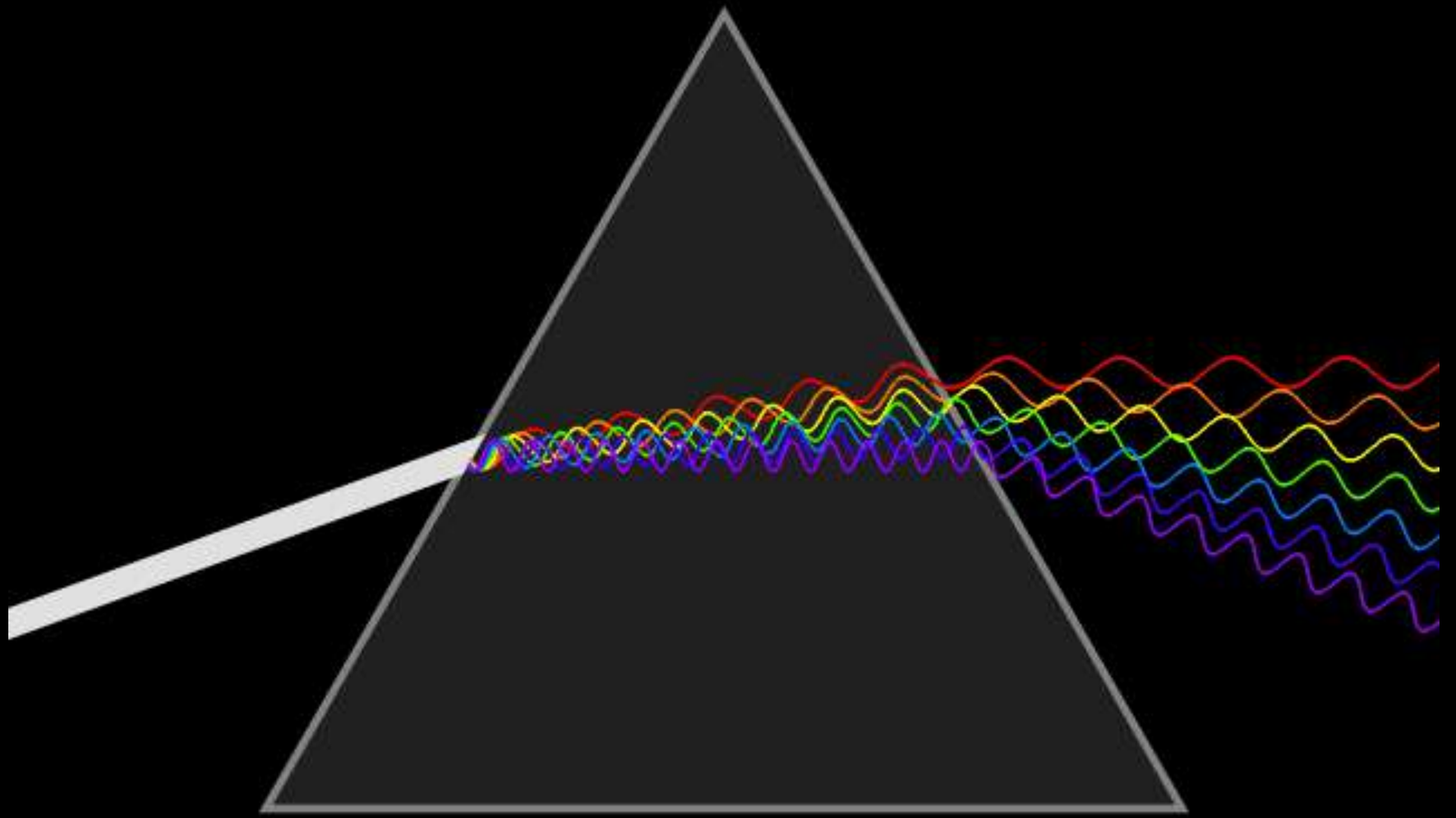
- Principio de mínima acción: la naturaleza "es vaga" y quiere trabajar lo menos posible
  → Ejemplo, el principio de Fermat

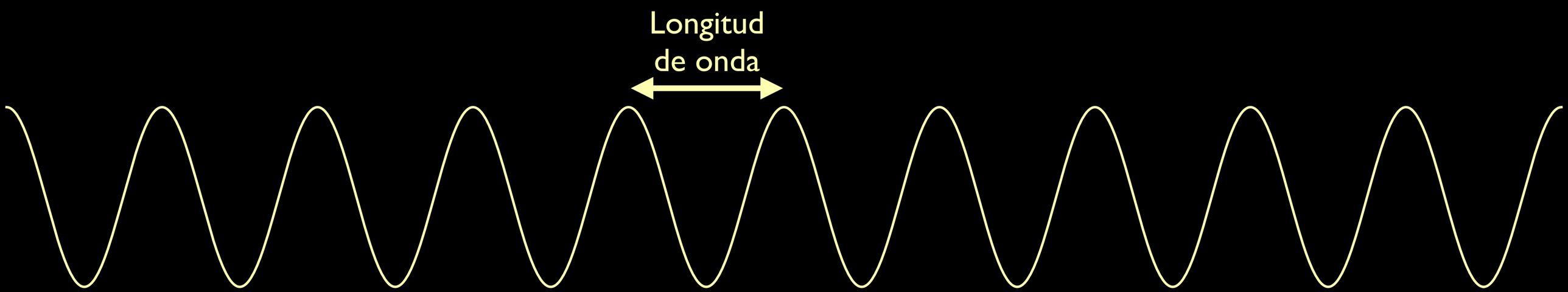


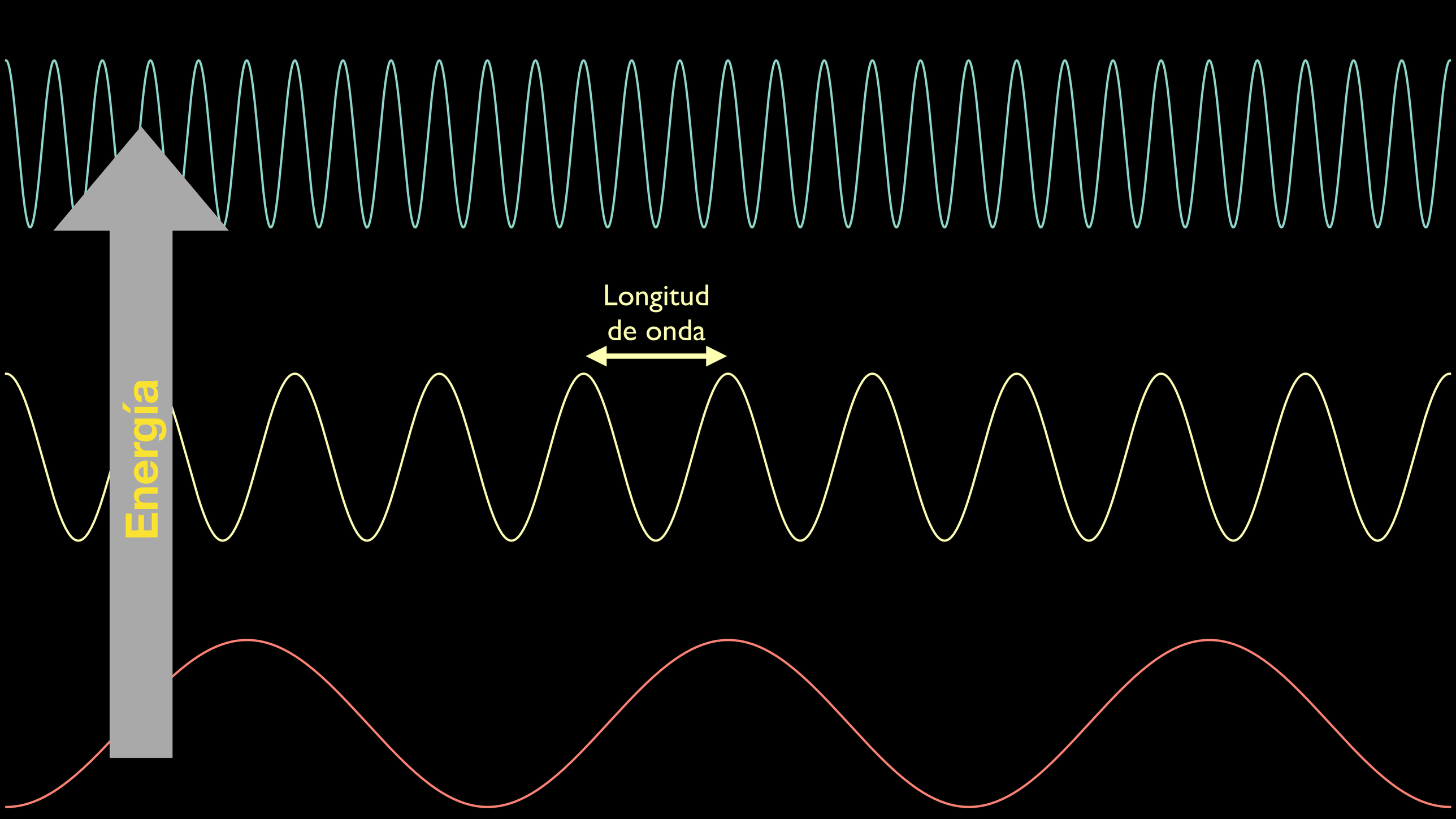
Camino óptimo
(más corto en tiempo)

Camino más corto en distancia






Longitud
de onda


Longitud
de onda
Energía

Principio de incertidumbre de Heisenberg

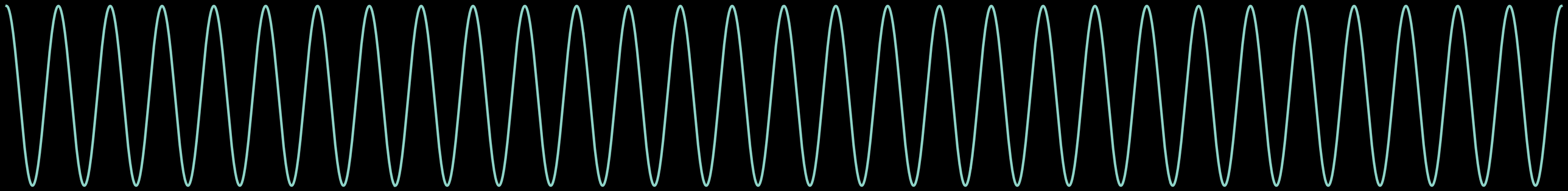
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Si tengo mucho tiempo para medir la energía E de una onda electromagnética, puedo conocer con mucha precisión su longitud de onda λ:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}.$$



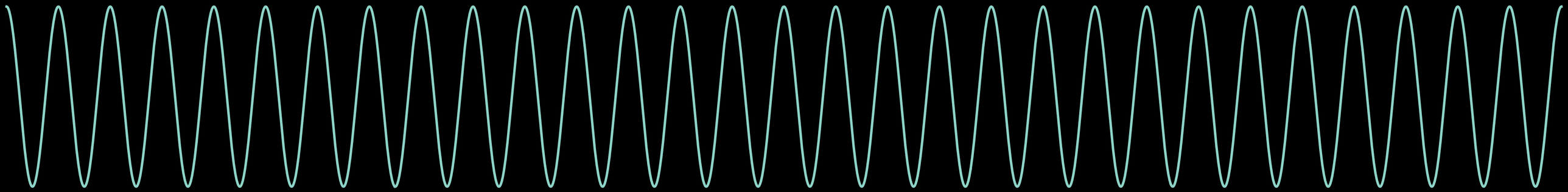
Tiempo $\longrightarrow$



Principio de incertidumbre de Heisenberg

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

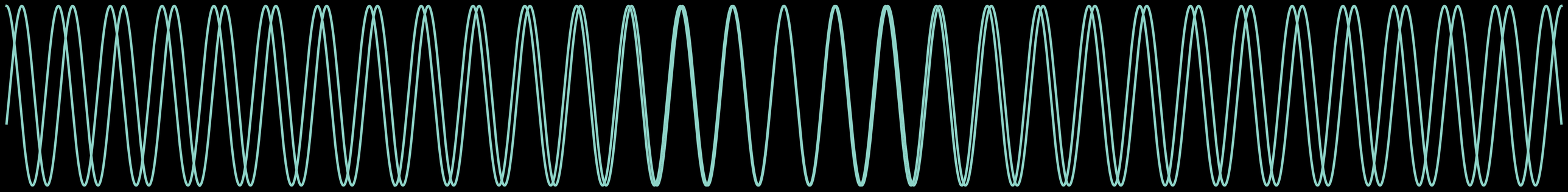
Si tengo menos tiempo para medir la energía de una onda electromagnética, conoceré su energía con menos precisión. La Física Cuántica nos dice que en ese caso tengo una superposición de ondas, compatible con mi desconocimiento sobre su energía.



Principio de incertidumbre de Heisenberg

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Si tengo menos tiempo para medir la energía de una onda electromagnética, conoceré su energía con menos precisión. La Física Cuántica nos dice que en ese caso tengo una superposición de ondas, compatible con mi desconocimiento sobre su energía.

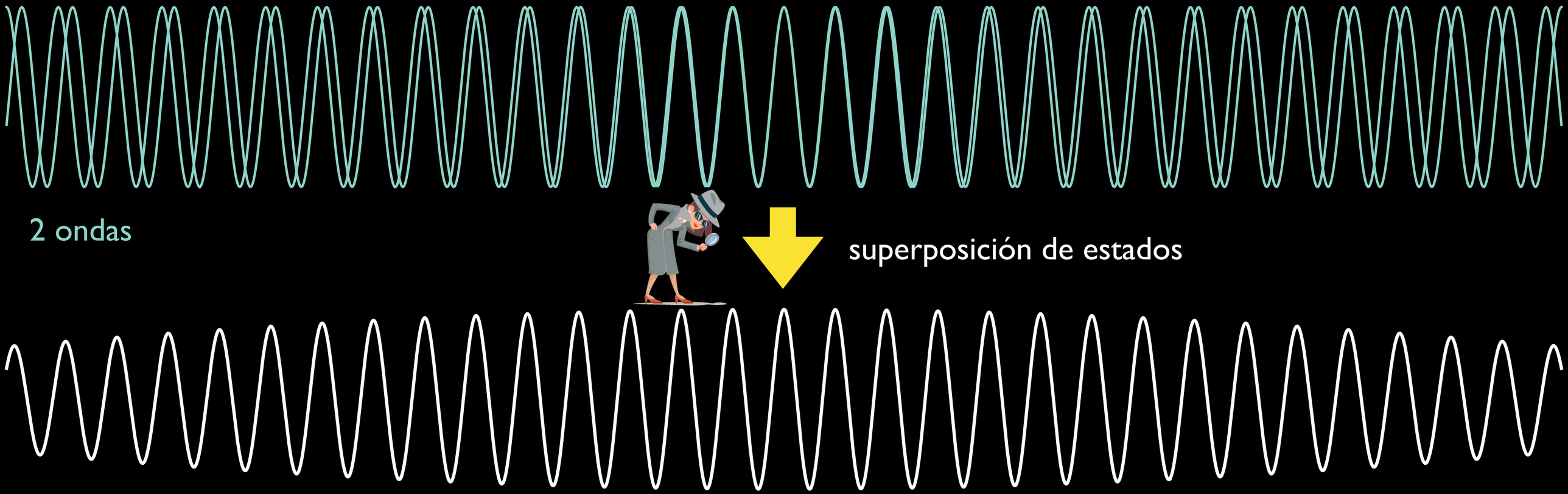


2 ondas

Principio de incertidumbre de Heisenberg

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

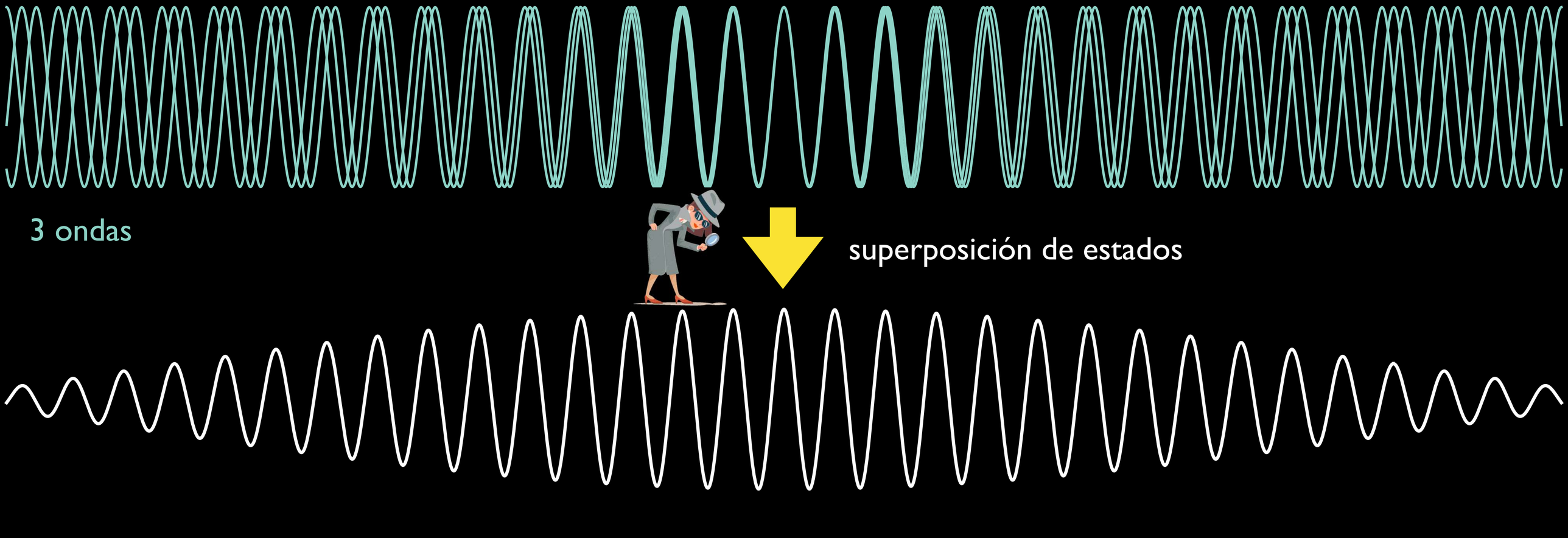
Si tengo menos tiempo para medir la energía de una onda electromagnética, conoceré su energía con menos precisión. La Física Cuántica nos dice que en ese caso tengo una superposición de ondas, compatible con mi desconocimiento sobre su energía.



Principio de incertidumbre de Heisenberg

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

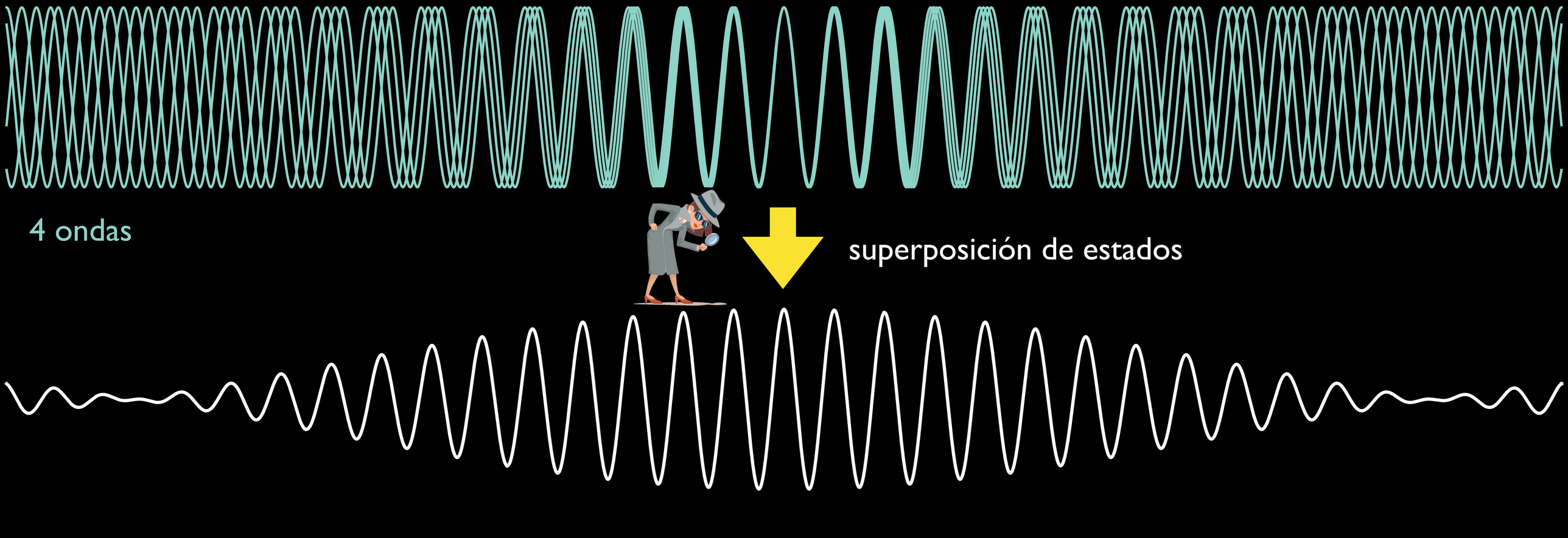
Si tengo menos tiempo para medir la energía de una onda electromagnética, conoceré su energía con menos precisión. La Física Cuántica nos dice que en ese caso tengo una superposición de ondas, compatible con mi desconocimiento sobre su energía.



Principio de incertidumbre de Heisenberg

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

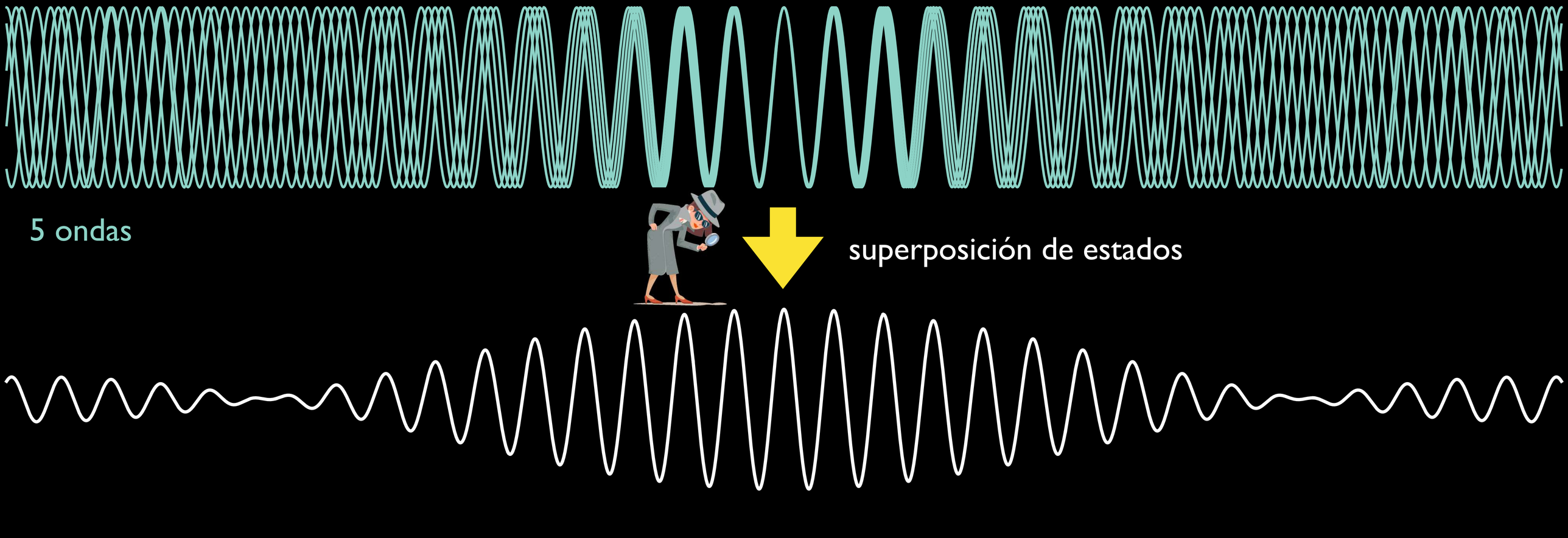
Si tengo menos tiempo para medir la energía de una onda electromagnética, conoceré su energía con menos precisión. La Física Cuántica nos dice que en ese caso tengo una superposición de ondas, compatible con mi desconocimiento sobre su energía.



Principio de incertidumbre de Heisenberg

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

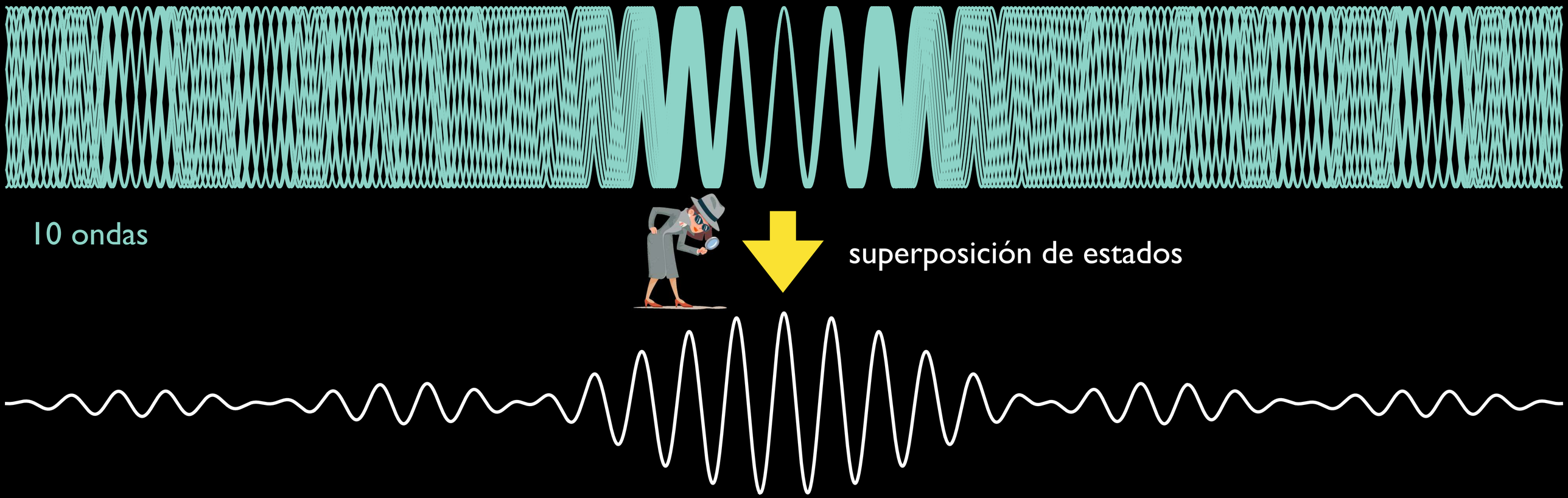
Si tengo menos tiempo para medir la energía de una onda electromagnética, conoceré su energía con menos precisión. La Física Cuántica nos dice que en ese caso tengo una superposición de ondas, compatible con mi desconocimiento sobre su energía.



Principio de incertidumbre de Heisenberg

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

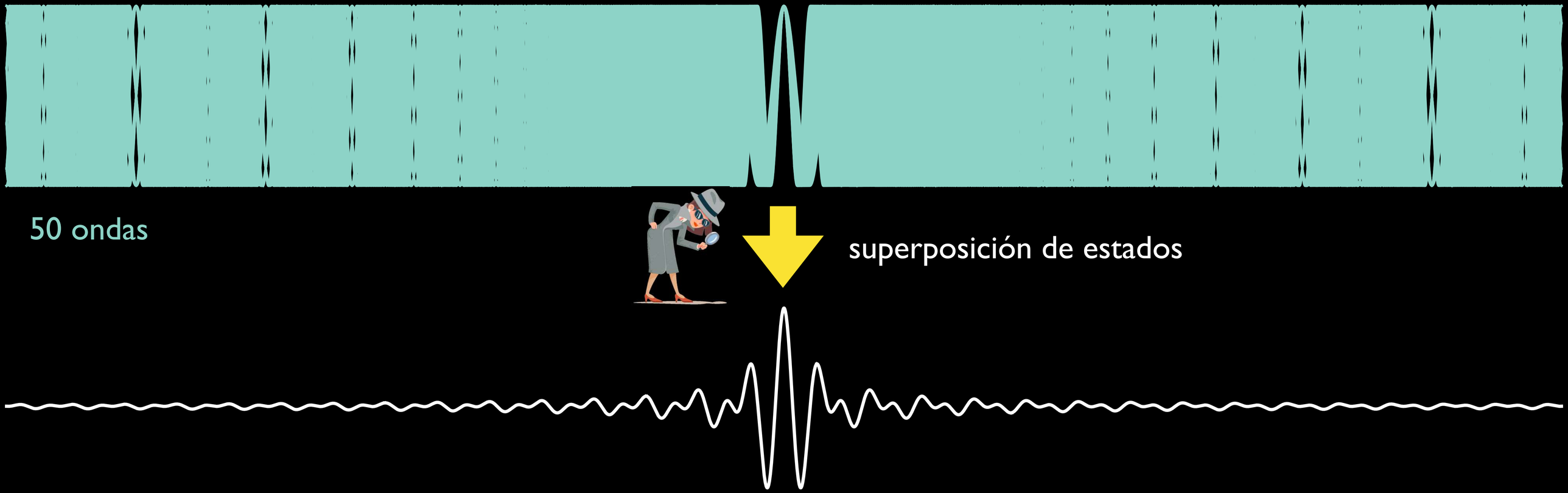
Si tengo menos tiempo para medir la energía de una onda electromagnética, conoceré su energía con menos precisión. La Física Cuántica nos dice que en ese caso tengo una superposición de ondas, compatible con mi desconocimiento sobre su energía.



Principio de incertidumbre de Heisenberg

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

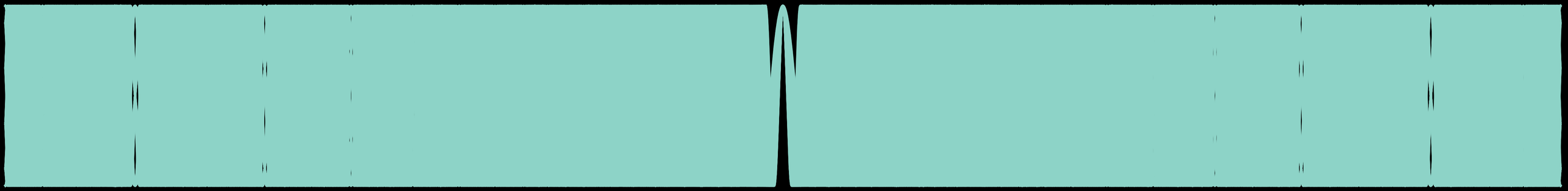
Si tengo menos tiempo para medir la energía de una onda electromagnética, conoceré su energía con menos precisión. La Física Cuántica nos dice que en ese caso tengo una superposición de ondas, compatible con mi desconocimiento sobre su energía.



Principio de incertidumbre de Heisenberg

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Si tengo menos tiempo para medir la energía de una onda electromagnética, conoceré su energía con menos precisión. La Física Cuántica nos dice que en ese caso tengo una superposición de ondas, compatible con mi desconocimiento sobre su energía.



100 ondas



superposición de estados

¡La luz se comporta como una partícula!



¿Hay algún nexo común entre diferentes leyes de la Física?

- Principio de mínima acción: la naturaleza "es vaga" y quiere trabajar lo menos posible
  → Ejemplo, el principio de Fermat

- Teorema de Noether

Emmy Noether
(1882-1935)







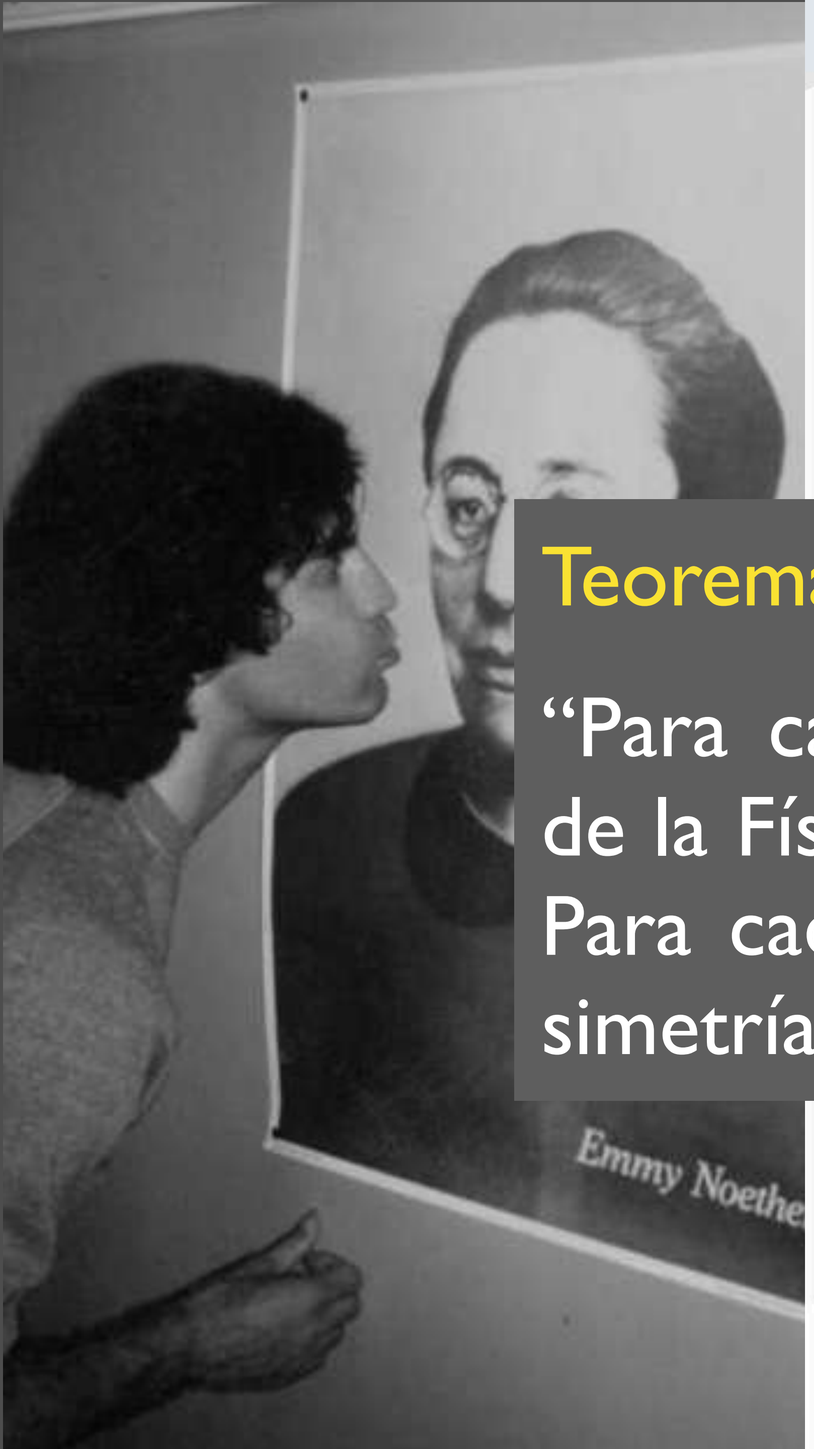
Emmy Noether was a math and physics pioneer who refused to sit on the sidelines. Shut out of academia due to her gender, she persisted and earned a PhD. Banned from teaching, she did it anyway and eventually held an official position. Hounded out of Germany by the Nazis, she went to the US and taught at Bryn Mawr and Princeton. Today, Noether's discoveries in symmetry and conservation underpin much of modern physics.

Perimeter Institute is committed to encouraging and empowering women in physics. From research fellowships to school outreach, Perimeter's Emmy Noether Initiatives aim to inspire and support women contributing to our understanding of the universe. Learn more at **www.insidetheperimeter.ca/donate/women**.

PERIMETER INSTITUTE











Teorema de Noether:

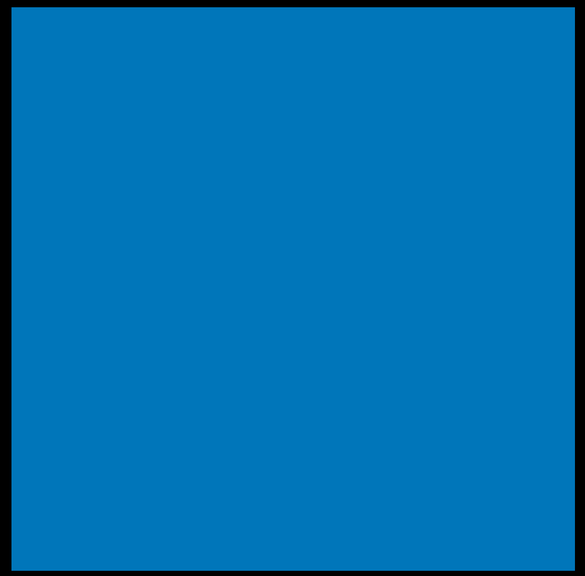
"Para cada simetría continua de las leyes de la Física existe una ley de conservación. Para cada ley de conservación existe una simetría continua."



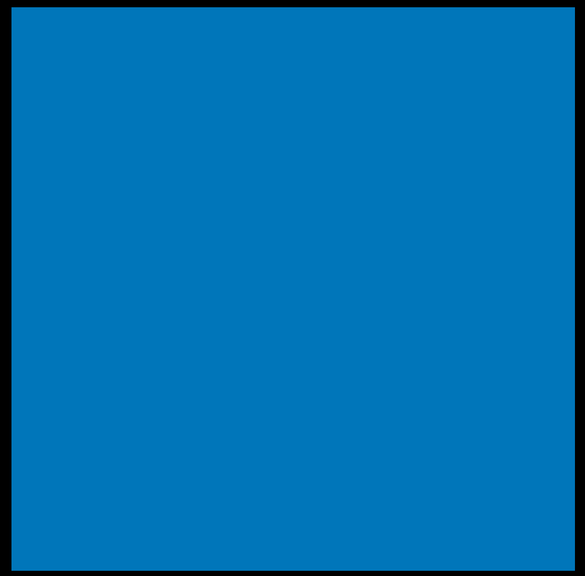




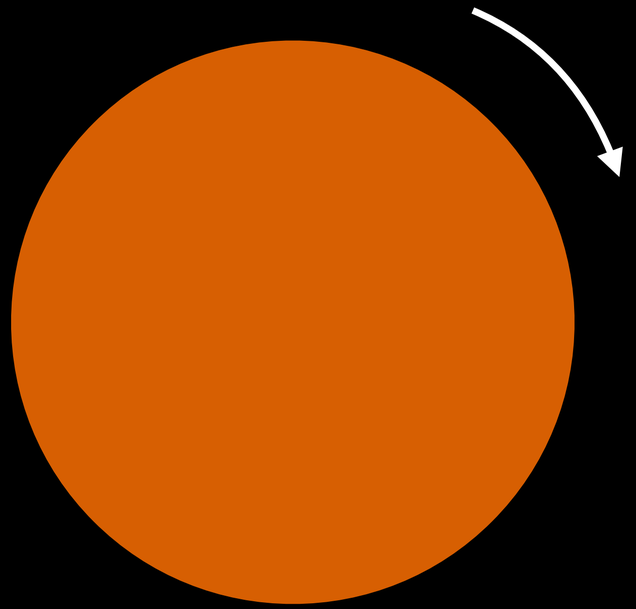
Un cuadrado presenta una simetría discreta:
puedo rotarlo 90, 180, 270 o 360 grados y
obtengo el mismo objeto.



Un cuadrado presenta una simetría discreta: puedo rotarlo 90, 180, 270 o 360 grados y obtengo el mismo objeto.



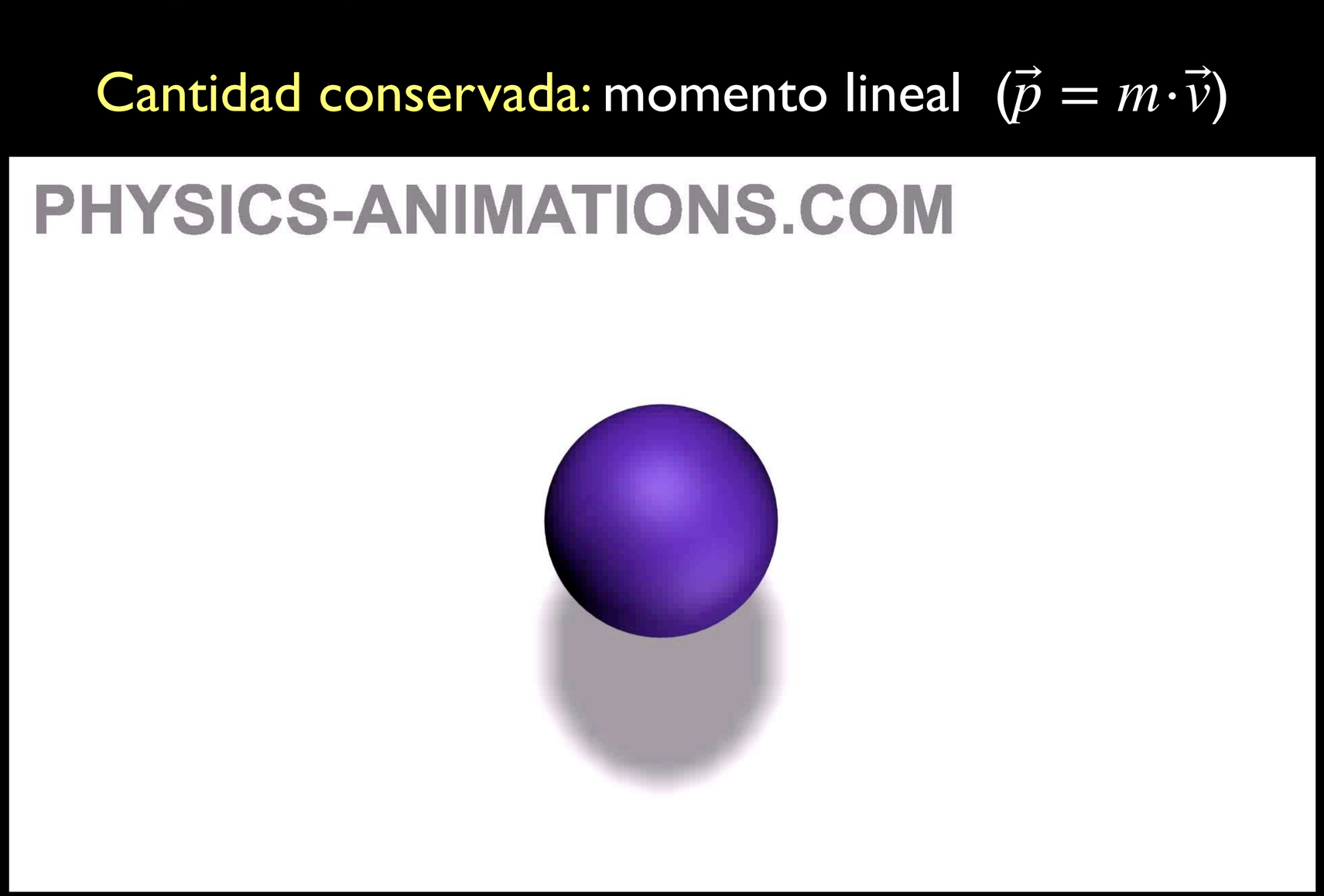
Un círculo presenta una simetría continua: puedo rotarlo cualquier ángulo arbitrario y obtengo el mismo objeto.



Simetría: desplazamientos espaciales

Si repito un experimento en sitios distintos, el resultado no cambia.

Cantidad conservada: momento lineal $(\vec{p} = m \cdot \vec{v})$

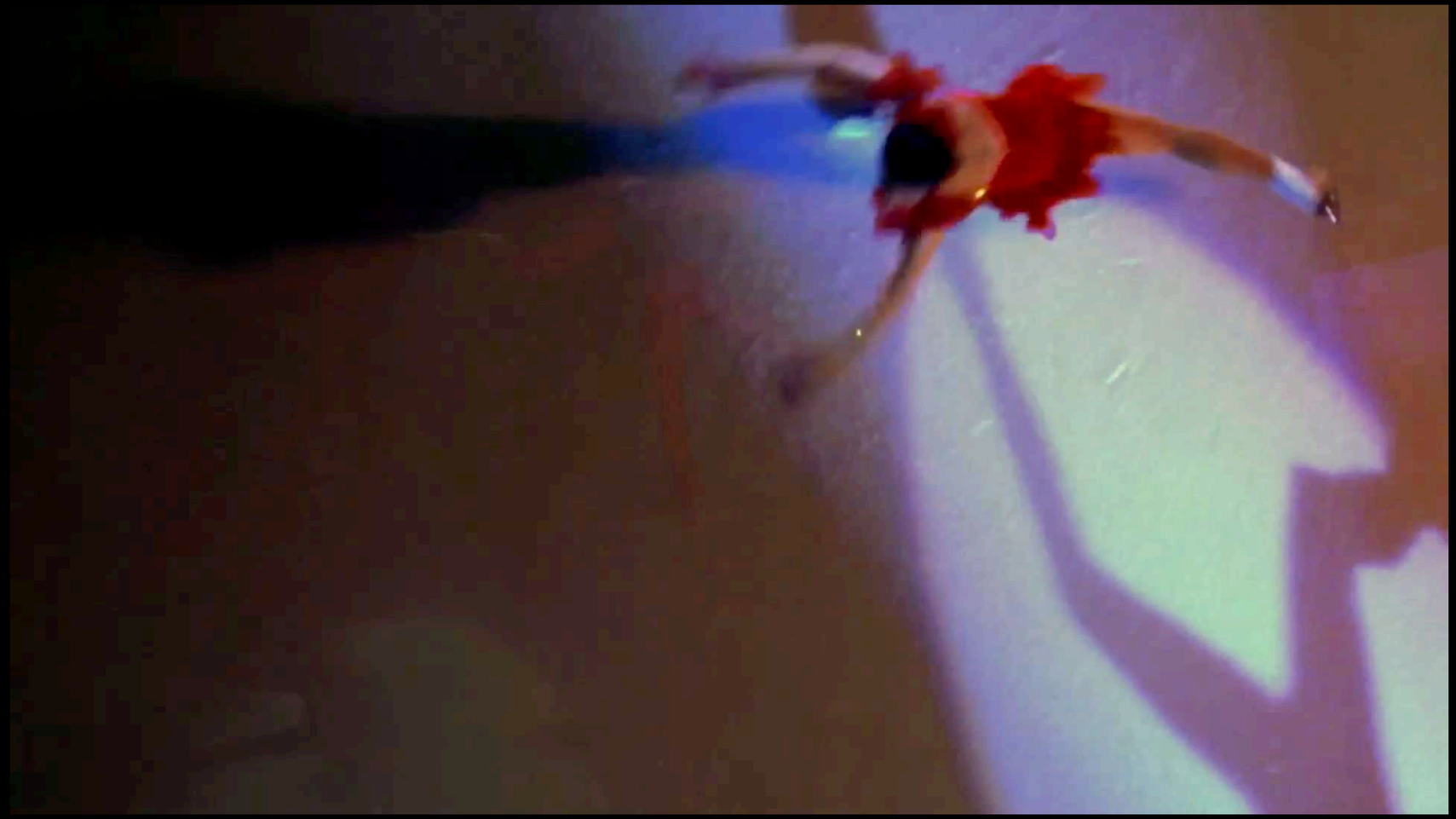


https://www.youtube.com/watch?v=4v2RHtBTbj8

Simetría: rotaciones espaciales

Si giro un experimento un ángulo cualquiera (sin moverme de sitio), el resultado no cambia.

Cantidad conservada: momento angular ($\vec{L} = I \cdot \vec{\omega}$)

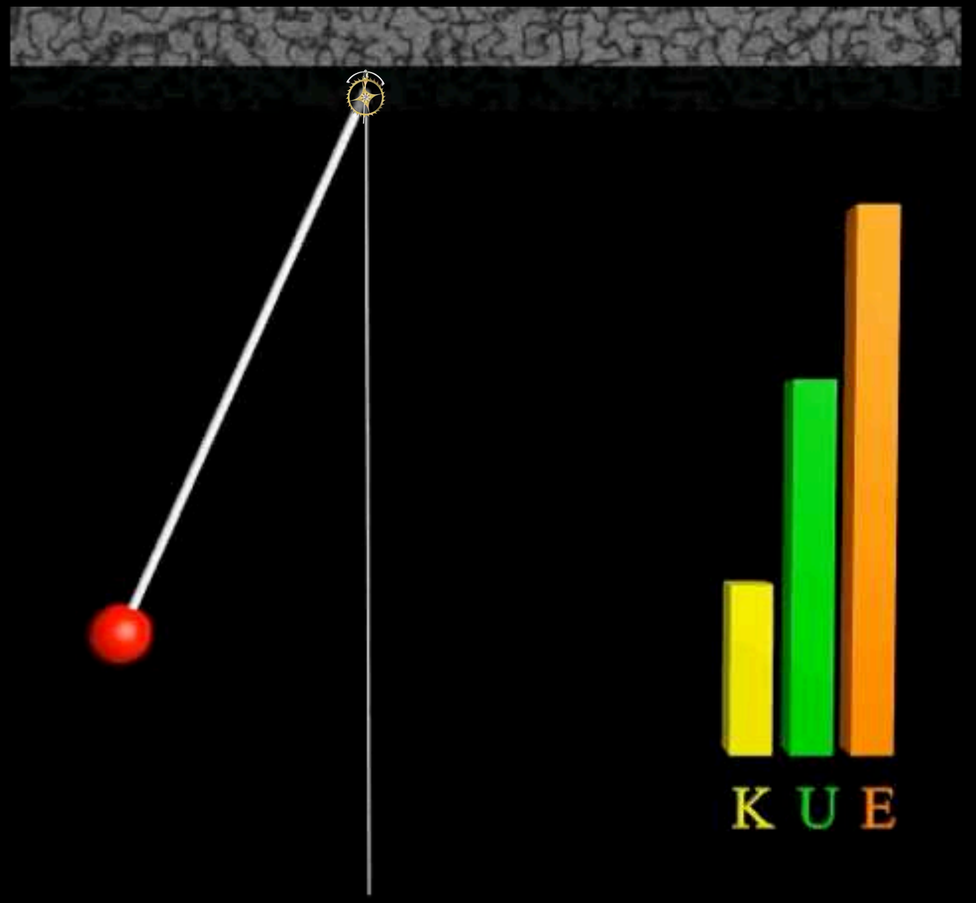


https://www.youtube.com/watch?v=FmnkQ2ytlO8

Simetría: traslación temporal

Si repito un experimento en otro momento el resultado no cambia.

Cantidad conservada: energía



K: energía cinética

U: energía potencial

E = K + U energía total
(se conserva)

https://www.youtube.com/watch?v=jyHFXTZmWgI

¿Hay algún nexo común entre diferentes leyes de la Física?

- Principio de mínima acción: la naturaleza "es vaga" y quiere trabajar lo menos posible
  → Ejemplo, el principio de Fermat

- Teorema de Noether

→ Hay simetrías ligadas al espacio-tiempo que conducen a la conservación del momento lineal, momento angular y energía

→ Hay simetrías matemáticas más profundas que se aplican a los campos que usamos para describir las partículas elementales

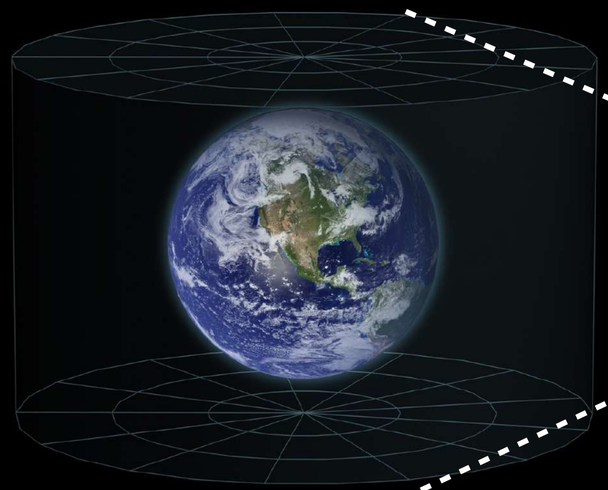
¿Esto no era una conferencia sobre cosmología?

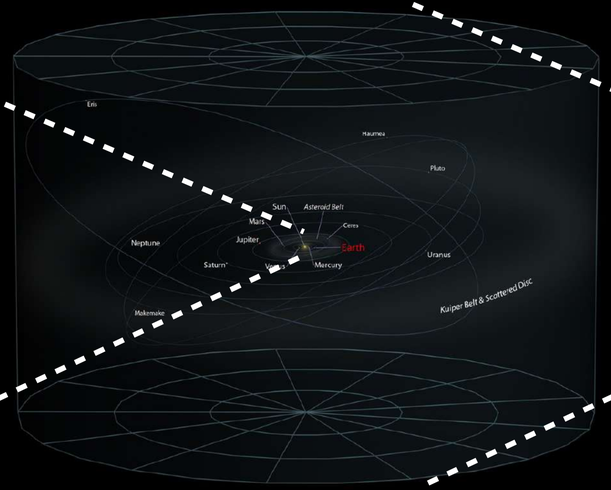
La Tierra

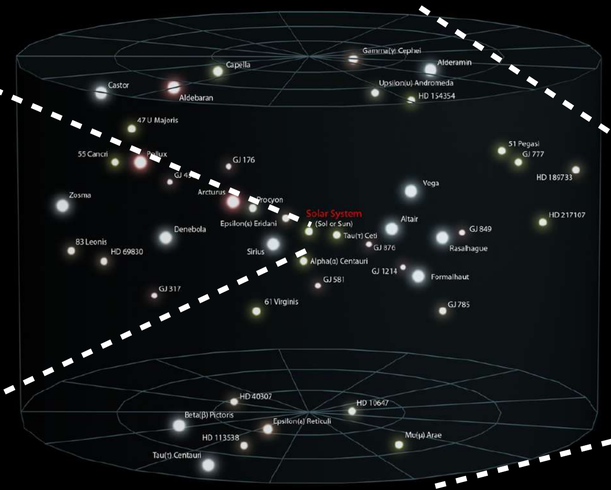
El Sistema Solar

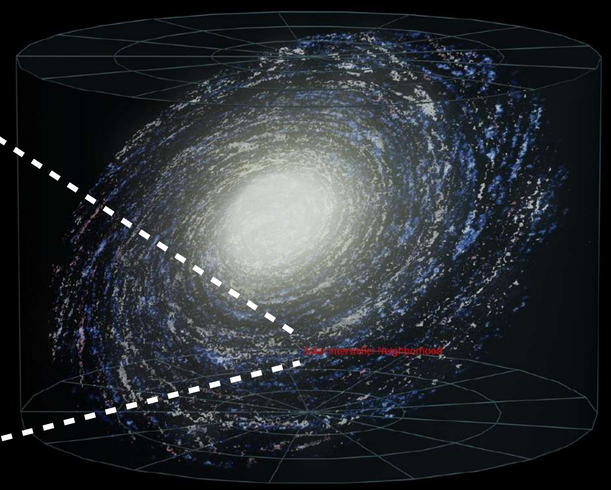
Estrellas vecinas al Sol

La Vía Láctea, nuestra galaxia







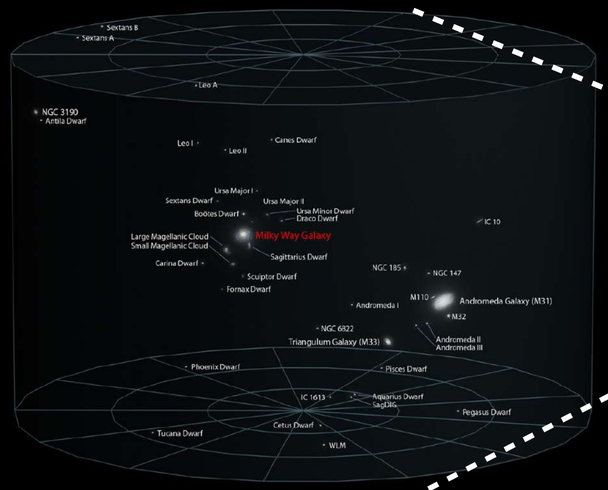


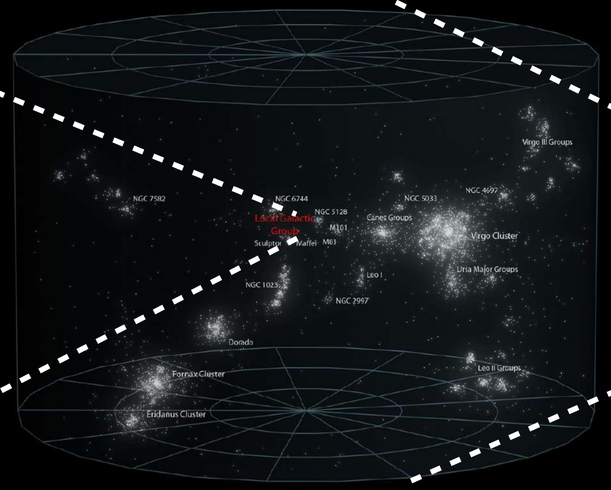
El Grupo Local de Galaxias

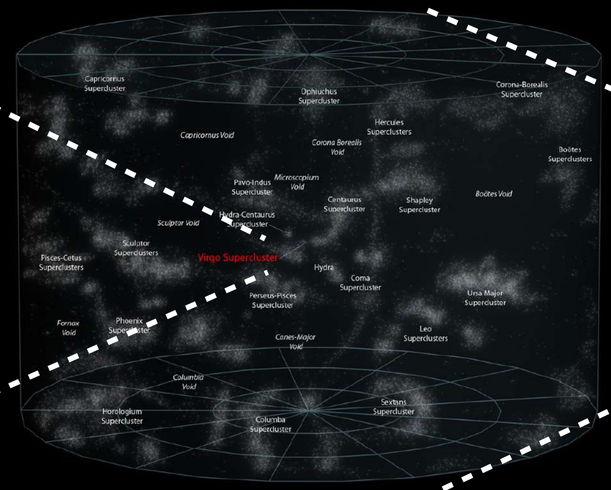
El supercúmulo de Virgo

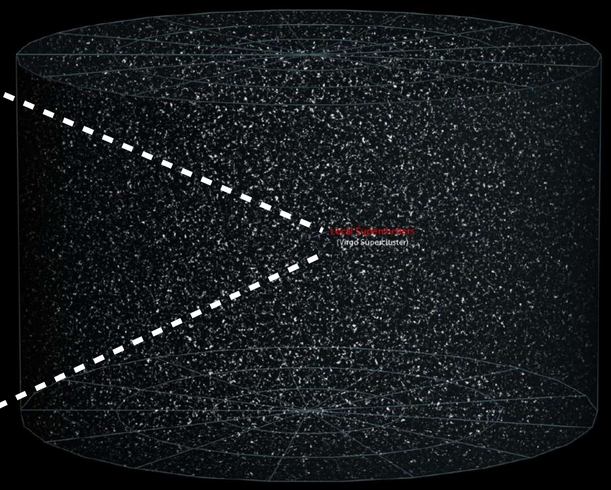
Supercúmulos locales

El universo observable







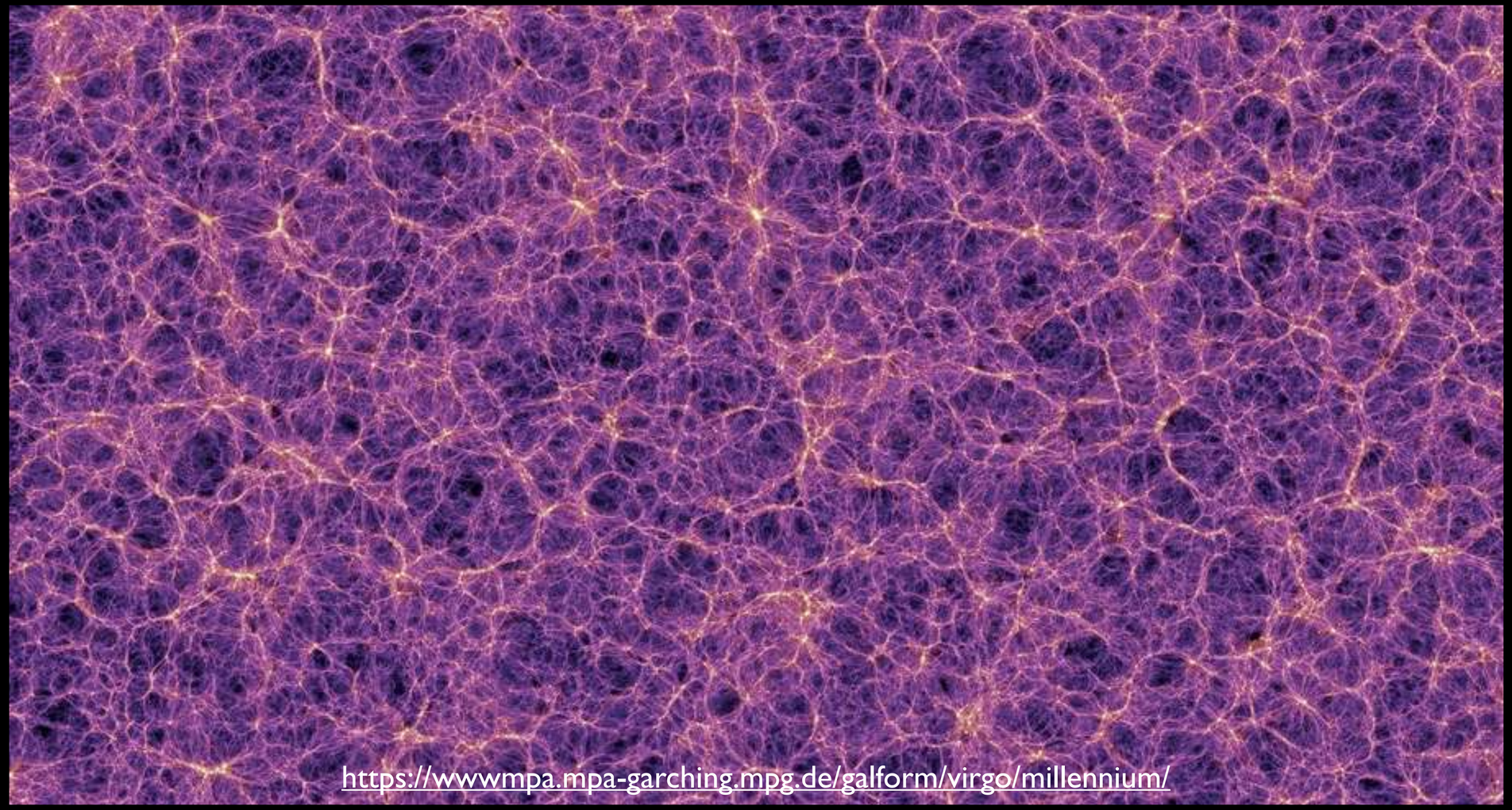


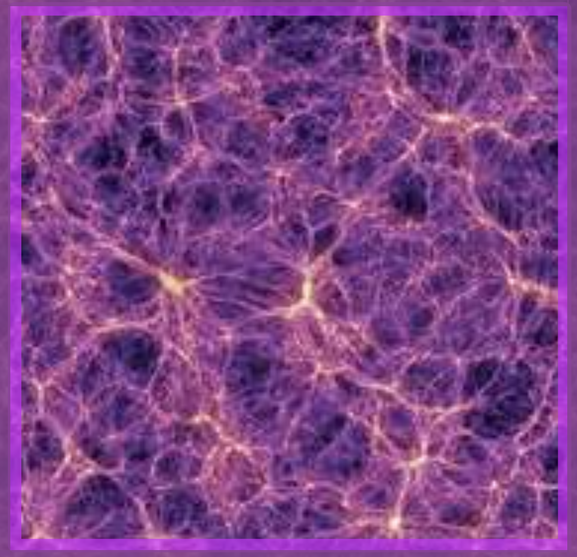
https://en.wikipedia.org/wiki/Universe#/media/File:Earth's_Location_in_the_Universe_SMALLER_(JPEG).jpg

El Principio Cosmológico

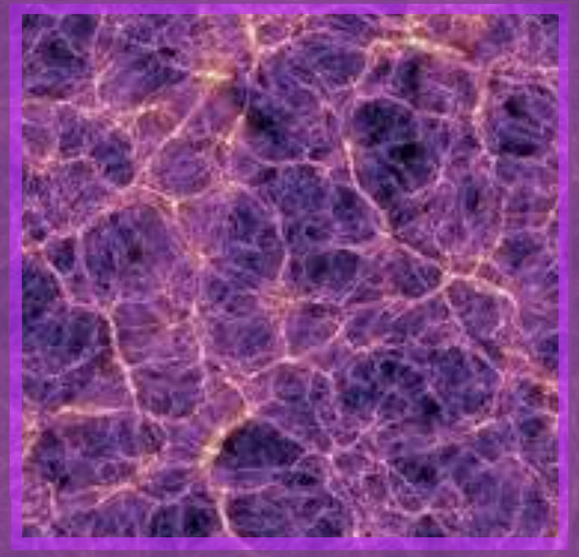
Ampliación del principio copernicano: la Tierra no ocupa una posición especial en el Universo

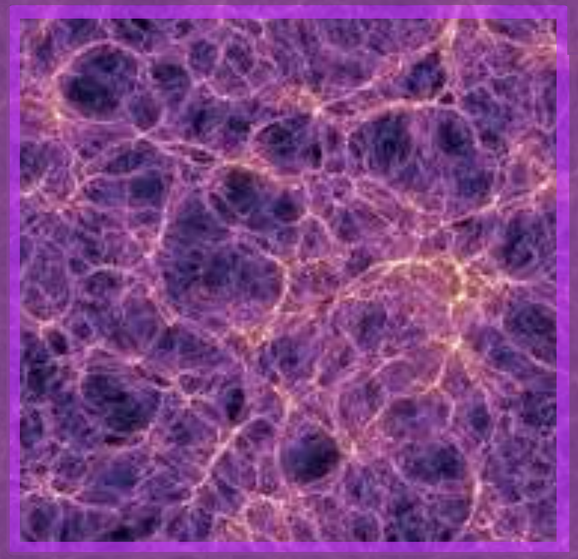
En grandes escalas, el Universo es homogéneo e isótropo

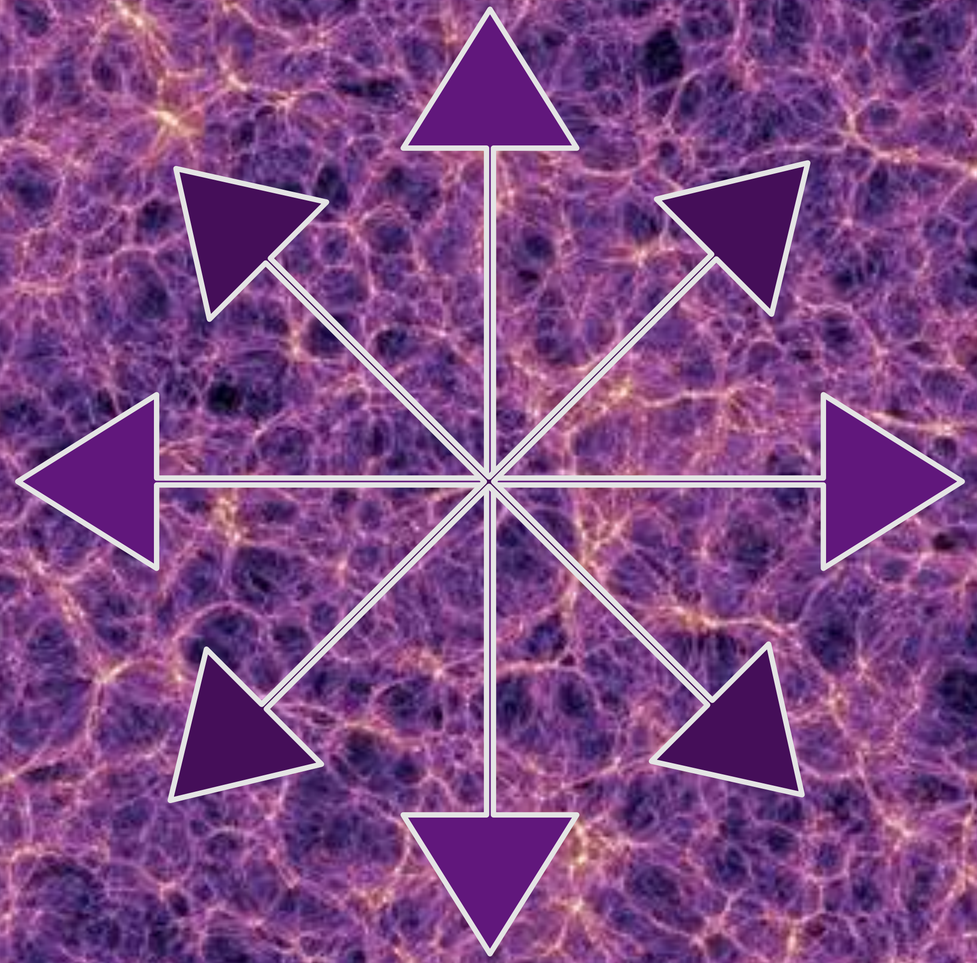




En grandes escalas,
el Universo es **homogéneo**
(similar en todos los sitios)





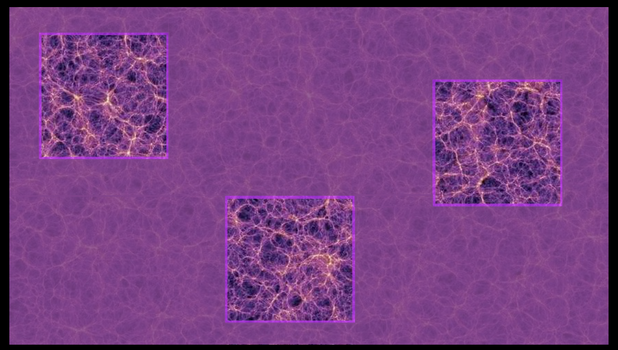


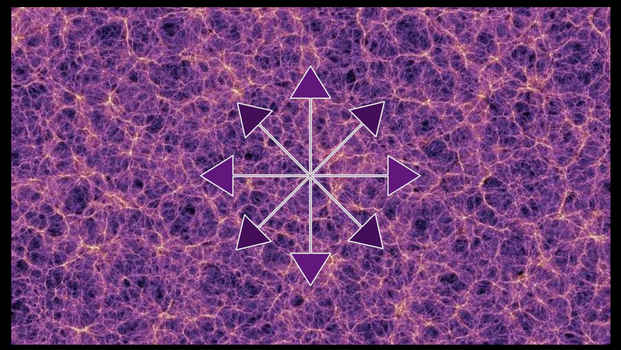
En grandes escalas, el Universo es **isótropo**
(similar en todas las direcciones)

El Principio Cosmológico

Ampliación del principio copernicano: la Tierra no ocupa una posición especial en el Universo

En grandes escalas, el Universo es homogéneo e isótropo





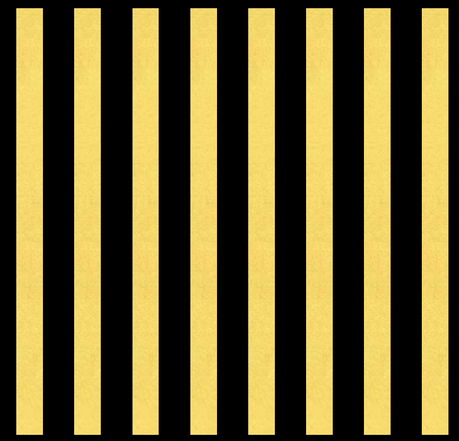
Para que se cumpla: "grandes escalas" significa distancias > 200 Mpc (por encima del tamaño de los supercúmulos de galaxias)

Es una hipótesis de trabajo para la construcción de modelos del Universo.

Corroborada por las observaciones (distribución de galaxias y de la radiación de fondo)

¡Podemos enunciar leyes universales!

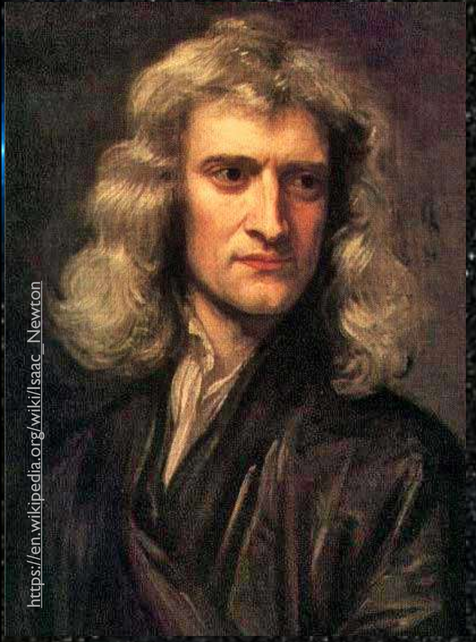
Una propiedad no implica la otra:



homogéneo (no isótropo)



isótropo (no homogéneo)



https://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton

Isaac Newton
(1642-1726)

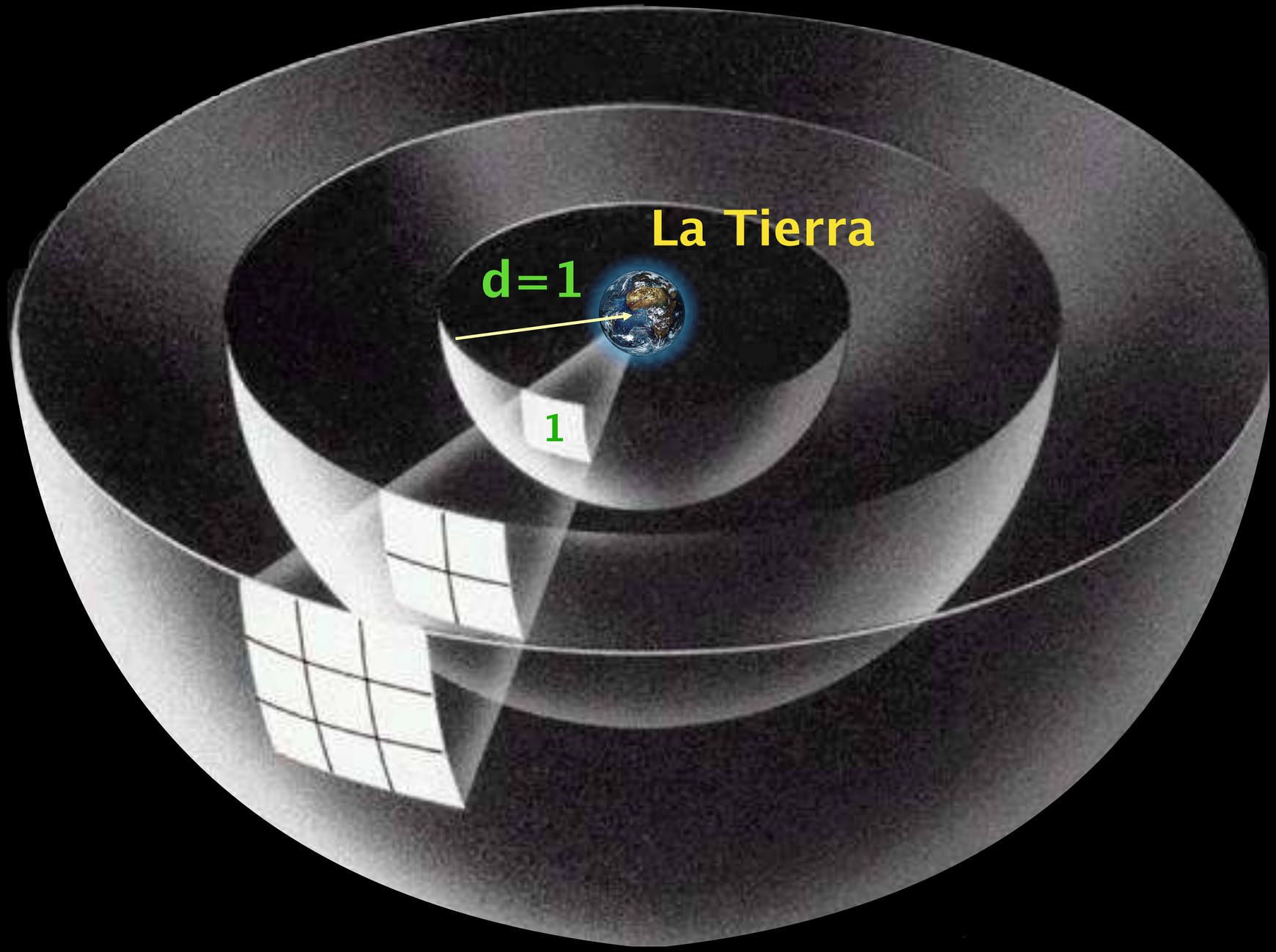
¿Tamaño del Universo?

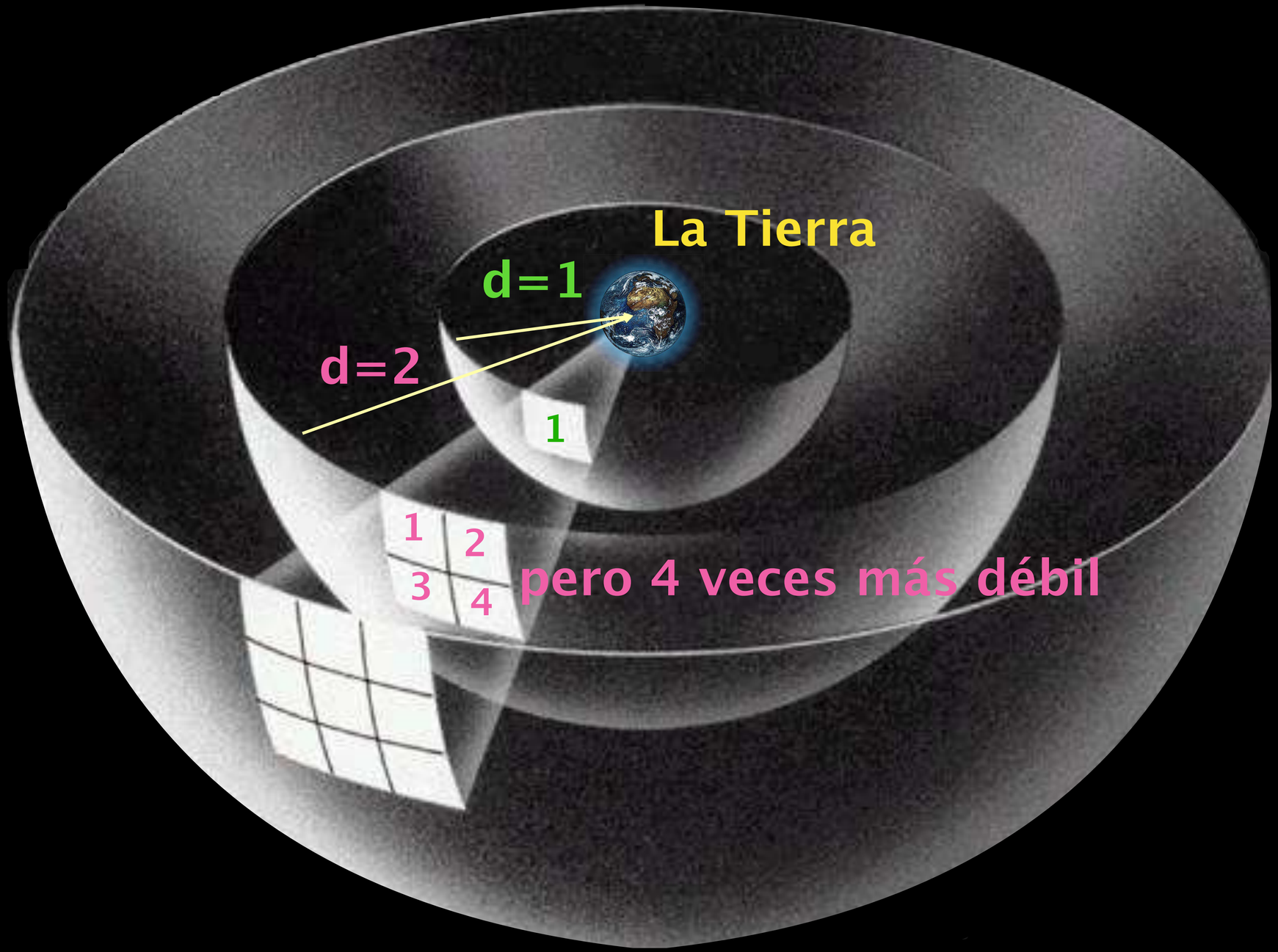


Infinito o colapsaría por acción de la gravedad

¿Por qué el cielo por la noche es negro?




La Tierra
d=1
1

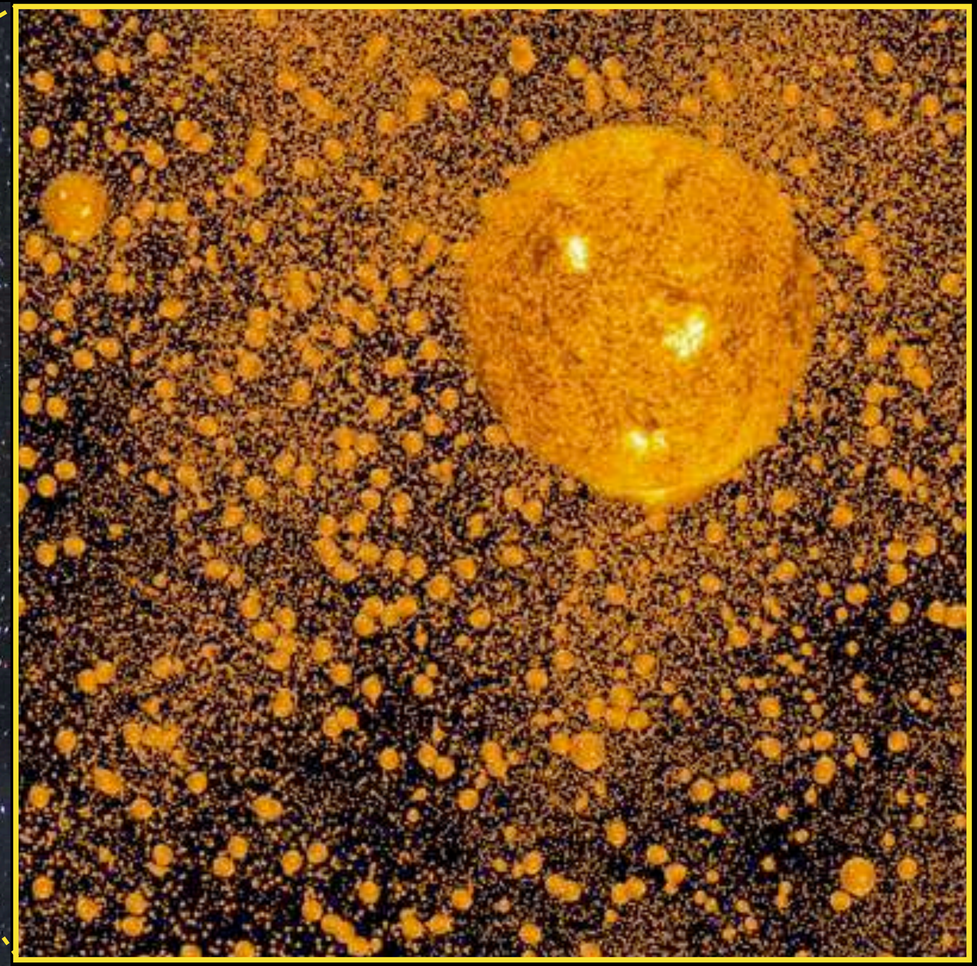

La Tierra
d=1
d=2
1
1
2
3
4
pero 4 veces más débil


La Tierra
d=1
d=2
d=3
1
1
2
3
4
pero 4 veces más débil
1
2
3
4
5
6
7
8
9
pero 9 veces más débil

¡Pero el cielo es negro!

Posibles respuestas:

- Hay materia interestelar que absorbe la radiación (¡no funciona!)
- A mayores distancias hay menos estrellas o son menos luminosas (¿por qué?)
- El Universo no es infinito (¿por qué no colapsa?)
- El Universo tiene una edad finita y no ha dado tiempo a que llegue la luz de las estrellas más lejanas (Edgar Allen Poe)





https://apod.nasa.gov/apod/ap070330.html

© Miloslav Druckmuller

¡El universo tuvo un origen!

El mejor modelo cosmológico disponible es el del "Big Bang" (Gran Explosión)

¿En qué pruebas se basa?

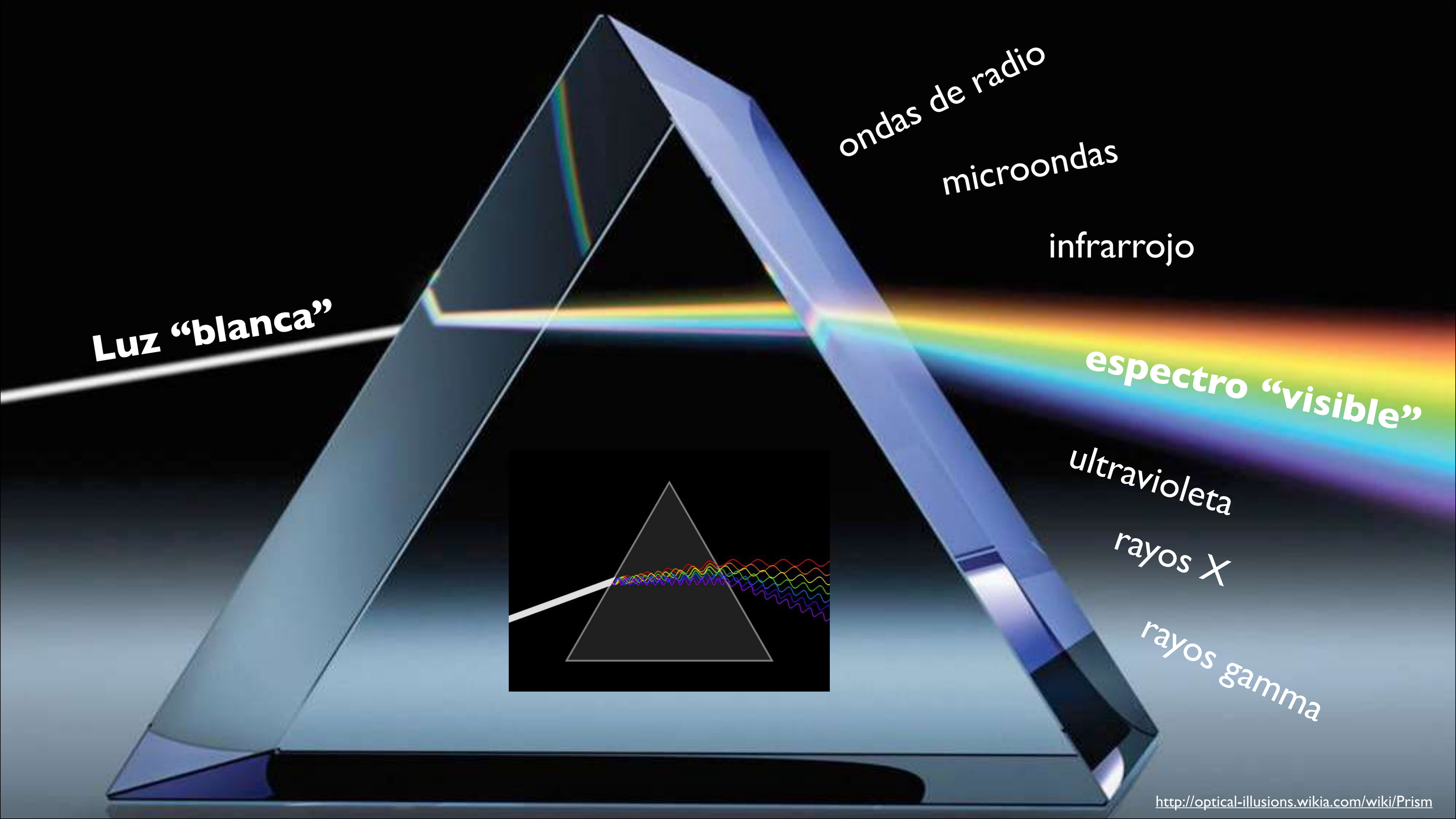
- Expansión del Universo
- Detección de una radiación cósmica de fondo en microondas
- Abundancias de elementos químicos: nucleosíntesis primordial

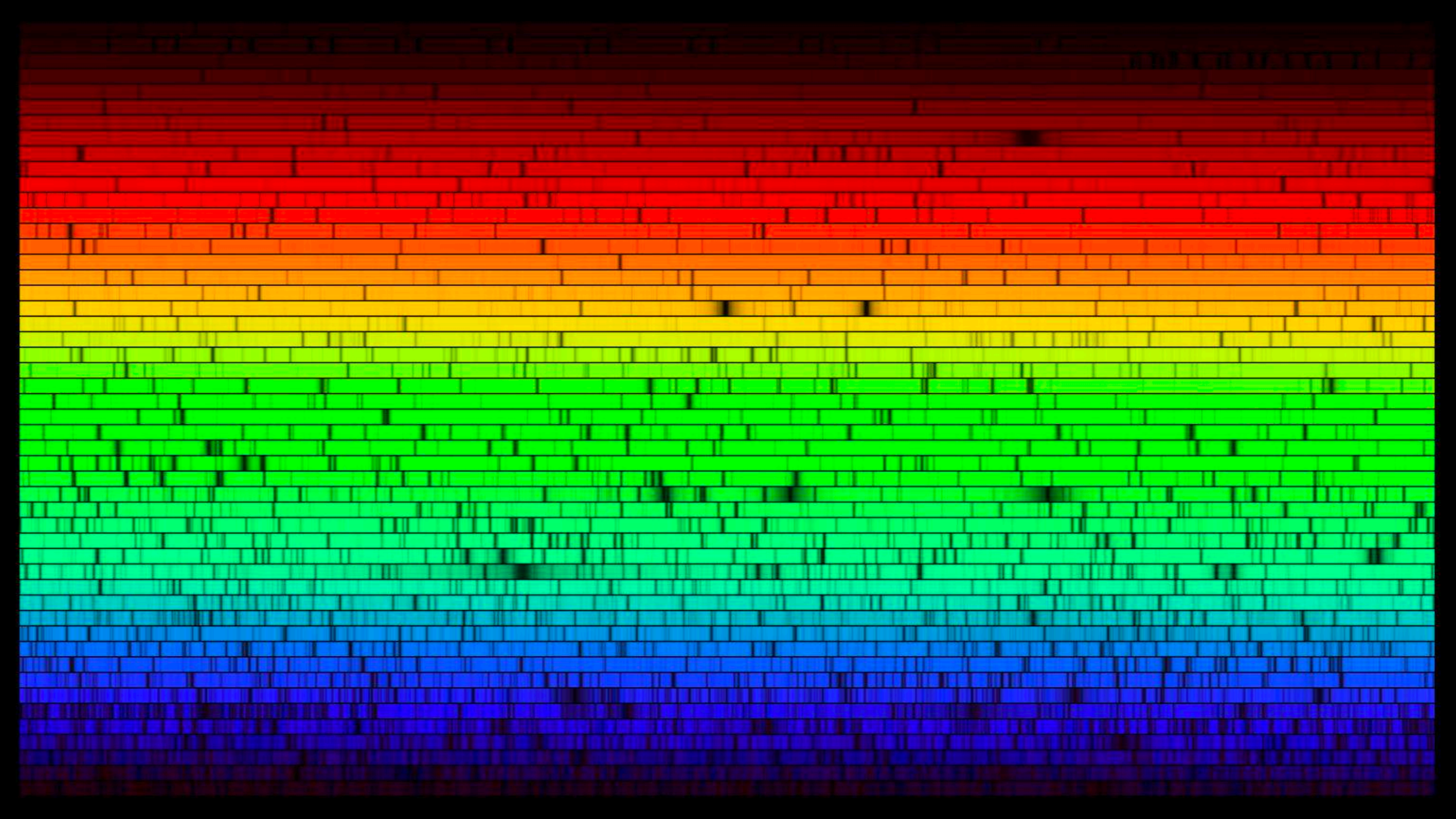
¡El universo tuvo un origen!

El mejor modelo cosmológico disponible es el del "Big Bang" (Gran Explosión)

¿En qué pruebas se basa?

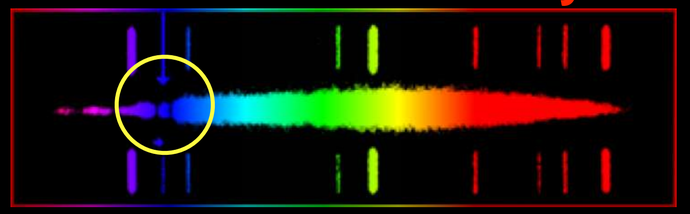
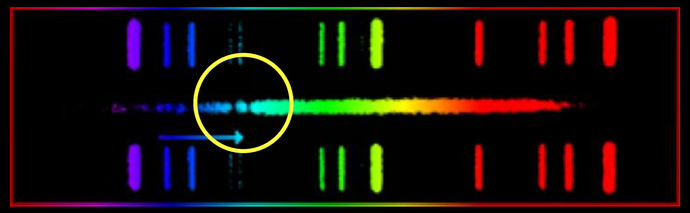
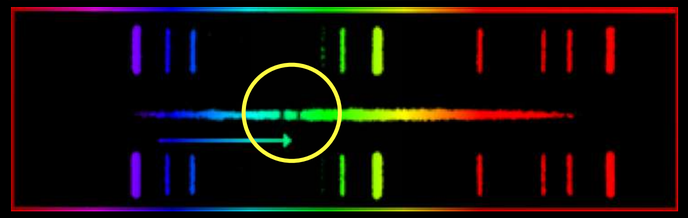
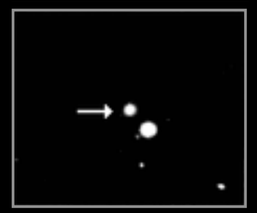
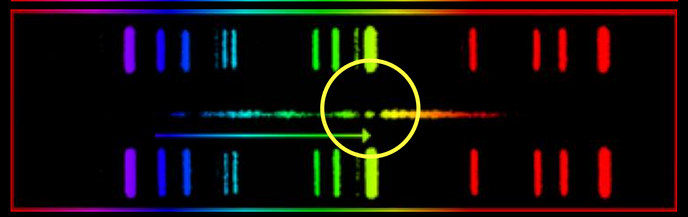
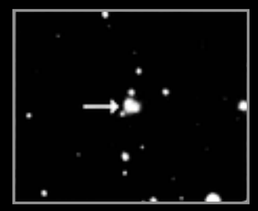
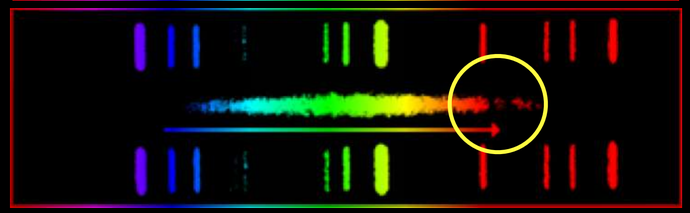
- Expansión del Universo
  - Detección de una radiación cósmica de fondo en microondas
  - Abundancias de elementos químicos: nucleosíntesis primordial


ondas de radio
microondas
infrarrojo
Luz “blanca”
espectro “visible”
ultravioleta
rayos X
rayos gamma
http://optical-illusions.wikia.com/wiki/Prism

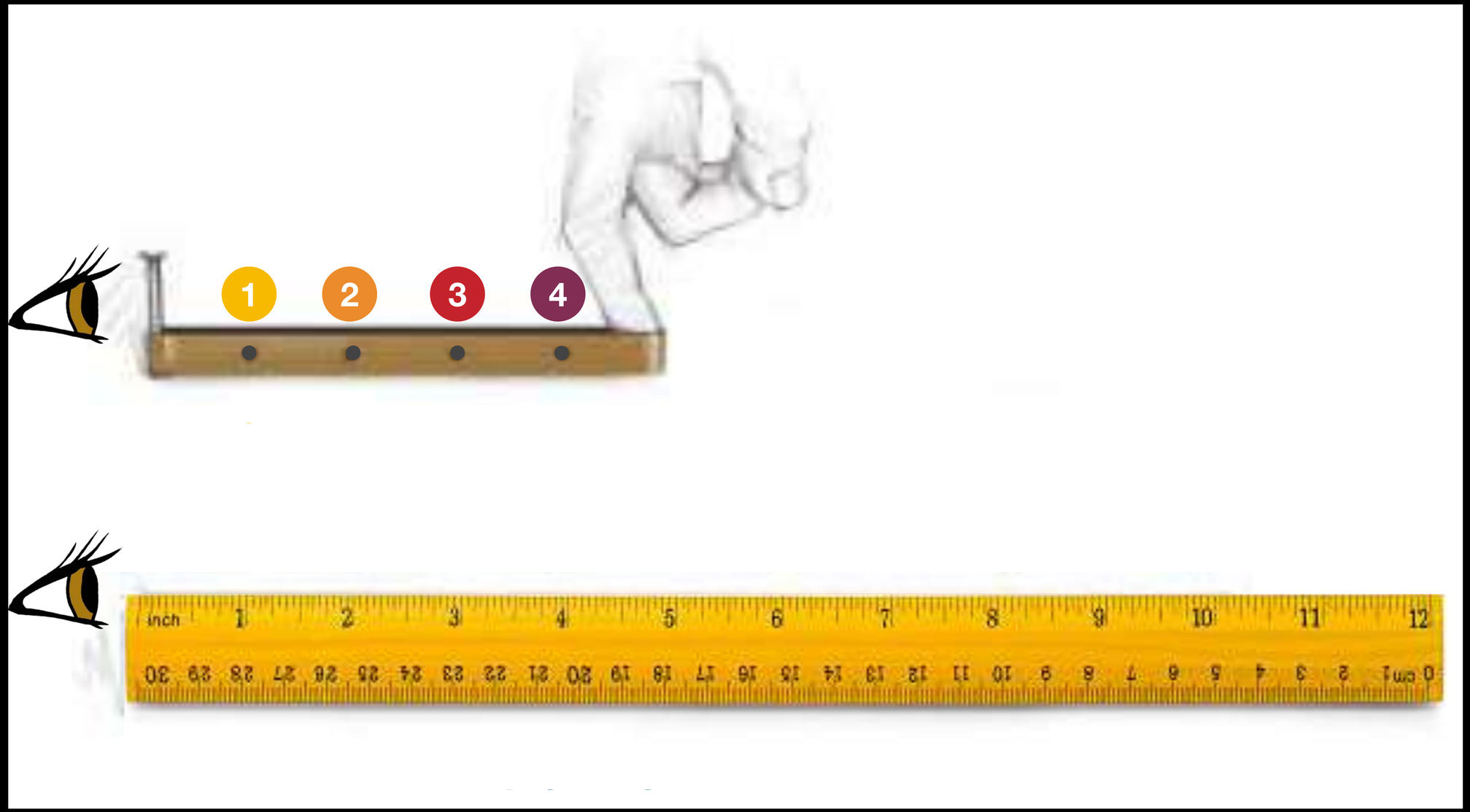


Desplazamiento al rojo

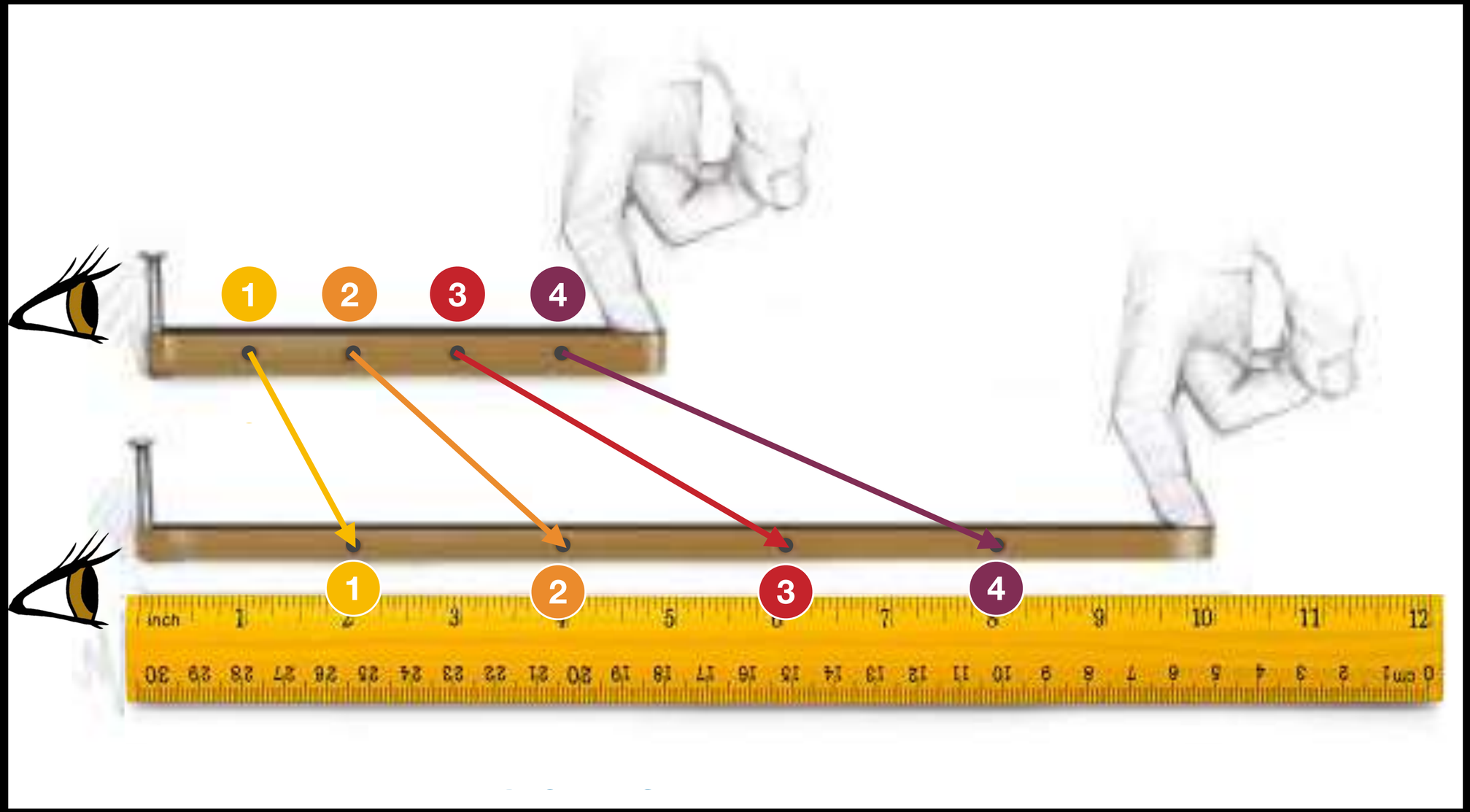
$$z = \frac{\lambda_{\text{observada}} - \lambda_{\text{emitida}}}{\lambda_{\text{emitida}}}$$

Galaxia en…	Imagen	Espectro (←AZUL ROJO→)	Velocidad (km/s)	Distancia (Mpc)
Virgo			1210	17
Osa Mayor			15000	214
Corona Boreal			21600	309
Boyero			39300	561
Hydra			61200	874

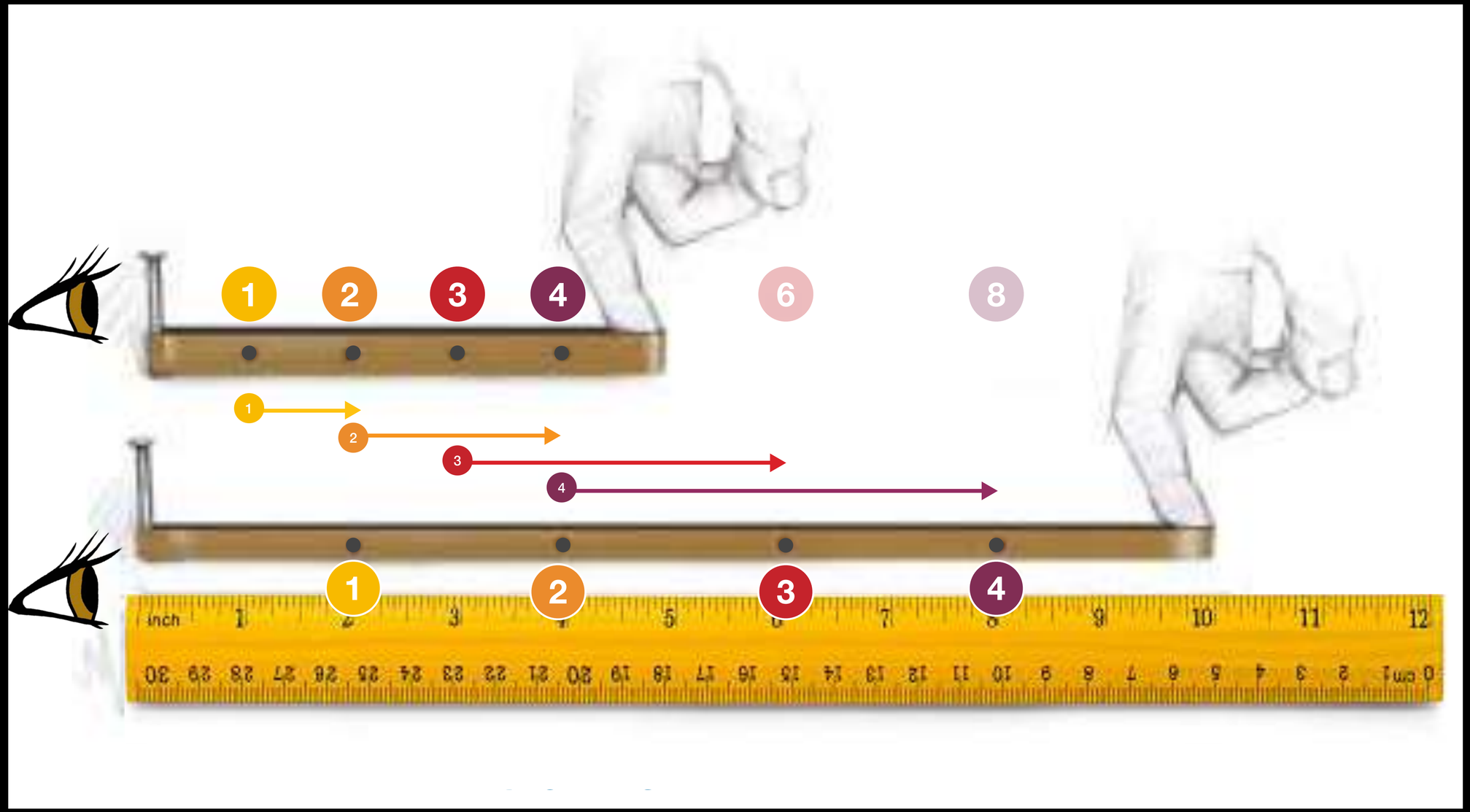
La expansión del espacio



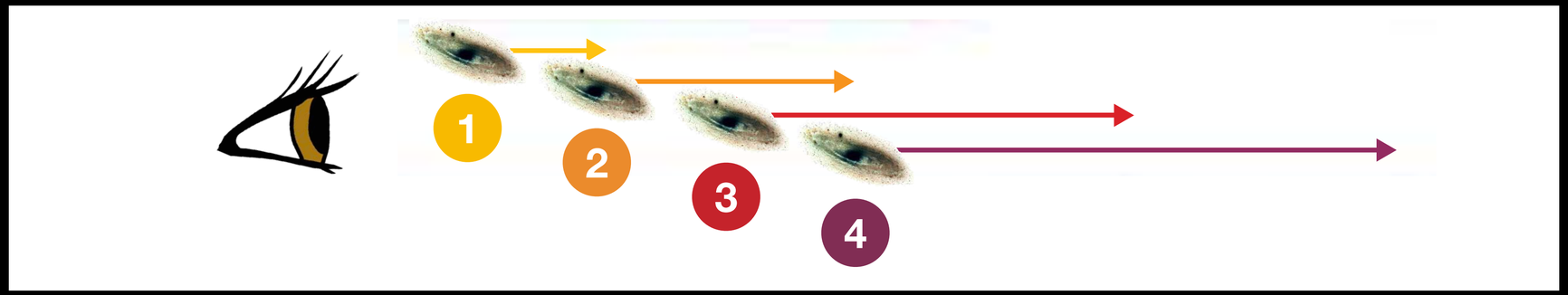
La expansión del espacio



La expansión del espacio

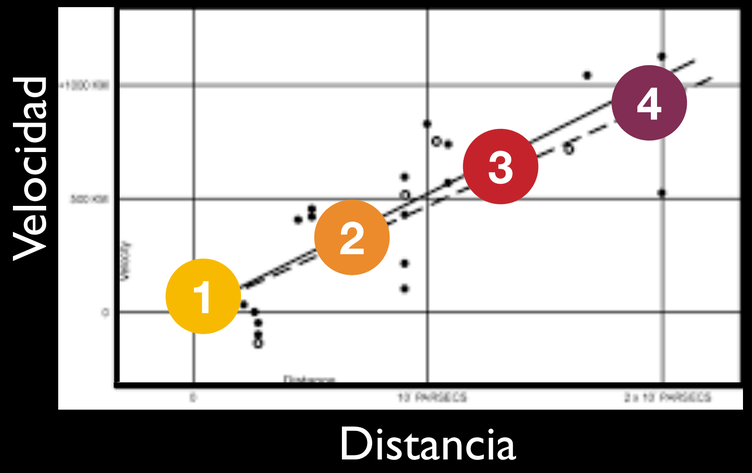


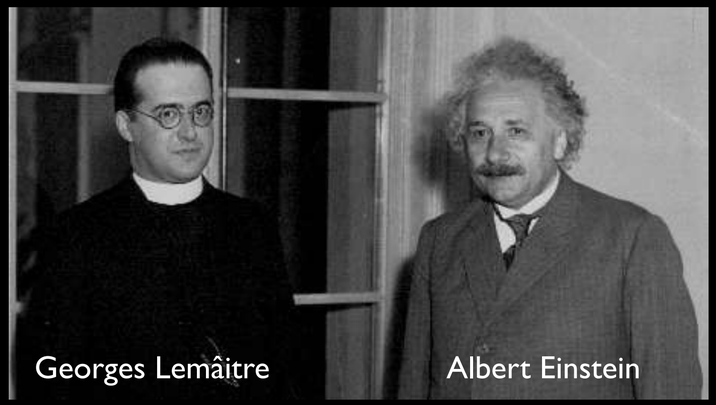
La expansión del espacio

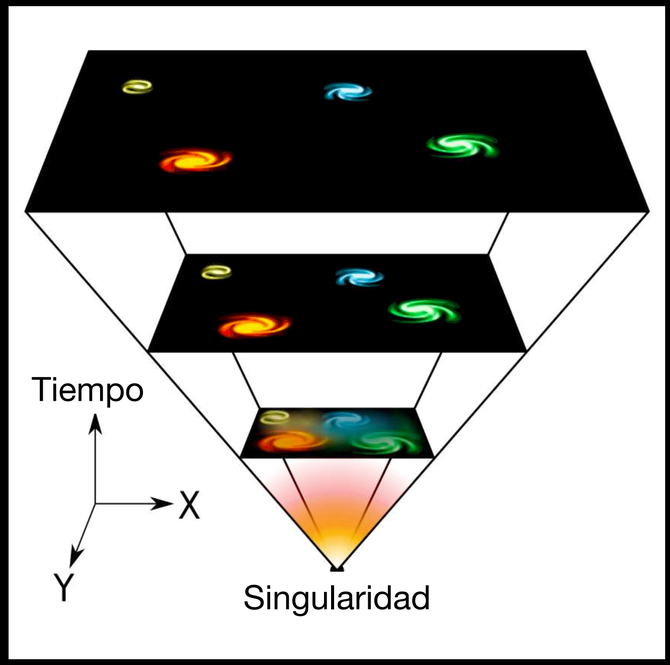


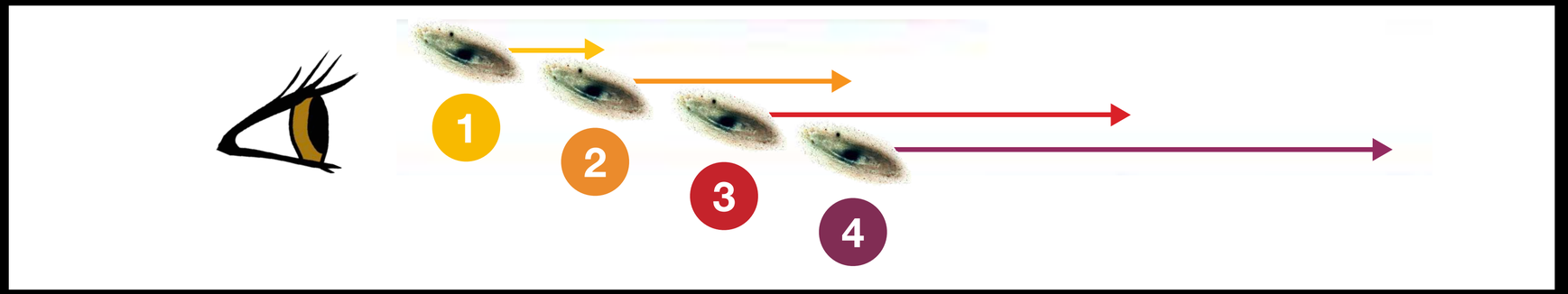
La expansión del espacio

Ley de Hubble-Lemaître



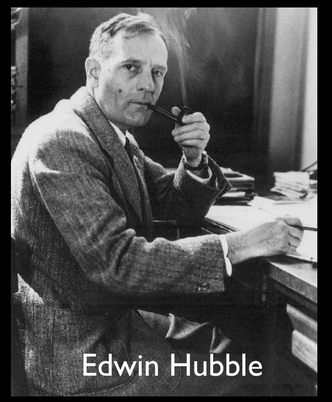






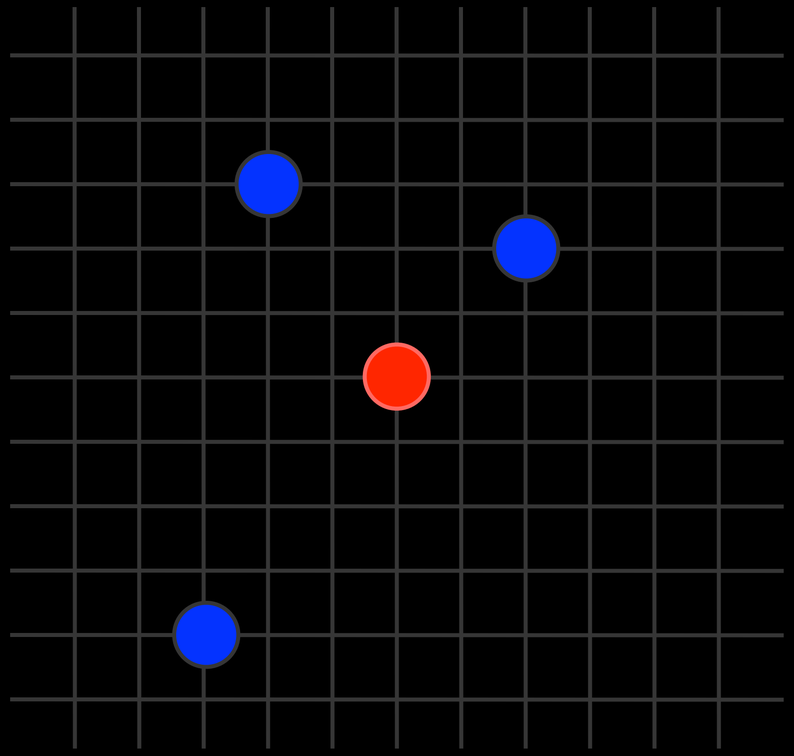

Telescopio Hooker, Observatorio del Monte Wilson

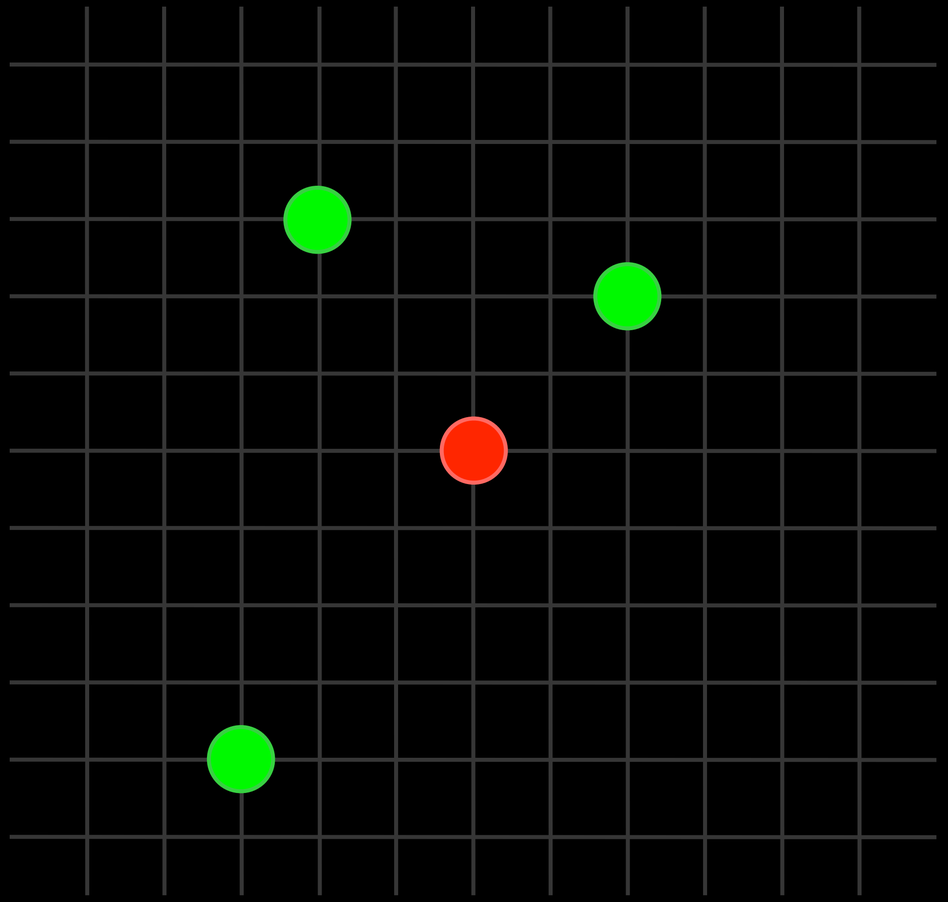

Telescopio Hooker
Observatorio del Monte Wilson

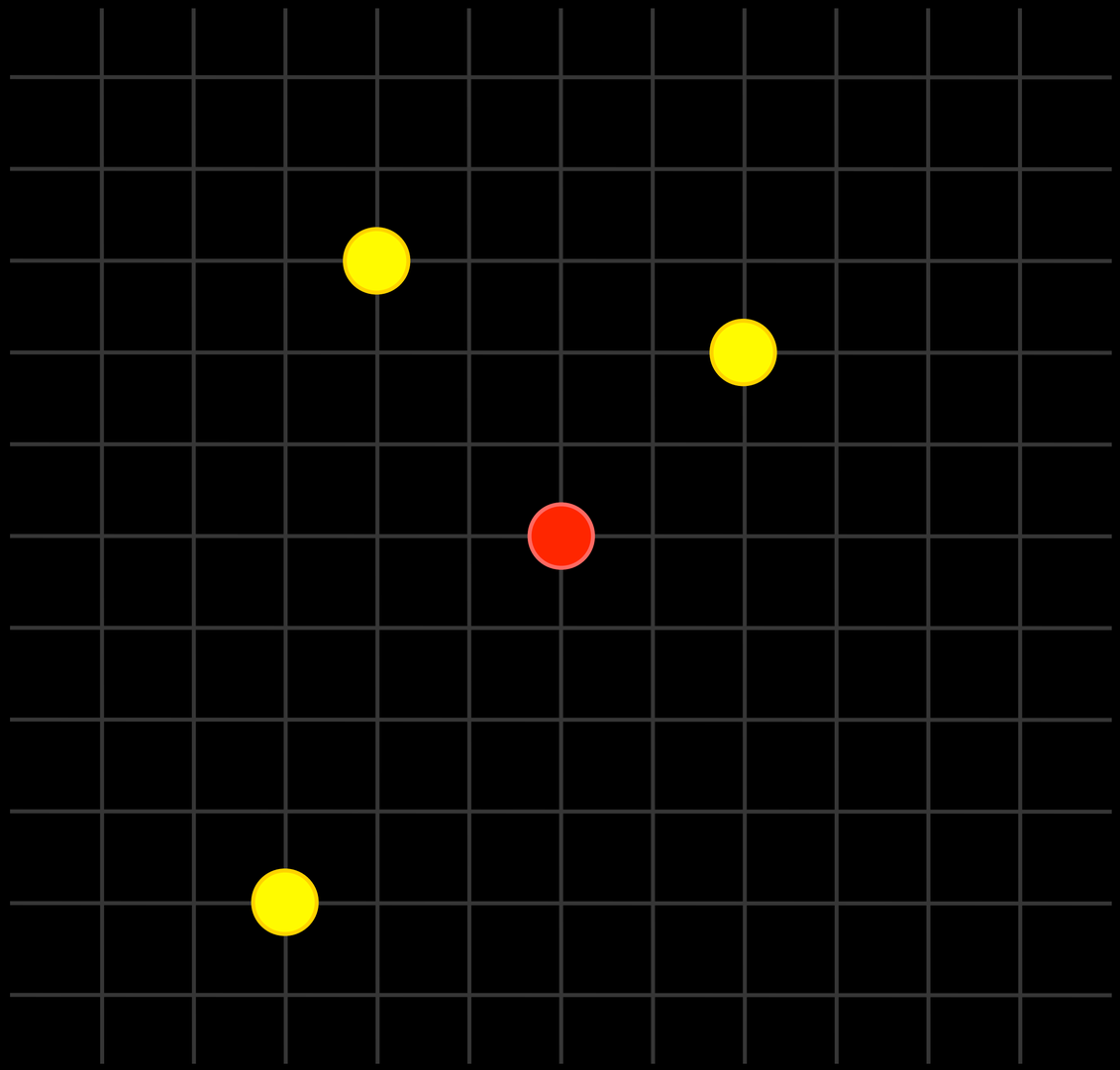

Edwin Hubble

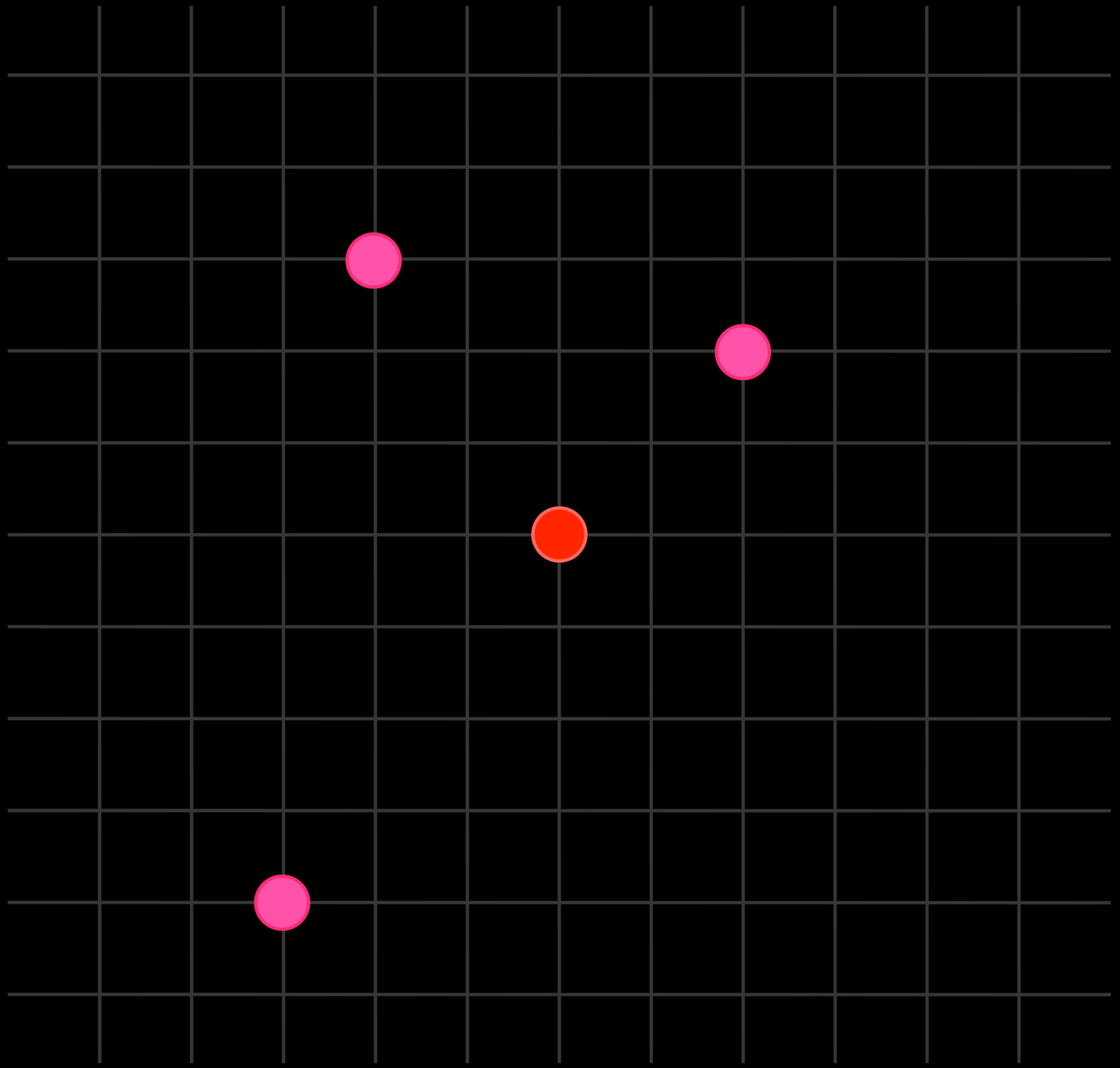
El espacio se expande y todos los observadores perciben que las galaxias se alejan las unas de las otras.

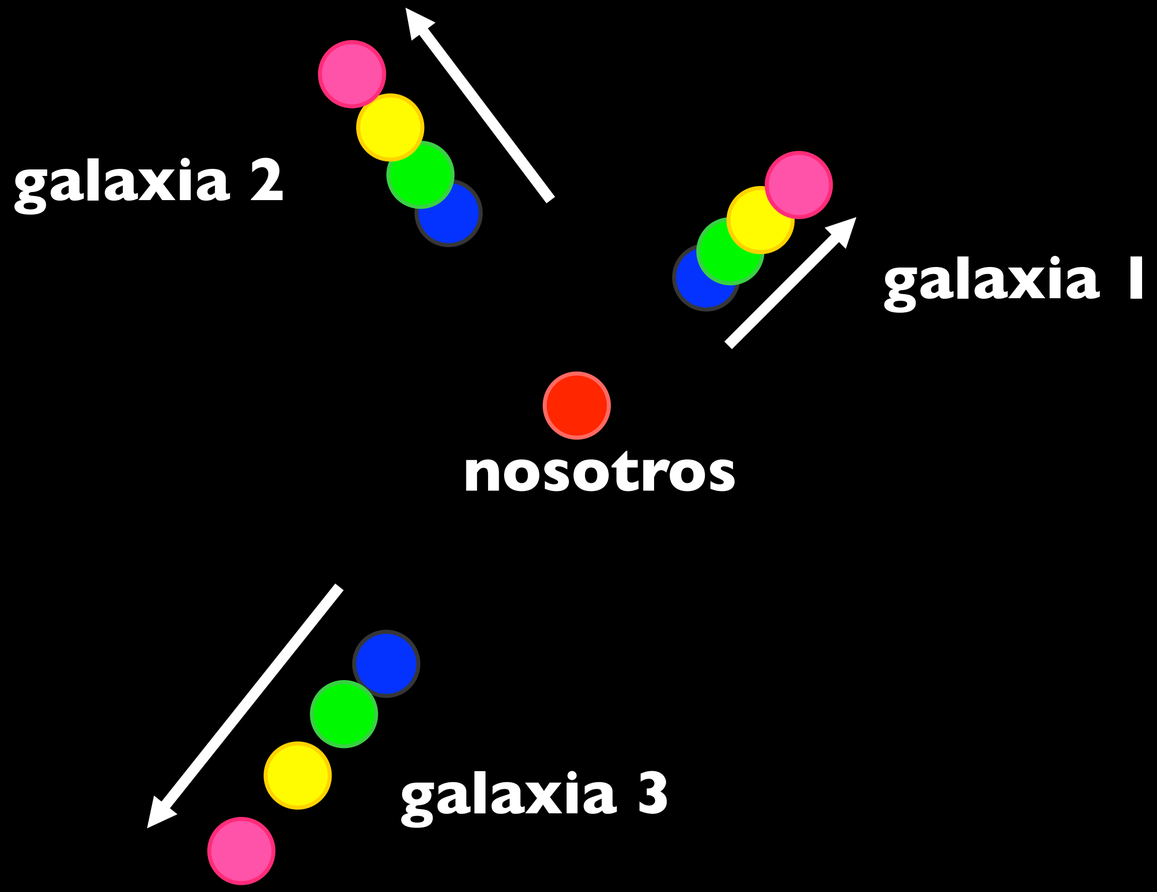




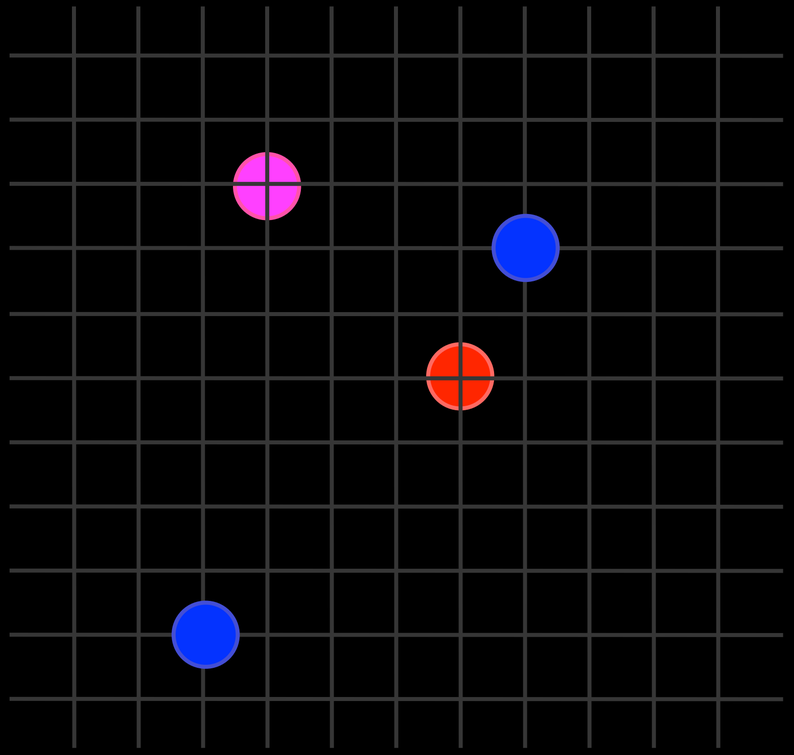


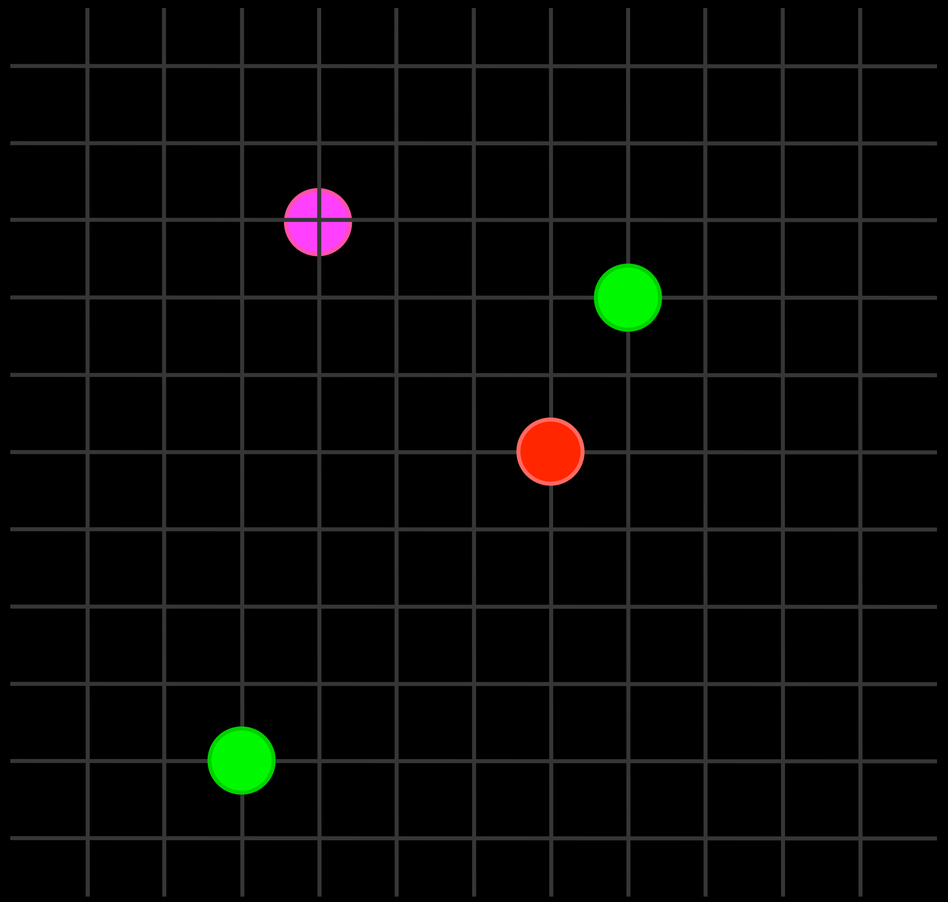


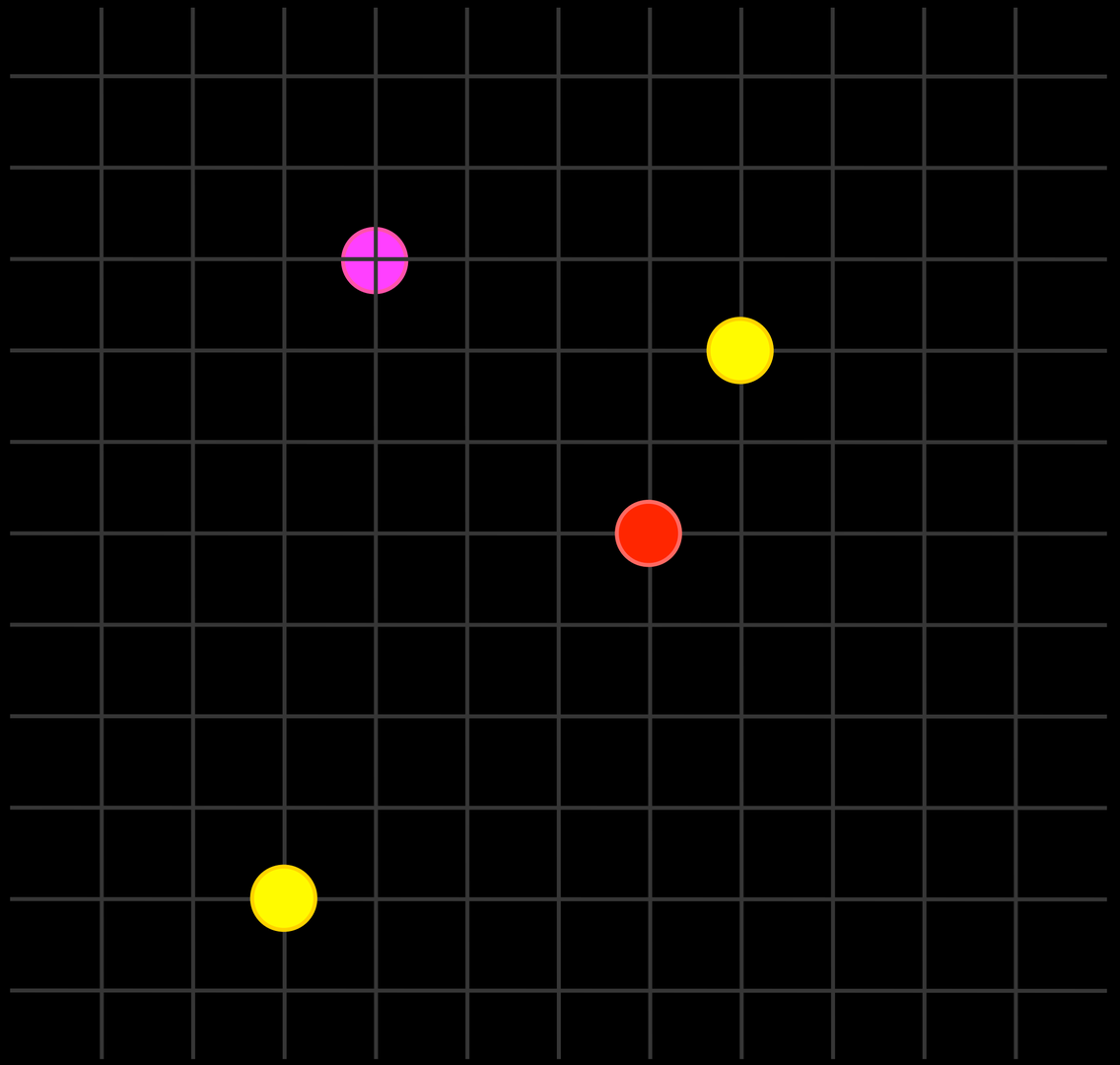


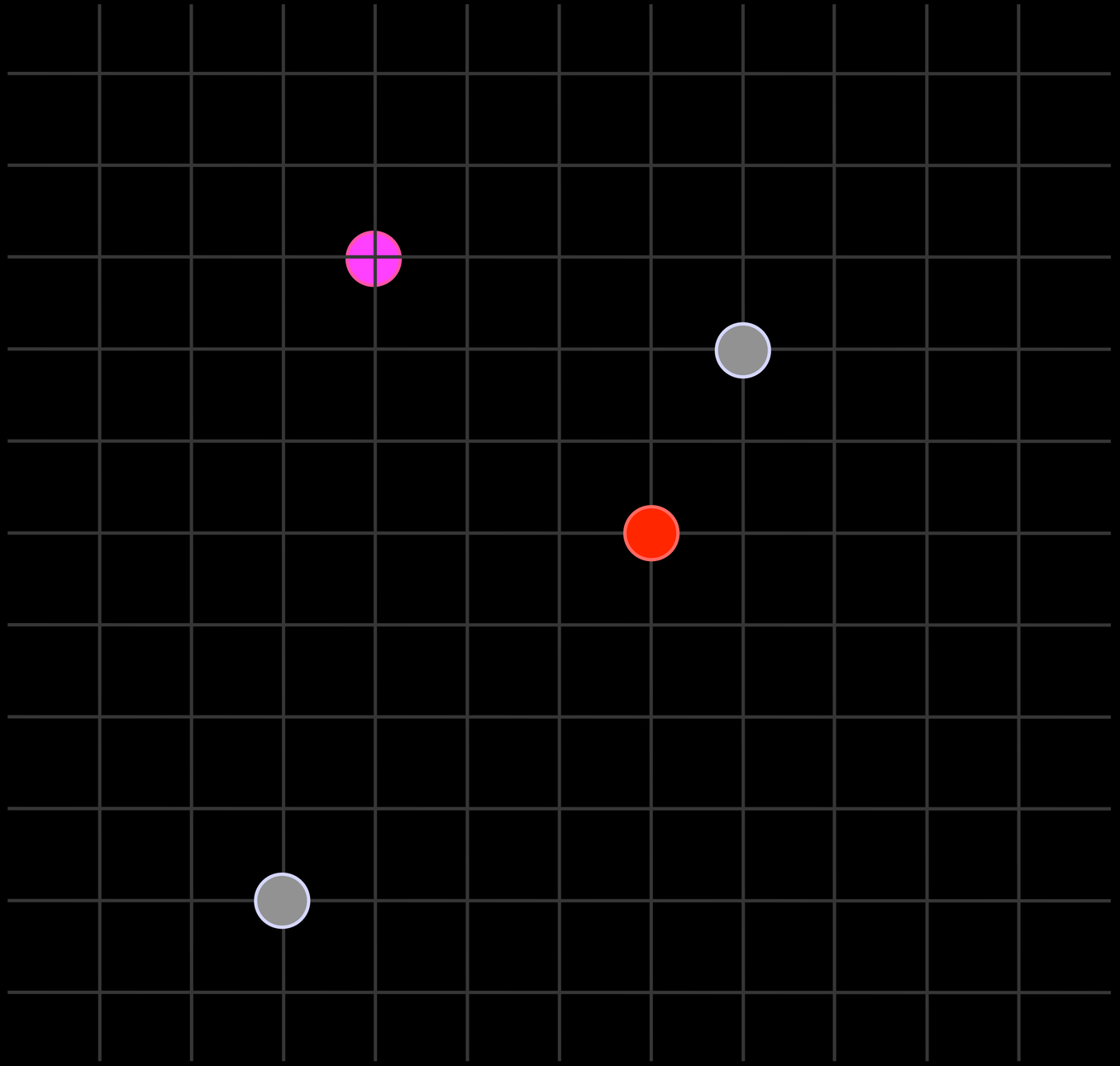

galaxia 2
galaxia 1
nosotros
galaxia 3

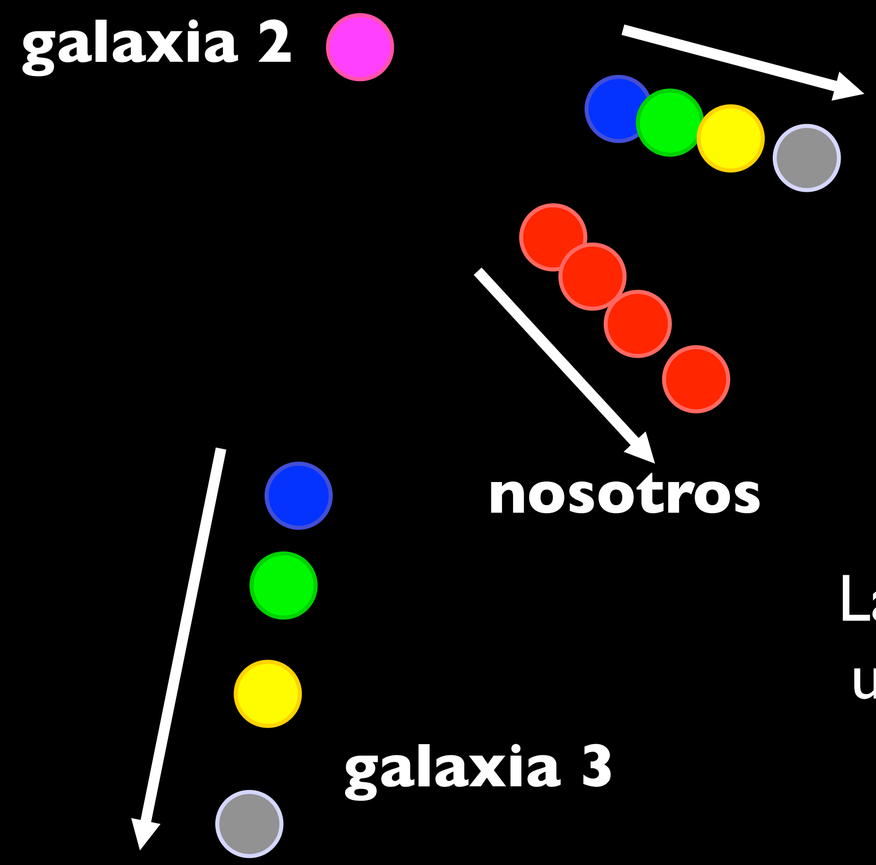










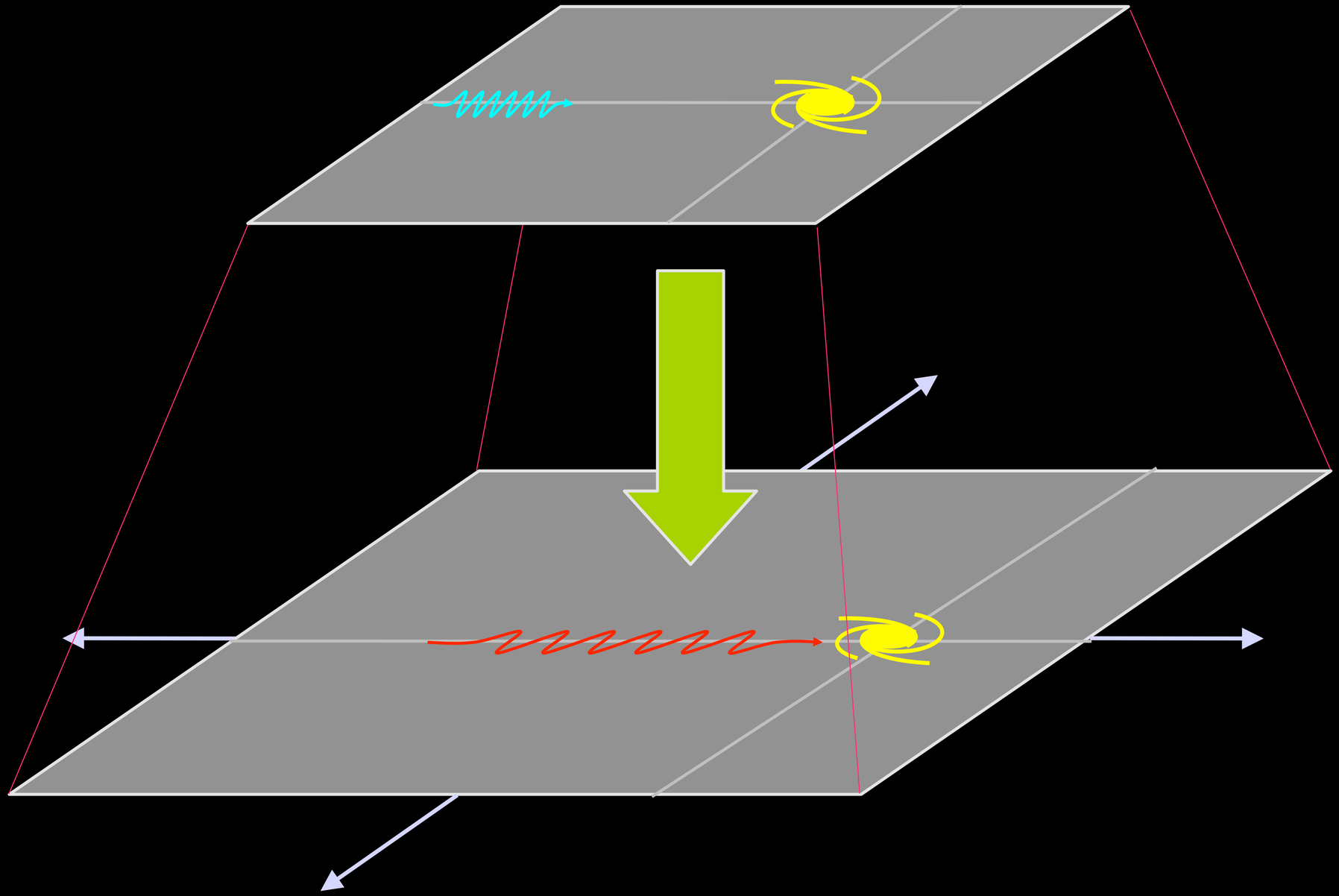


Principio Cosmológico

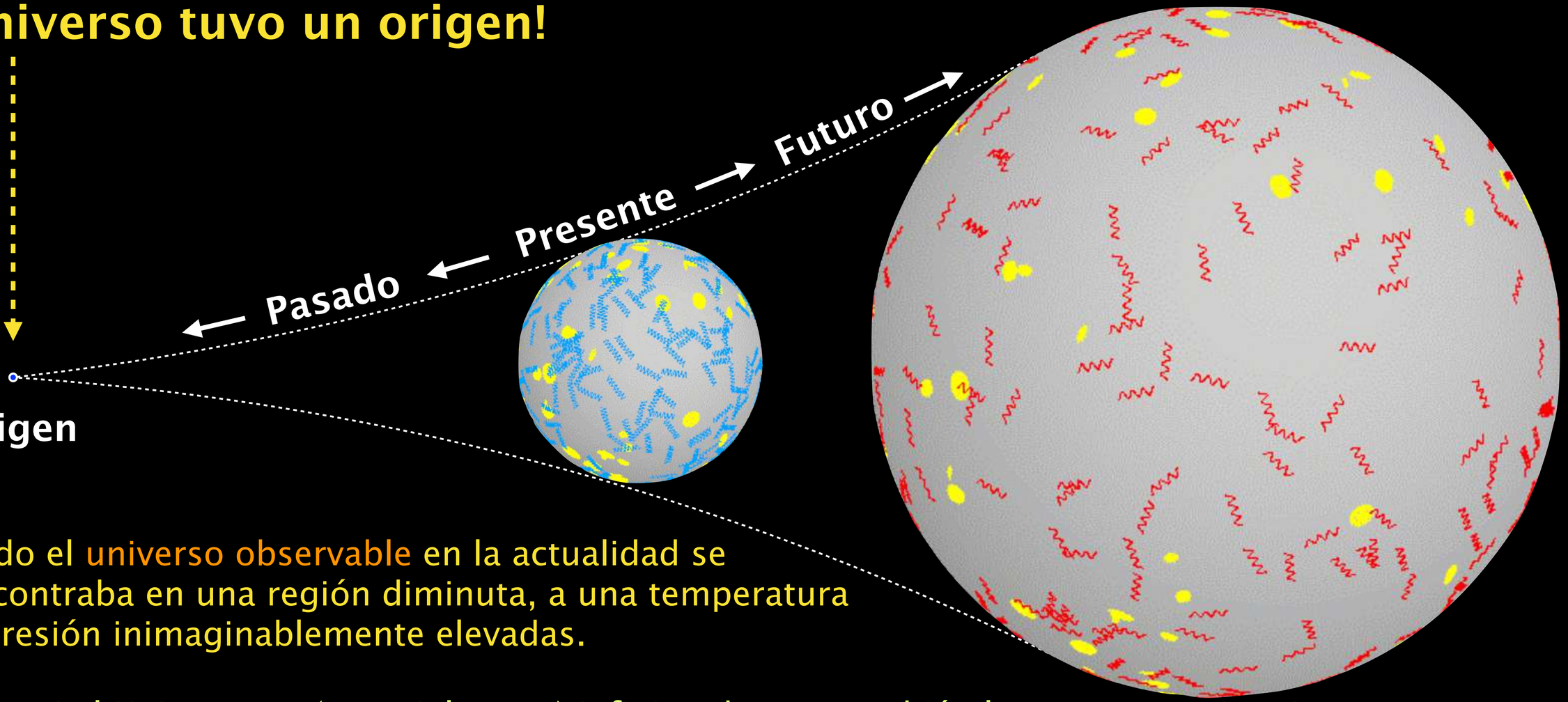
La expansión del espacio provoca que una observadora en cualquier galaxia detecte que el resto de las galaxias parezcan alejarse de ella

¡No existe un centro de la expansión!

Desplazamiento al rojo cosmológico



¡El Universo tuvo un origen!



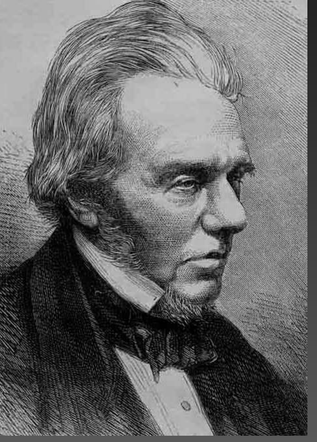
Todo el universo observable en la actualidad se encontraba en una región diminuta, a una temperatura y presión inimaginablemente elevadas.

Pero si el Universo es (espacialmente) infinito ahora, ¡también lo era en su origen!

¿A qué velocidad se expande? ¿Qué forma tiene?

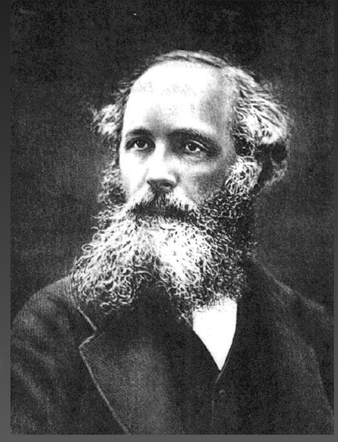
¿Hay alguna relación entre los agujeros negros y el origen y destino del Universo?

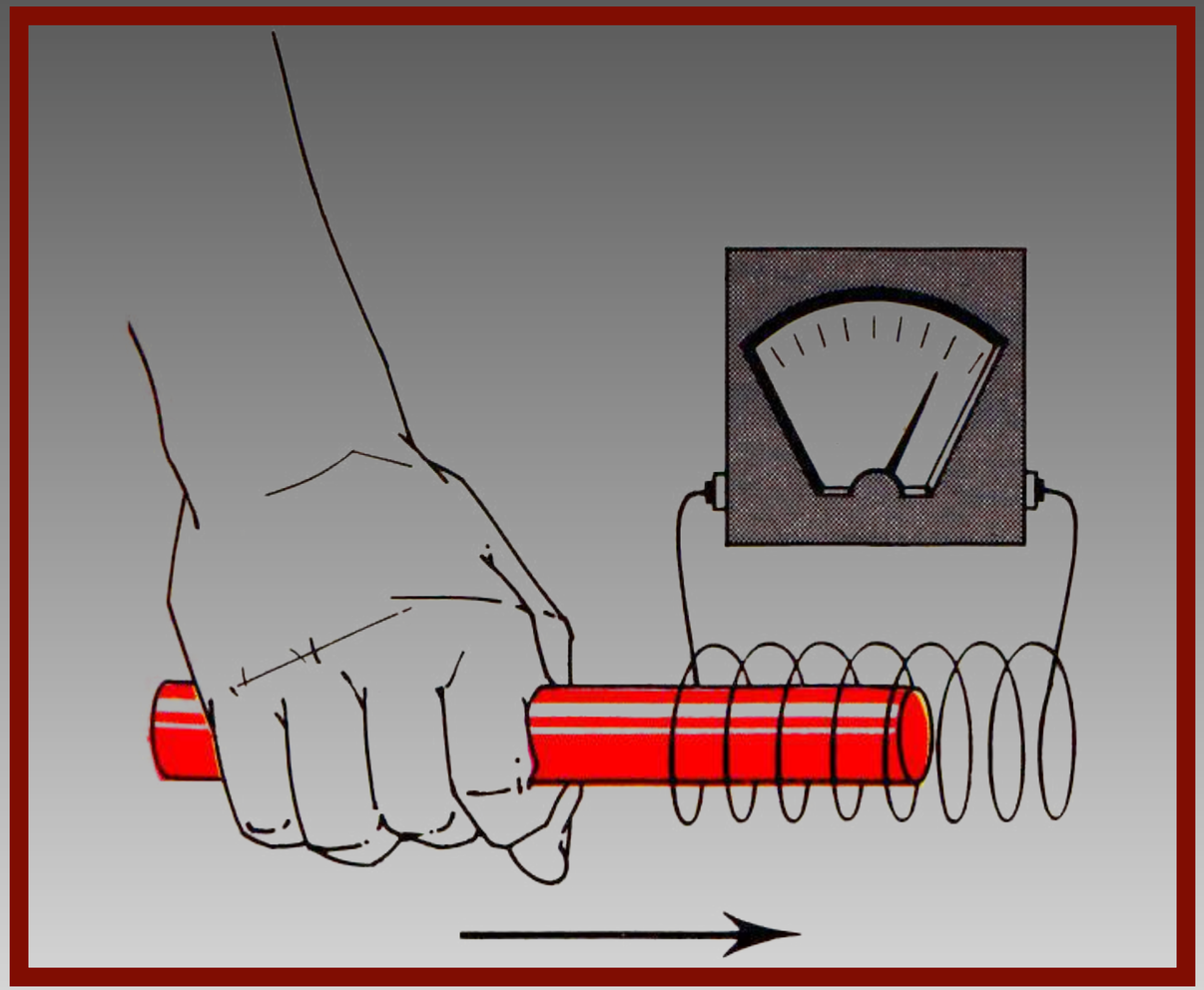
Tiempo

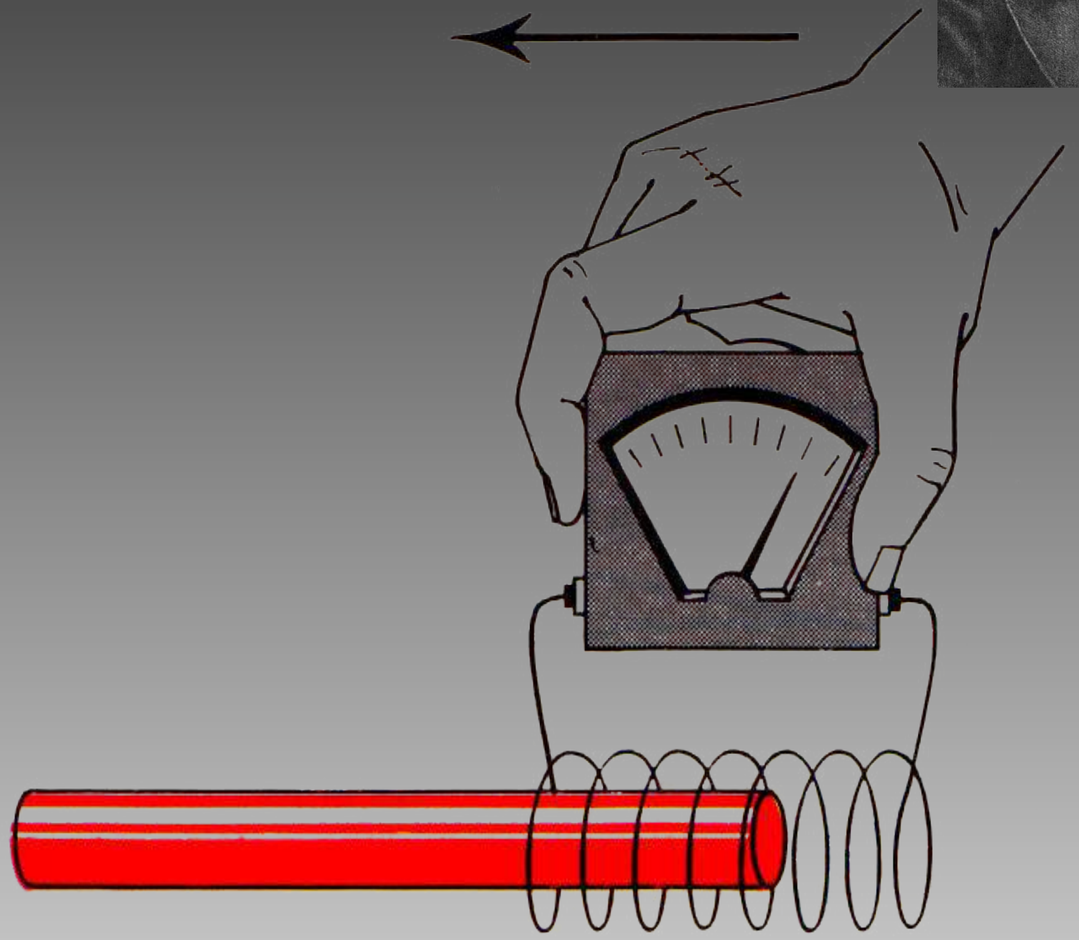


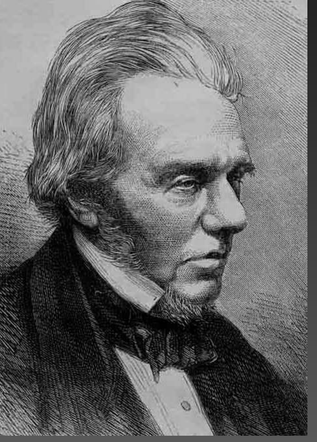
Michael Faraday
(1791-1867)

James Clerk Maxwell
(1831-1879)



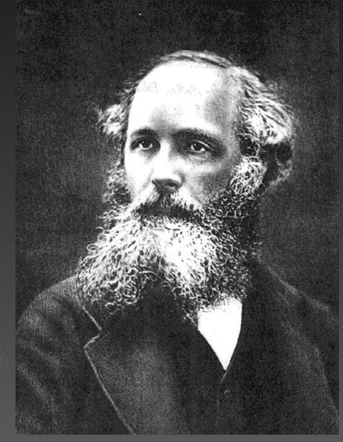


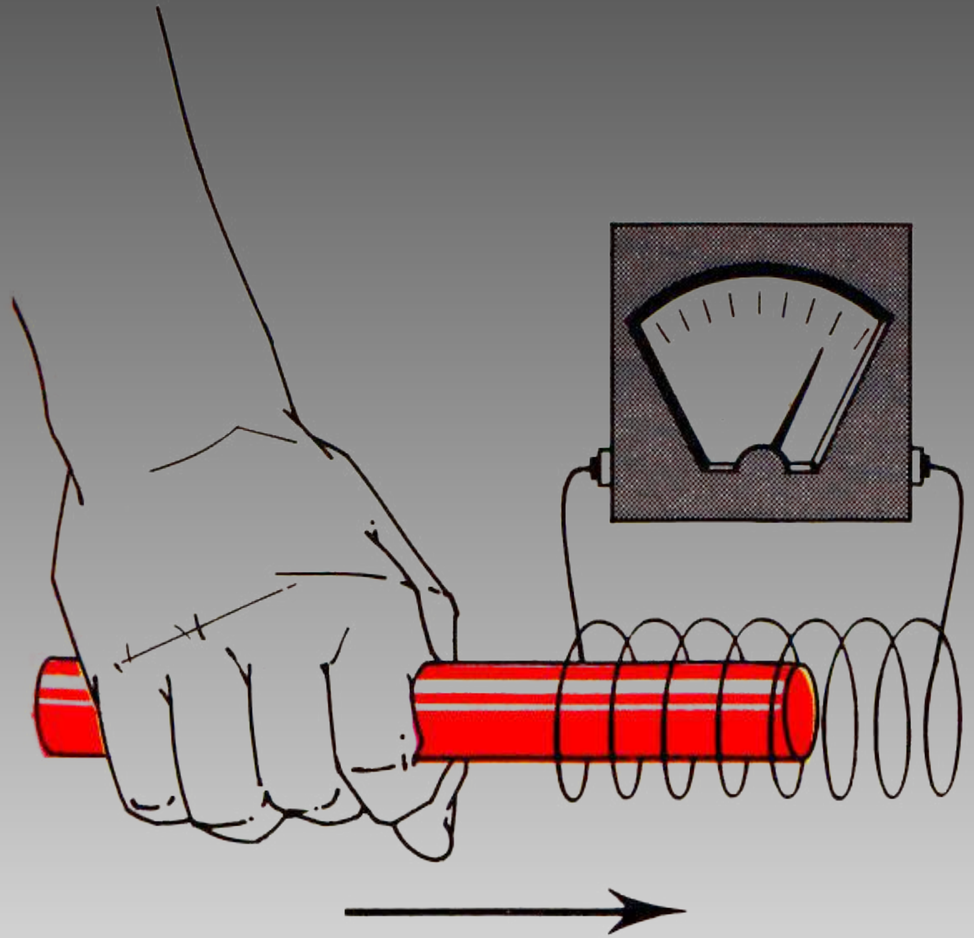


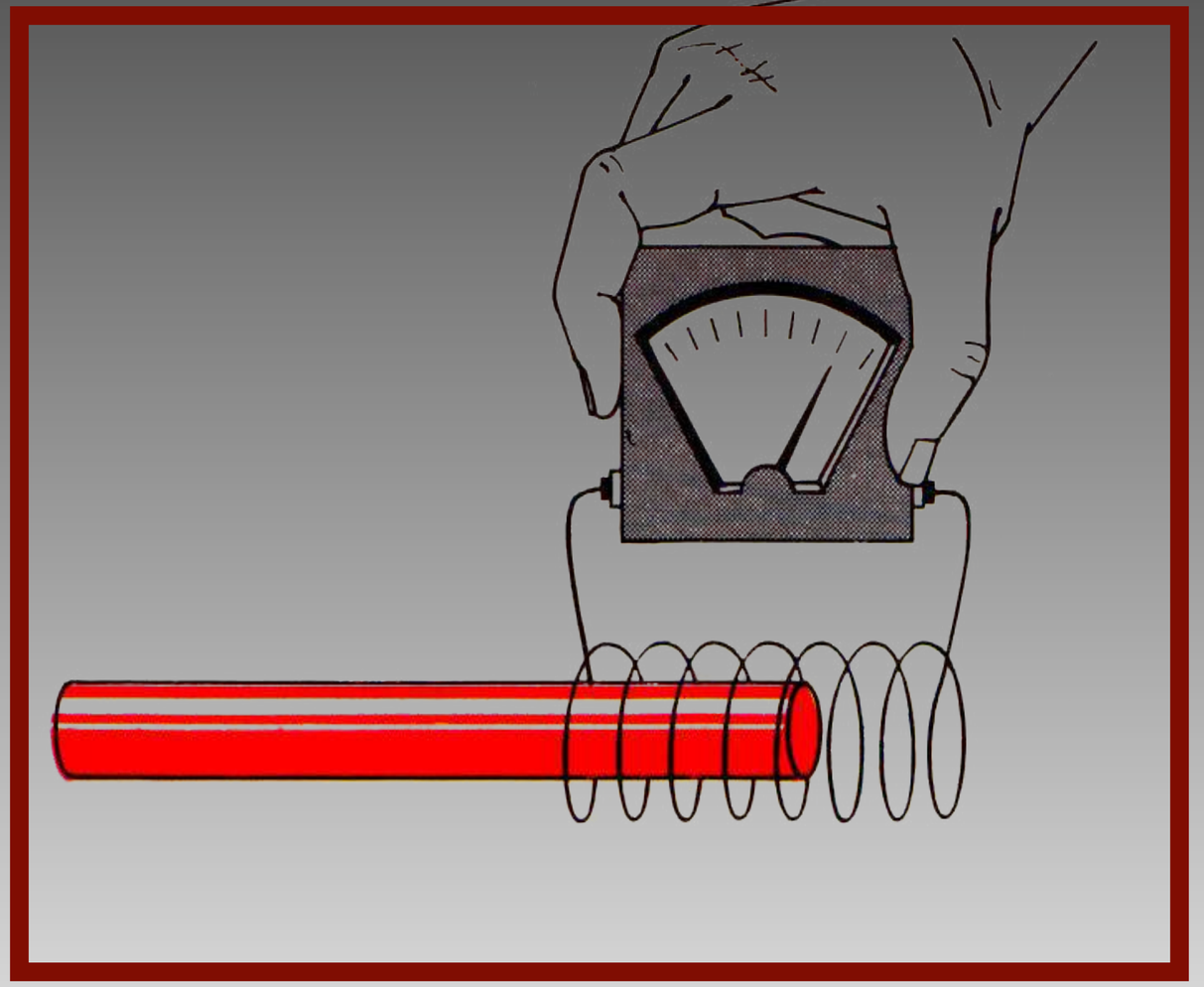


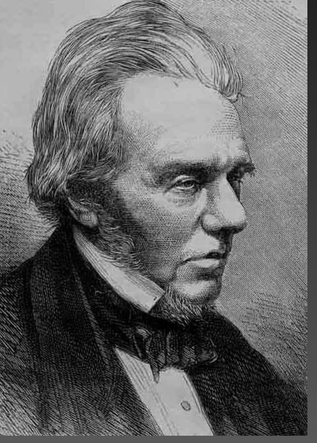
Michael Faraday
(1791-1867)

James Clerk Maxwell
(1831-1879)



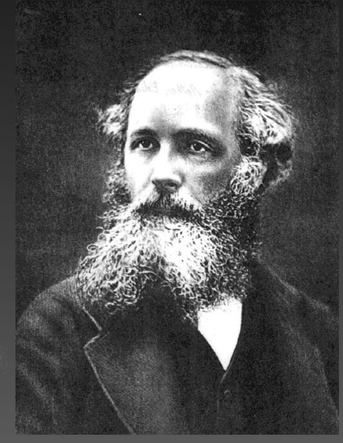


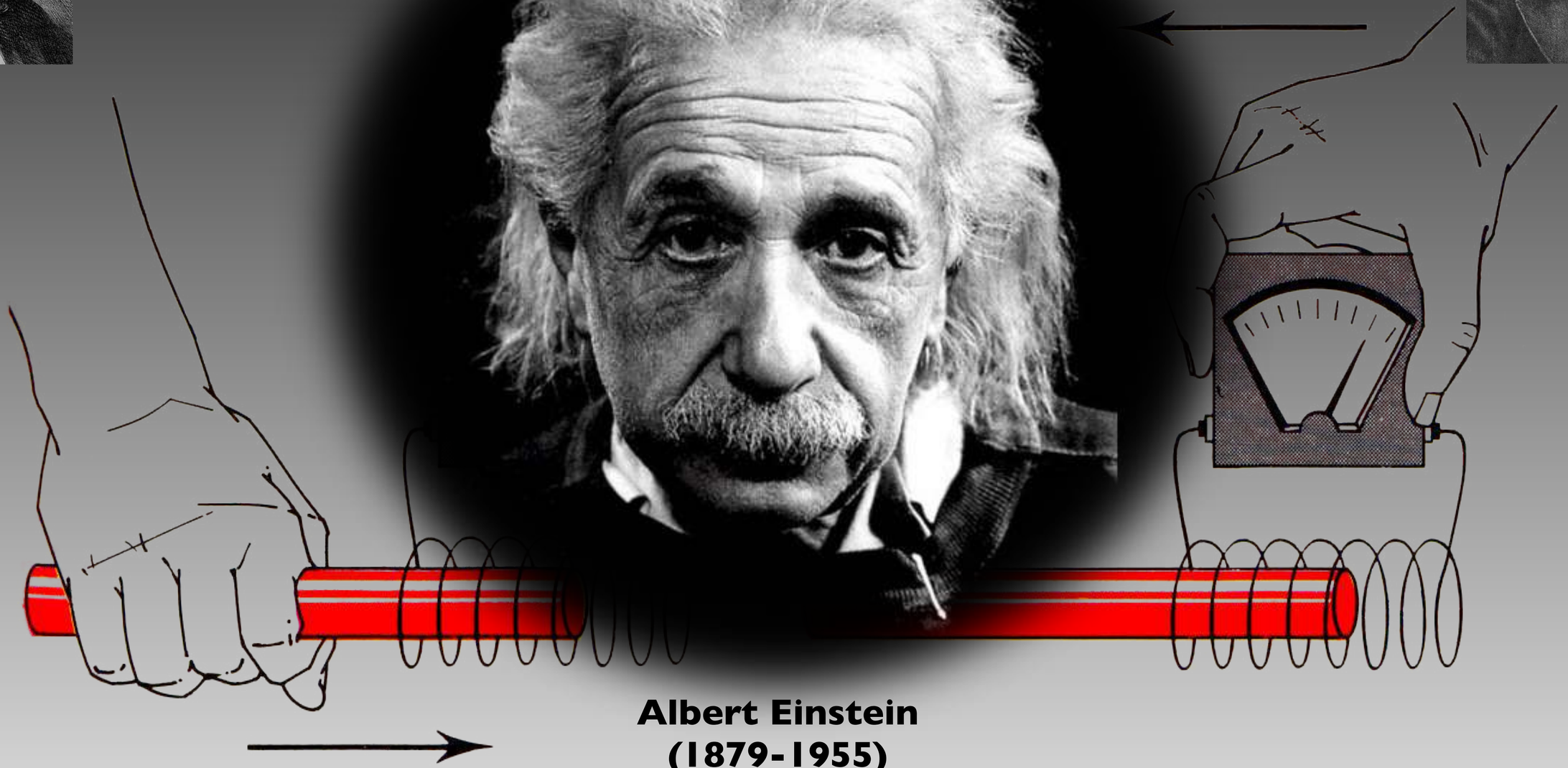




Michael Faraday
(1791-1867)

James Clerk Maxwell
(1831-1879)





Albert Einstein
(1879-1955)

ANNALEN
DER
PHYSIK.

BEGRÜNDET UND FORTGEFÜHRT DURCH
F. A. C. GREN, L. W. GILBERT, J. C. POGGENDORFF, G. UND E. WIEDEMANN.

VIERTE FOLGE.

BAND 17.

DER GANZEN REIHE 322. BAND.

KURATORIUM:
F. KOHLRAUSCH, M. PLANCK, G. QUINCKE,
W. C. RÖNTGEN. E. WARBURG.

UNTER MITWIRKUNG
DER DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT
UND INSBESONDERE VON
M. PLANCK

HERAUSGEGEBEN VON
PAUL DRUDE.

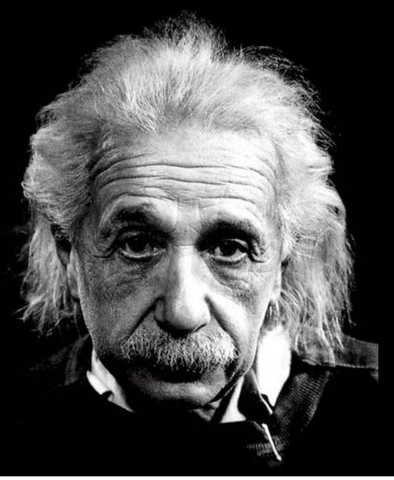
MIT FÜNF FIGURENTAFELN.

LEIPZIG, 1905.
VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH.

3. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.*

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche



Teoría Especial de la Relatividad

1) las leyes de la Física son las mismas para todos los observadores en movimiento relativo uniforme

2) la velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores, independientemente de su velocidad

$$E = m\,c^2$$



¿Dónde estoy?

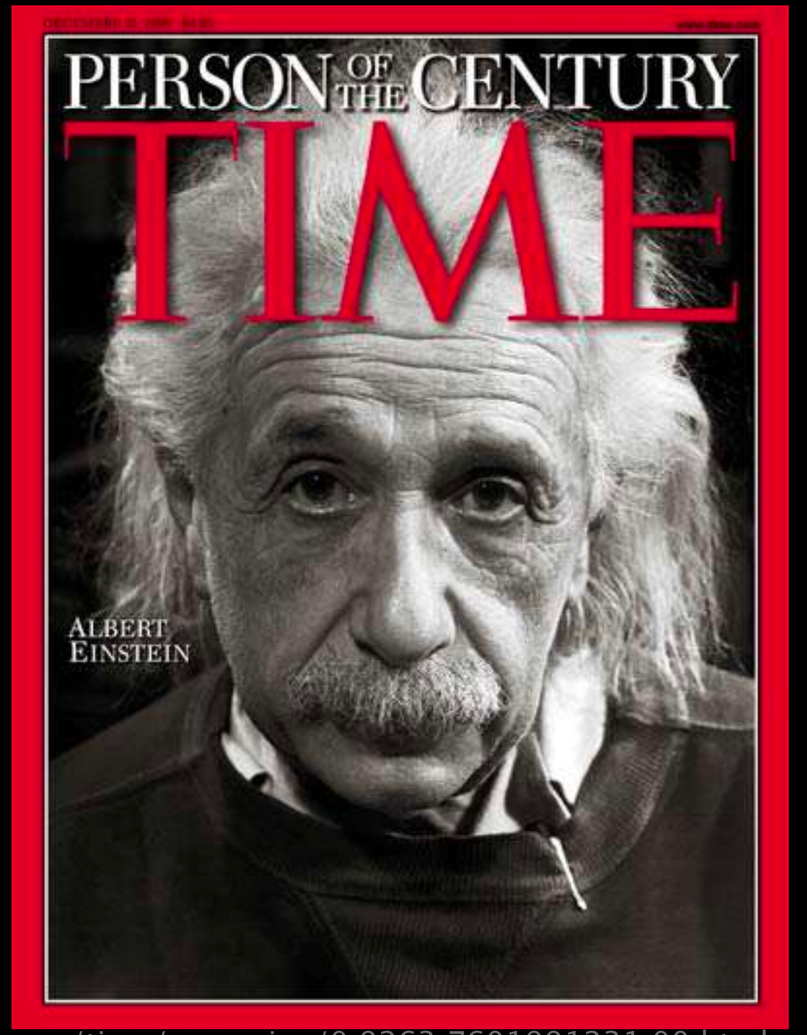
a) En un ascensor que está cayendo hacia el suelo
b) En una nave espacial que viaja por el espacio exterior (lejos de cualquier estrella/planeta) a velocidad constante

¡Las dos respuestas son válidas!

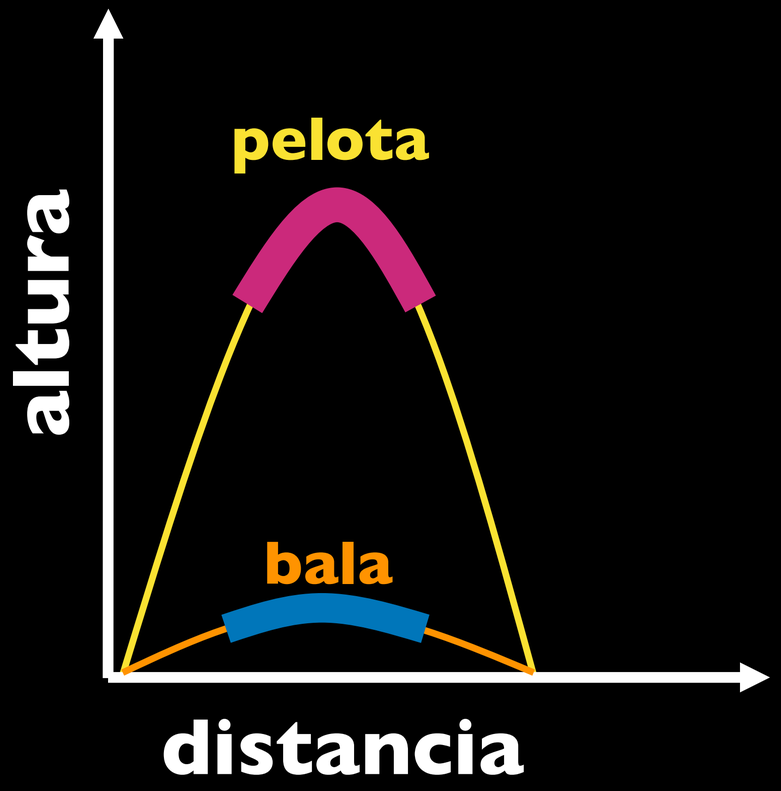
Esta idea guió a Einstein en la elaboración de la Teoría General de la Relatividad.

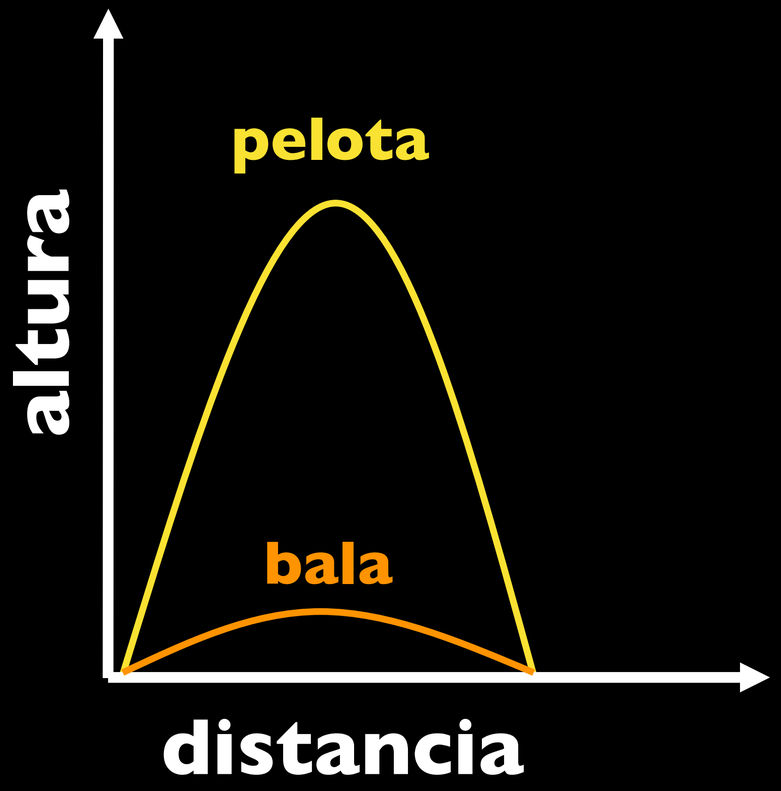


https://elpais.com/elpais/2015/11/20/ciencia/1448046863_223963.html



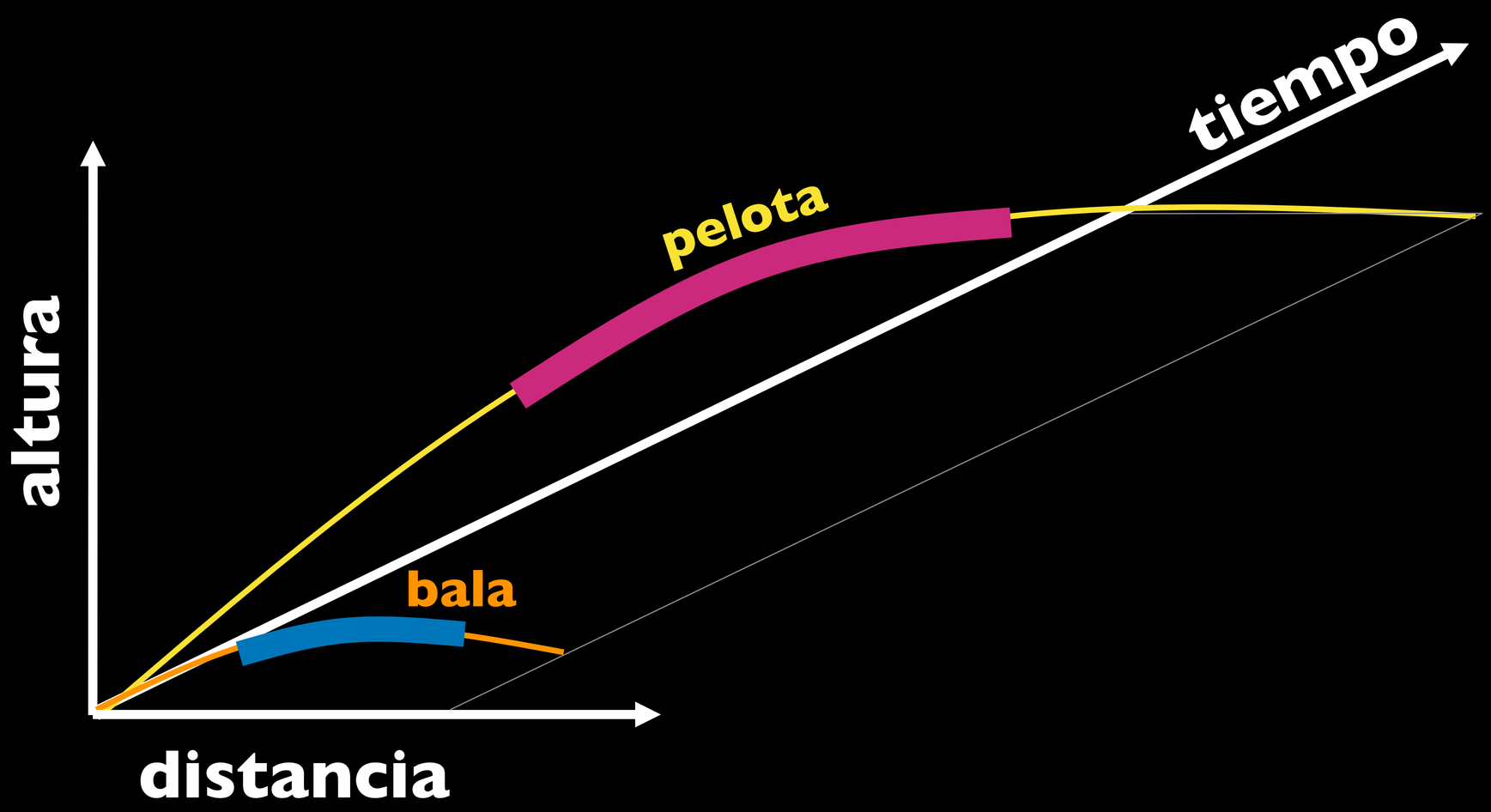
http://content.time.com/time/magazine/0,9263,7601991231,00.html

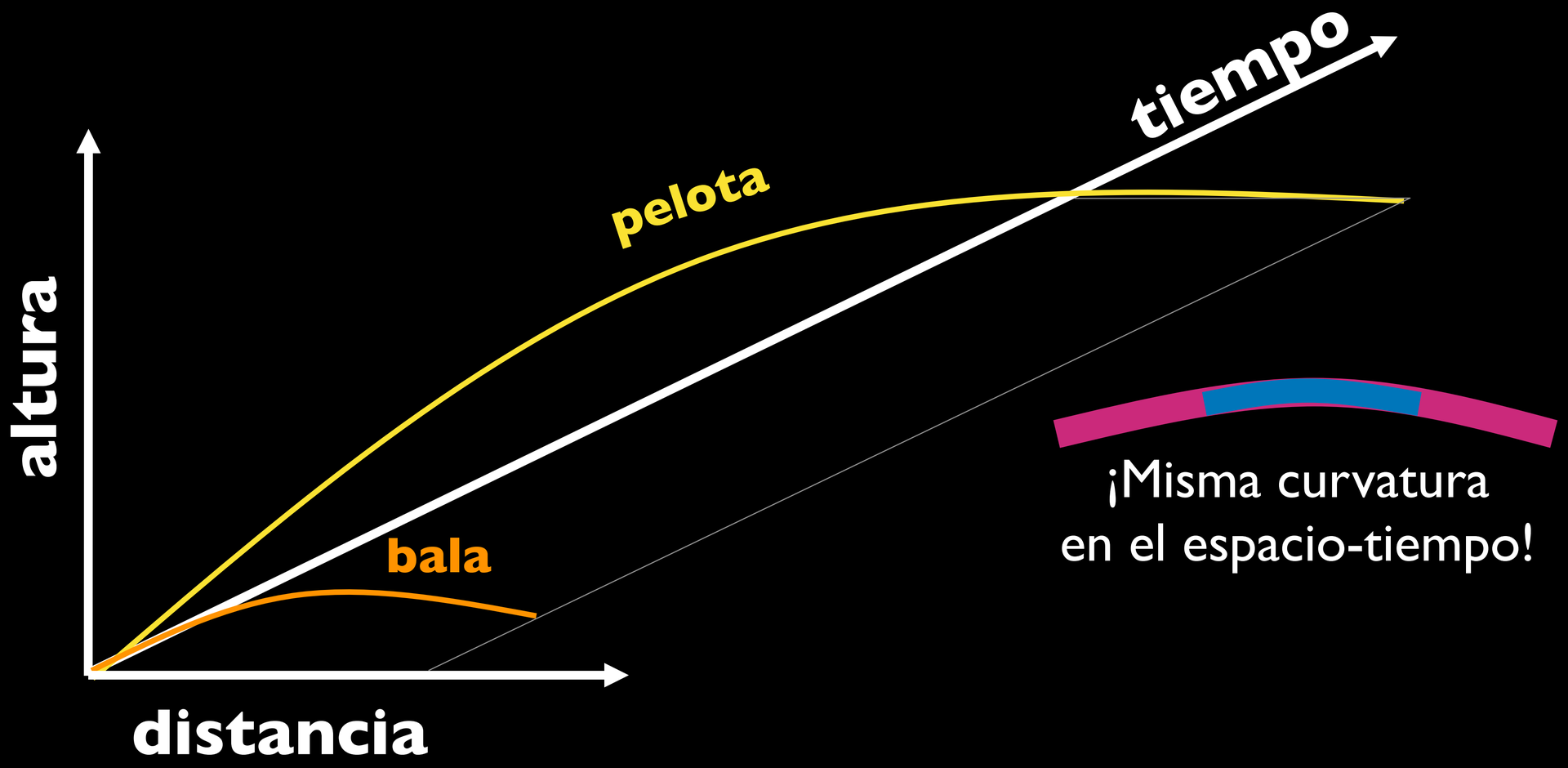

altura
pelota
bala
distancia





¡Curvaturas diferentes!

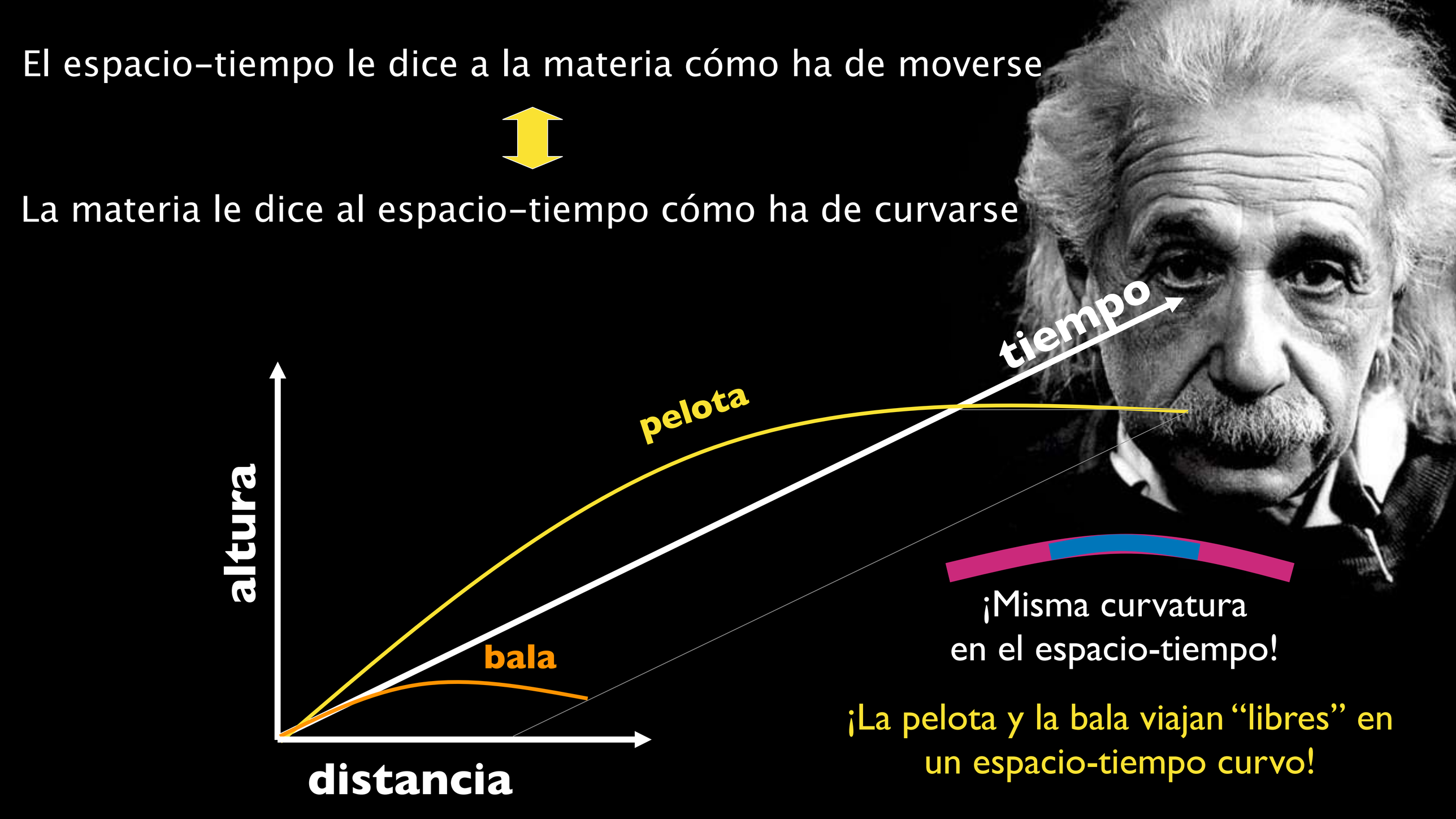

altura
distancia
pelota
bala
tiempo



¡Misma curvatura
en el espacio-tiempo!

El espacio-tiempo le dice a la materia cómo ha de moverse

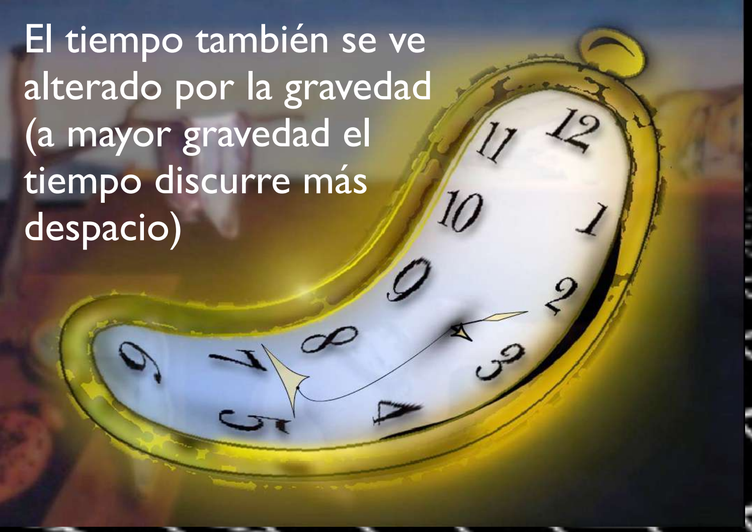
La materia le dice al espacio-tiempo cómo ha de curvarse



¡Misma curvatura
en el espacio-tiempo!

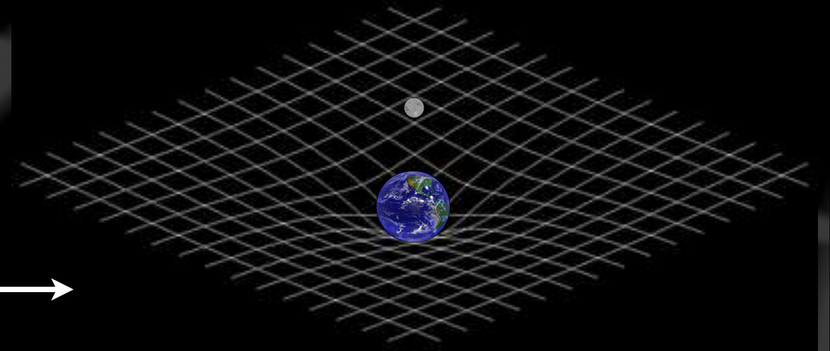
¡La pelota y la bala viajan “libres” en un espacio-tiempo curvo!

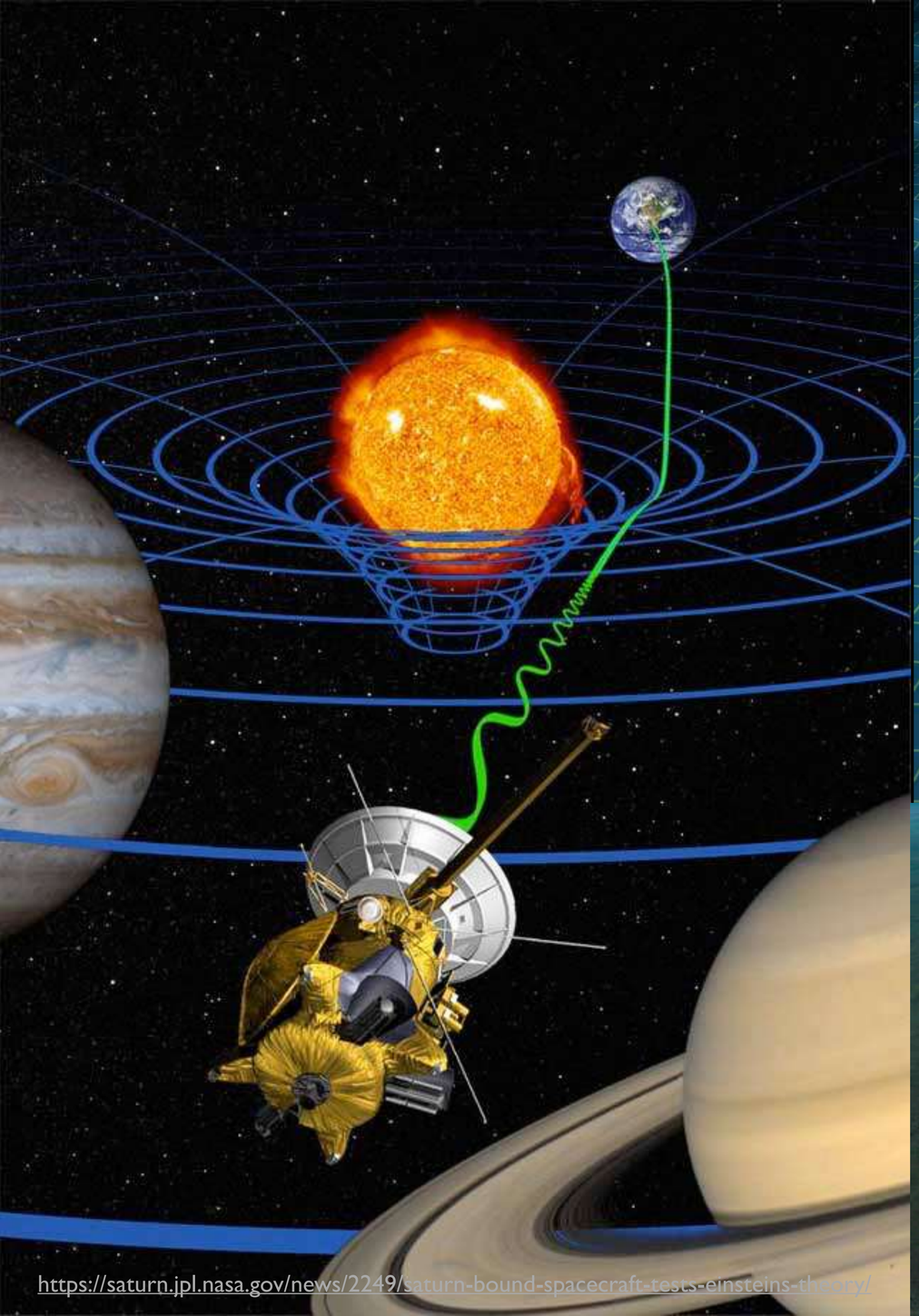
El tiempo también se ve alterado por la gravedad (a mayor gravedad el tiempo discurre más despacio)



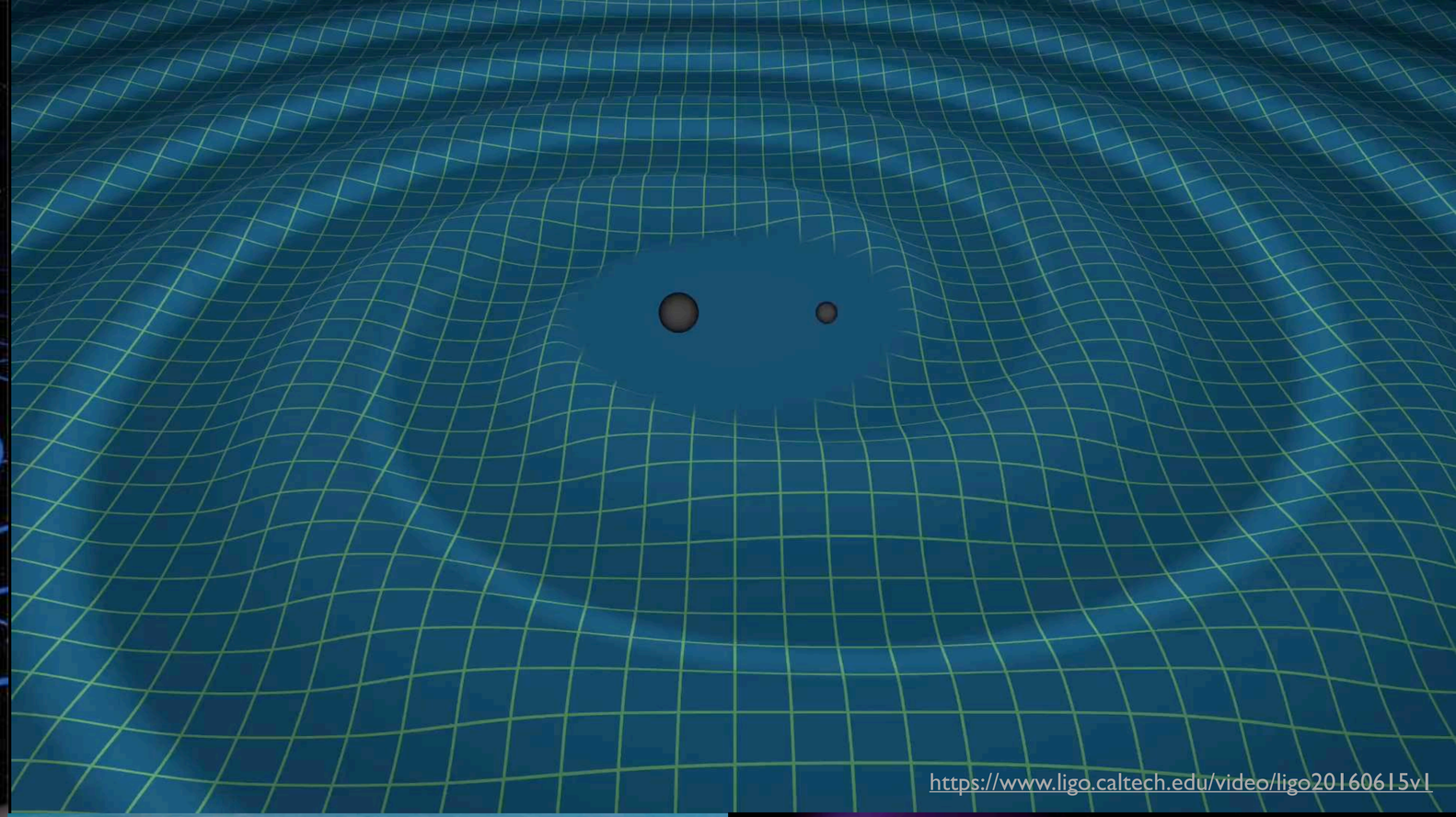
Los planetas se mueven libremente por un espacio curvado por la presencia del Sol.

Análogamente, la Luna se mueve libremente por un espacio curvado por la presencia de la Tierra.





https://saturn.jpl.nasa.gov/news/2249/saturn-bound-spacecraft-tests-einsteins-theory/



https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160615v1



https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20150731e



https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20171016c

La curvatura del espacio-tiempo

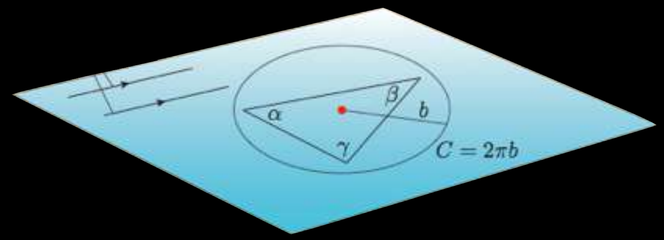
3 posibles curvaturas (cumpliendo el Principio Cosmológico), dependiendo de *k* = parámetro de curvatura

Versiones en 2D

$k = 0$

curvatura nula
espacio plano (euclídeo)
Universo plano
(espacio infinito)

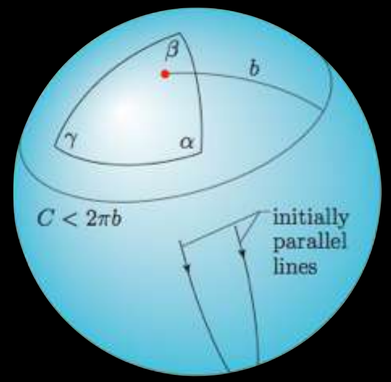
$$\begin{cases} \alpha + \beta + \gamma = 180^{\circ} \\ C = 2\pi b \text{ (con } b \text{ el radio)} \\ \text{Las paralelas permanecen} \end{cases}$$



$k = +1$

curvatura positiva
espacio esférico
Universo cerrado
(espacio finito)

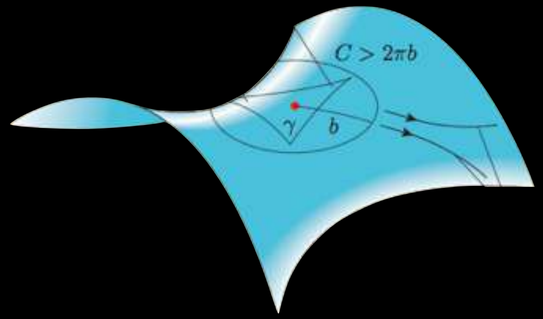
$$\begin{cases} \alpha + \beta + \gamma > 180^{\circ} \\ C < 2\pi b \text{ (con } b \text{ el radio)} \\ \text{Las paralelas convergen} \end{cases}$$



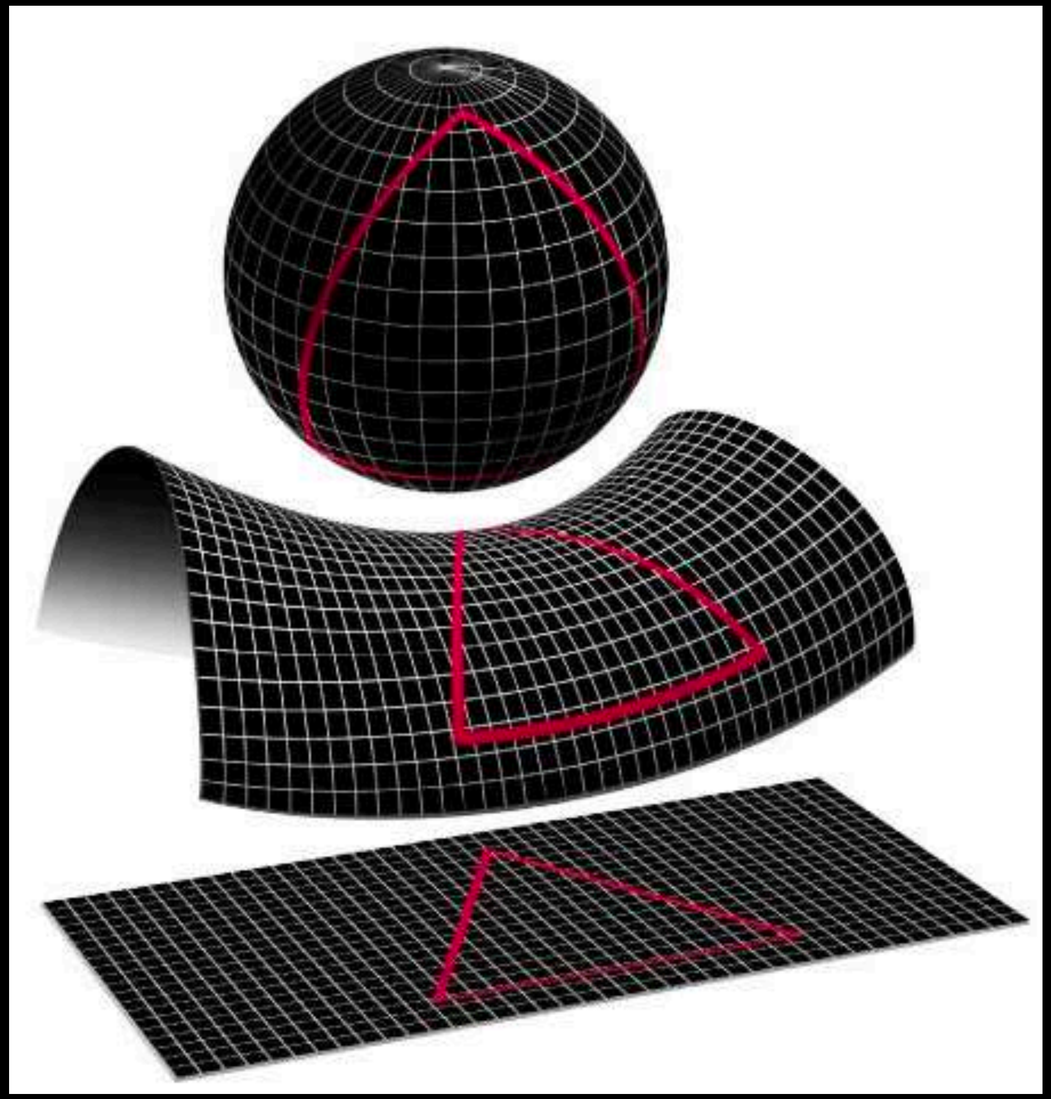
$k = -1$

curvatura negativa
espacio hiperbólico
Universo abierto
(espacio infinito)

$$\begin{cases} \alpha + \beta + \gamma < 180^{\circ} \\ C > 2\pi b \text{ (con } b \text{ el radio)} \\ \text{Las paralelas divergen} \end{cases}$$



¡No es necesario contemplar una figura geométrica desde fuera para poder conocer su curvatura!

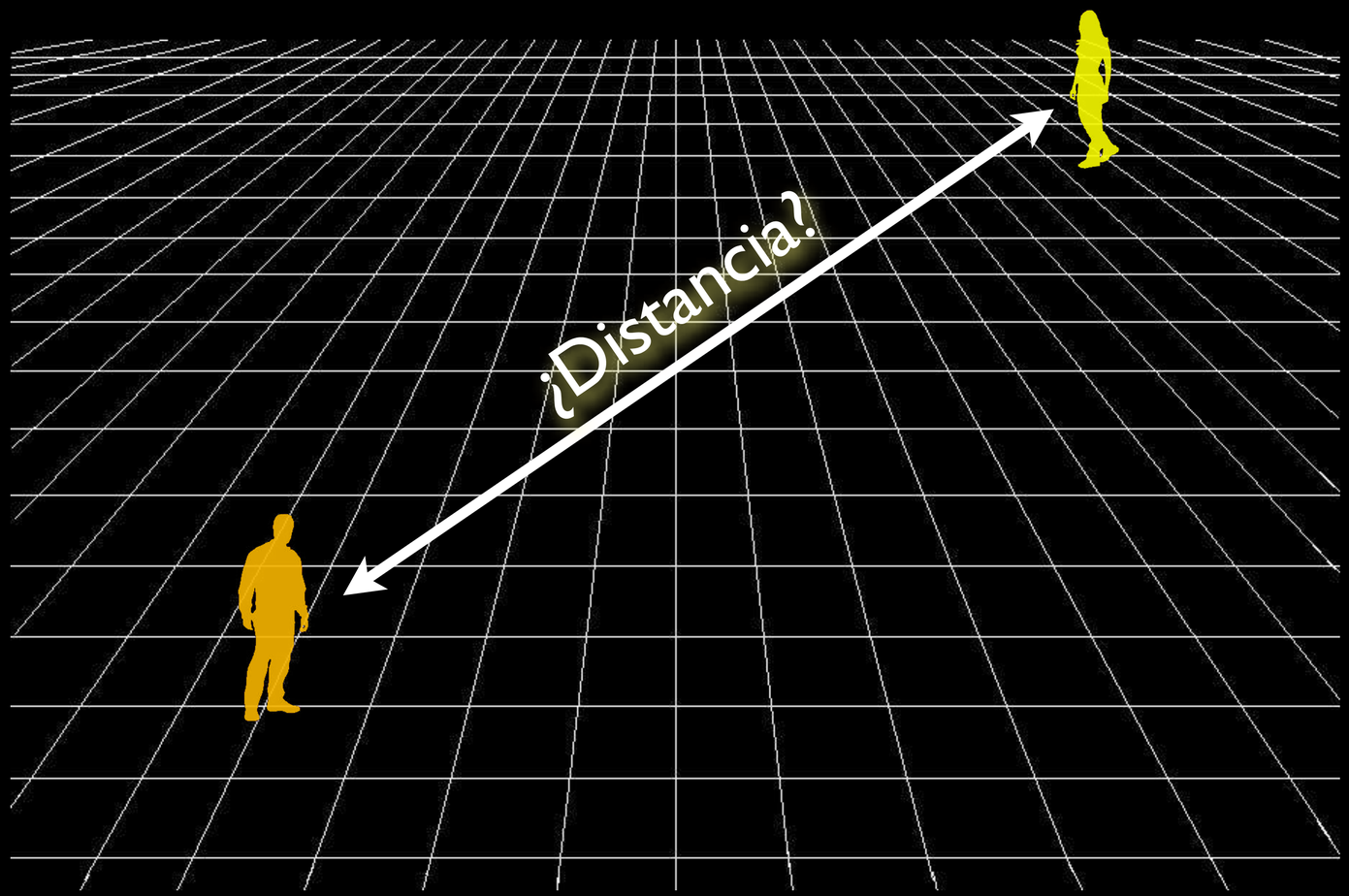


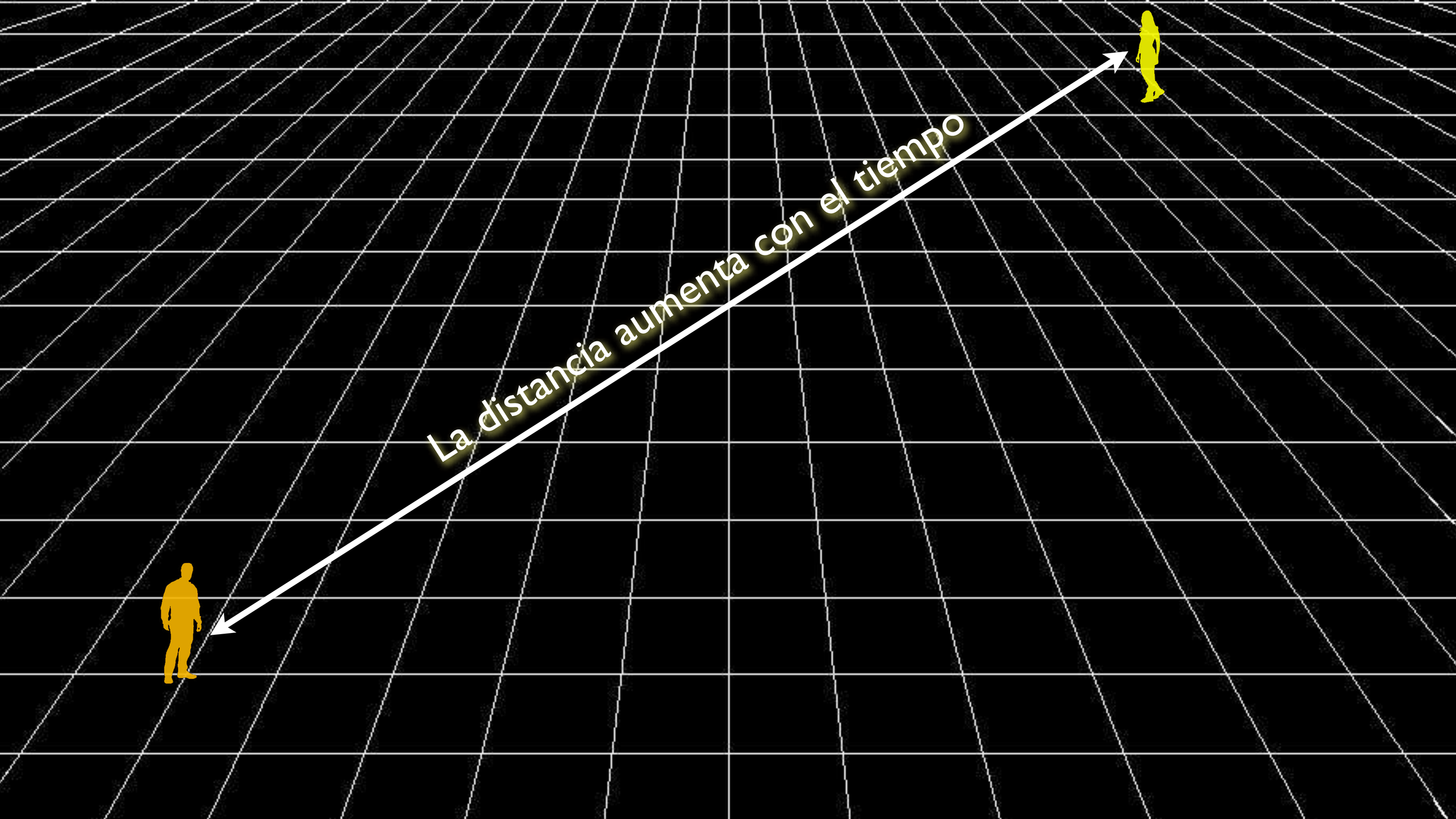
Como el Universo contiene materia (y energía, que es lo mismo), el Universo como un todo puede estar curvado. Es decir, el Universo tiene una determinada geometría.

Además sabemos que el espacio aumenta con el tiempo (las galaxias se alejan unas de otras).

Pero el ritmo de expansión depende de la geometría.

En otras palabras, podemos llegar a conocer qué geometría tiene el Universo midiendo a qué ritmo se expande.

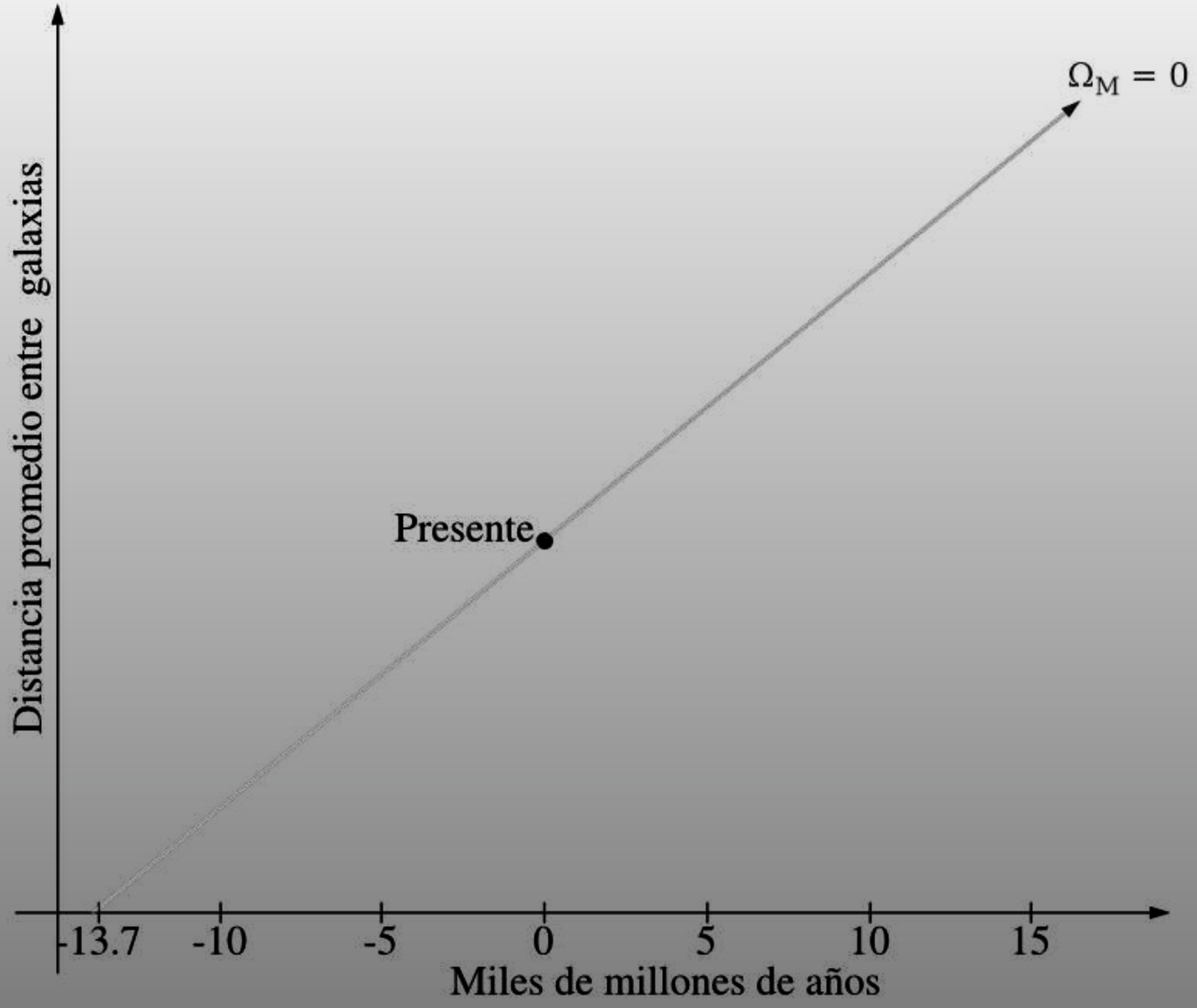

¿Distancia?


La distancia aumenta con el tiempo

¿Cómo cambia la distancia entre dos puntos en universos con diferente densidad de materia Ω_M?

Factor de Escala

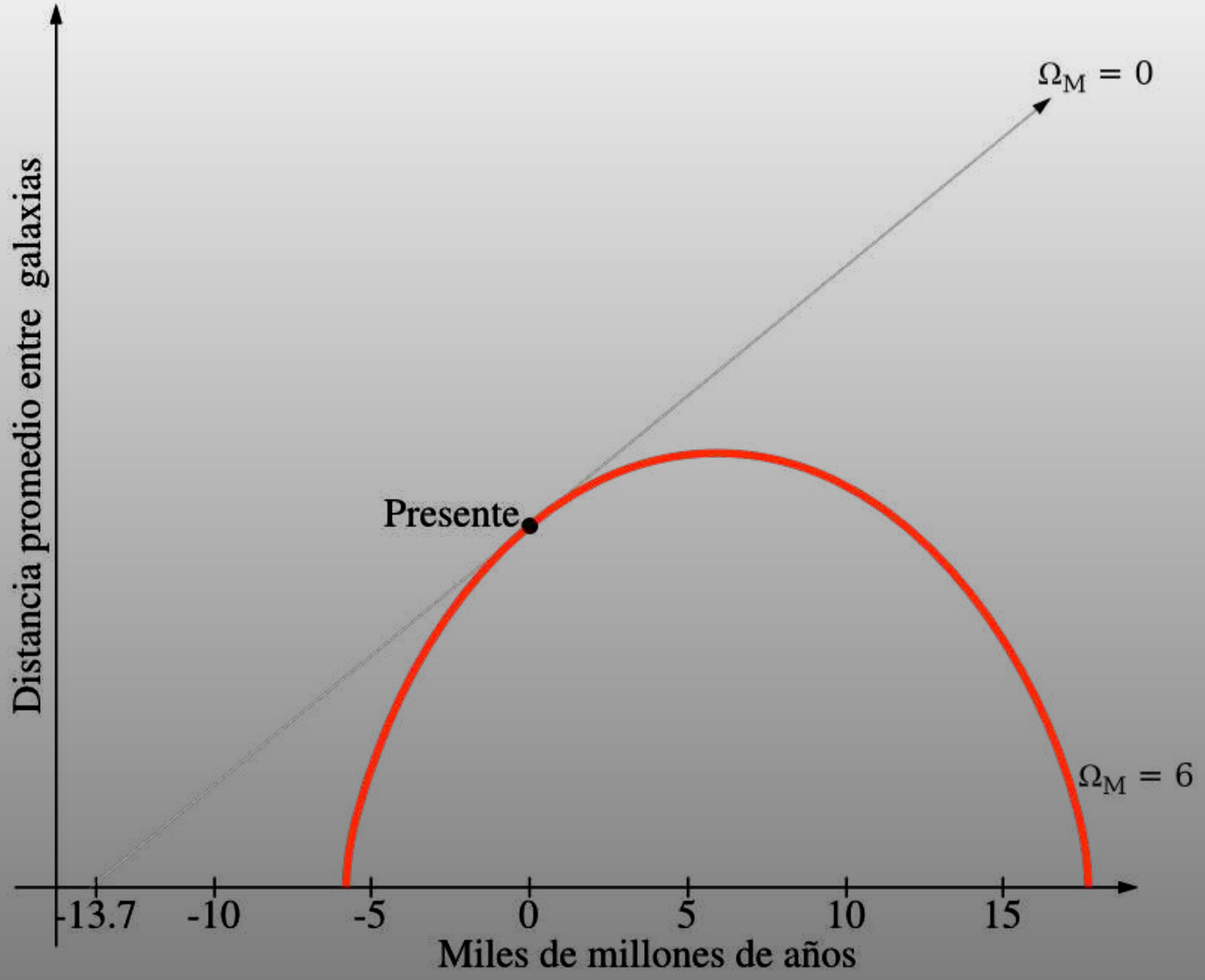
¡No confundir con el tamaño del universo!



¿Cómo cambia la distancia entre dos puntos en universos con diferente densidad de materia Ω_M?

Factor de Escala

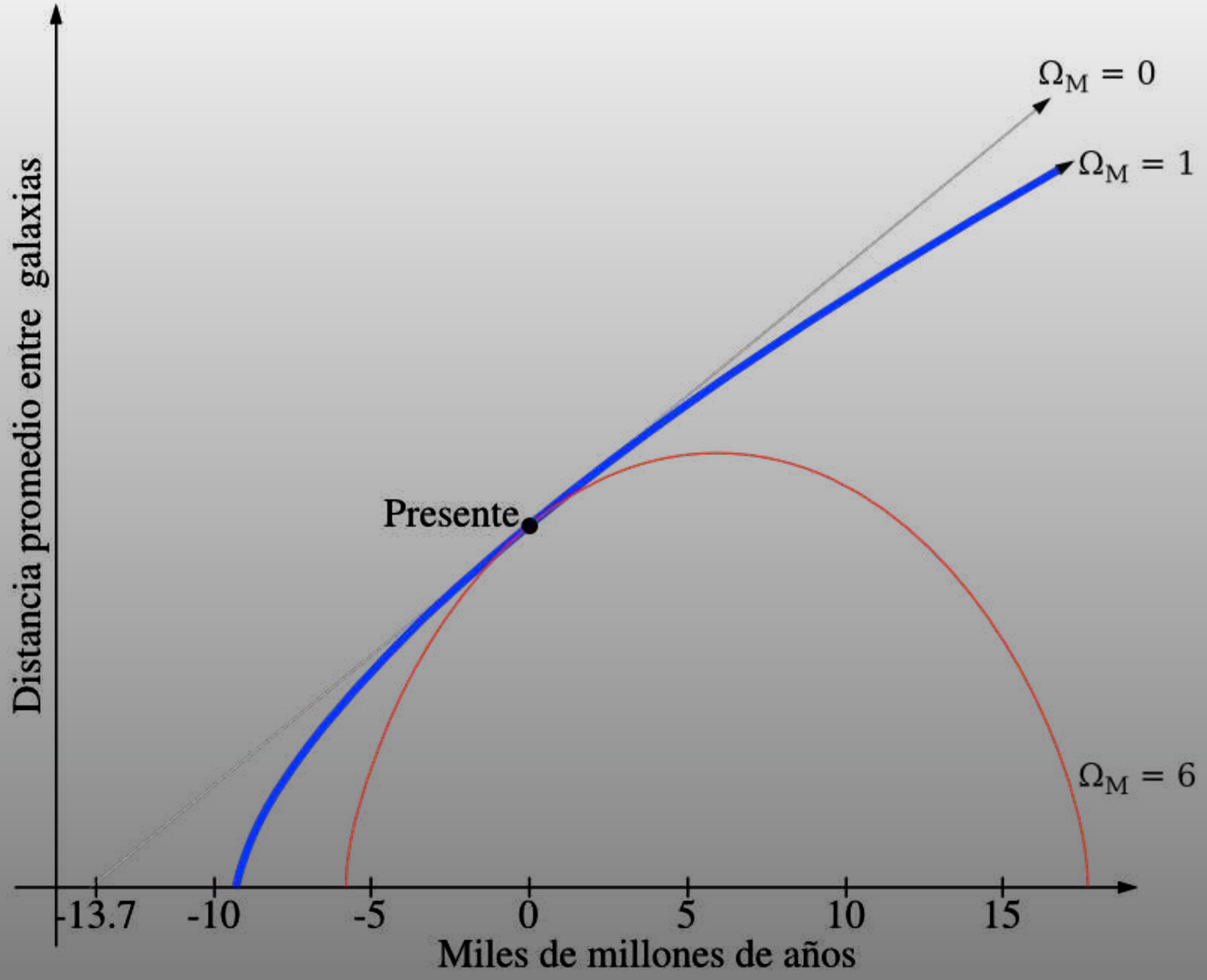
¡No confundir con el tamaño del universo!



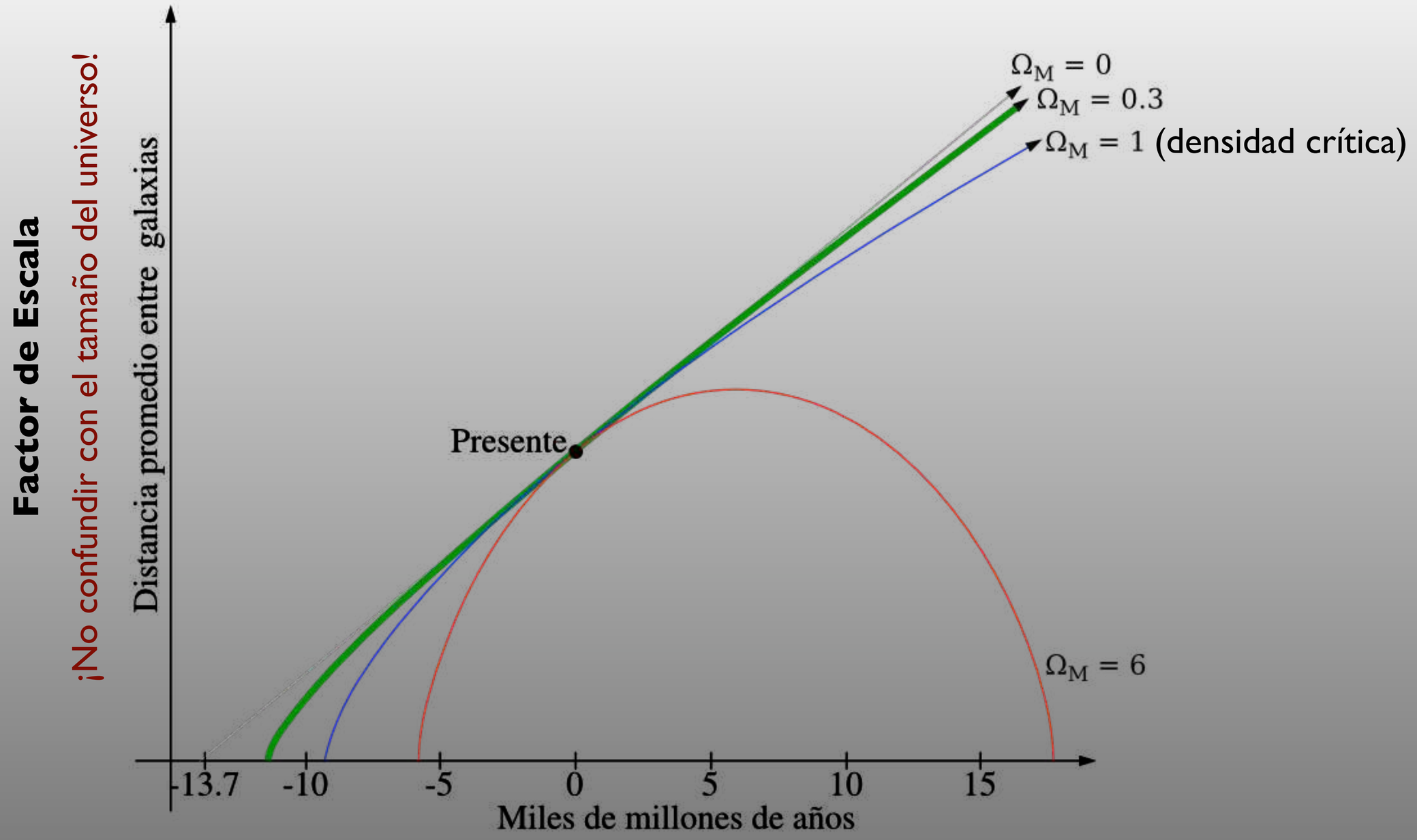
¿Cómo cambia la distancia entre dos puntos en universos con diferente densidad de materia Ω_M?

Factor de Escala

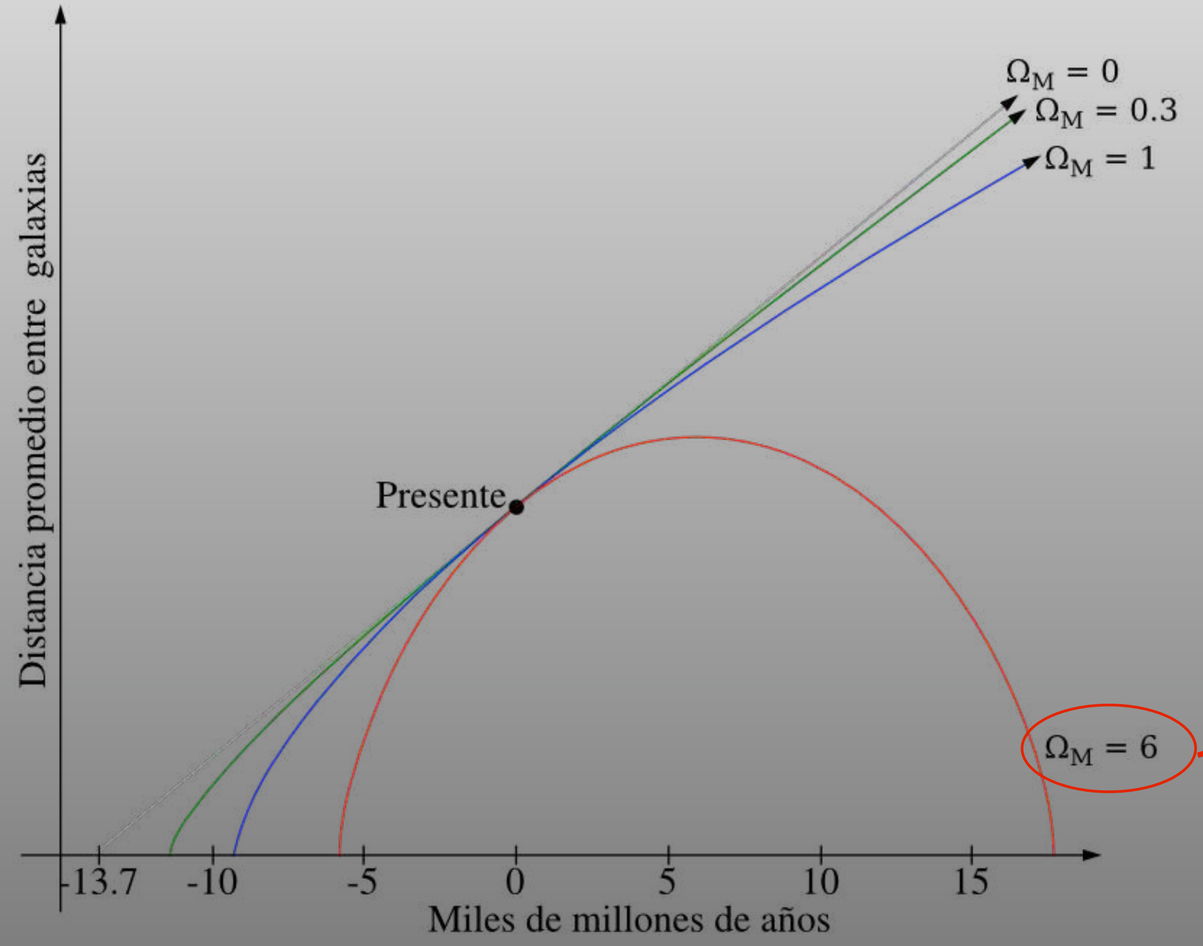
¡No confundir con el tamaño del universo!

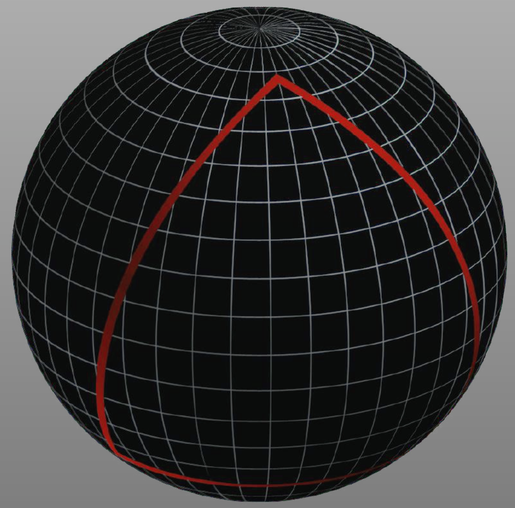


¿Cómo cambia la distancia entre dos puntos en universos con diferente densidad de materia Ω_M?



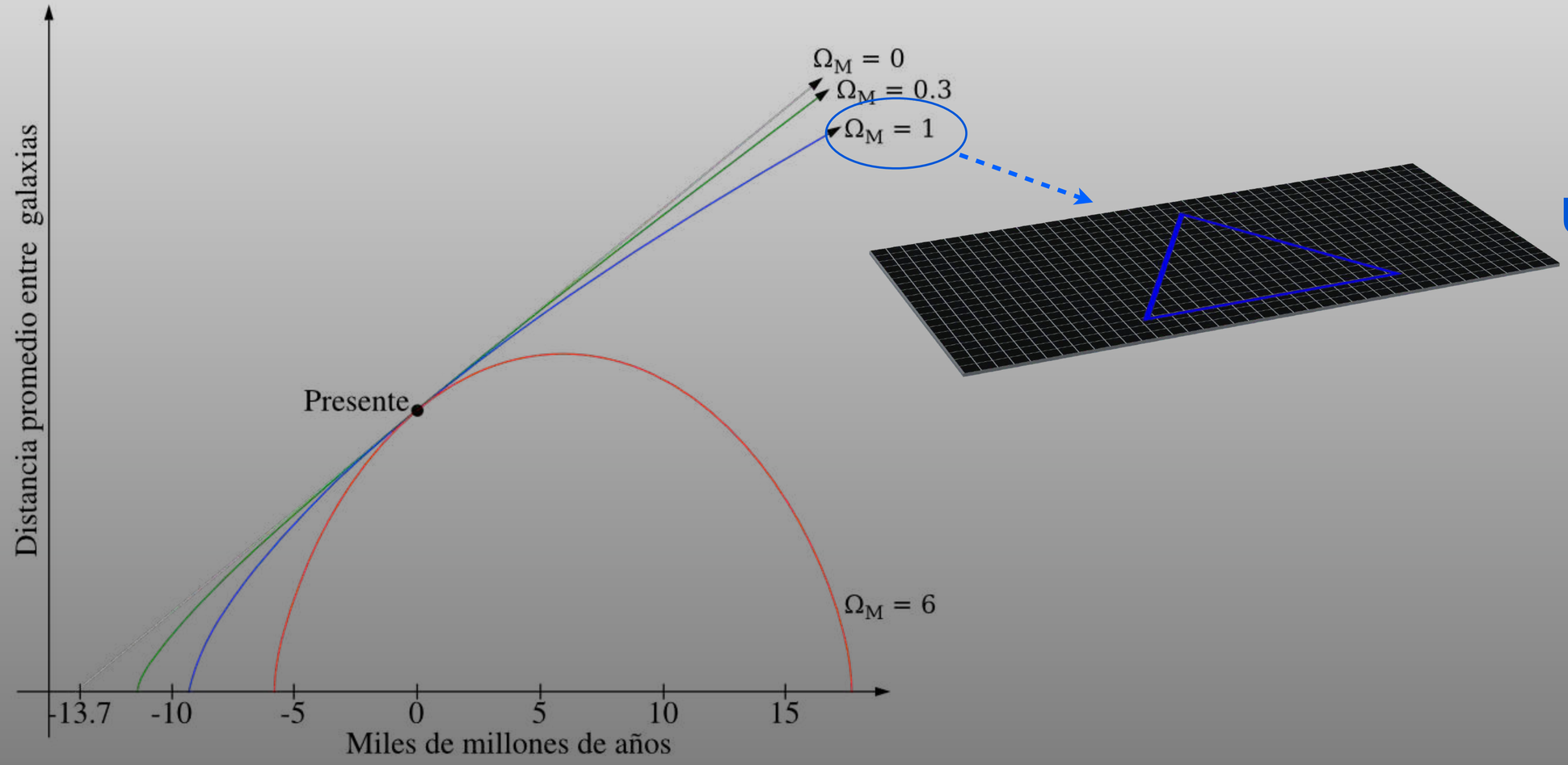
¿Cómo es la geometría asociada a universos con diferente densidad de materia Ω_M?





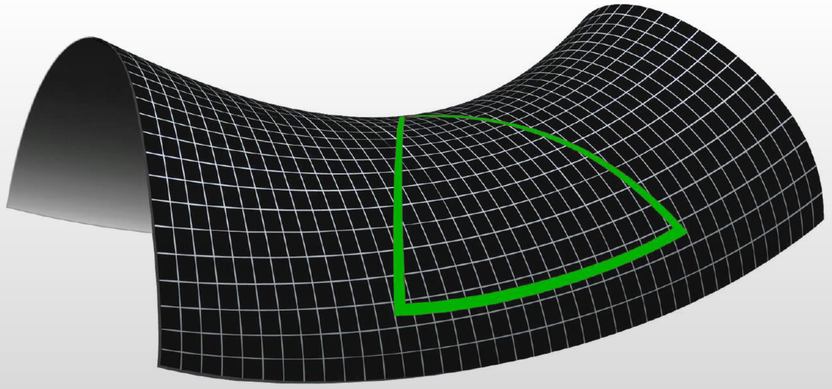
Universo cerrado
(curvatura positiva)

¿Cómo es la geometría asociada a universos con diferente densidad de materia Ω_M?

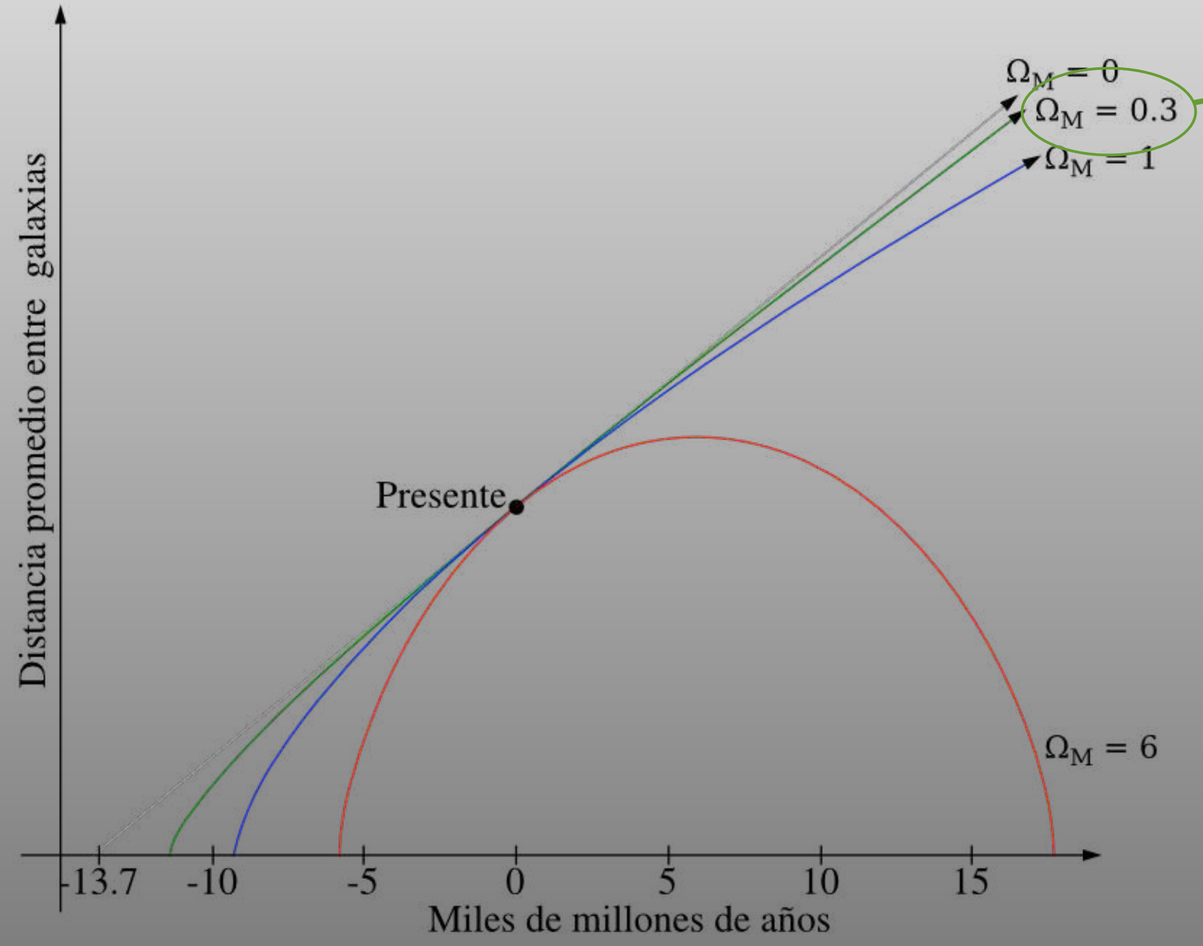


Universo "plano"
(curvatura nula)

¿Cómo es la geometría asociada a universos con diferente densidad de materia Ω_M?

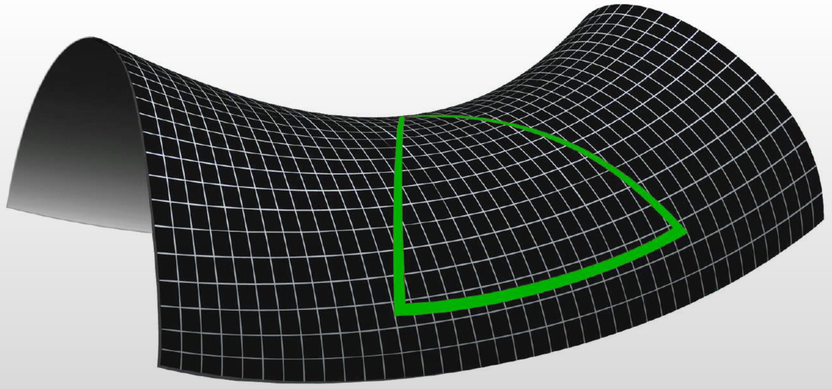


Universo abierto
(curvatura negativa)

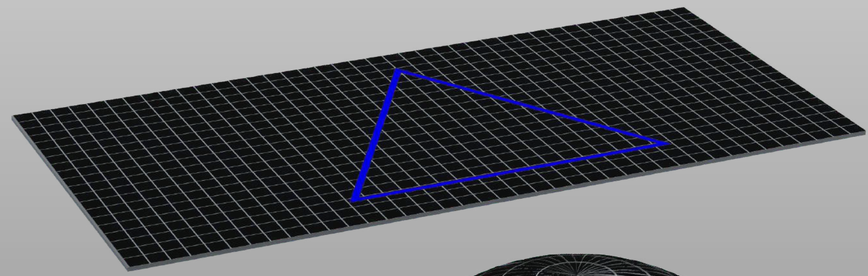


¿Cómo es la geometría asociada a universos con diferente densidad de materia Ω?

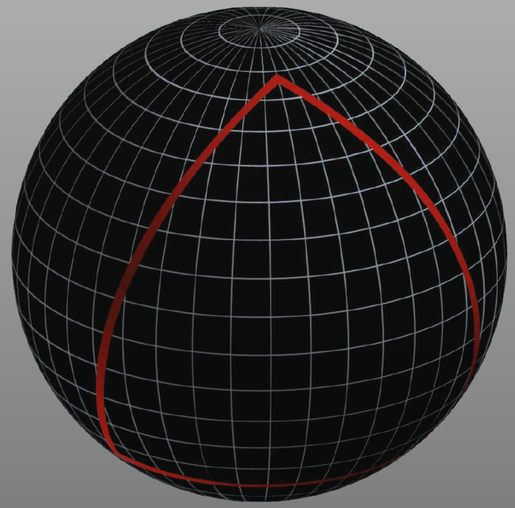
Inicialmente, midiendo la densidad de materia Ω_M (materia ordinaria + materia oscura) podríamos conocer la geometría del Universo.



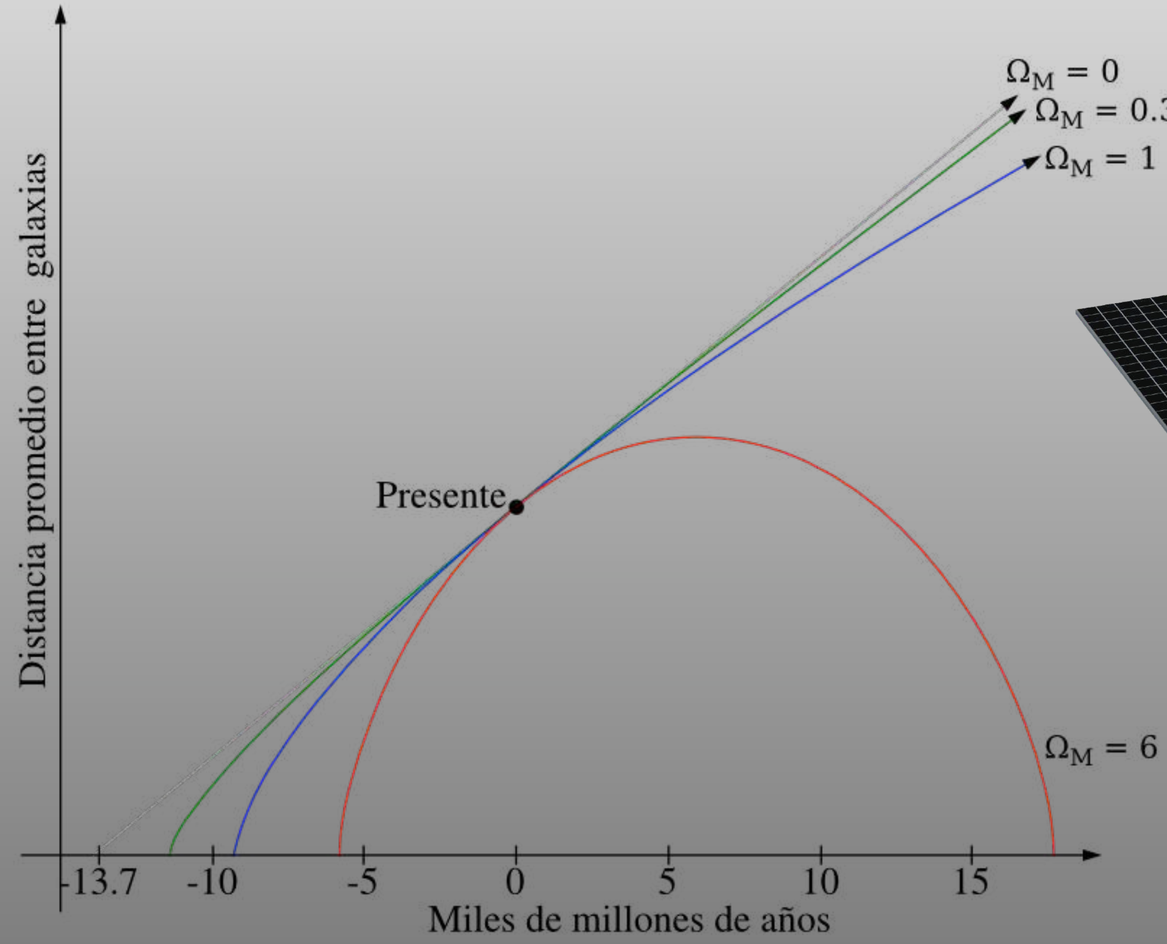
Universo abierto
(curvatura negativa)



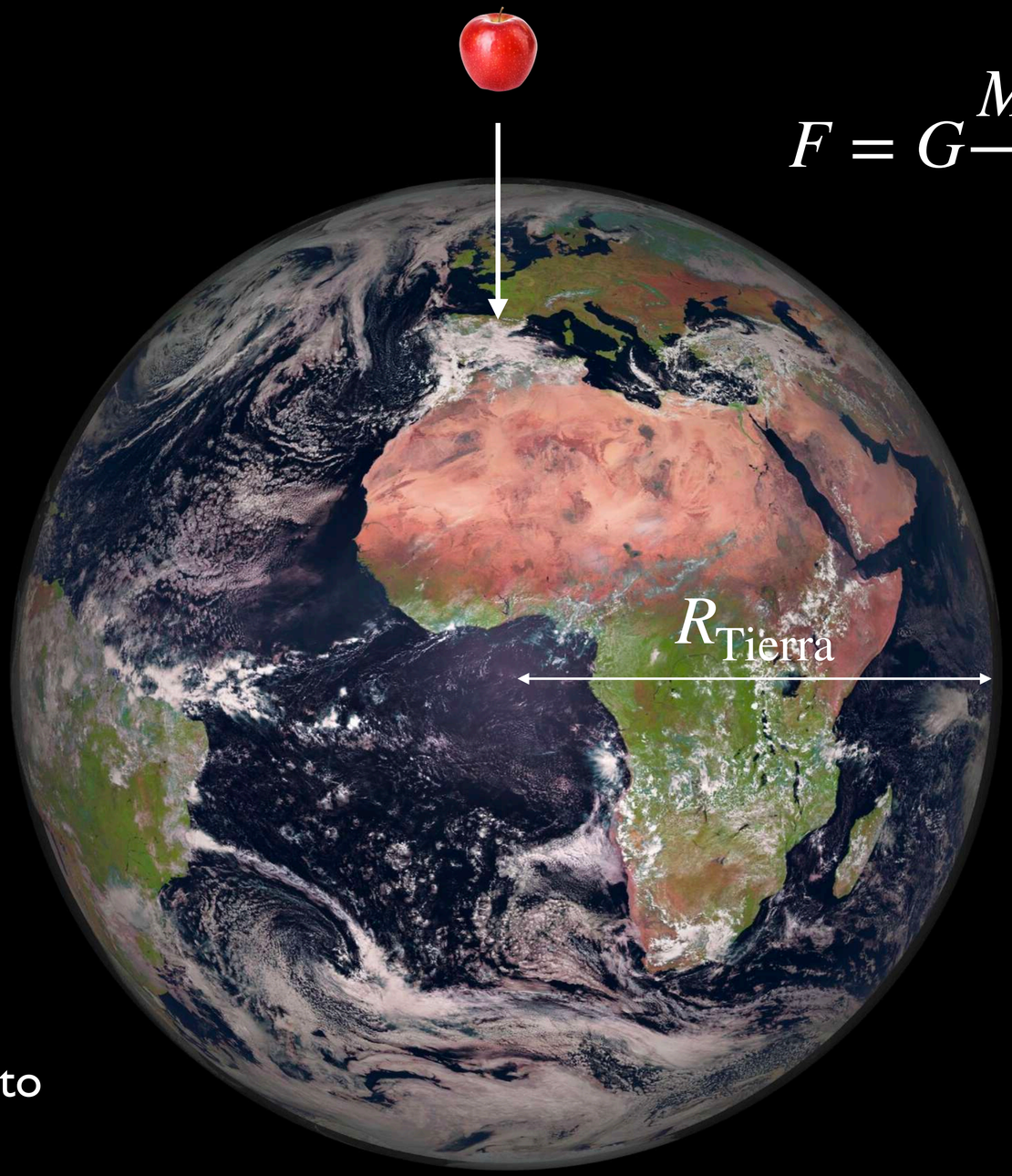
Universo "plano"
(curvatura nula)



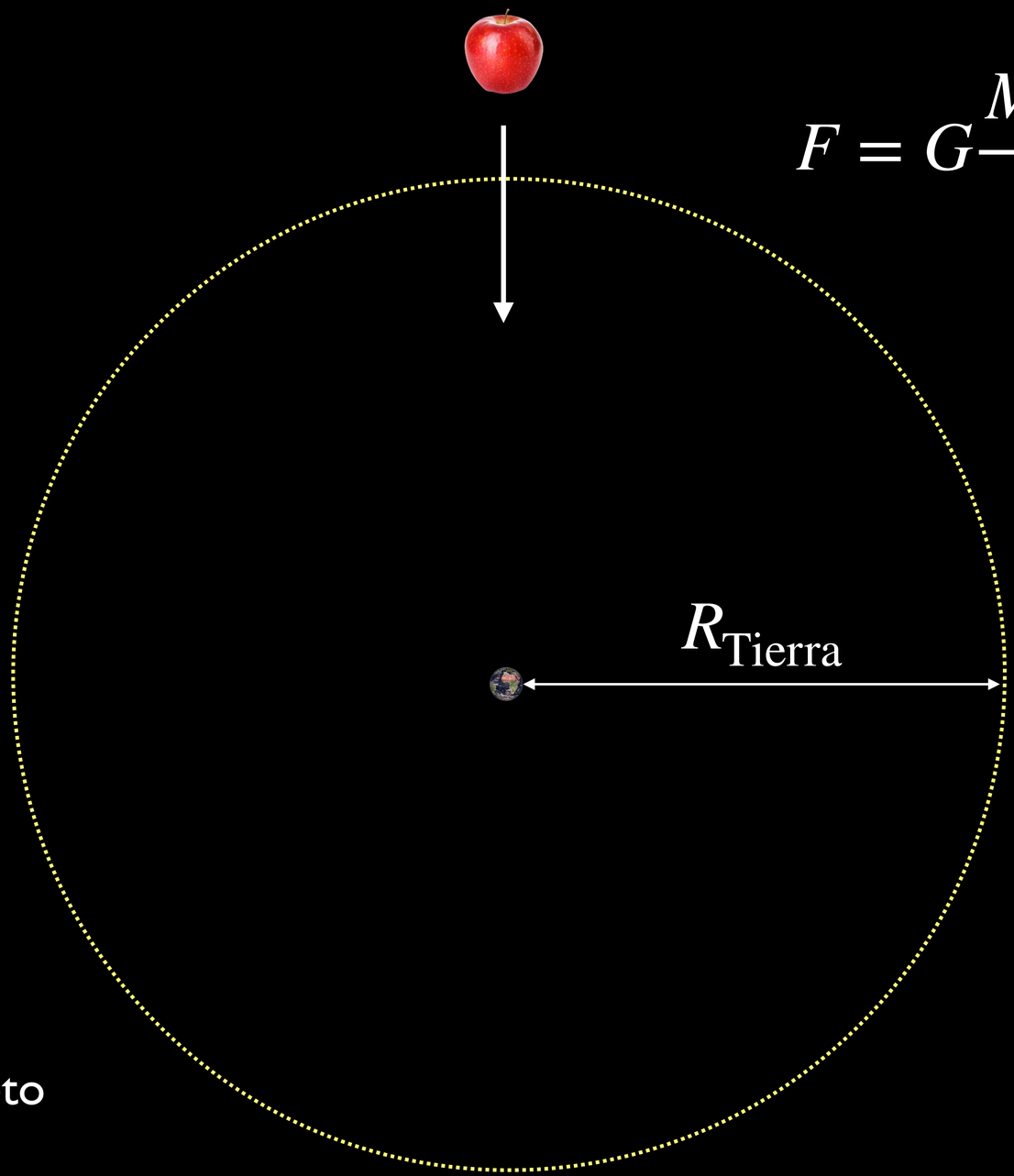
Universo cerrado
(curvatura positiva)



$$F = G\frac{M_{\text{Tierra}} \times m_{\text{manzana}}}{R^2_{\text{Tierra}}}$$



Cuando tenemos simetría esférica en la distribución de masa, podemos colocar toda la masa en el punto central y eso no cambiará la fuerza de la gravedad percibido por un objeto exterior.



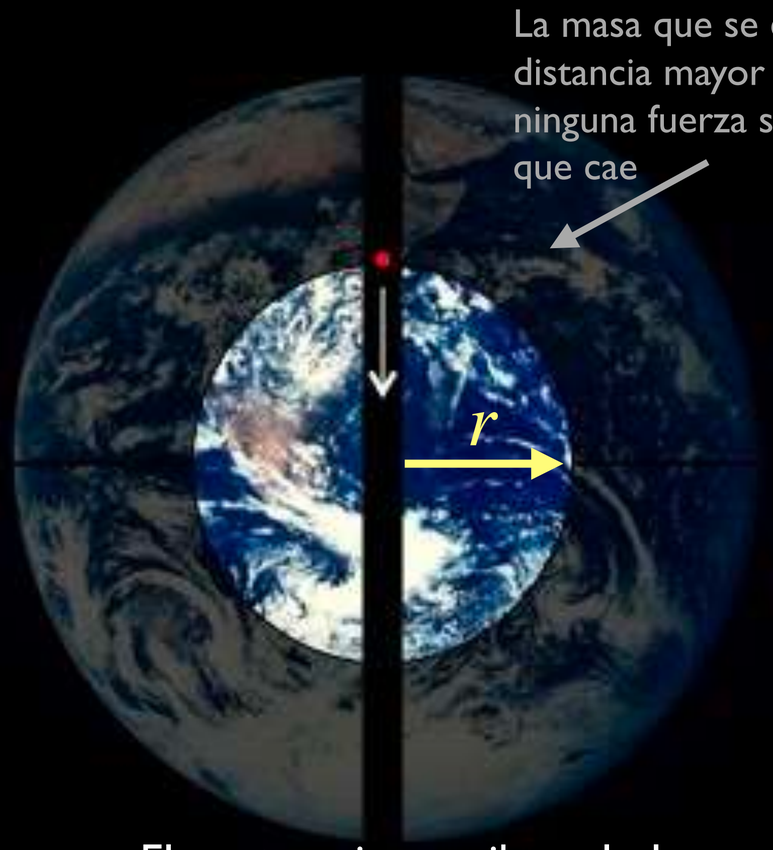
$$F = G\frac{M_{\text{Tierra}} \times m_{\text{manzana}}}{R^2_{\text{Tierra}}}$$

Cuando tenemos simetría esférica en la distribución de masa, podemos colocar toda la masa en el punto central y eso no cambiará la fuerza de la gravedad percibido por un objeto exterior.

Cuando hay simetría esférica, para calcular el efecto de la gravedad sobre un punto solo necesitamos conocer cuánta masa hay encerrada en una esfera interior a ese punto.

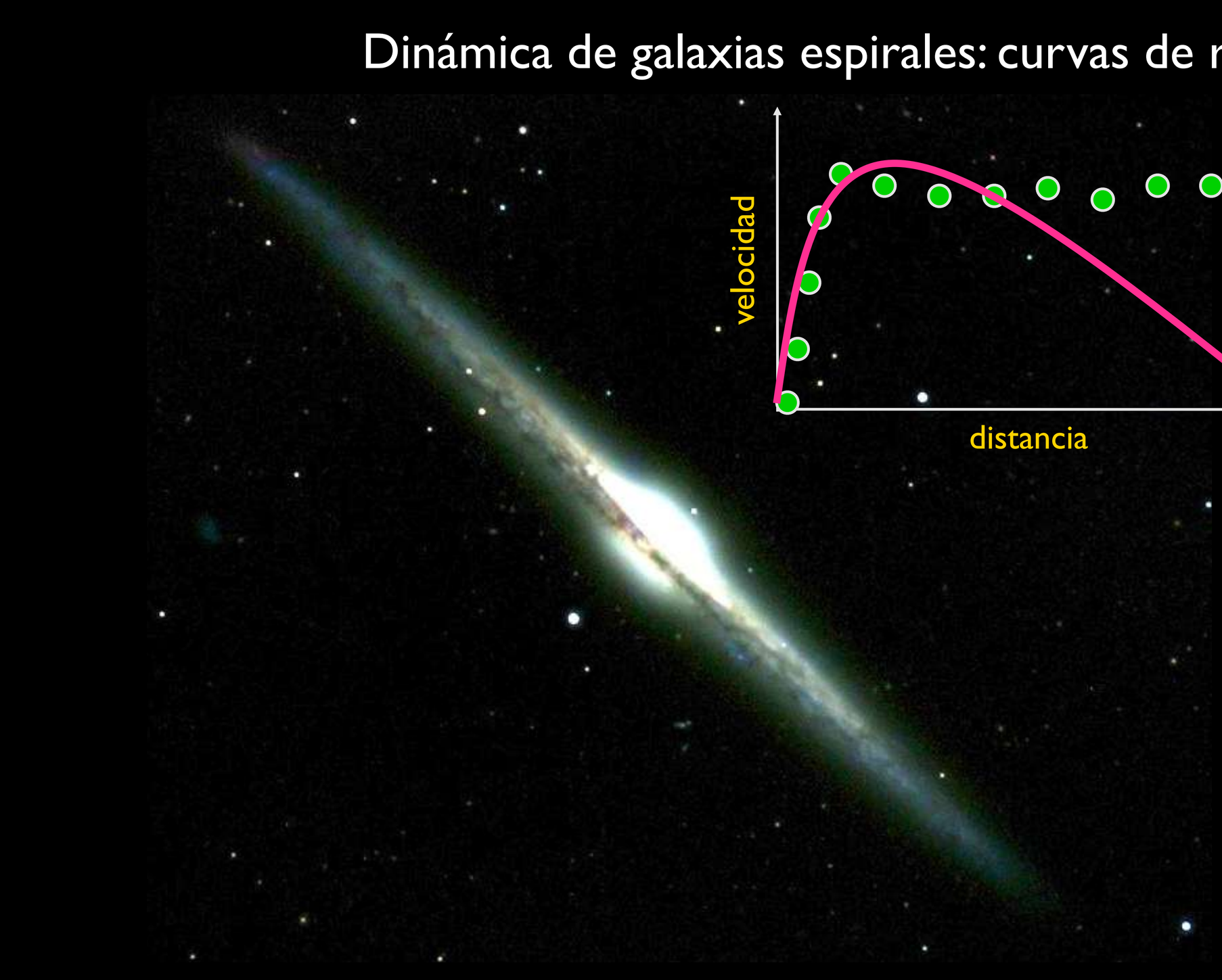


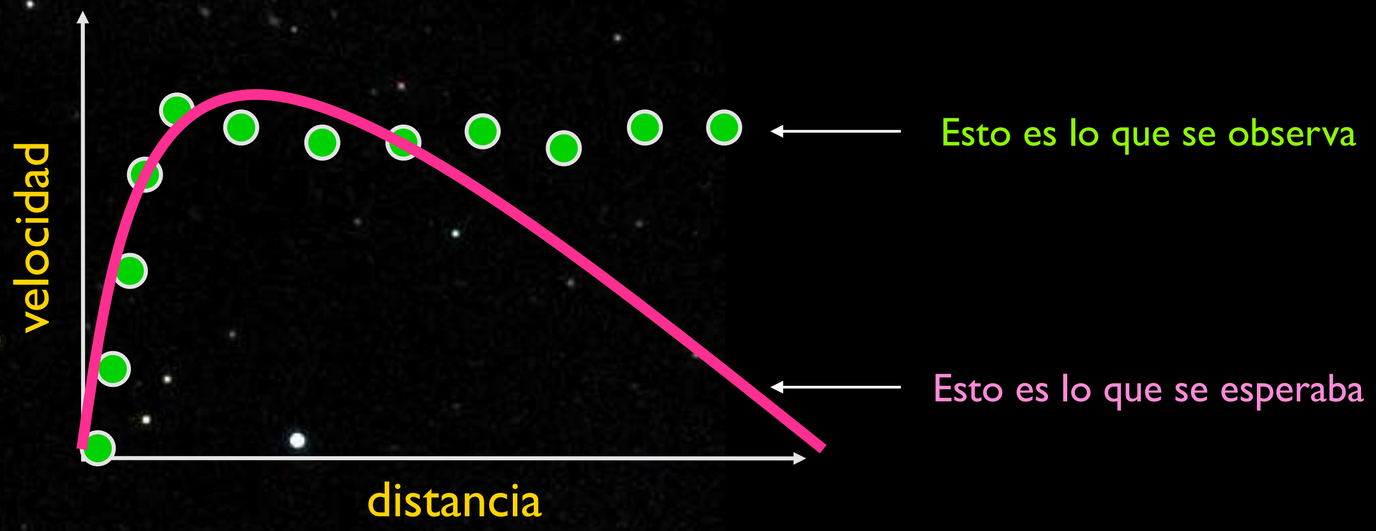
El punto rojo percibe la gravedad de toda la Tierra, como si toda su masa estuviera en el centro.



El punto rojo percibe solo la gravedad ejercida por el material dentro de un radio r, como si toda esa masa estuviera en el centro.

Dinámica de galaxias espirales: curvas de rotación





La distancia típica entre las estrellas es muy pequeña en comparación con sus tamaños. Podemos ignorar la interacción entre estrellas.

Cada estrella solo percibe el efecto gravitatorio del conjunto del resto de las estrellas encerradas en una esfera interior.

Dinámica de galaxias espirales: curvas de rotación



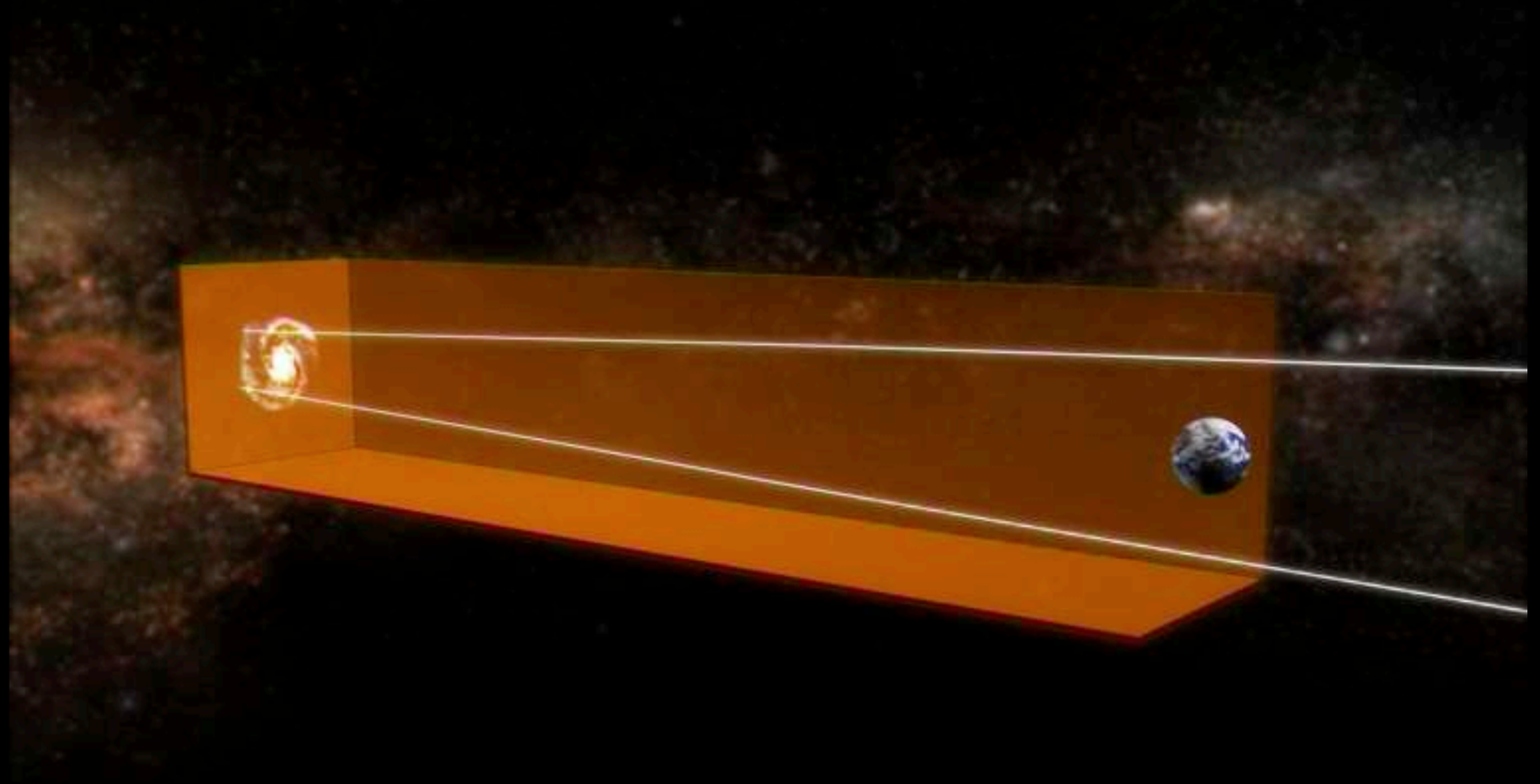
La existencia de un halo de materia oscura (de naturaleza todavía desconocida a día de hoy) explica por qué las estrellas en las partes exteriores de las galaxias espirales se mueven a velocidades más altas de lo esperado si solo se tiene en cuenta la presencia de las estrellas luminosas.

A medida que nos alejamos del centro de la galaxia, las estrellas exteriores perciben que hay más materia.

La extensión de estos halos, difícil de determinar, debe ser, como mínimo, de 50 - 100 kpc (más grande de lo que podemos ver en forma de estrellas).

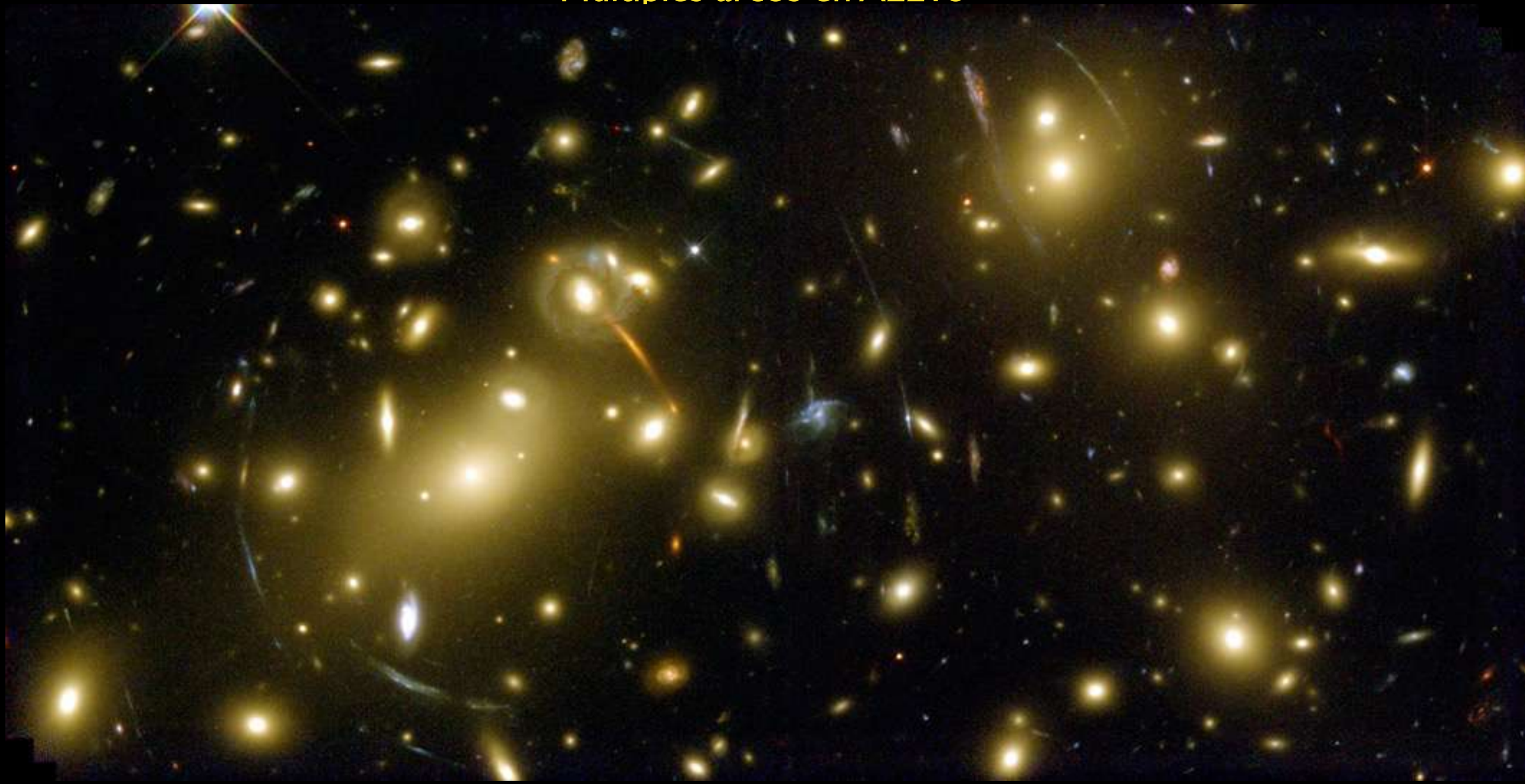
Las estimaciones indican que la masa en los halos de materia oscura pueden contener entre 5 a 10 veces la masa en estrellas + gas + polvo

Lentes gravitatorias

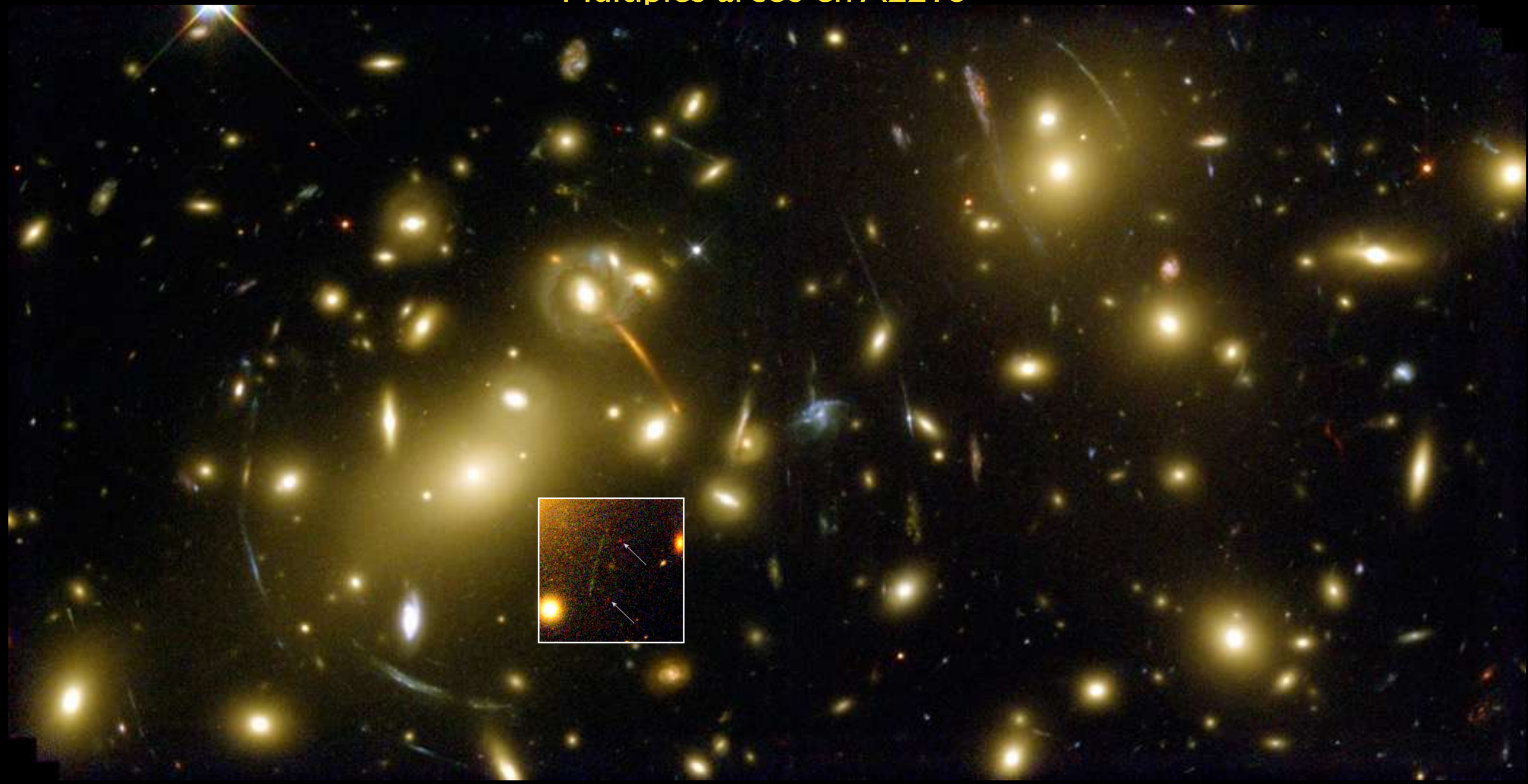


https://www.spacetelescope.org/videos/hst15_gravitational_lensing/

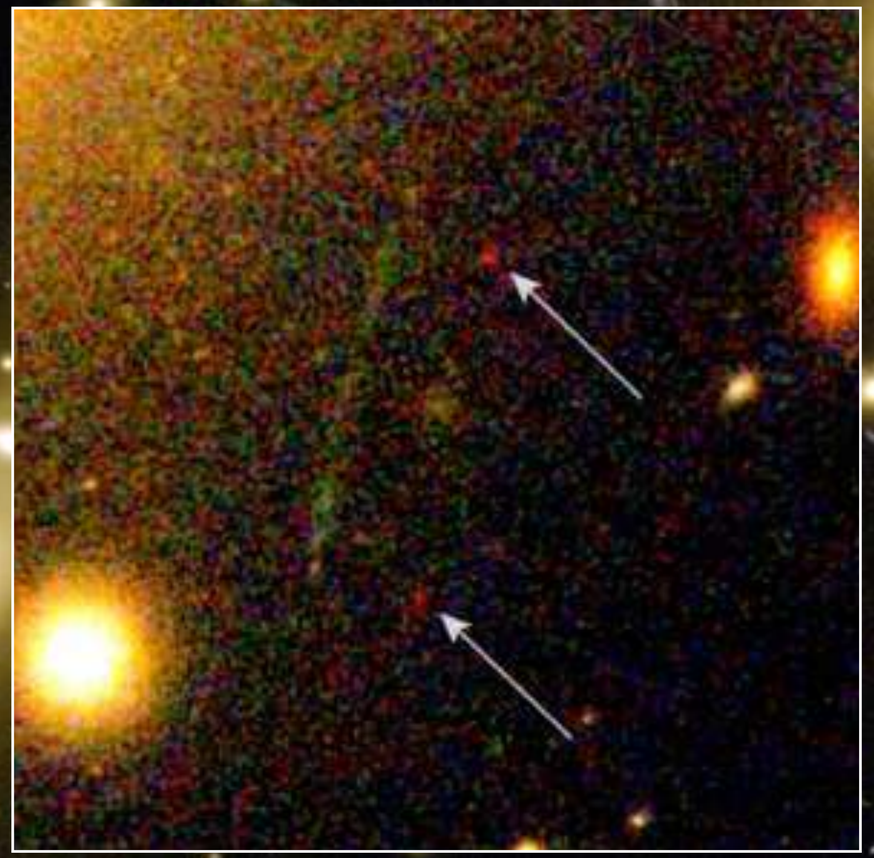
Múltiples arcos en A2218



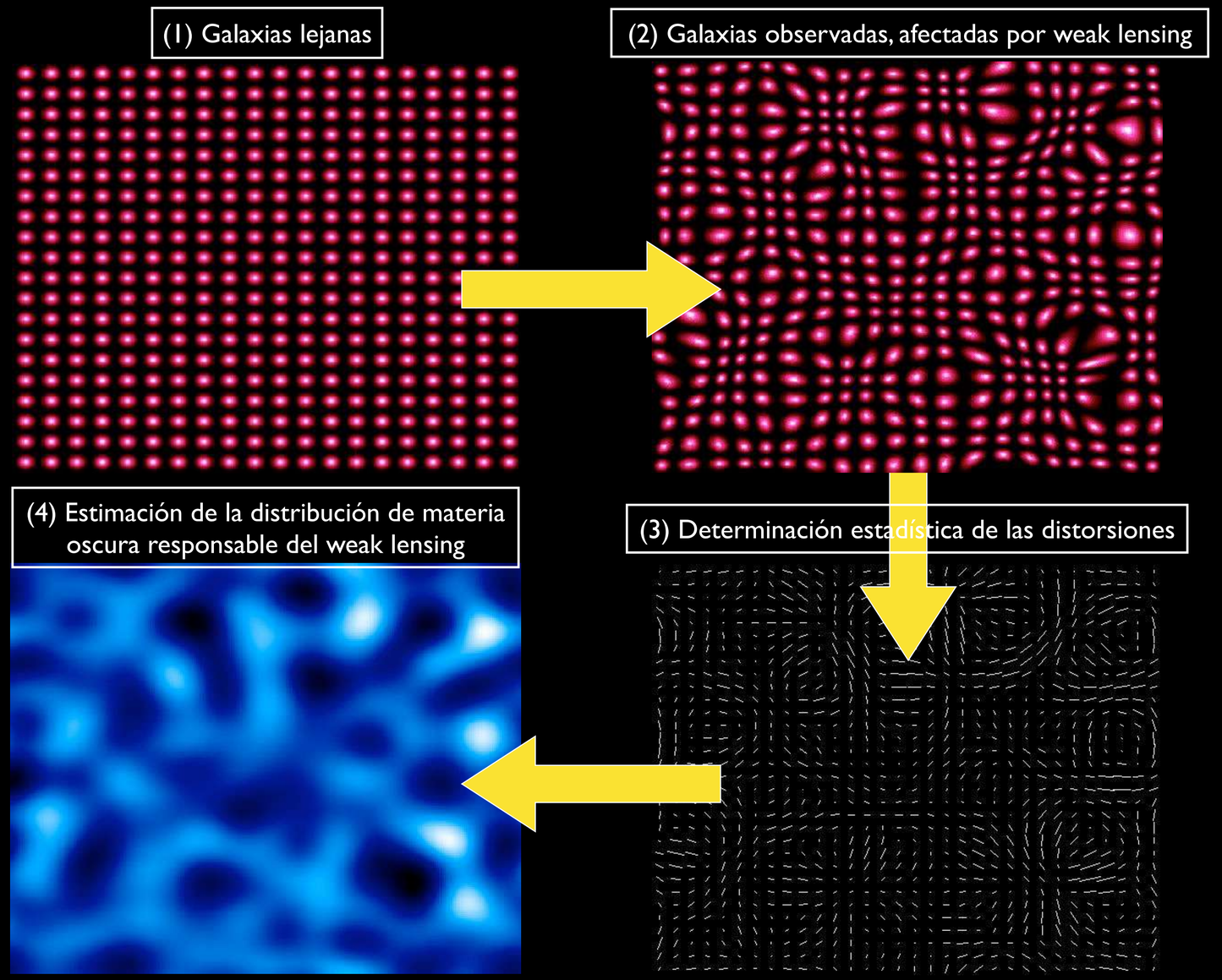
Múltiples arcos en A2218



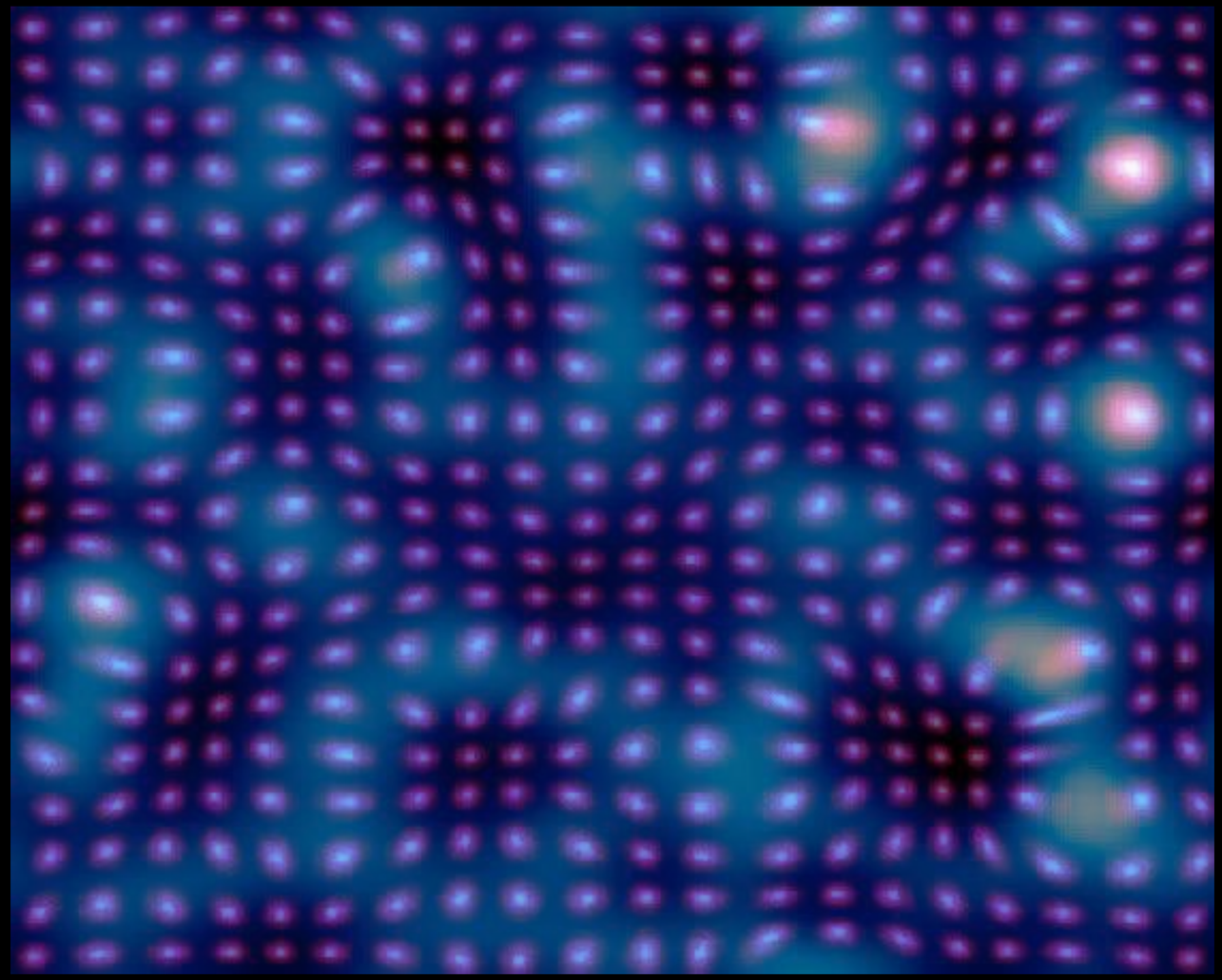
Múltiples arcos en A2218



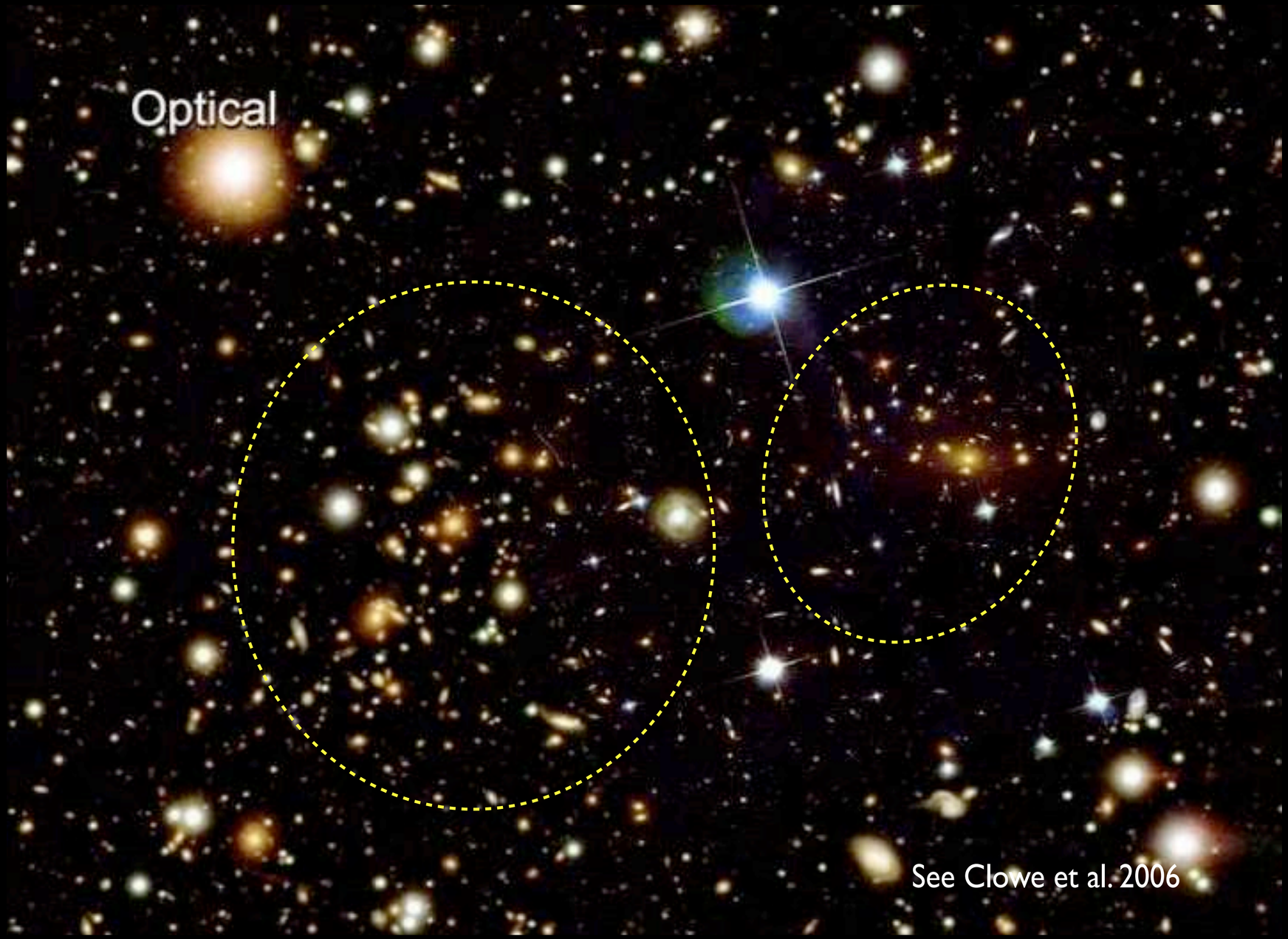
Cuando la densidad del objeto que actúa como lente gravitacional no es muy grande, no se forman imagen múltiples, pero sí se producen distorsiones de las galaxias lejanas (lentes débiles o “weak lensing”).



Cuando la densidad del objeto que actúa como lente gravitacional no es muy grande, no se forman imagen múltiples, pero sí se producen distorsiones de las galaxias lejanas (lentes débiles o “weak lensing”).



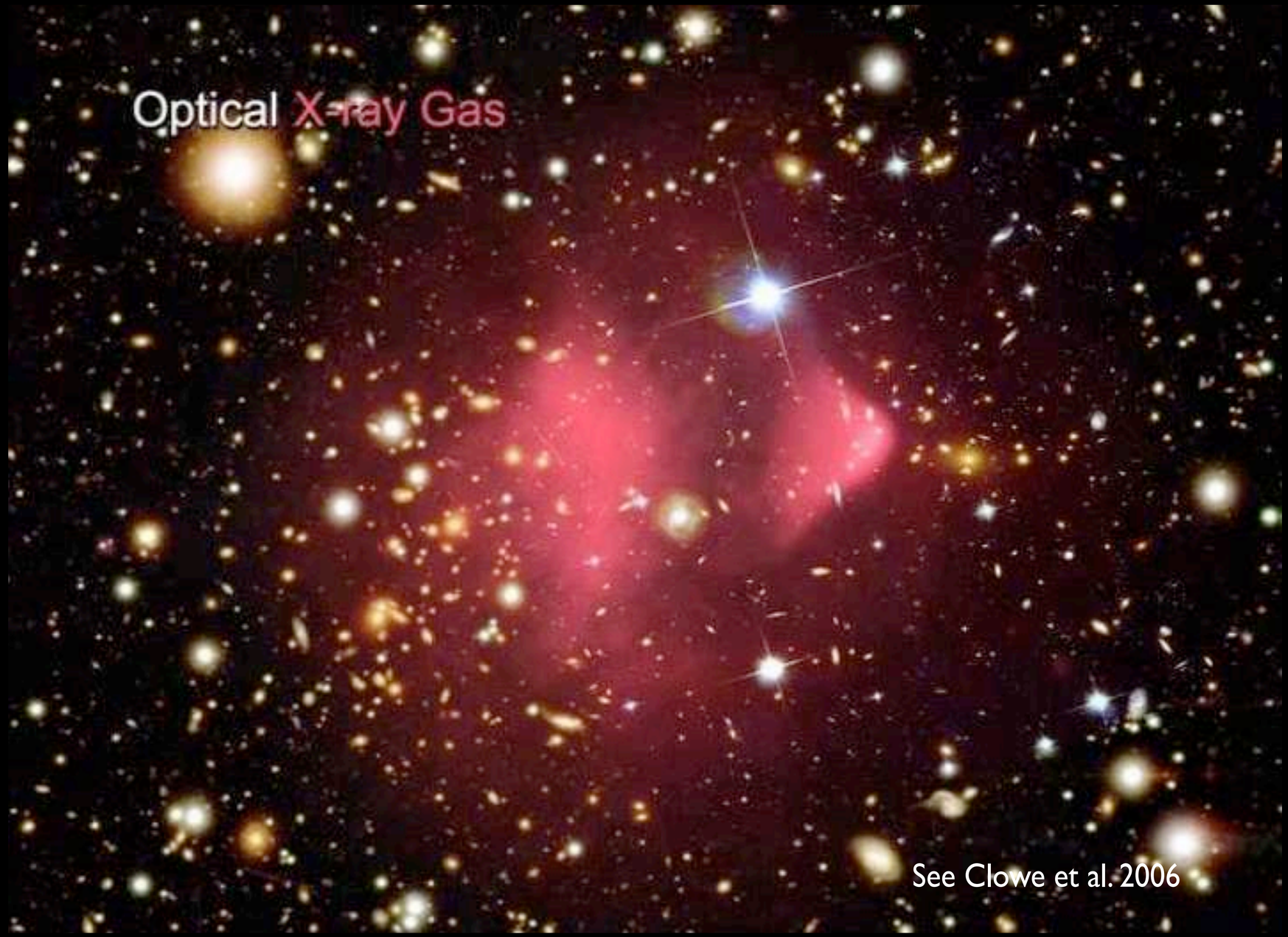
Cúmulo de la Bala



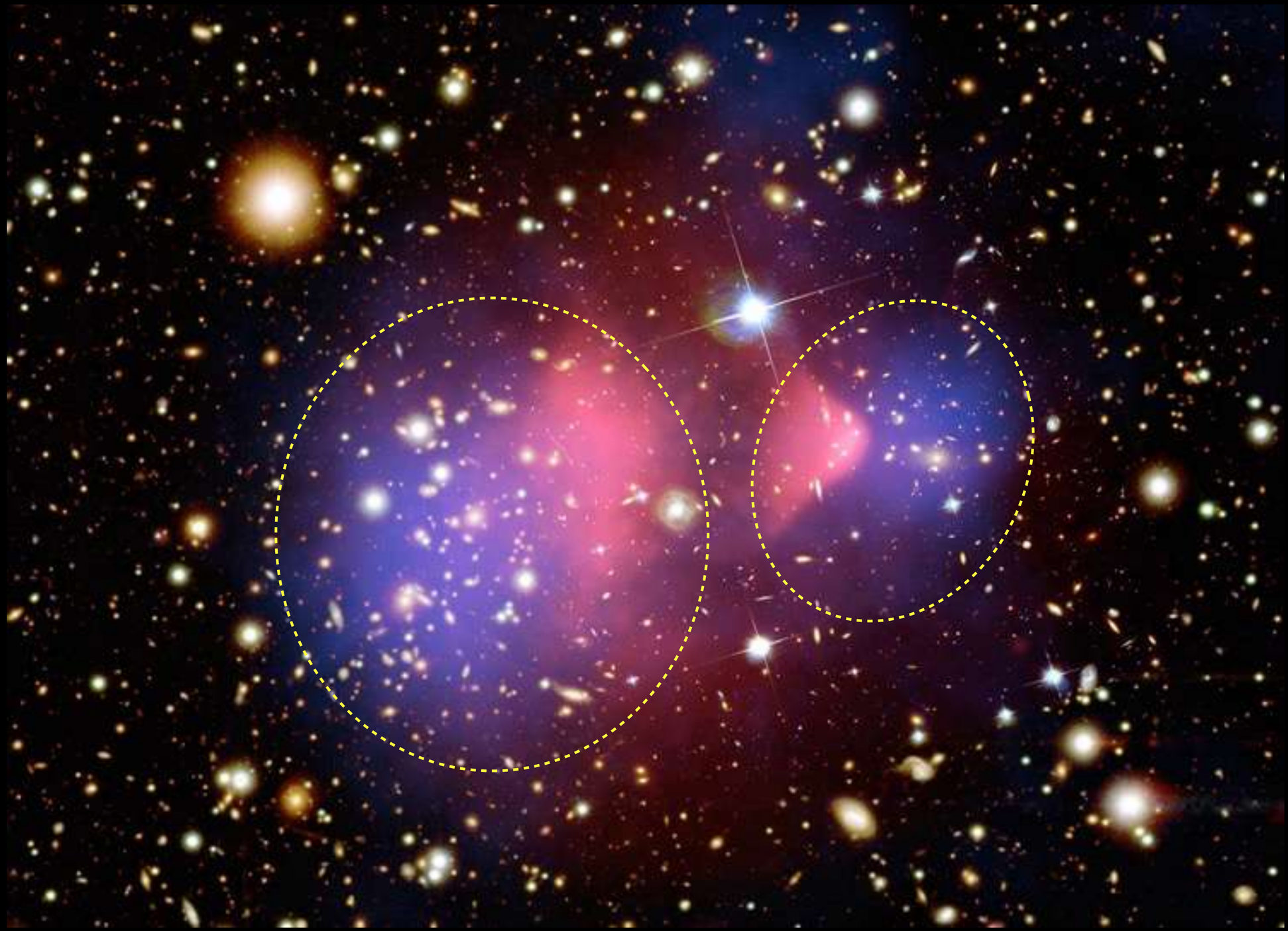


Distribución de materia oscura (determinada a partir de lentes gravitacionales, fuertes y débiles)

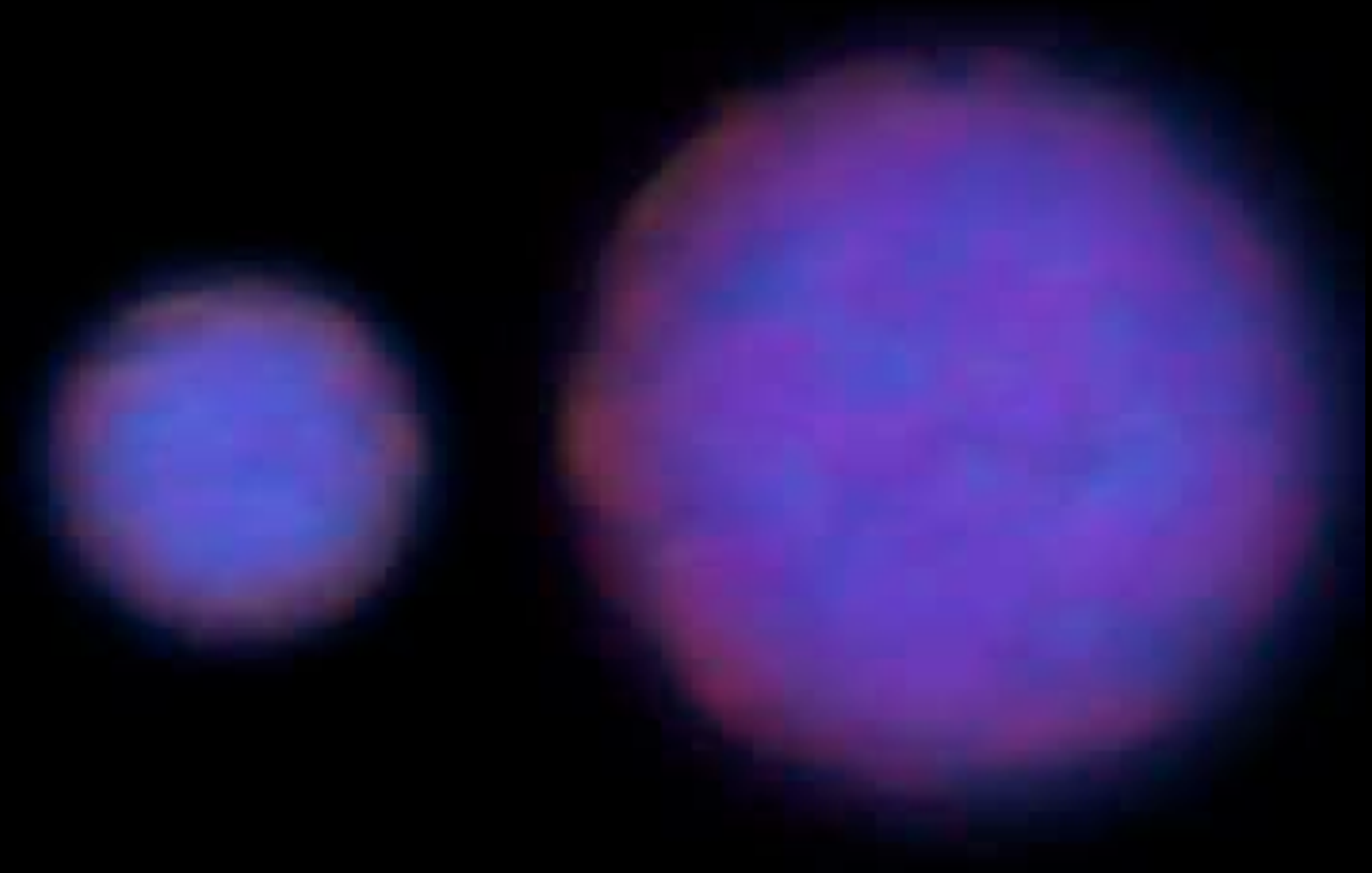
Cúmulo de la Bala



Distribución de materia visible (gas intracumular caliente emisor en rayos X)



Cúmulo de la Bala



El cúmulo menor (la bala) ha atravesado el otro, hace ~150x10^6 años. Las galaxias y la materia oscura no han interaccionado apenas pero el gas intergaláctico ha chocado produciendo un frente de choque con material más caliente.

La distribución de materia oscura no sigue a la de la materia visible (gas intracumular)

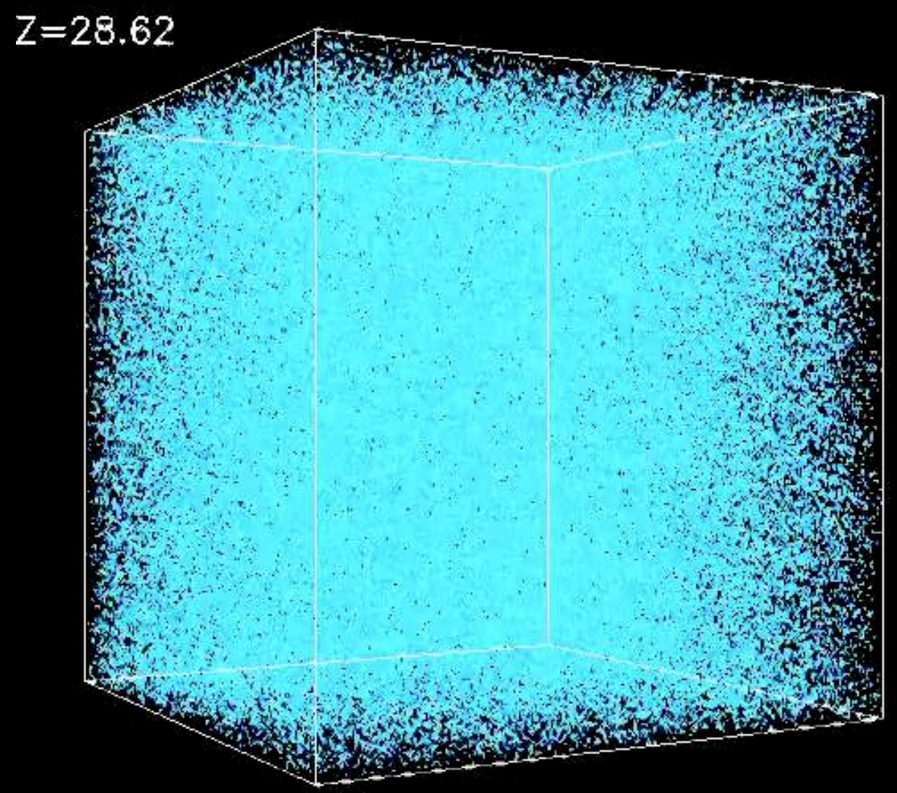
Mejor evidencia hasta la fecha a favor de la realidad de la existencia de materia oscura y en contra de las posibles teorías de gravitación modificada



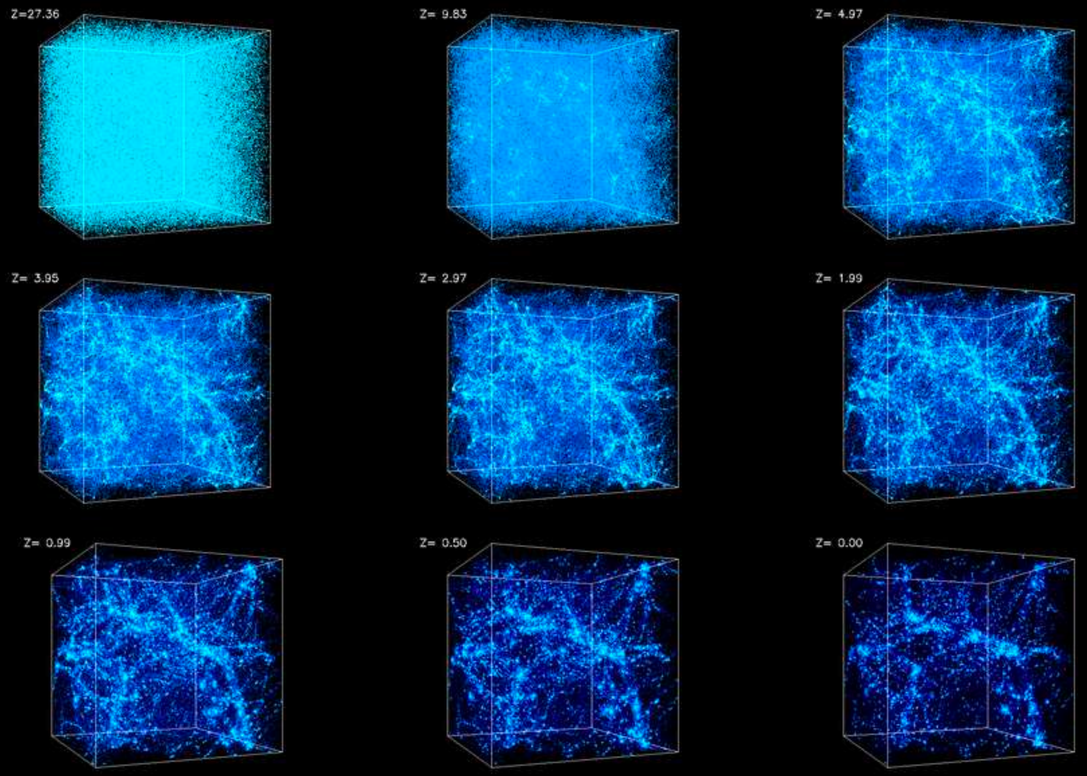
Otro ejemplo:
MACS J0025.4-1222

Modelizando el Universo

Podemos construir modelos "de juguete" del Universo para estudiar cómo se han podido formas las grandes estructuras a través del tiempo. Para simplificar, se puede partir de una distribución relativamente homogénea de materia oscura y se hace evolucionar el sistema sometido a la expansión del espacio y al efecto de la gravedad.



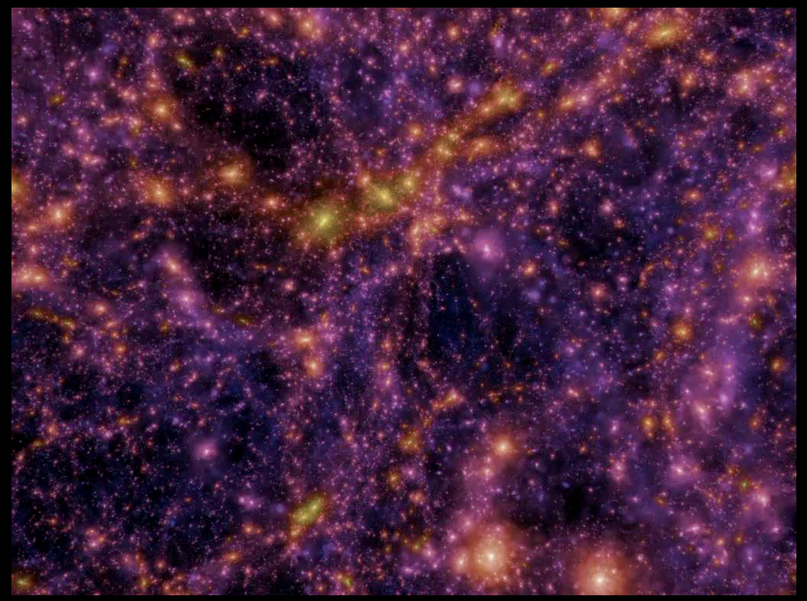
http://cosmicweb.uchicago.edu/filaments.html

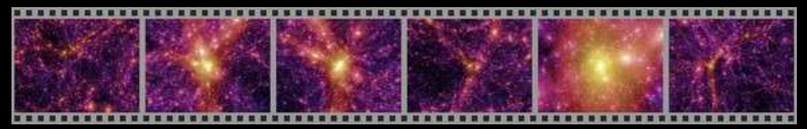


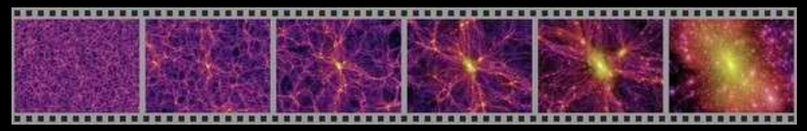
El volumen de la región representada aumenta con el tiempo debido a la expansión del Universo, aunque aquí se muestra siempre con el mismo tamaño para apreciar mejor la aparición de estructuras.

La simulación de milenio

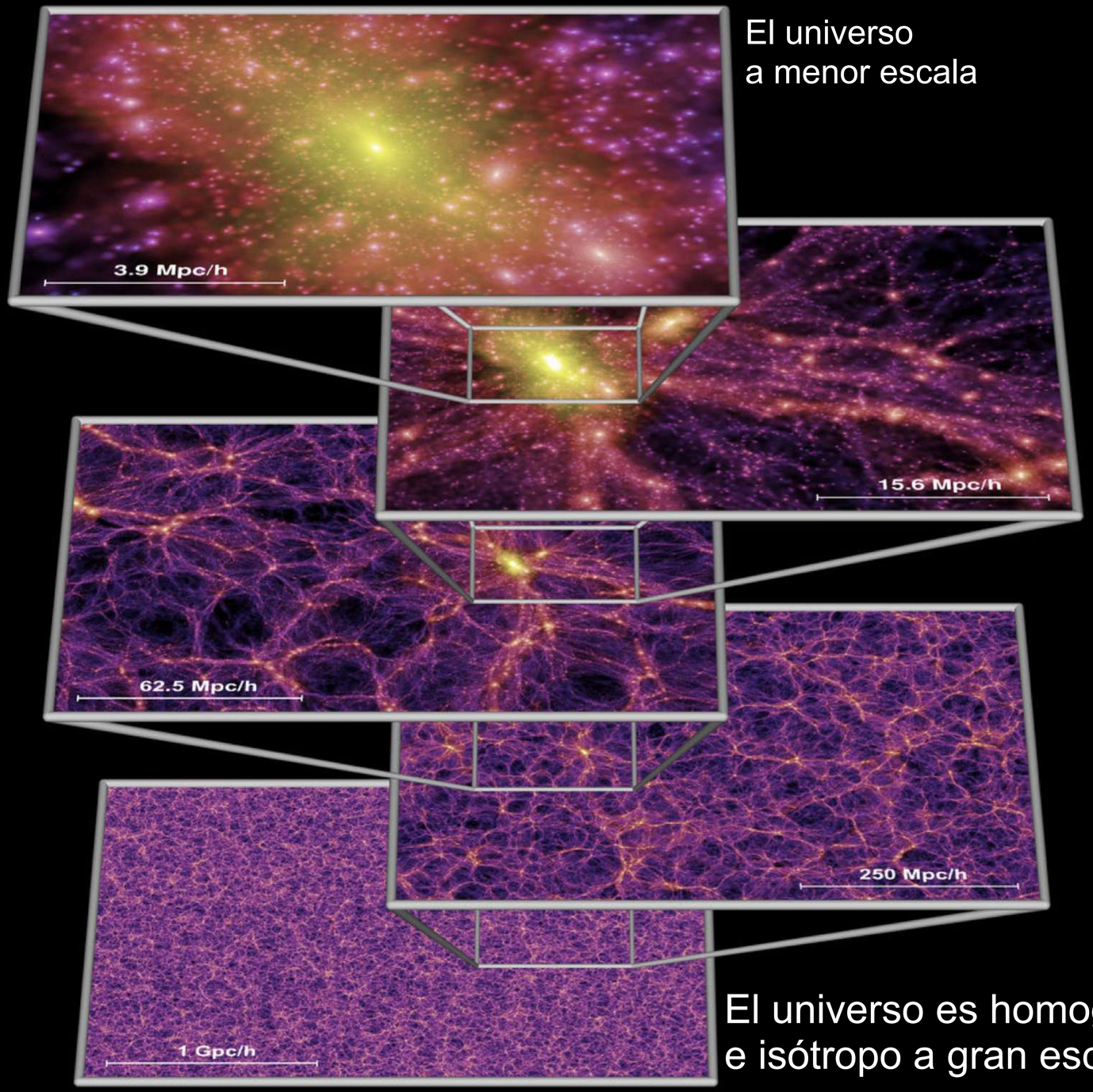
(Springel et al. 2005)







https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/



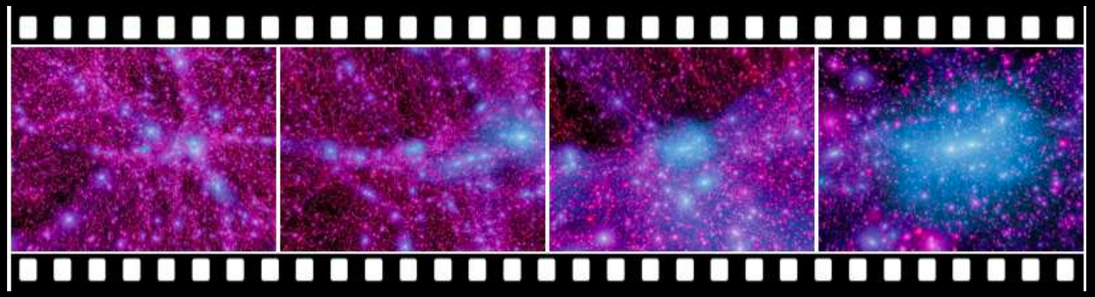
El universo
a menor escala

El universo es homogéneo
e isótropo a gran escala

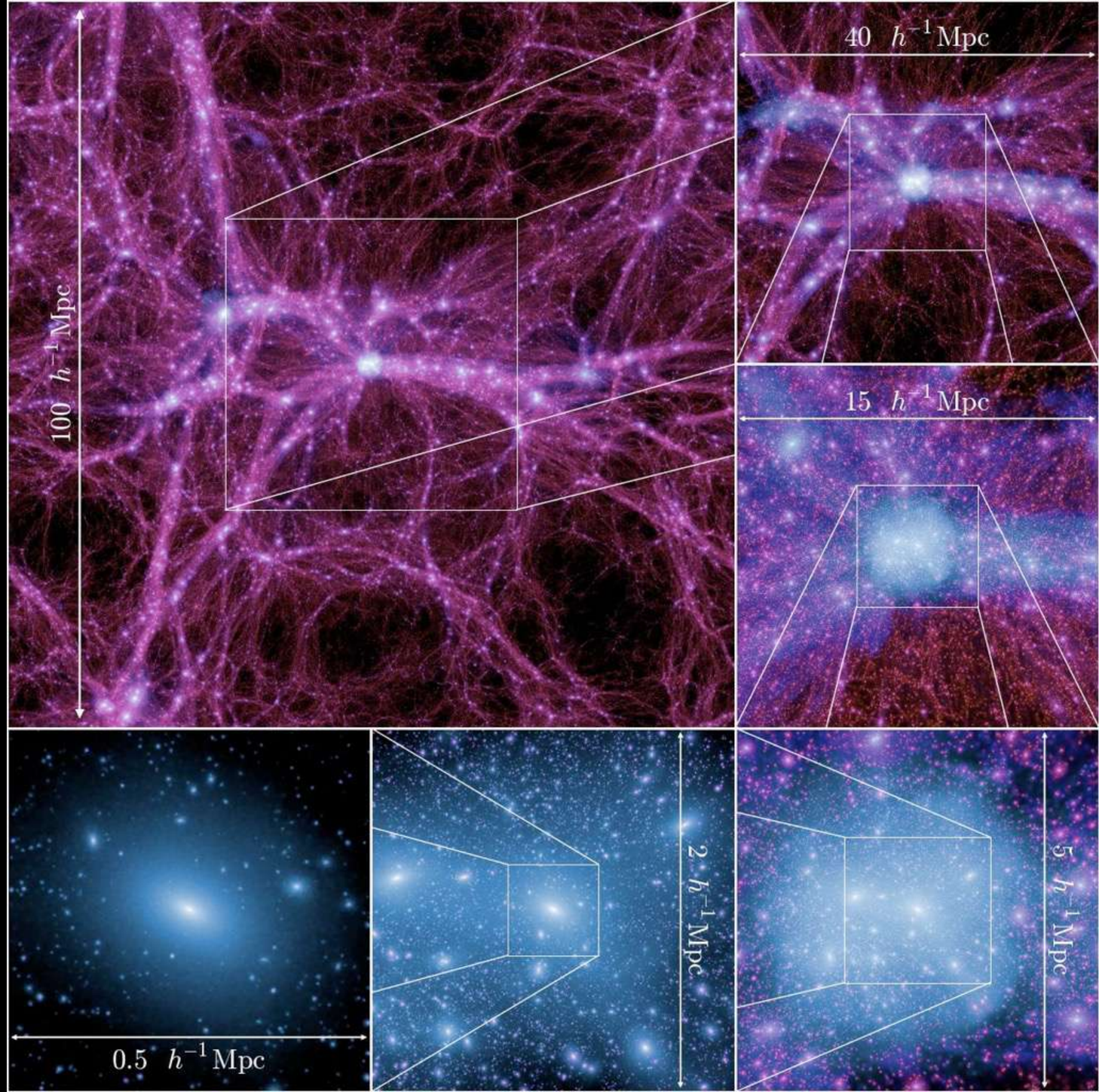
Millennium II

(Boylan-Kolchin et al. 2009)





https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium-II/



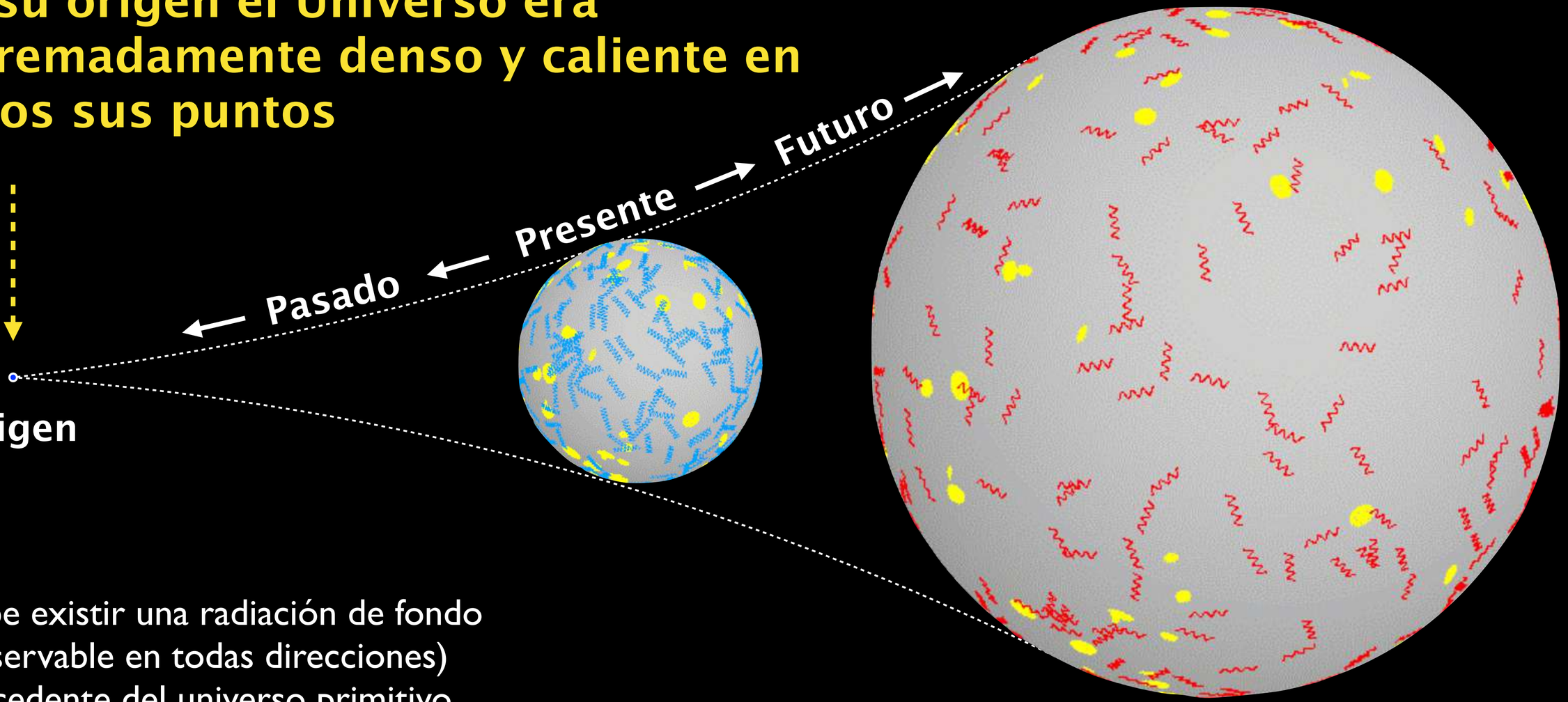
¡El universo tuvo un origen!

El mejor modelo cosmológico disponible es el del “Big Bang” (Gran Explosión)

¿En qué pruebas se basa?

- Expansión del Universo
- Detección de una radiación cósmica de fondo en microondas
- Abundancias de elementos químicos: nucleosíntesis primordial

En su origen el Universo era extremadamente denso y caliente en todos sus puntos



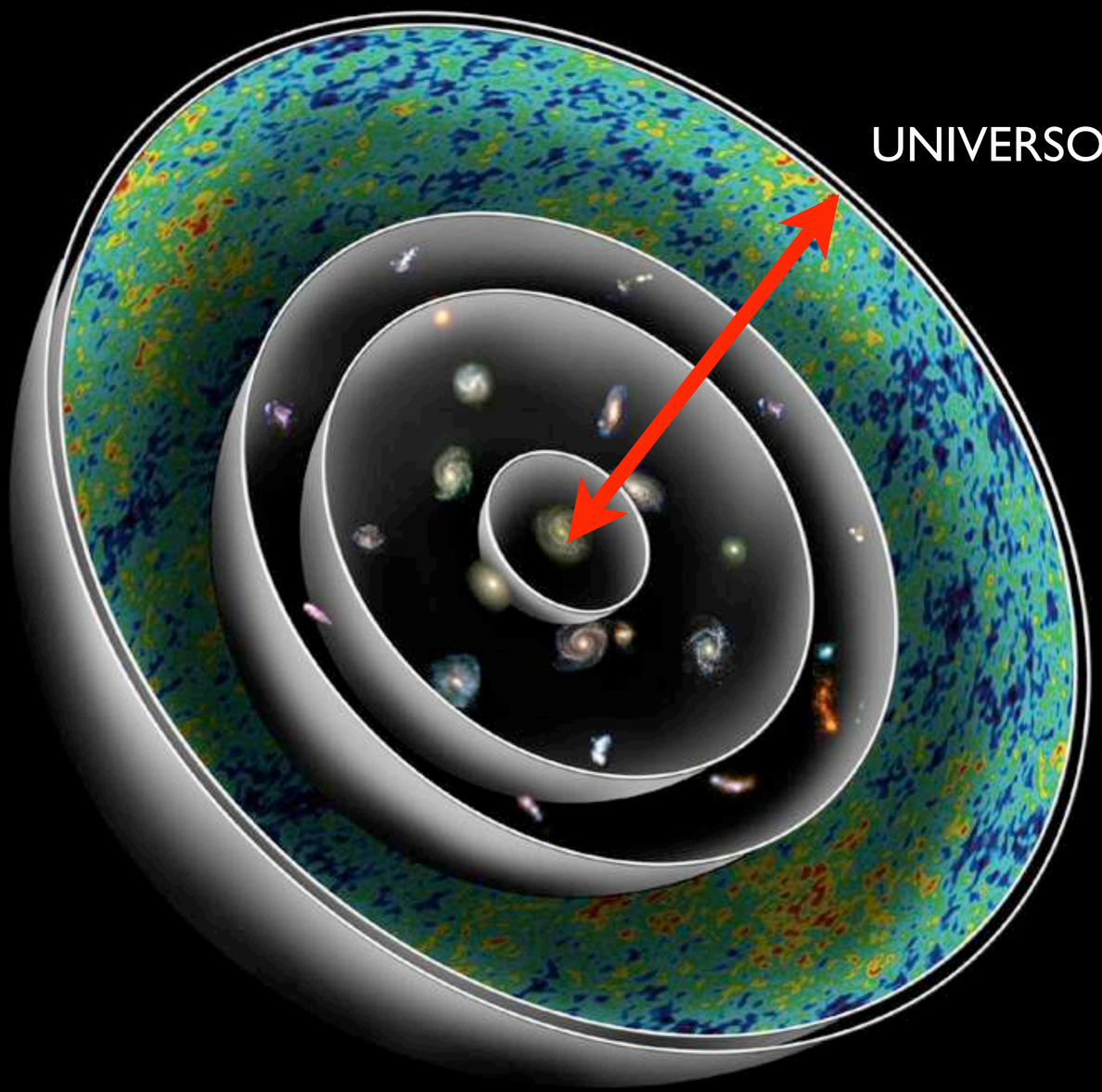
Debe existir una radiación de fondo (observable en todas direcciones) procedente del universo primitivo, cuando este era mucho más caliente.

Tiempo

Mirar lejos es mirar al pasado

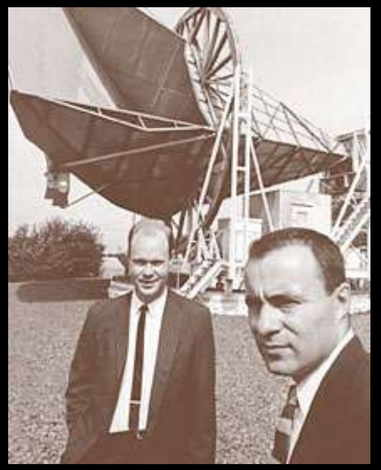


La radiación de fondo se observa en todas direcciones



¡Detectable como una parte del ruido que se observa en un televisor (en modo analógico)!





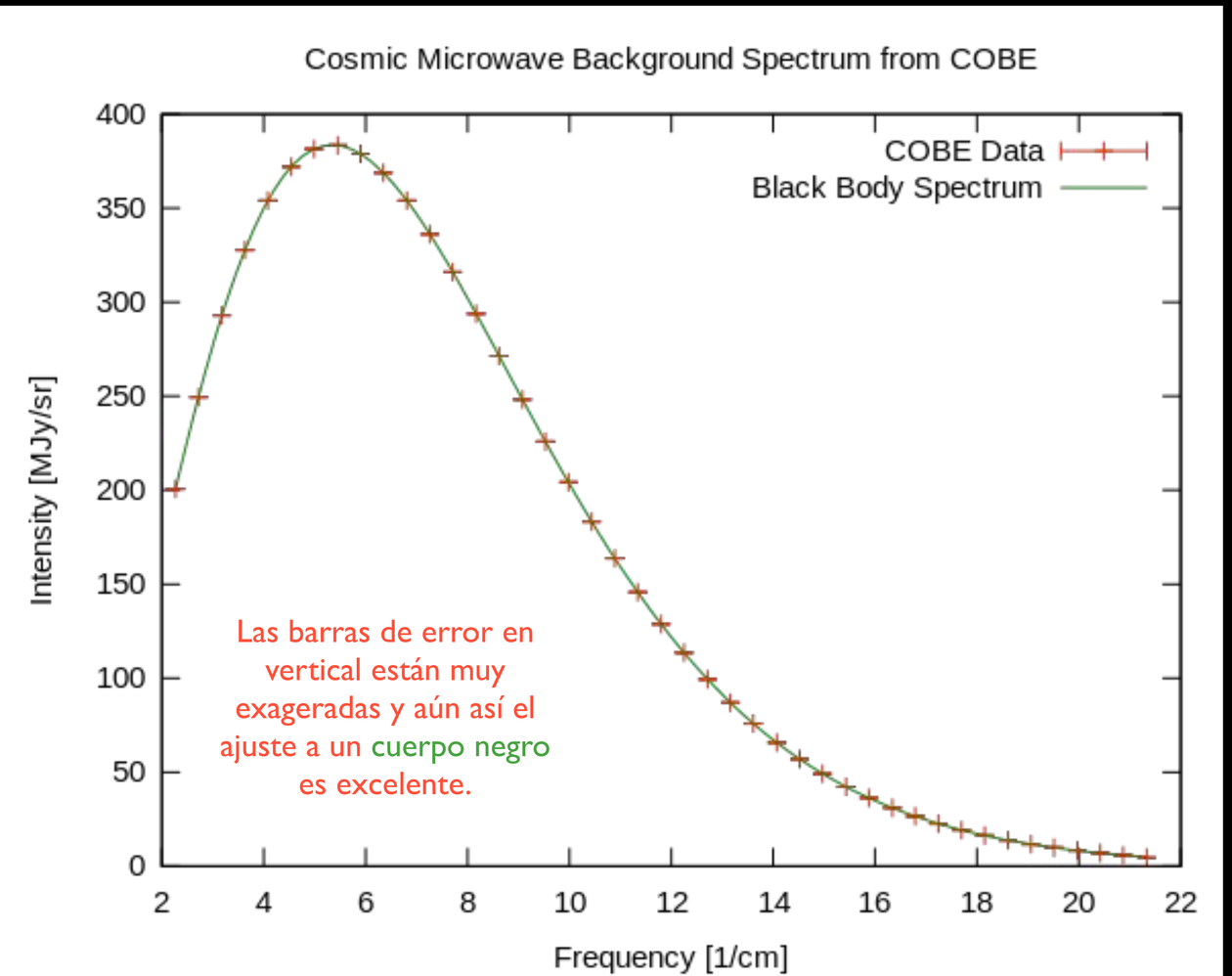
En 1965 Penzias y Wilson descubrieron una radiación procedente de todas direcciones en el cielo, y que no podían asociar a ningún objeto celeste conocido.

La existencia de la radiación de fondo demuestra que cuando el Universo era muy joven (edad=380000 años) su temperatura era muy elevada.

Debido a la expansión del universo, esa luz ha sufrido un desplazamiento hacia el rojo que ahora provoca que se observe en la región del espectro electromagnético correspondiente a las microondas.

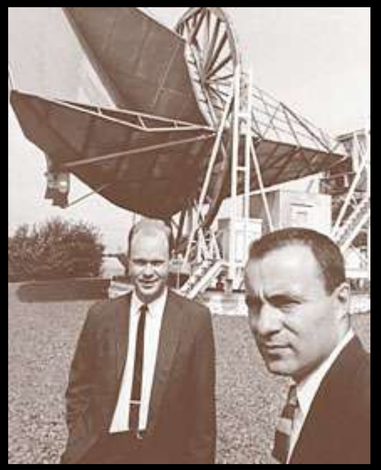
La radiación de fondo se observa en todas direcciones

Observaciones posteriores mostraron que la radiación de fondo se ajustaba perfectamente a un cuerpo negro a $T = 2.725 \pm 0.002$ K (es el mejor cuerpo negro natural).



¡Detectable como una parte del ruido que se observa en un televisor (en modo analógico)!



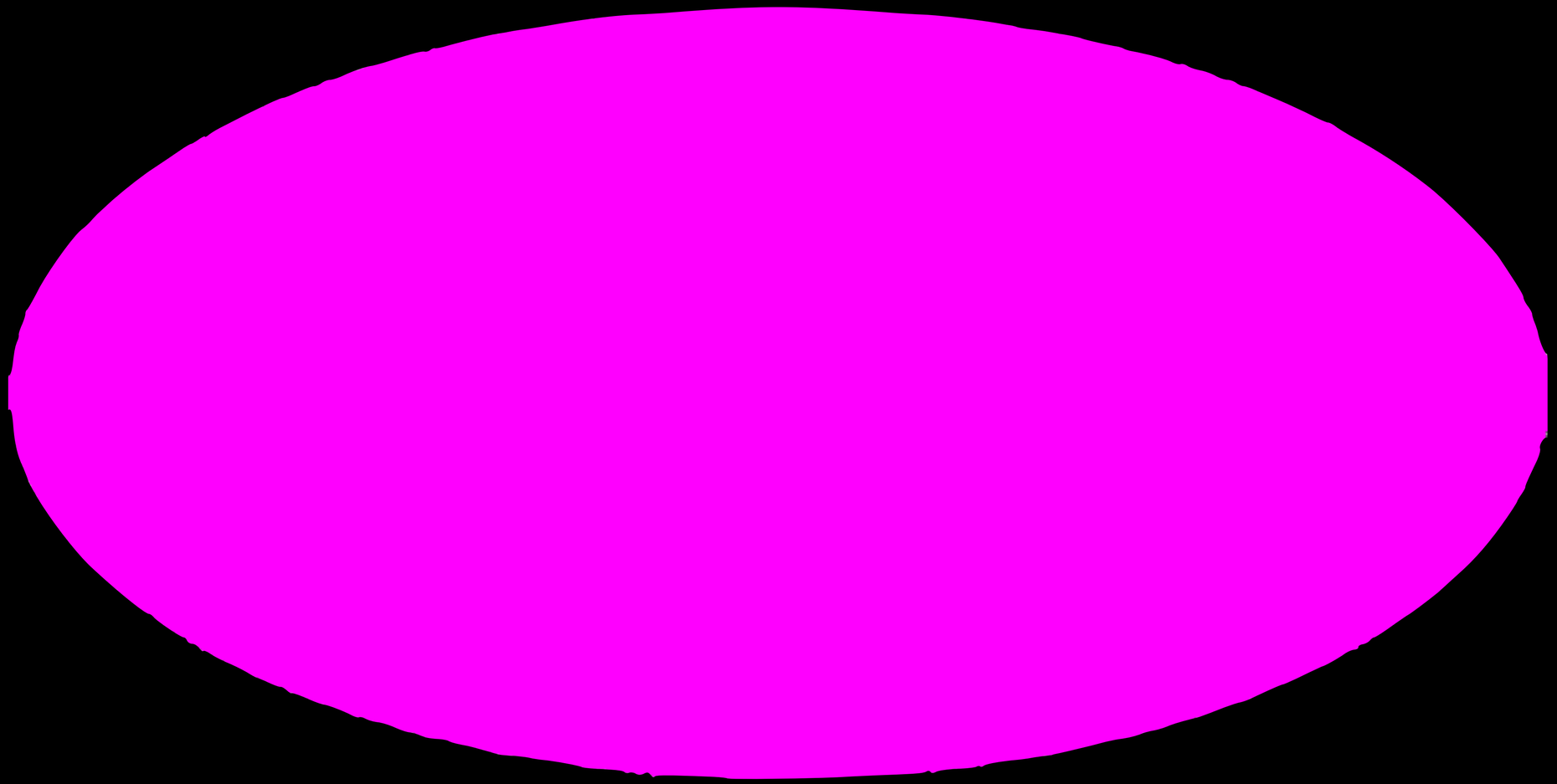


En 1965 Penzias y Wilson descubrieron una radiación procedente de todas direcciones en el cielo, y que no podían asociar a ningún objeto celeste conocido.



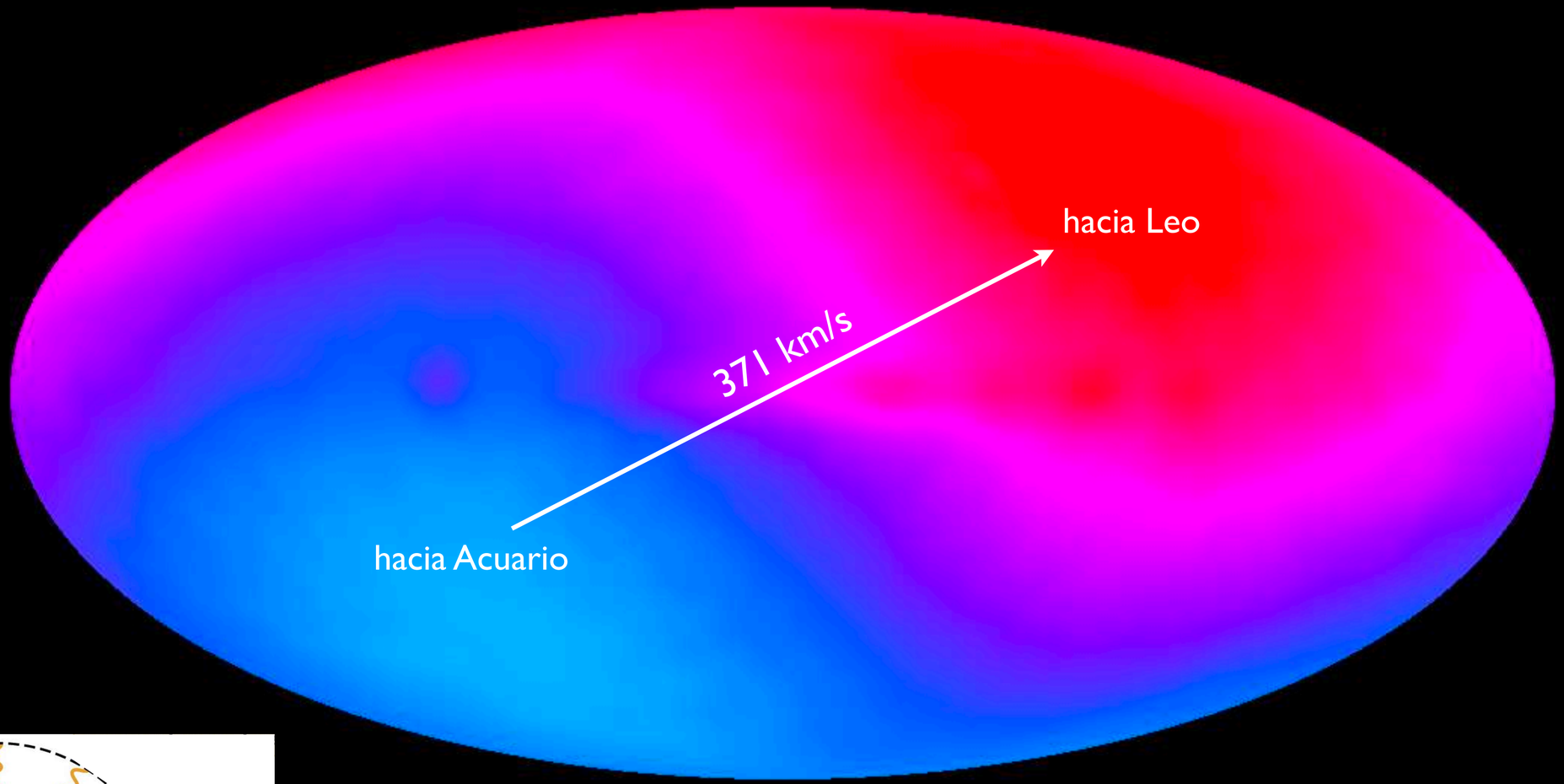
En 1989, el satélite COBE pudo hacer un mapa bidimensional del fondo cósmico de microondas

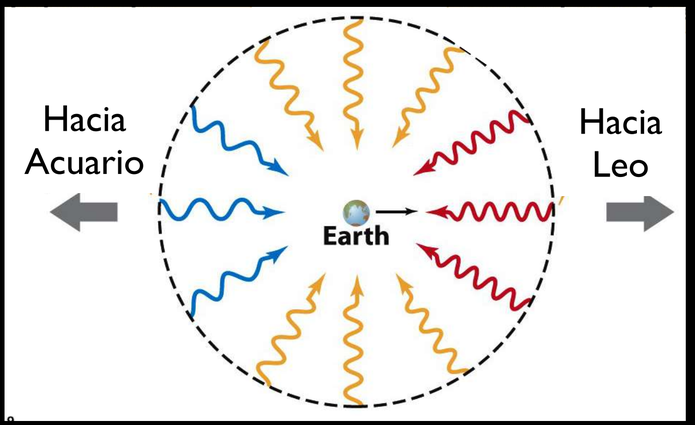
Anisotropías en la radiación de fondo



Aparentemente el fondo cósmico de microondas es extraordinariamente homogéneo en todas direcciones.

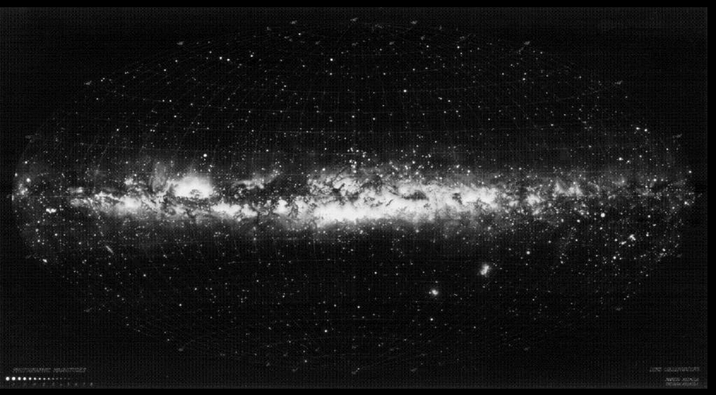
Anisotropías en la radiación de fondo





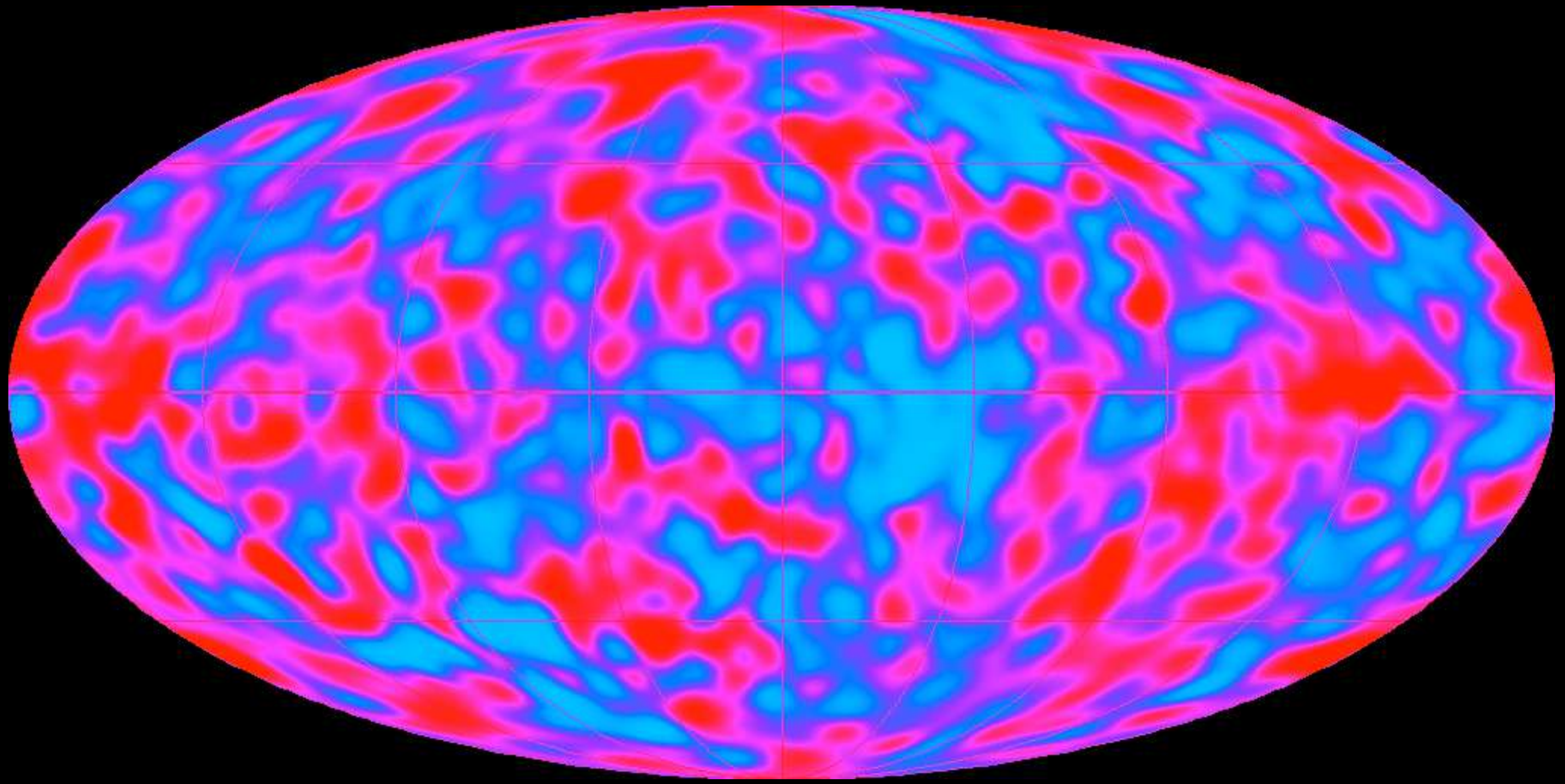
Si cambiamos el contraste de la imagen podemos detectar el movimiento absoluto de la Tierra respecto al fondo cósmico de microondas

Anisotropías en la radiación de fondo



Tras corregir del movimiento de la Tierra, es necesario corregir de la emisión de nuestra propia Galaxia

Anisotropías en la radiación de fondo

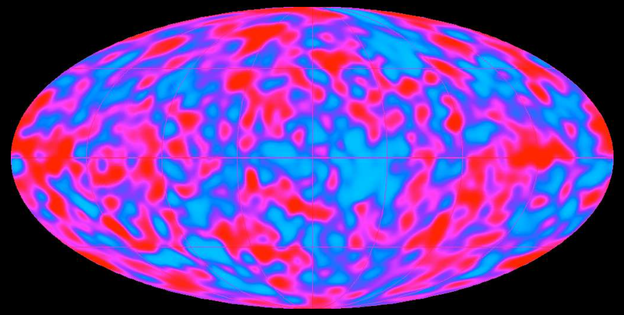


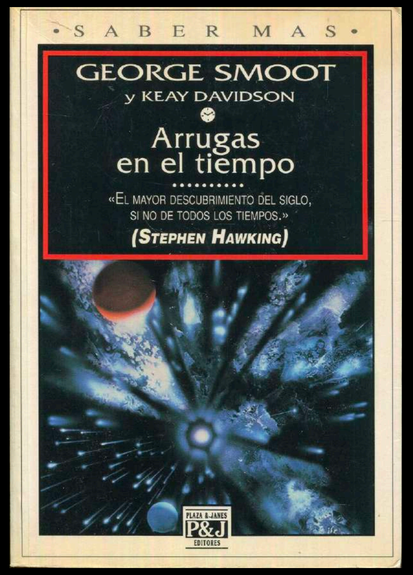
COBE detectó, por primera vez, anisotropías en la radiación de fondo.

Las anisotropías son del orden de 1 parte en 100.000.

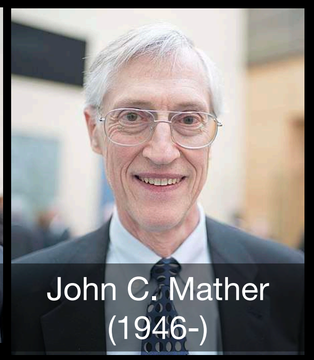
Semillas para el crecimiento de las estructuras en el Universo (arrugas del espacio-tiempo)

La resolución espacial de COBE era moderada (7º)






George Smoot
(1945-)


John C. Mather
(1946-)

Premio Nobel de Física en 2006

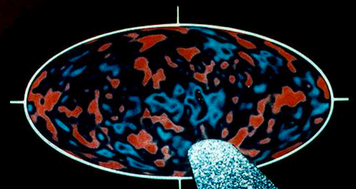
Origen del Universo (Big Bang)



Después de una fracción diminuta de segundo 10^{-43} s tras el Big Bang

Inflación

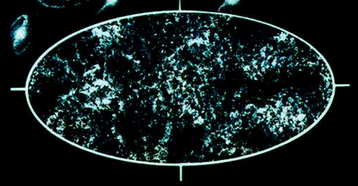
Mapa del COBE



380000 años después del Big Bang: generación de la radiación de fondo de microondas

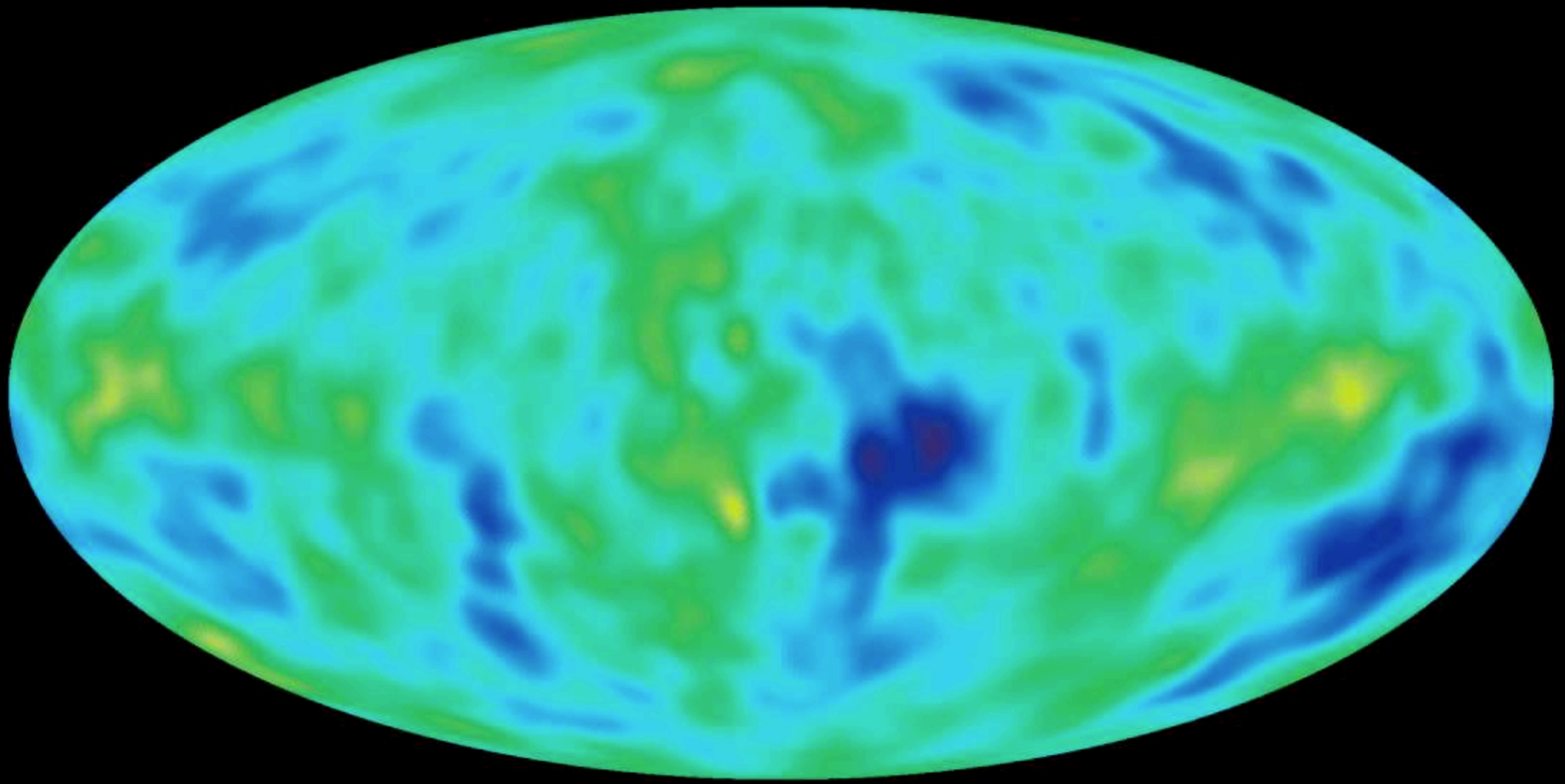
Creación de las galaxias

13700 millones de años después del Big Bang

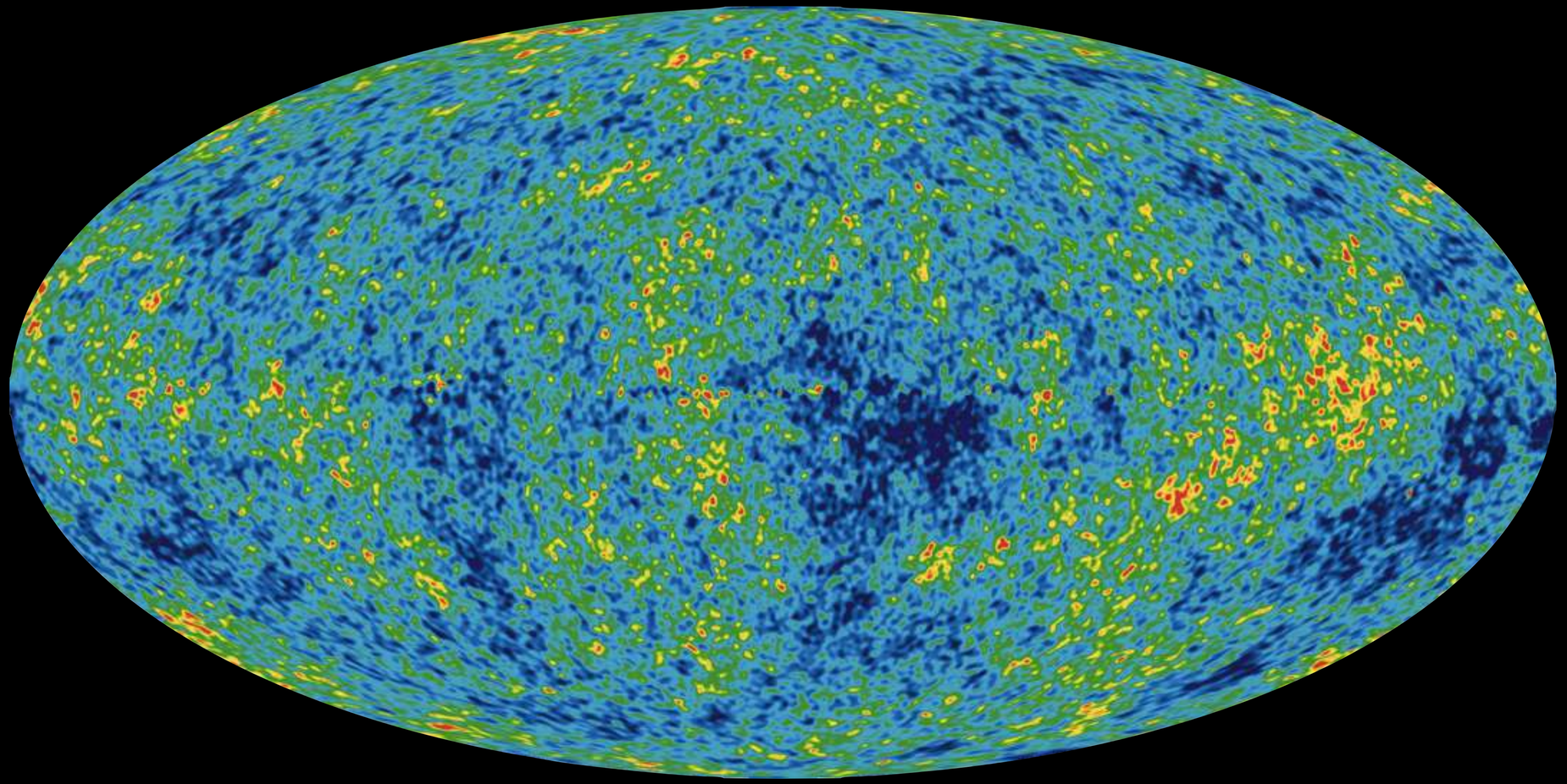


La existencia de inhomogeneidades (“arrugas”) en la radiación de fondo de microondas explica la formación de estructuras en el Universo.

De COBE a WMAP

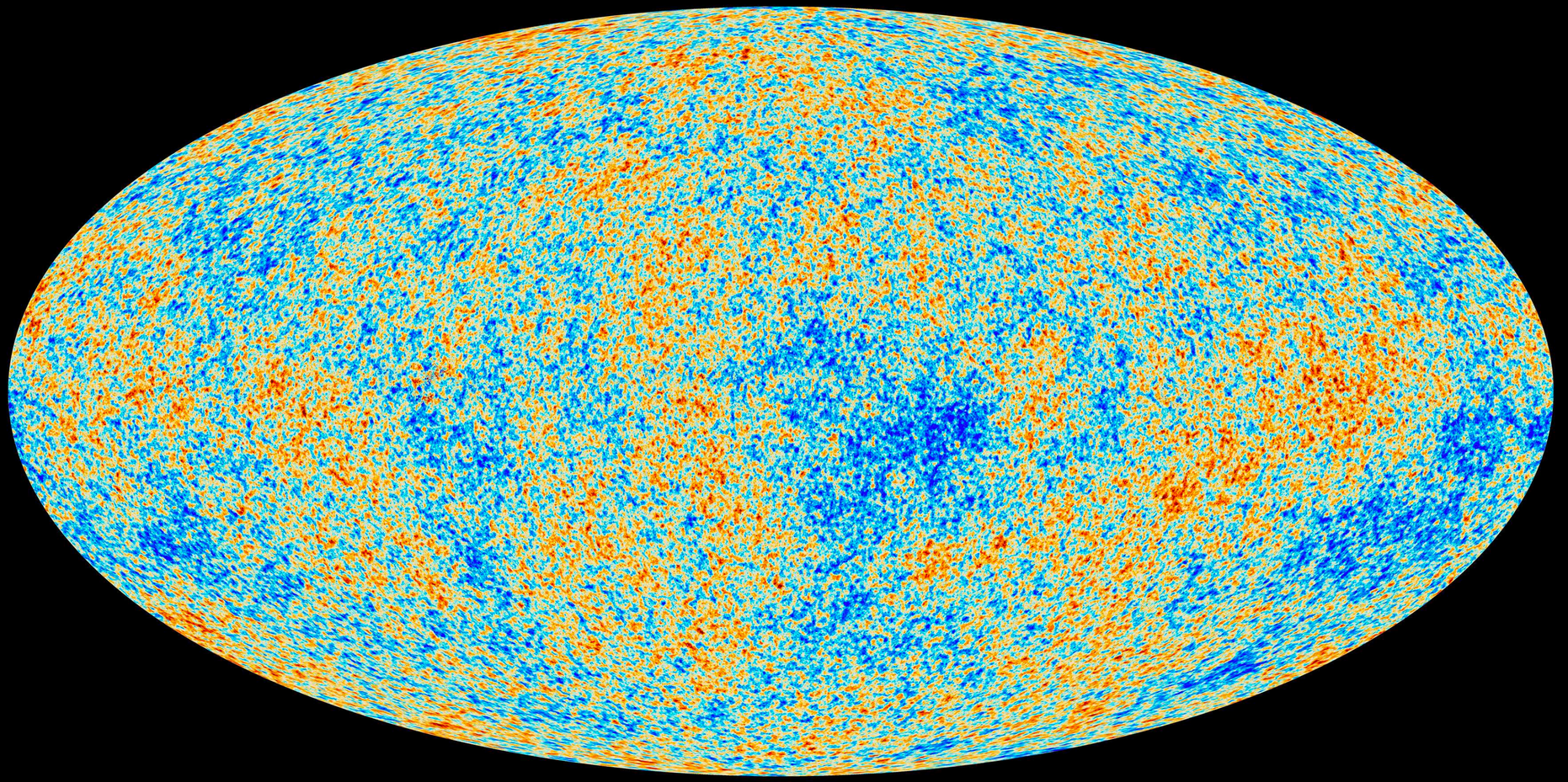


De COBE a WMAP

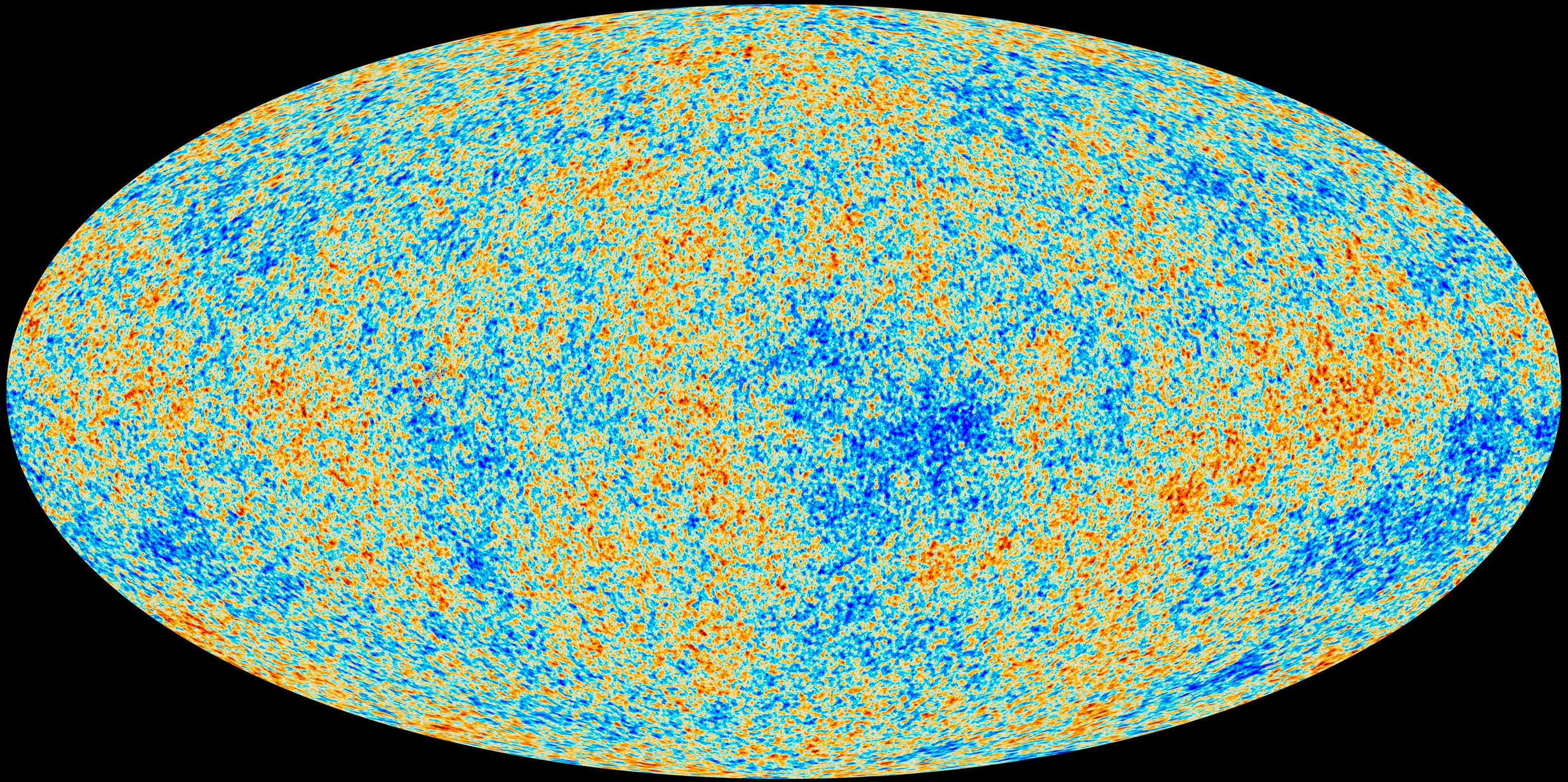


WMAP (9 años de datos)

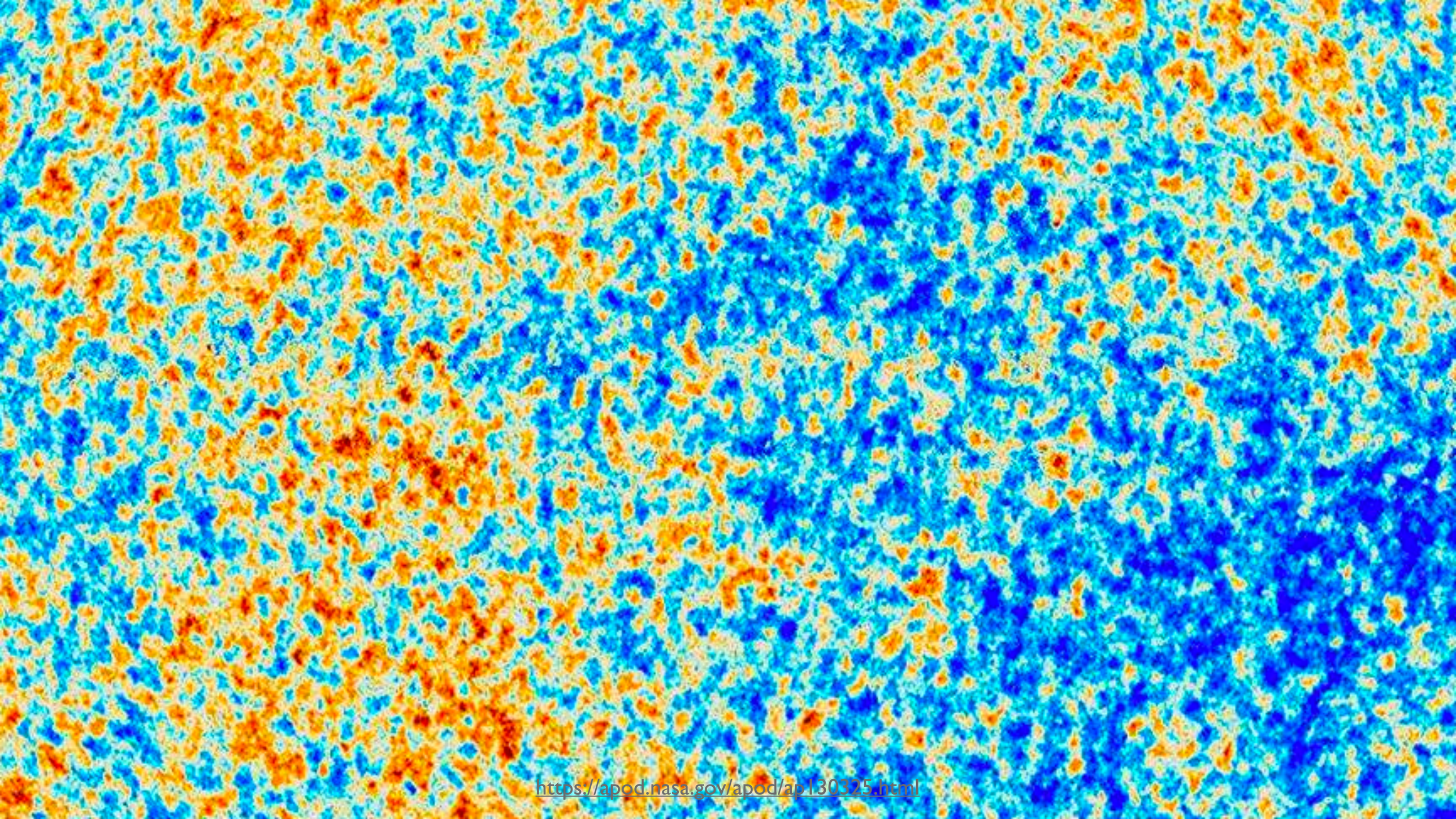
De WMAP a Planck



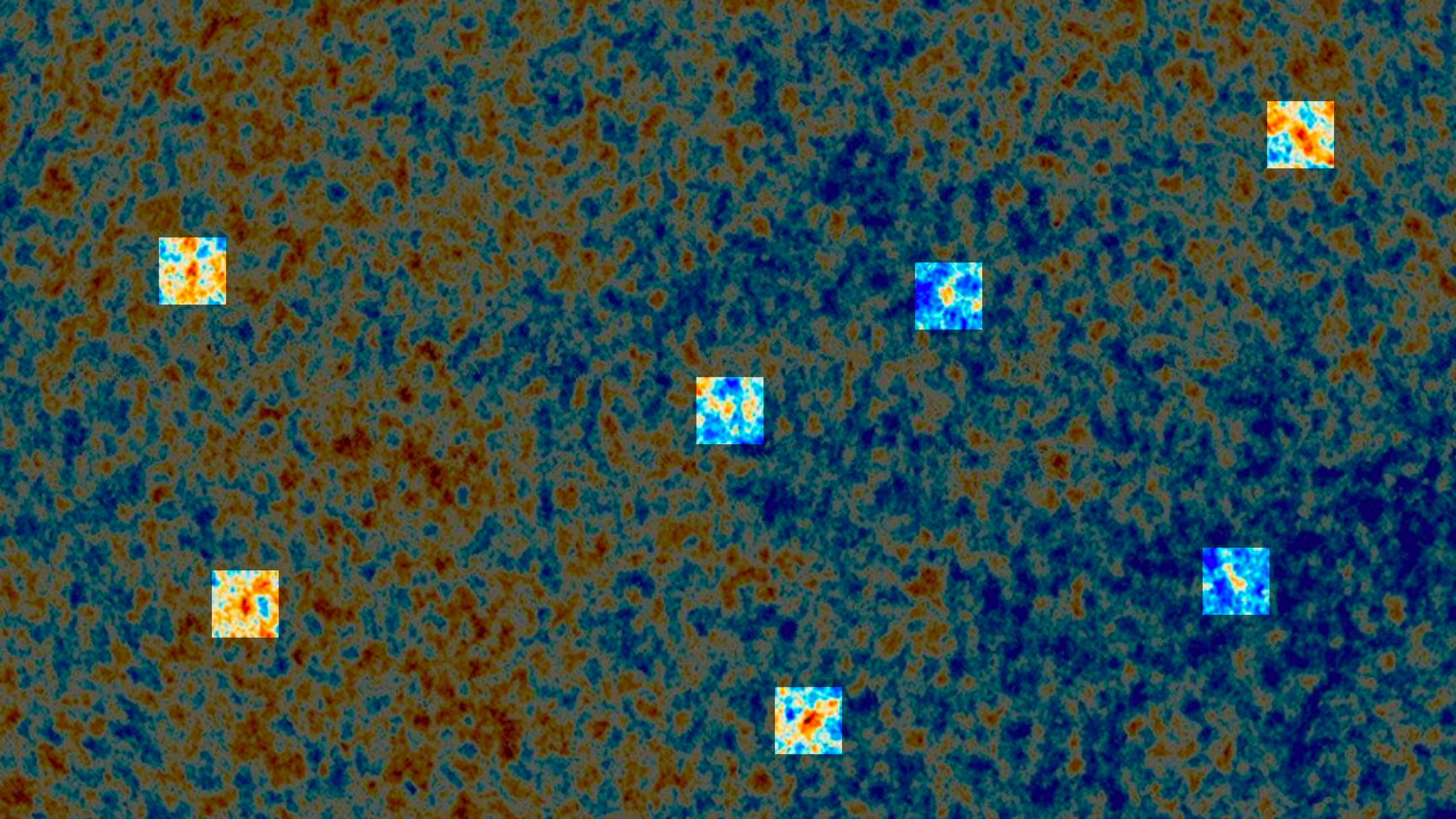
Planck (2013)

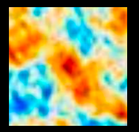
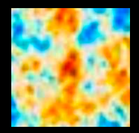
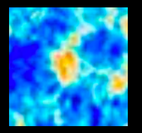
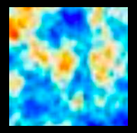
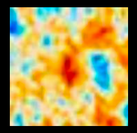
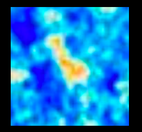
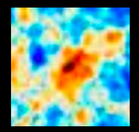


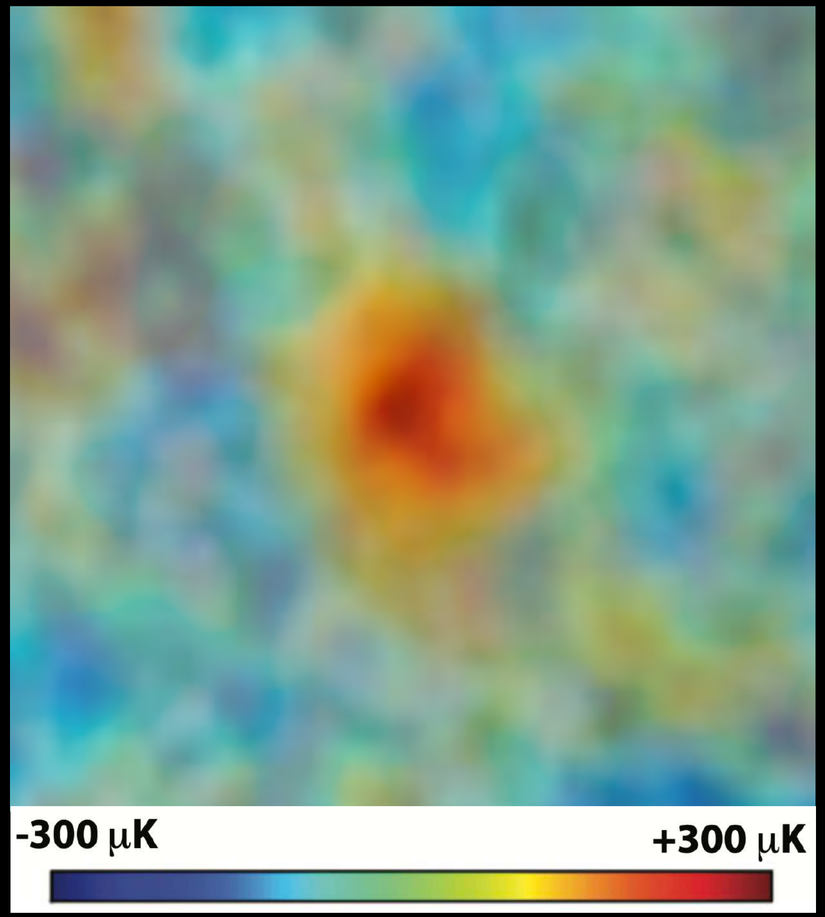
https://apod.nasa.gov/apod/ap130325.html

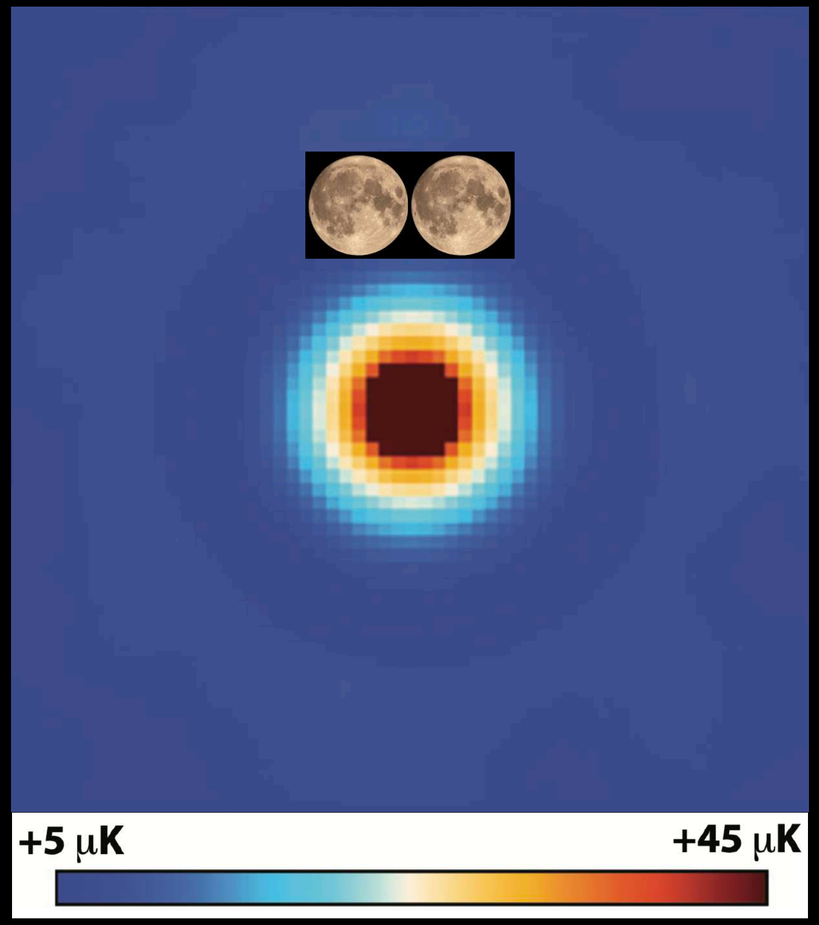


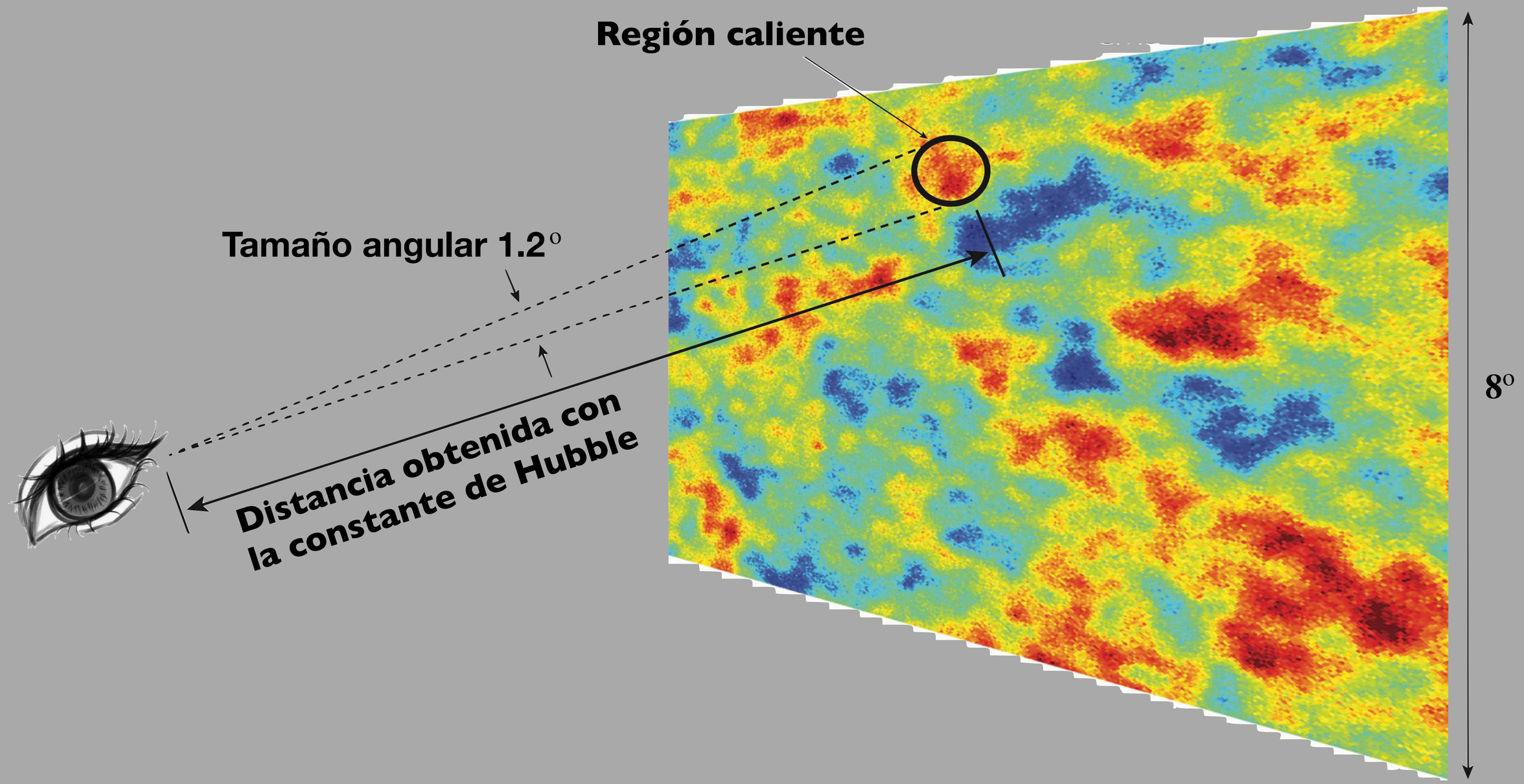
https://apod.nasa.gov/apod/ap130325.html




-300 μK
+300 μK


+5 μK
+45 μK

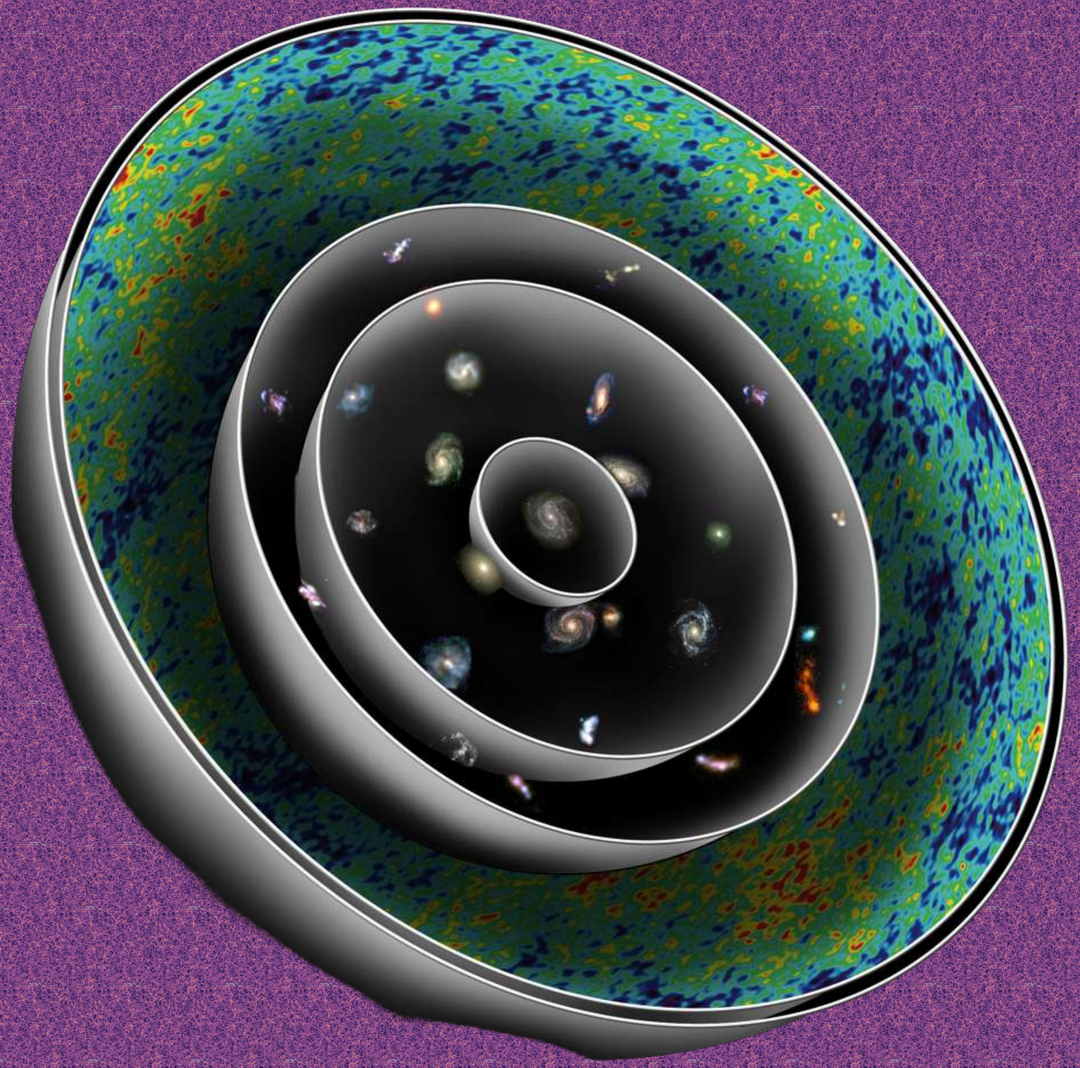

Región caliente
Tamaño angular 1.2°
Distancia obtenida con
la constante de Hubble
8°



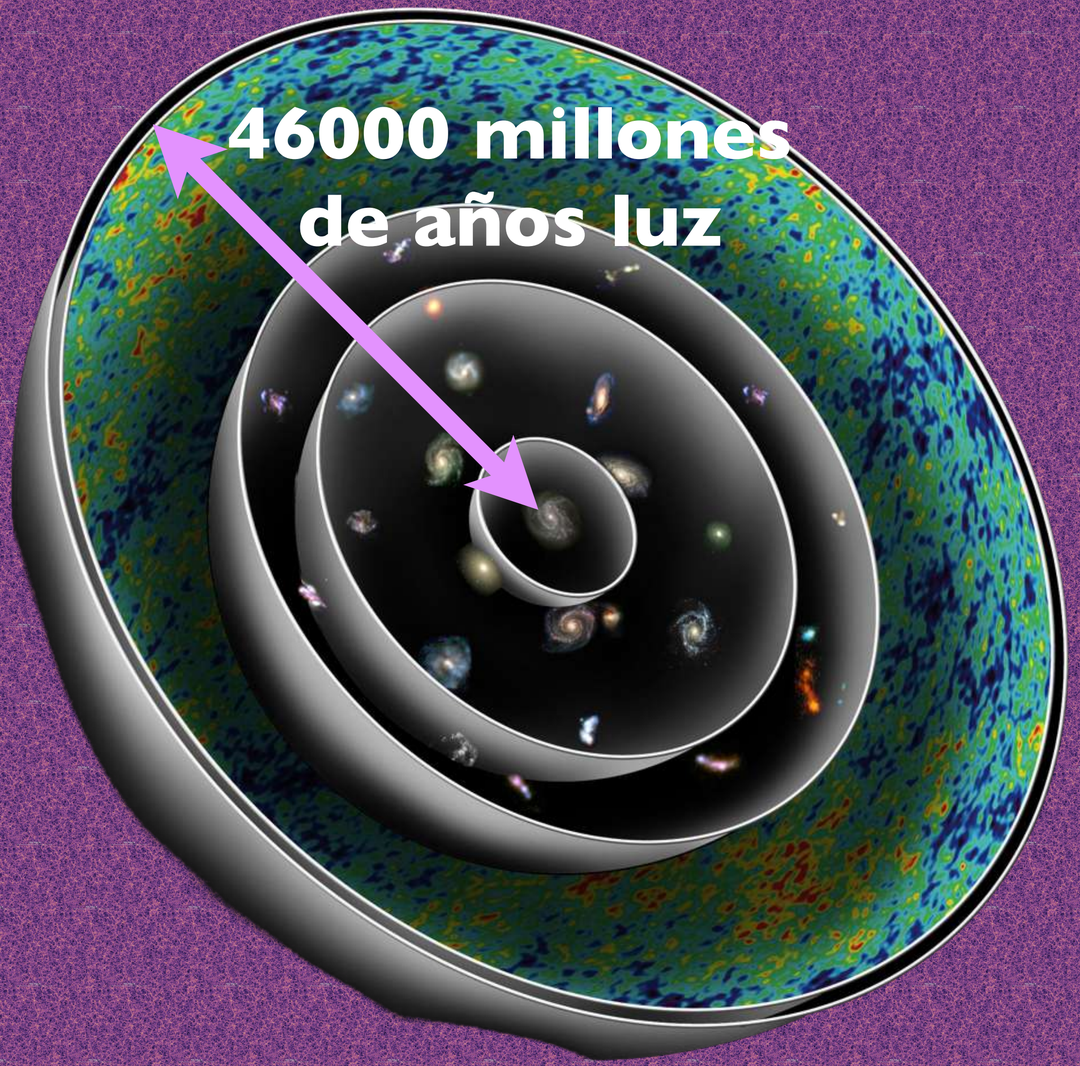
¿Qué volumen de universo podemos observar?

¿Qué volumen de universo podemos observar?

Es un volumen muy grande, en el que, si el principio cosmológico se aplica, en cada punto de dicho volumen deben existir galaxias/cúmulos de galaxias con propiedades similares a las de los mismos objetos que nosotros observamos en el universo local.

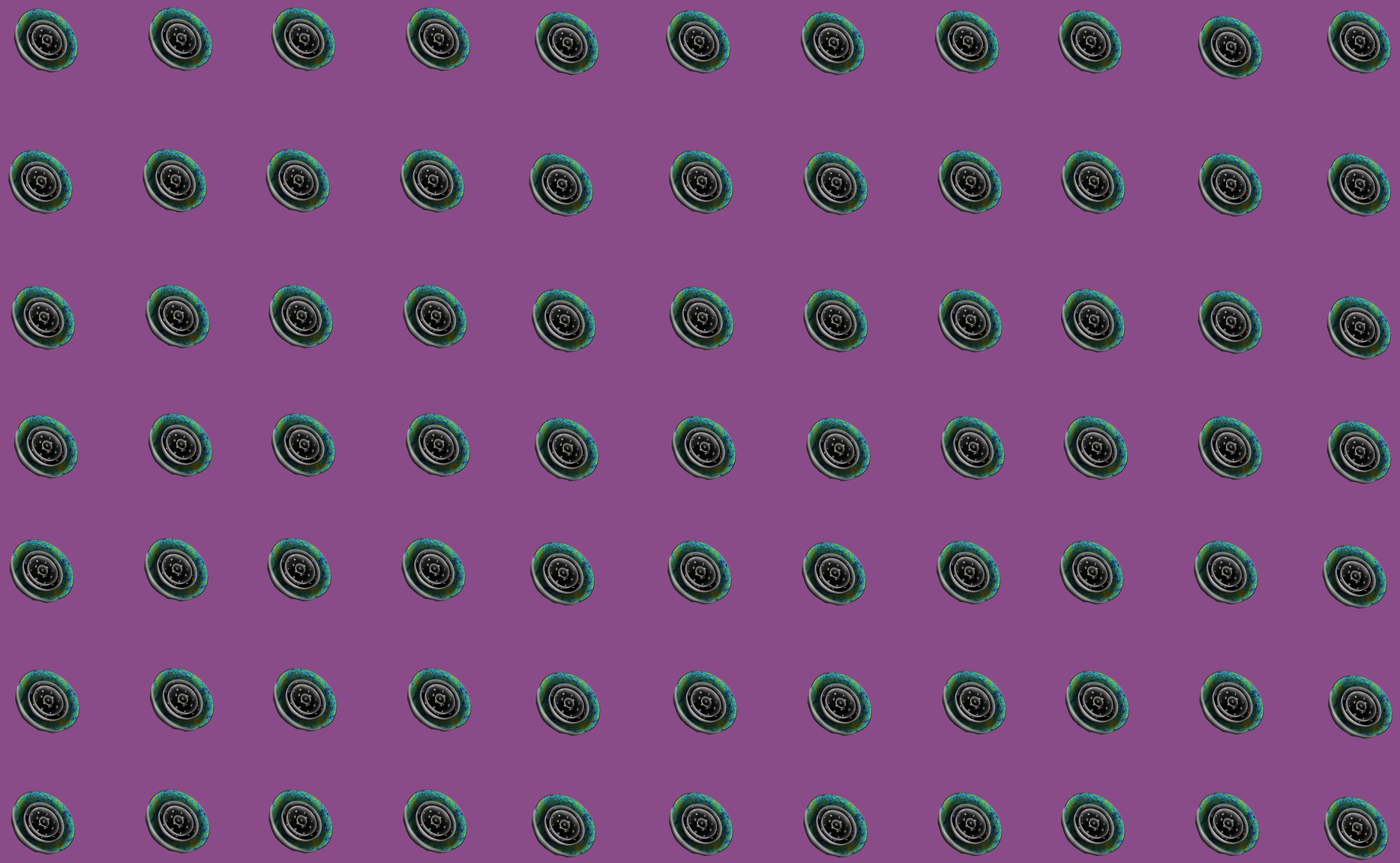


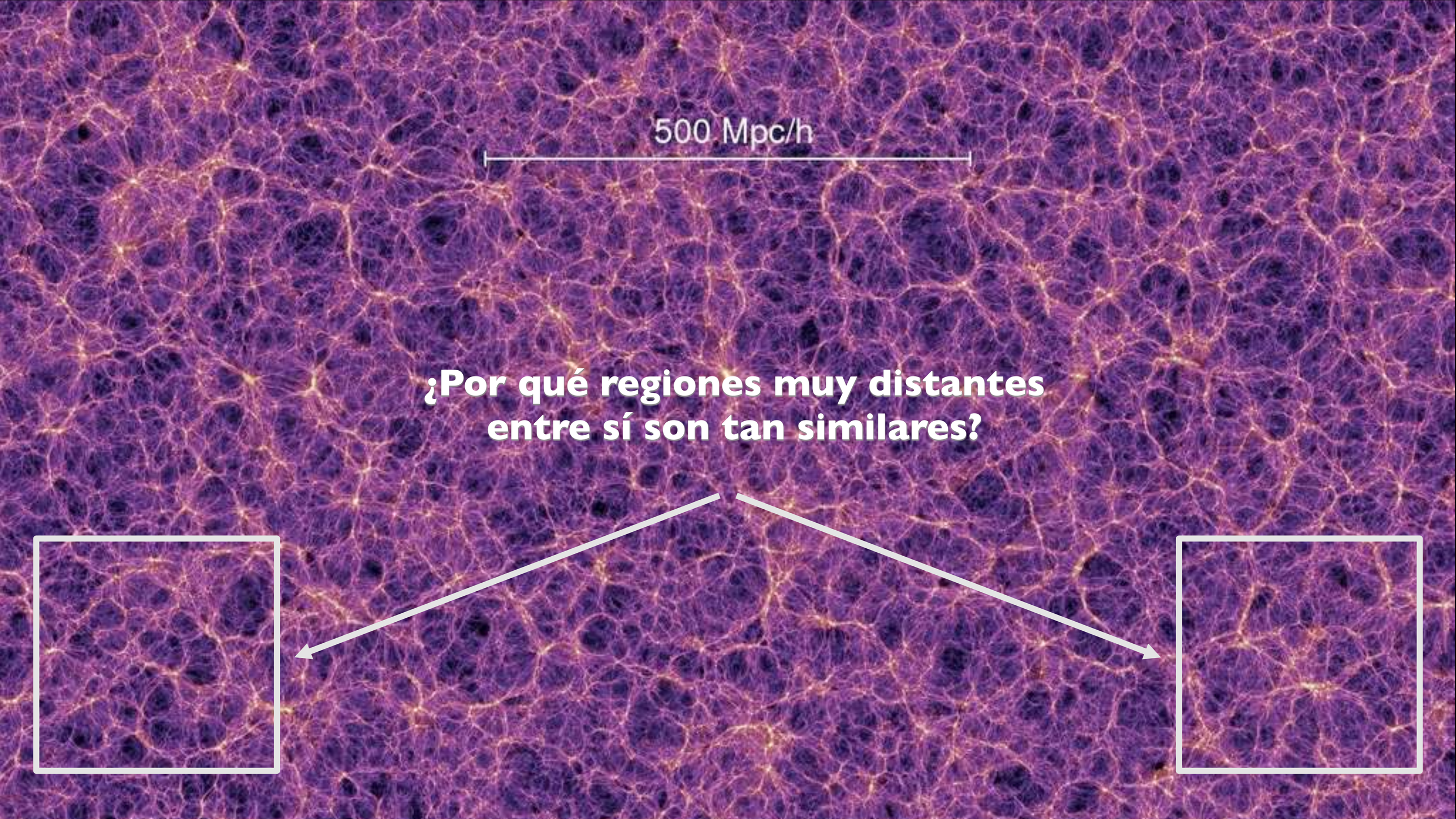
Pero como la velocidad de la luz es finita, a grandes distancias el universo observable se nos presenta con propiedades diferentes a las del universo local. Gracias a ello, sin embargo, ¡podemos contemplar su evolución temporal!



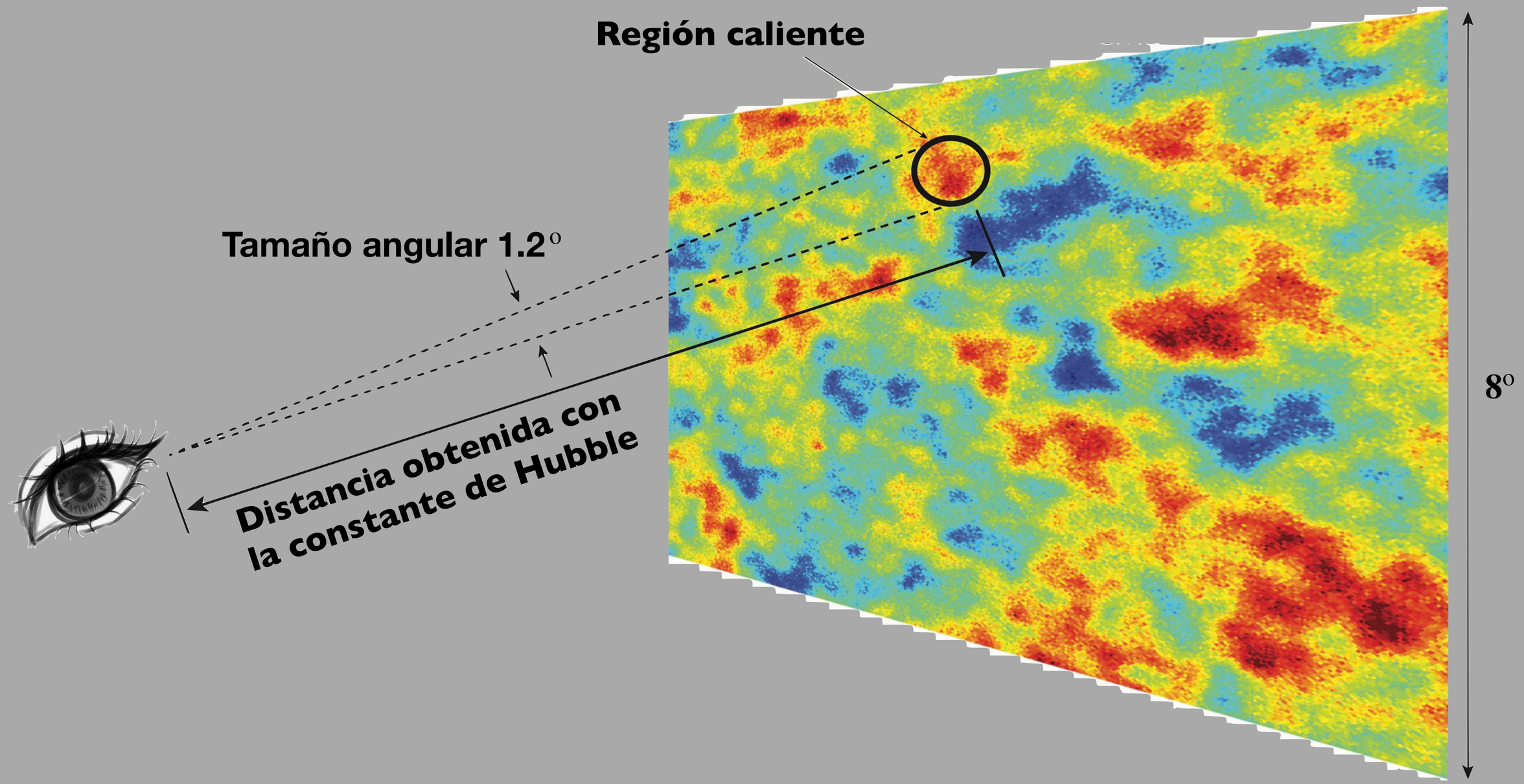
Pero como la velocidad de la luz es finita, a grandes distancias el universo observable se nos presenta con propiedades diferentes a las del universo local. Gracias a ello, sin embargo, ¡podemos contemplar su evolución temporal!

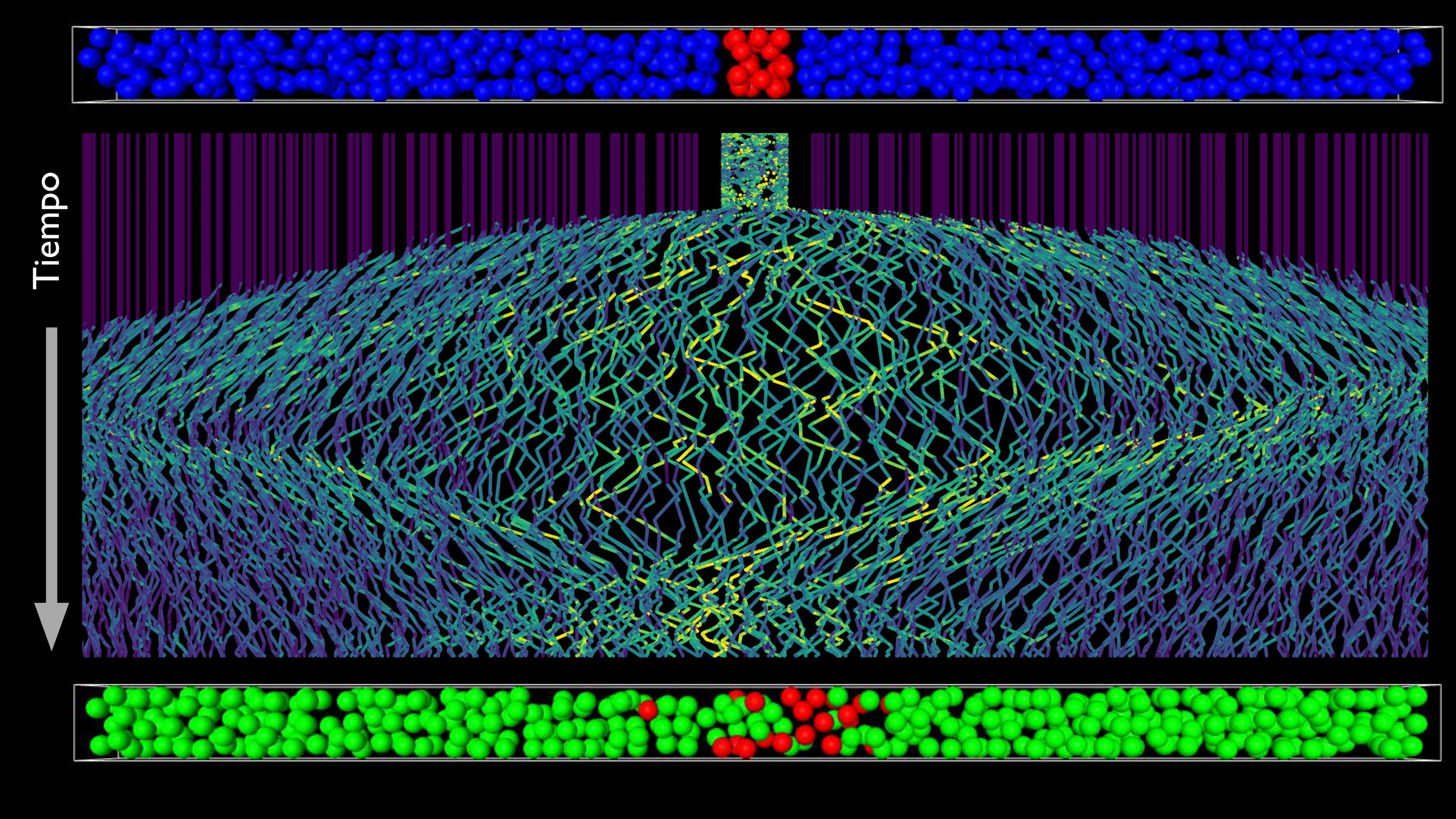
El universo puede ser muchísimo más grande de lo que observamos (¡incluso infinito!). Si el principio cosmológico funciona, cualquier observador debe contemplar un universo similar al que nosotros observamos.

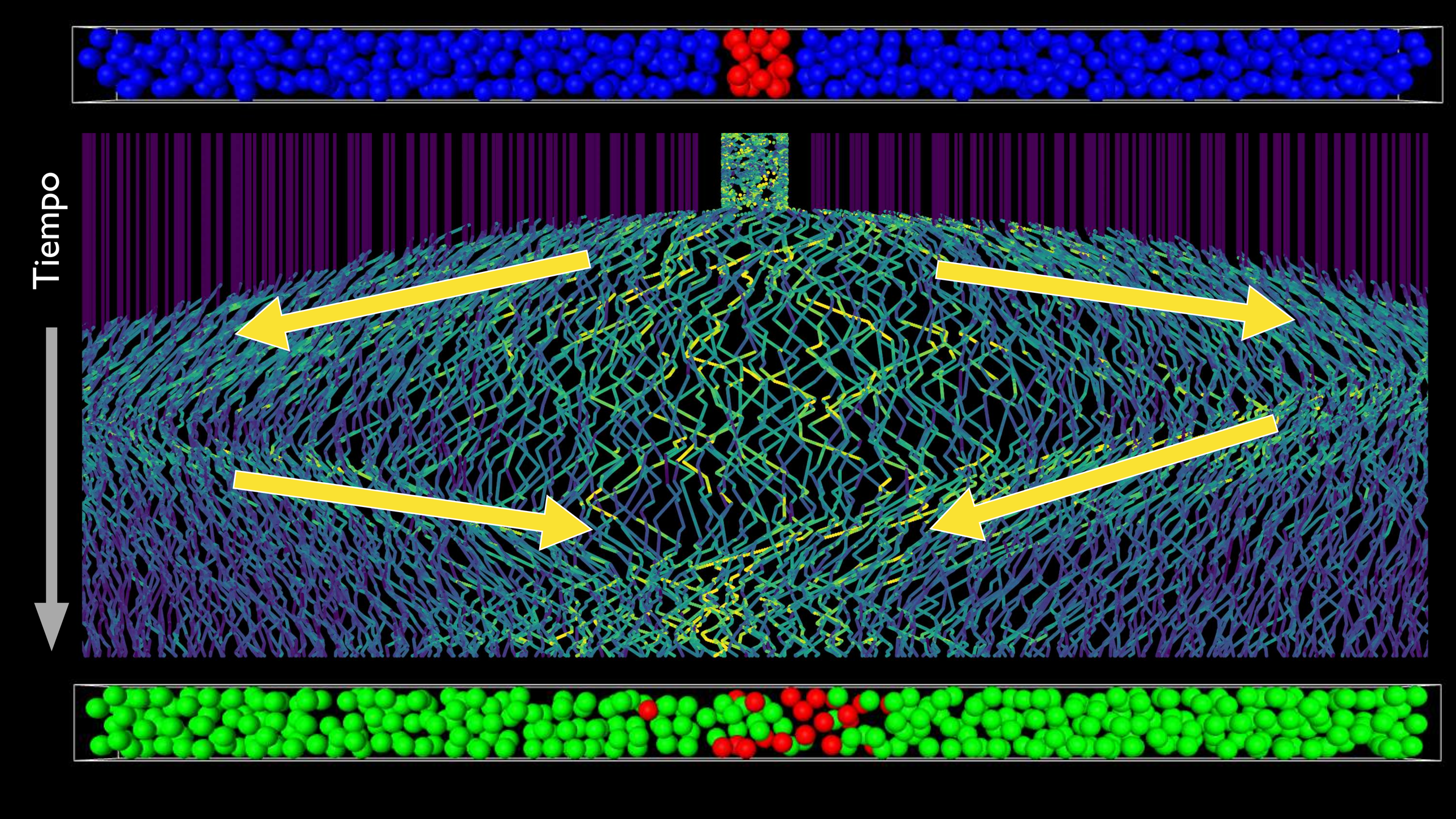


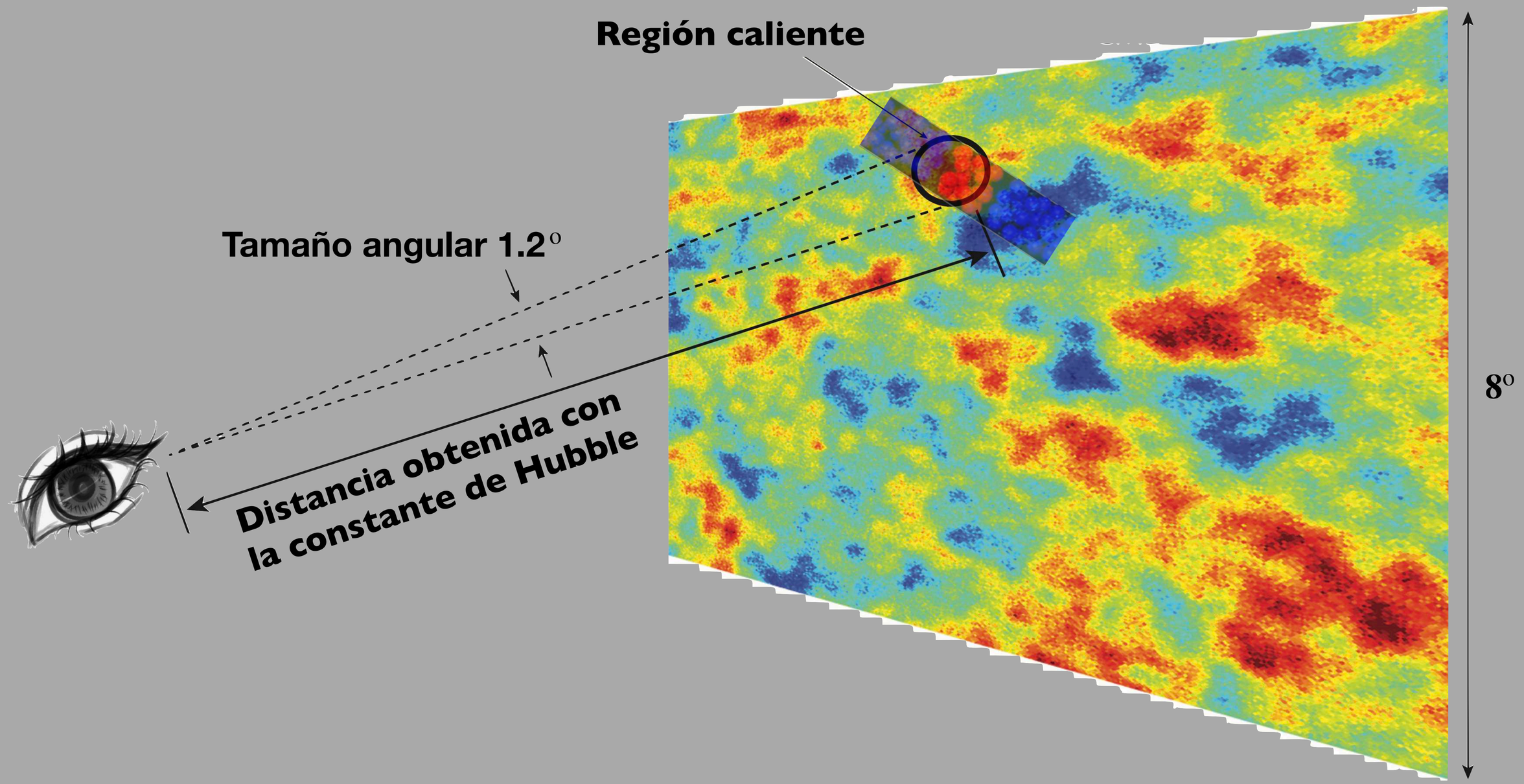


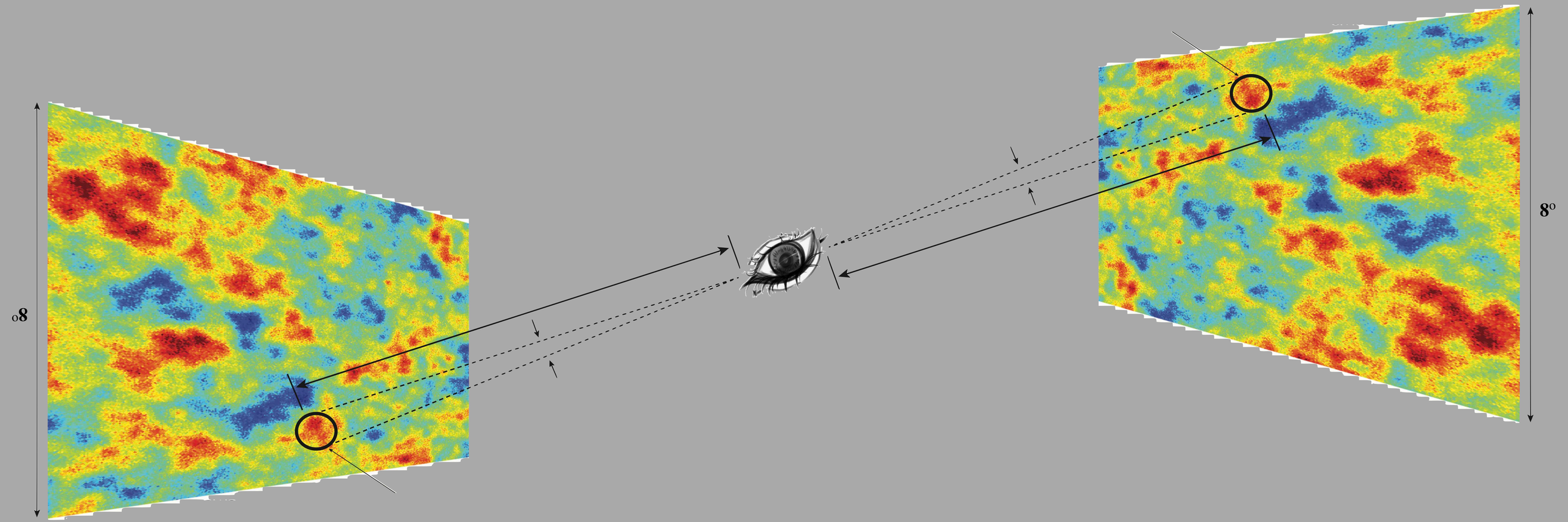
¿Por qué regiones muy distantes entre sí son tan similares?


Región caliente
Tamaño angular 1.2°
Distancia obtenida con
la constante de Hubble
8°

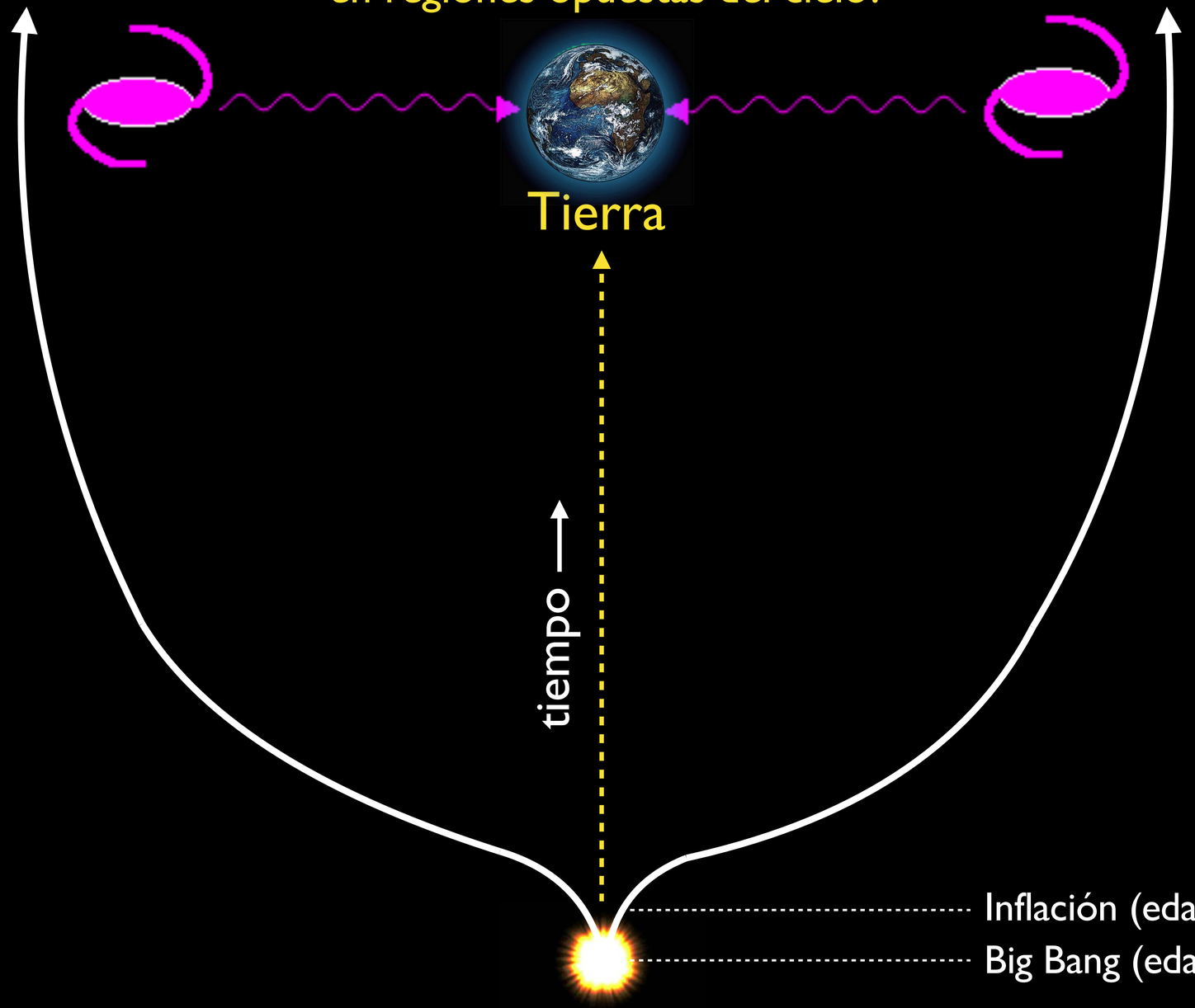

Tiempo


Tiempo


Región caliente
Tamaño angular 1.2º
Distancia obtenida con
la constante de Hubble
8º


8°
8°

¿Por qué vemos lo mismo (estadísticamente)
en regiones opuestas del cielo?



Alan Guth propuso en 1979 que en una fracción diminuta dentro del primer segundo de vida del universo, se produjo una expansión inflacionaria.



¿Por qué ocurrió la inflación?

El espacio del universo recién formado se encontraba en un estado de falso vacío: había un campo cuántico con energía no nula (un campo escalar, similar al campo de Higgs, aunque diferente).

Según la Relatividad General, un espacio "vacío" de estas características debería sufrir una expansión exponencial.

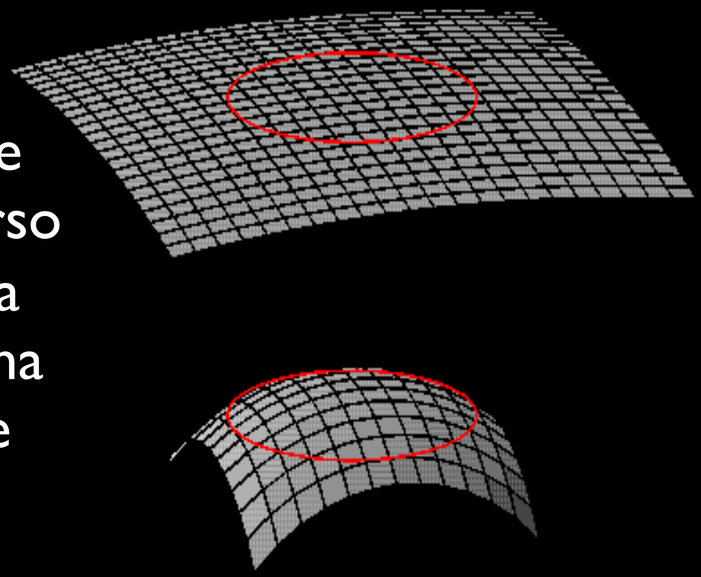
La inflación "aplana" la geometría

Después de la inflación, lo que vemos *parece* plano

El Universo tenía curvatura antes de la inflación

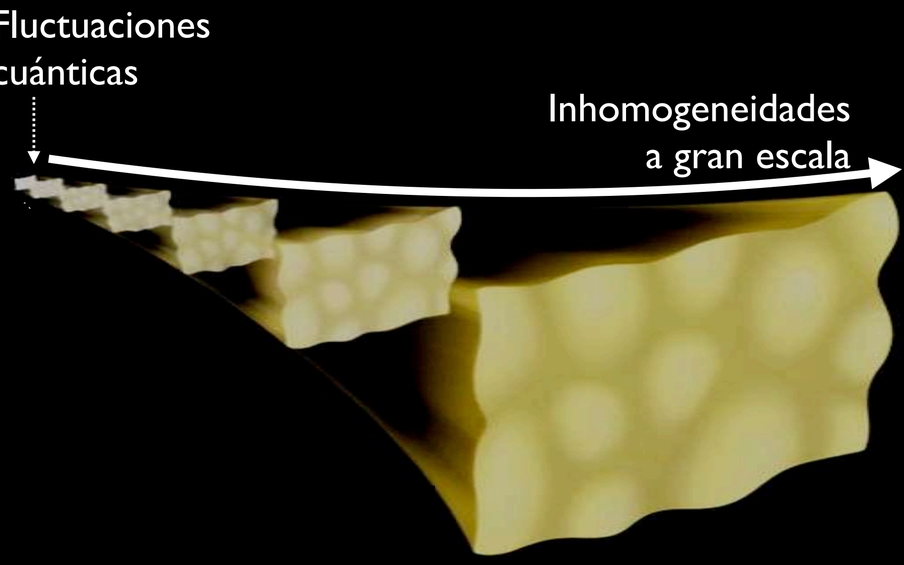
Efectos de la inflación

Debido a la inflación sólo vemos una parte minúscula del Universo real → La curvatura del Universo visible ha de ser prácticamente nula ($\Omega \simeq 1$)



Se soluciona además otro problema: ¿cómo se produjeron las irregularidades del Universo primitivo que dieron lugar a las estructuras a gran escala, como los supercúmulos, etc?

Como el vacío físico no existe, pequeñas fluctuaciones cuánticas antes de la inflación crecieron con ésta para convertirse en fluctuaciones macroscópicas que dieron lugar al Universo actual.



¡El universo tuvo un origen!

El mejor modelo cosmológico disponible es el del "Big Bang" (Gran Explosión)

¿En qué pruebas se basa?

- Expansión del Universo
- Detección de una radiación cósmica de fondo en microondas
- Abundancias de elementos químicos: nucleosíntesis primordial

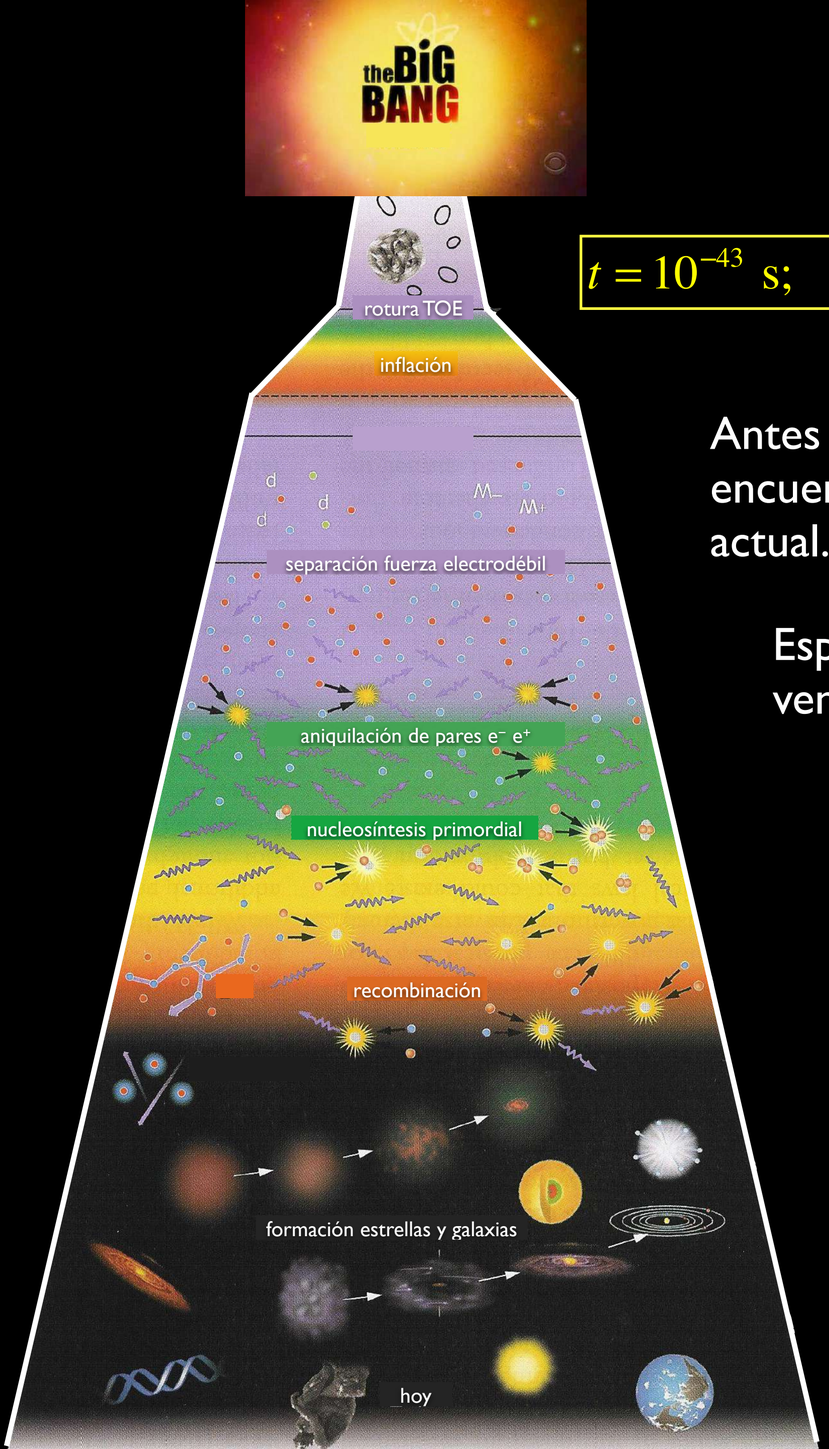
Números grandes y pequeños

Notación científica

Podemos escribir números grandes y pequeños utilizando potencias de diez

$$\vdots$$
$$10^{4} = 10000$$
$$10^{3} = 1000$$
$$10^{2} = 100$$
$$10^{1} = 10$$
$$10^{0} = 1$$
$$10^{-1} = 0.1$$
$$10^{-2} = 0.01$$
$$10^{-3} = 0.001$$
$$10^{-4} = 0.0001$$
$$\vdots$$

Historia térmica del Universo



$t = 10^{-43}$ s; $T = 10^{32}$ K

Theory Of Everything

Era de Planck; ruptura TOE (hipotética Teoría del Todo)

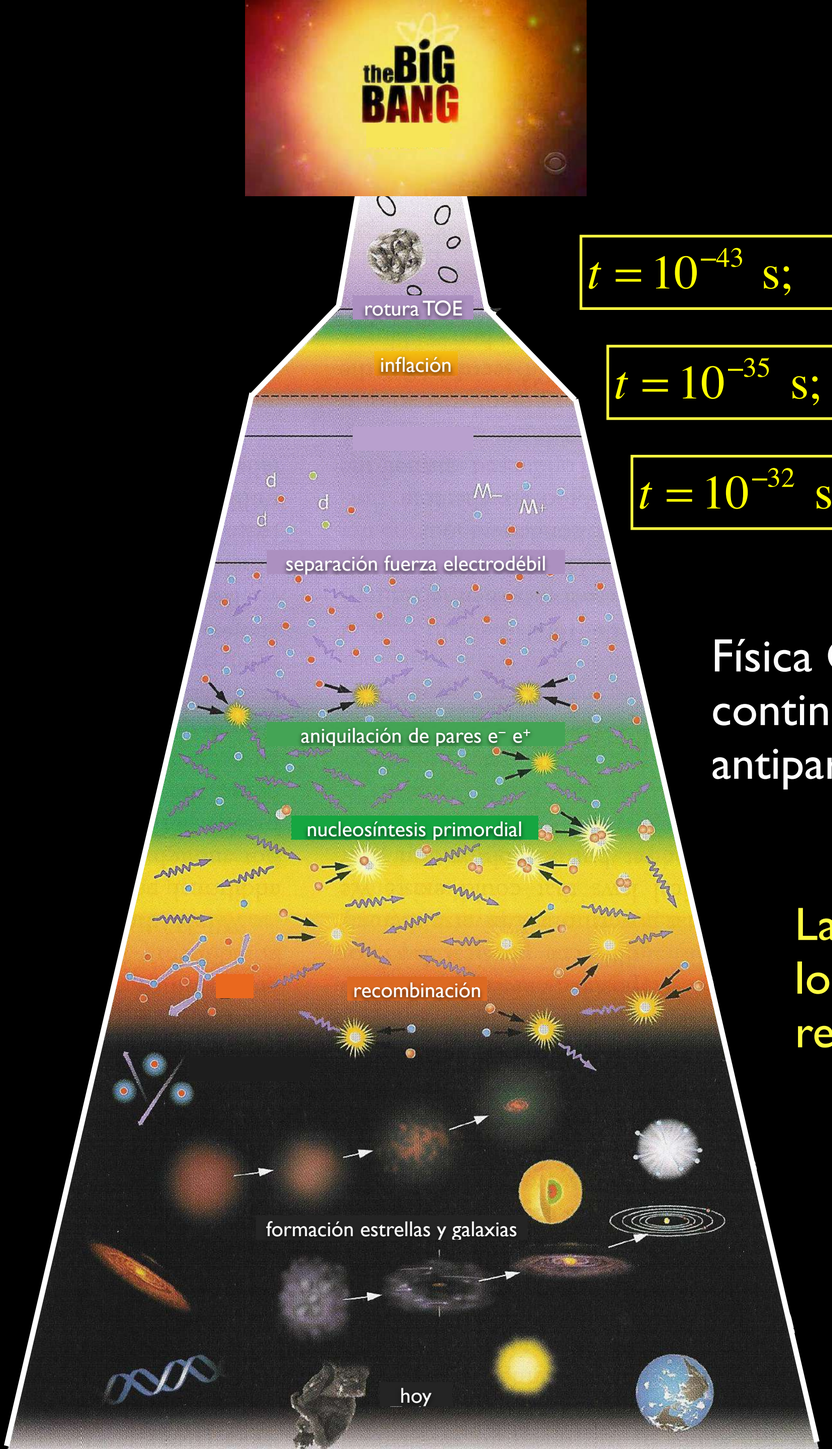
Antes de la era de Planck el espacio-tiempo y la materia-energía se encuentran en un estado desconocido que no puede describir la Física actual.

Especulación: las 4 fuerzas fundamentales podrían estar unidas y vendrían descritas por una única teoría del todo.

Hace falta una teoría cuántica de la gravedad (supercuerdas, teoría cuántica de bucles,…) que una el Modelo Estándar de la física de partículas con la Relatividad General.



Historia térmica del Universo

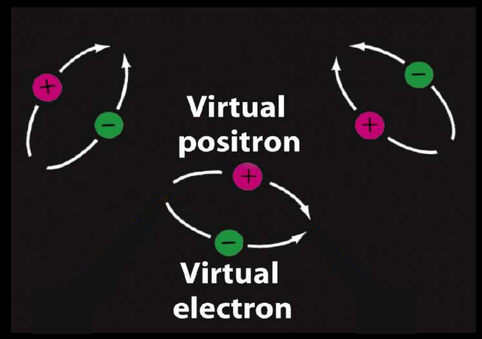


$t = 10^{-43}$ s; $T = 10^{32}$ K — Era de Planck; ruptura TOE (hipotética Teoría del Todo)

$t = 10^{-35}$ s; $T = 10^{27}$ K — Comienza la inflación; ruptura GUT (Gran Unificación)

$t = 10^{-32}$ s; $T = 10^{26}$ K — Final de la inflación

Física Cuántica: en el vacío se están formando continuamente pares virtuales de partículas-antipartículas que se aniquilan rápidamente.

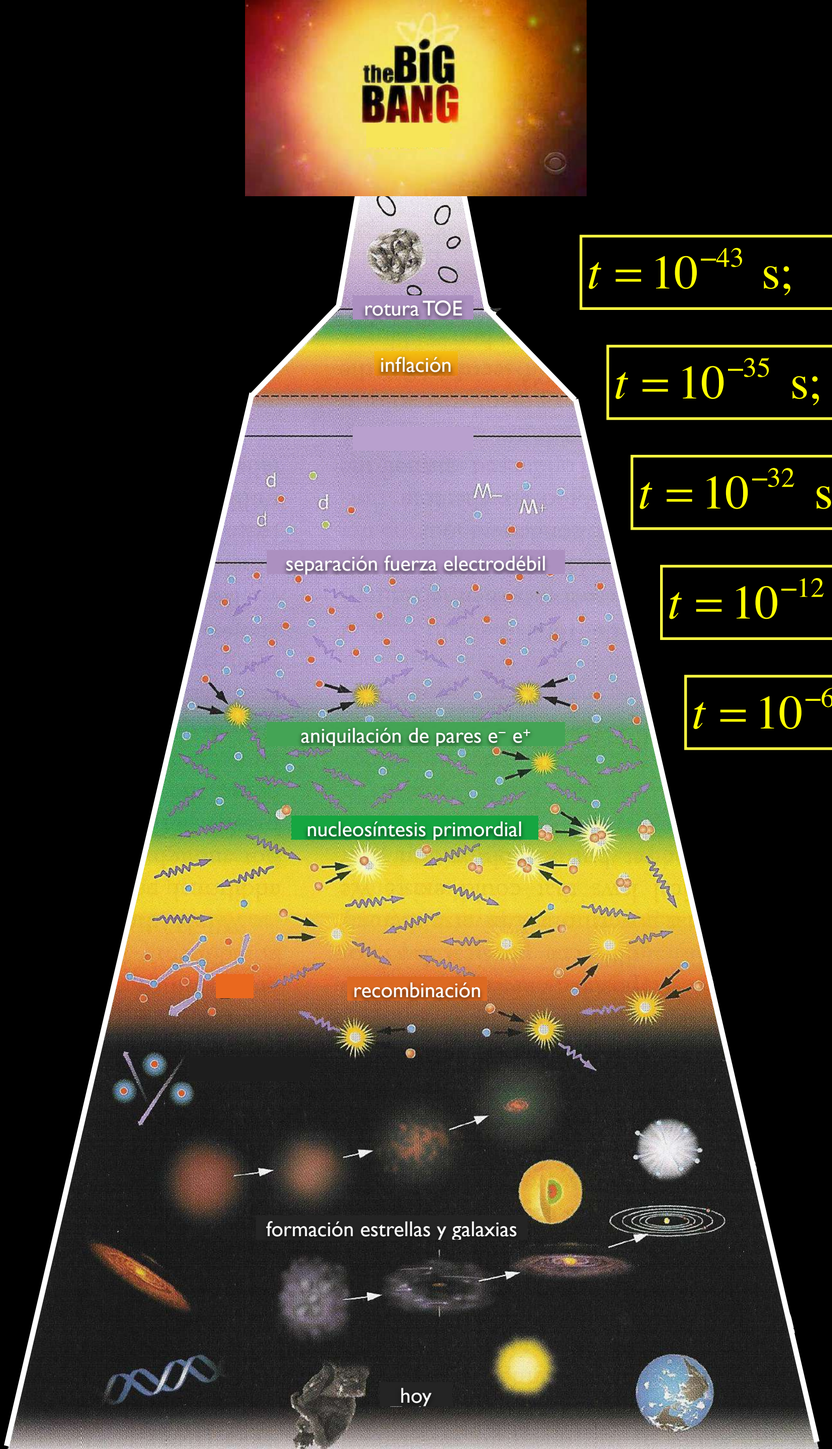


La inflación se produce tan rápidamente que las partículas y antipartículas de los pares virtuales son separadas y no se aniquilan. Se convierten en pares reales.

La mayor parte de la masa del Universo se crea en este suceso (en principio, aunque se debería haber creado la misma cantidad de materia que de antimateria, vivimos en un universo dominado por materia: ¡tiene que existir una asimetría!).



Historia térmica del Universo



$t = 10^{-43}$ s; $T = 10^{32}$ K — Era de Planck; ruptura TOE (hipotética Teoría del Todo)

$t = 10^{-35}$ s; $T = 10^{27}$ K — Comienza la inflación; ruptura GUT (Gran Unificación)

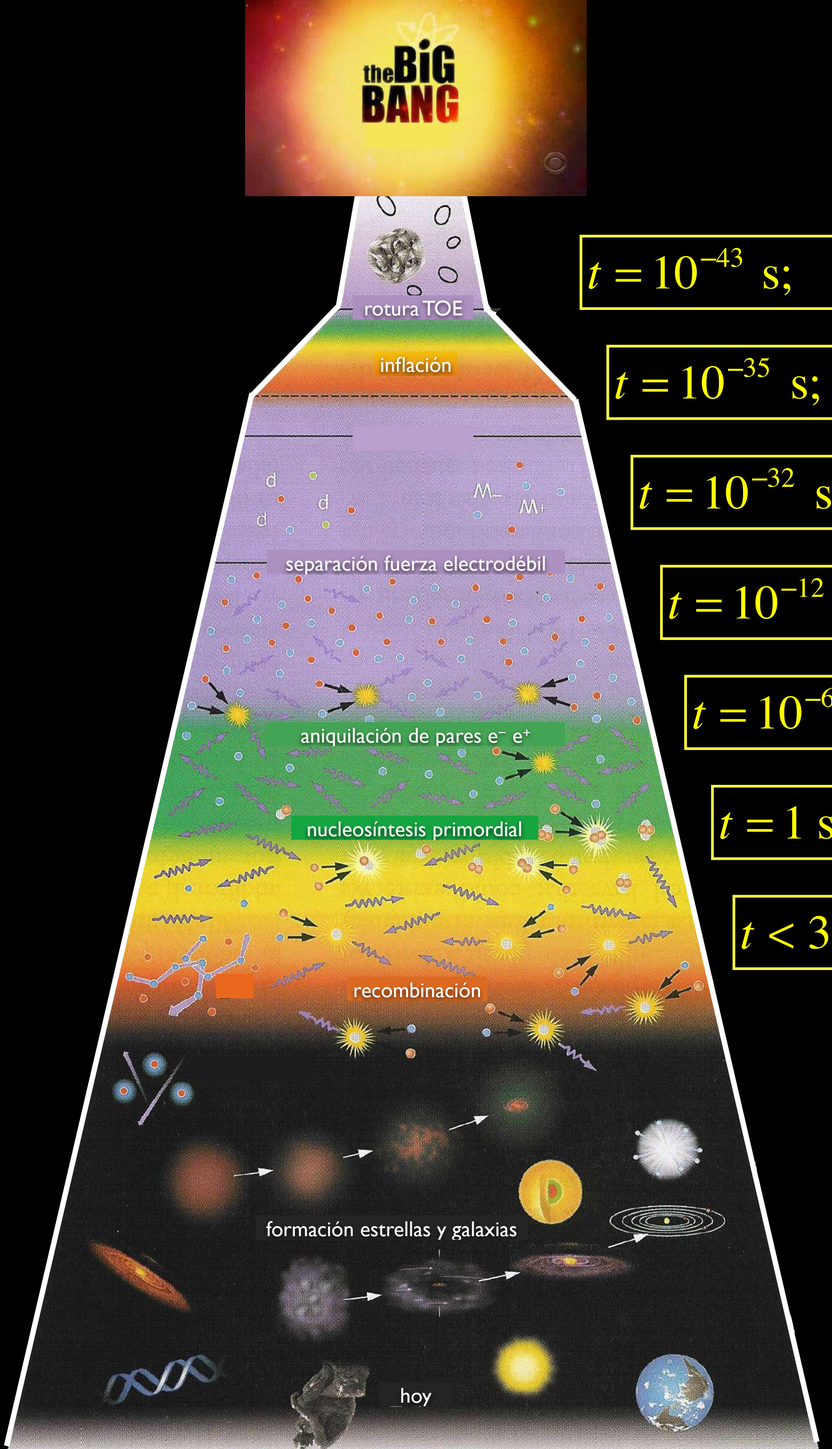
$t = 10^{-32}$ s; $T = 10^{26}$ K — Final de la inflación

$t = 10^{-12}$ s; $T = 10^{15}$ K — Separación fuerza electrodébil

$t = 10^{-6}$ s; $T = 10^{13}$ K — Confinamiento quarks (formación de p y n)



Historia térmica del Universo



$t = 10^{-43}$ s; $T = 10^{32}$ K — Era de Planck; ruptura TOE (hipotética Teoría del Todo)

$t = 10^{-35}$ s; $T = 10^{27}$ K — Comienza la inflación; ruptura GUT (Gran Unificación)

$t = 10^{-32}$ s; $T = 10^{26}$ K — Final de la inflación

$t = 10^{-12}$ s; $T = 10^{15}$ K — Separación fuerza electrodébil

$t = 10^{-6}$ s; $T = 10^{13}$ K — Confinamiento quarks (formación de p y n)

$t = 1$ s; $T = 10^{10}$ K — Desacoplamiento ν, aniquilación e^--e^+

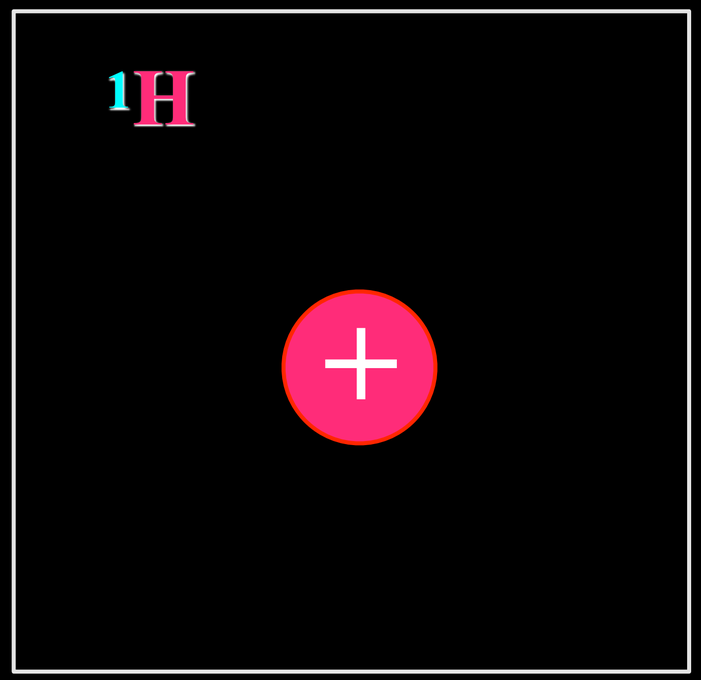
$t < 3$ m; $T = 10^{8-9}$ K — Nucleosíntesis primordial

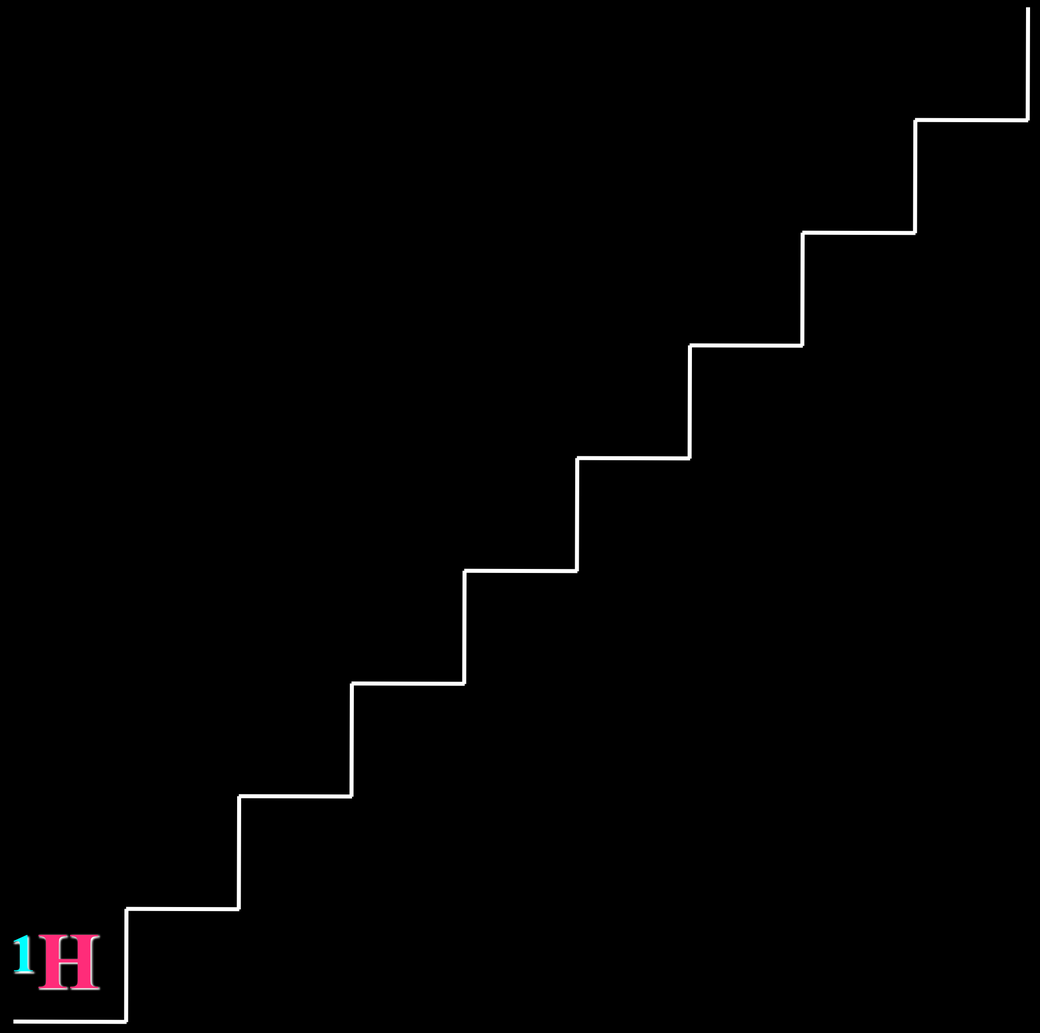


Nucleosíntesis Primordial

protón

neutron

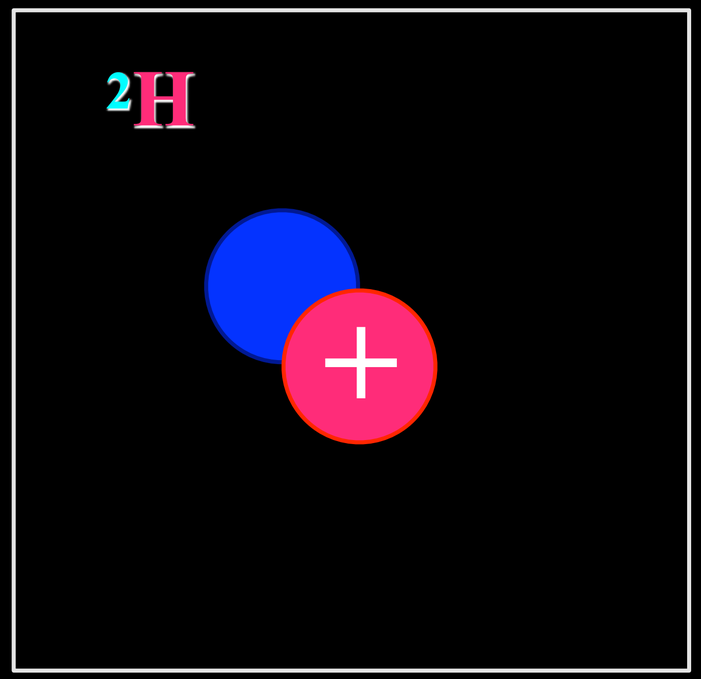


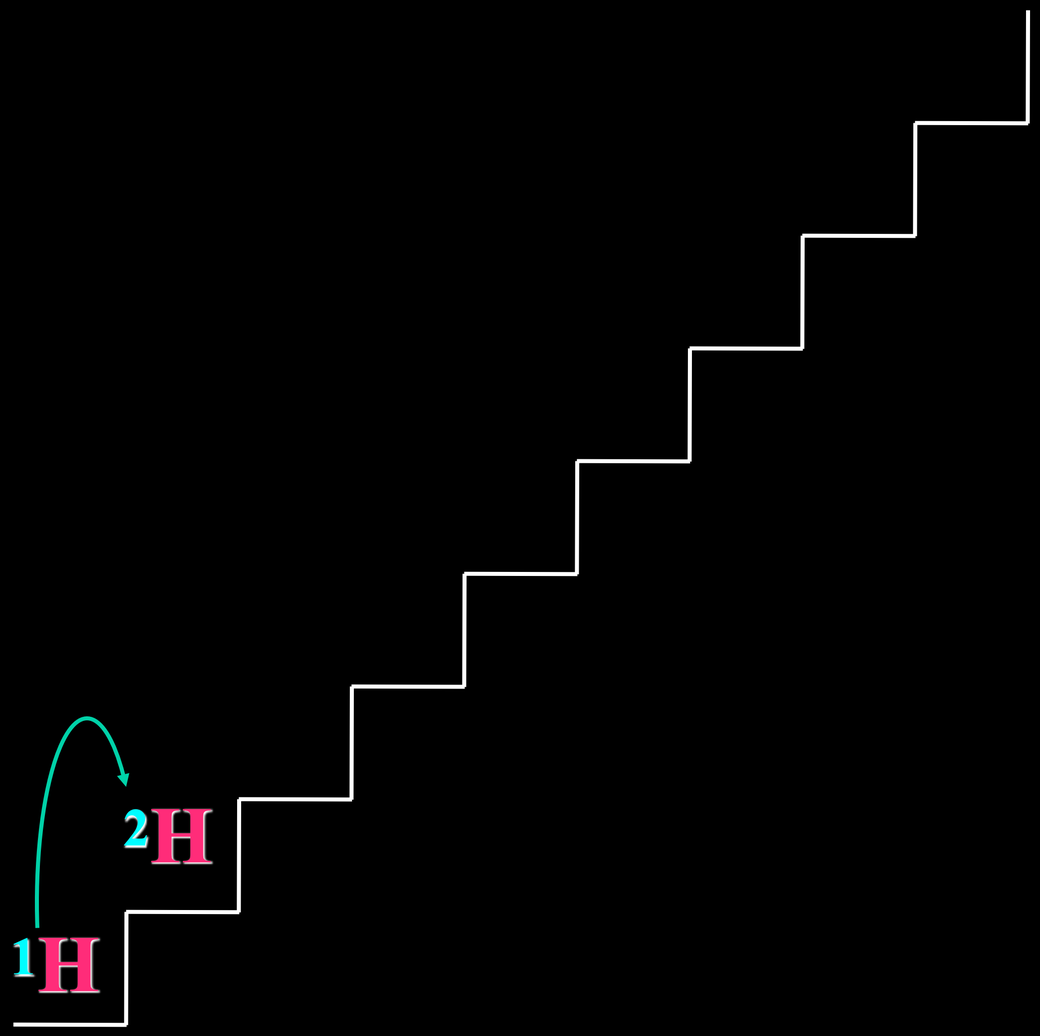


Nucleosíntesis Primordial

protón

neutron

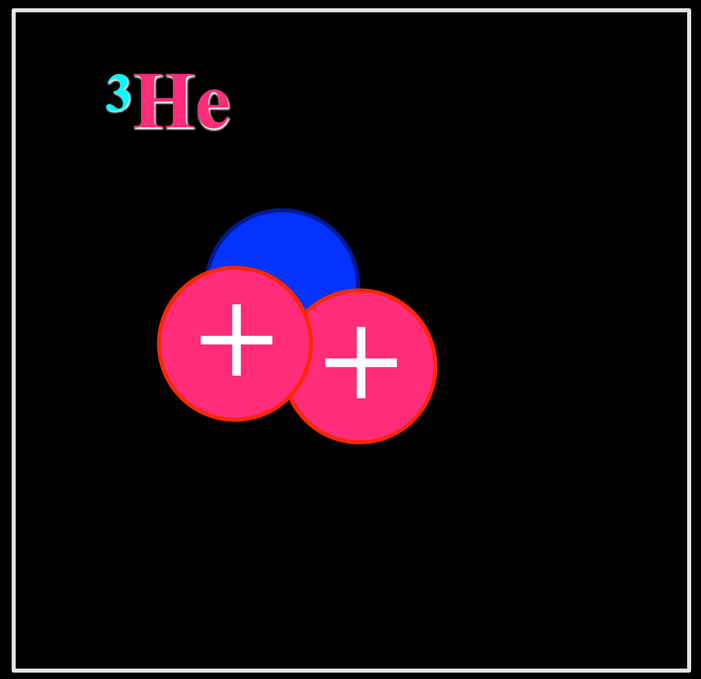


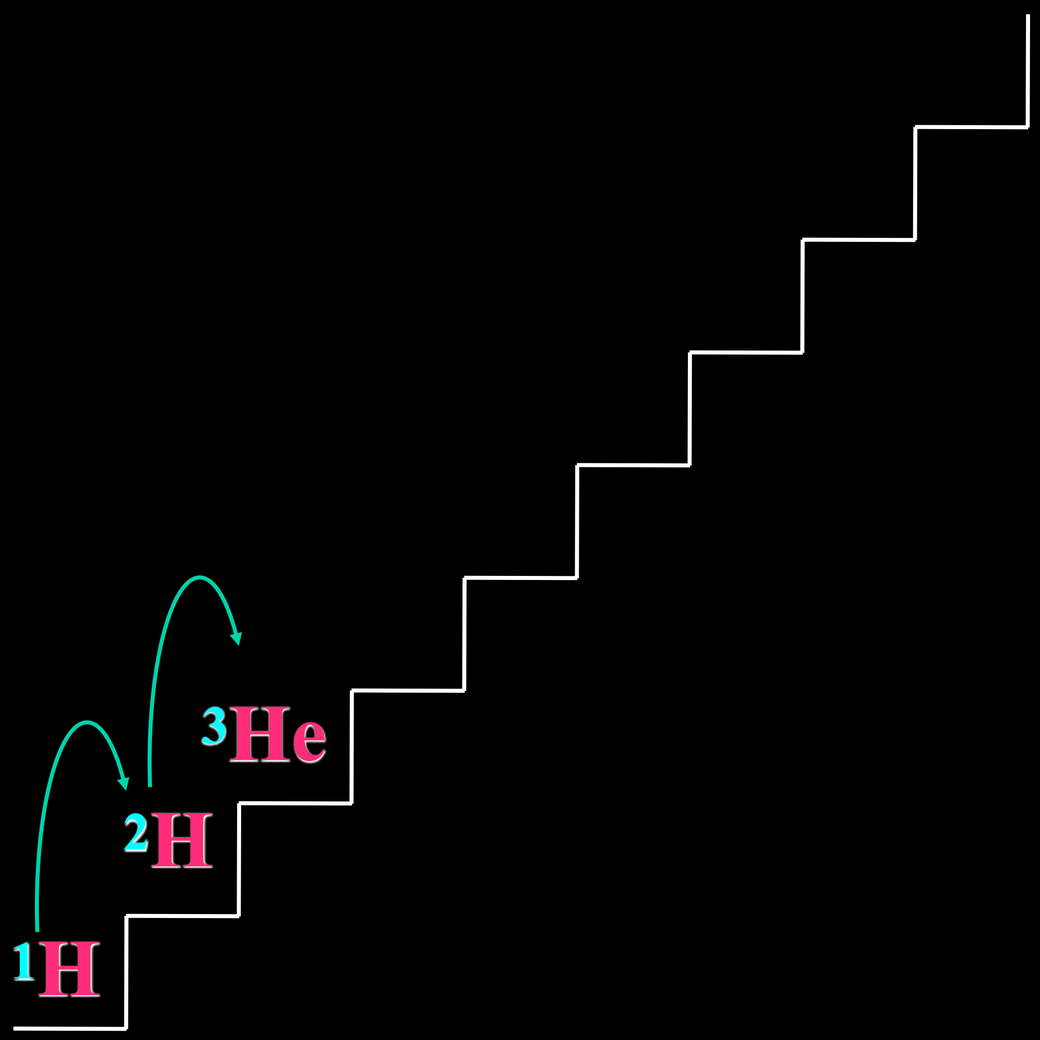


Nucleosíntesis Primordial

protón

neutron

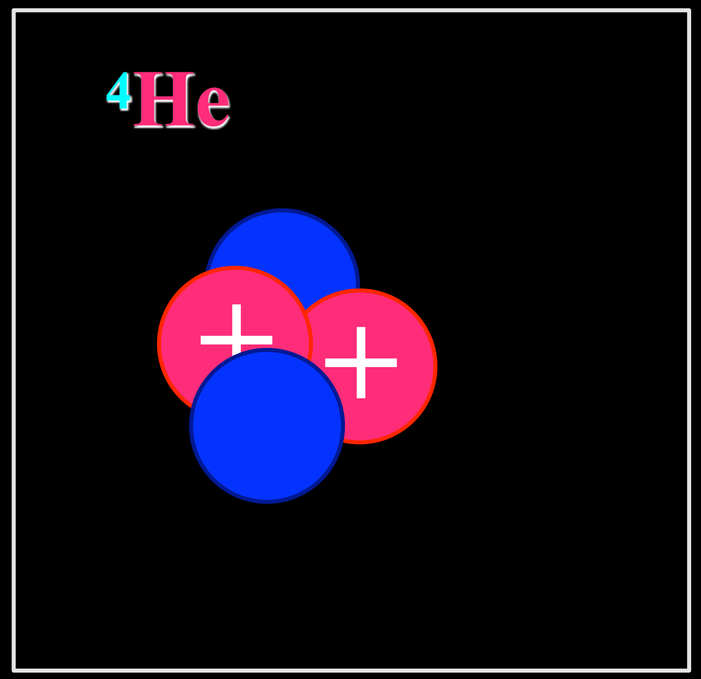


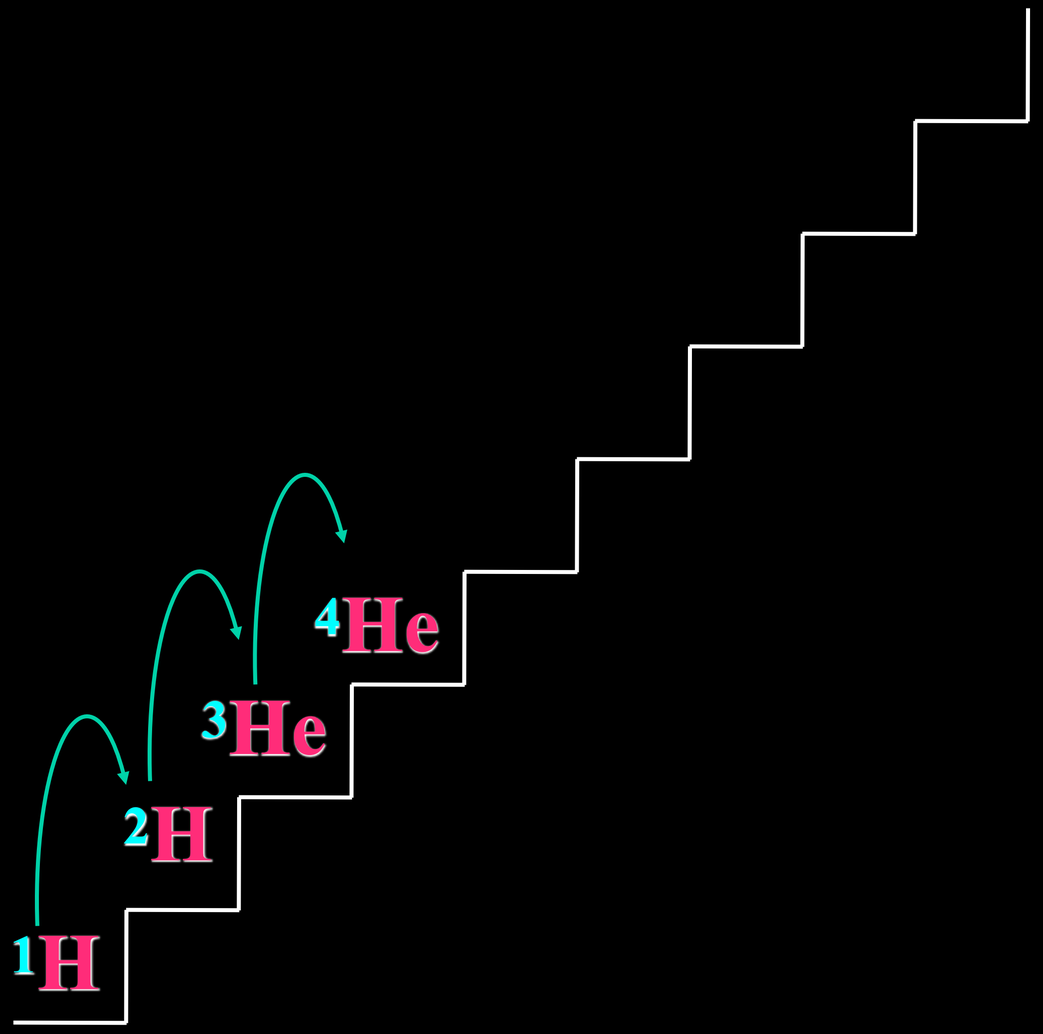


Nucleosíntesis Primordial

protón

neutron

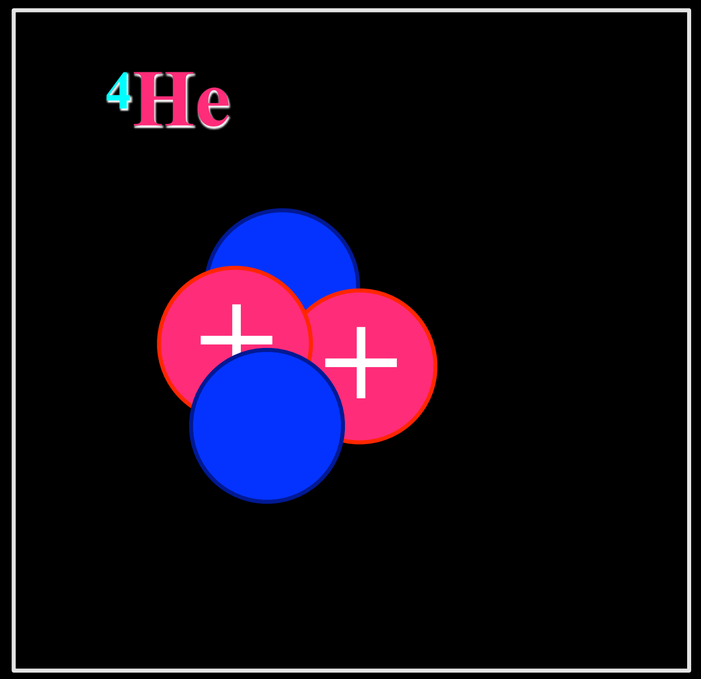


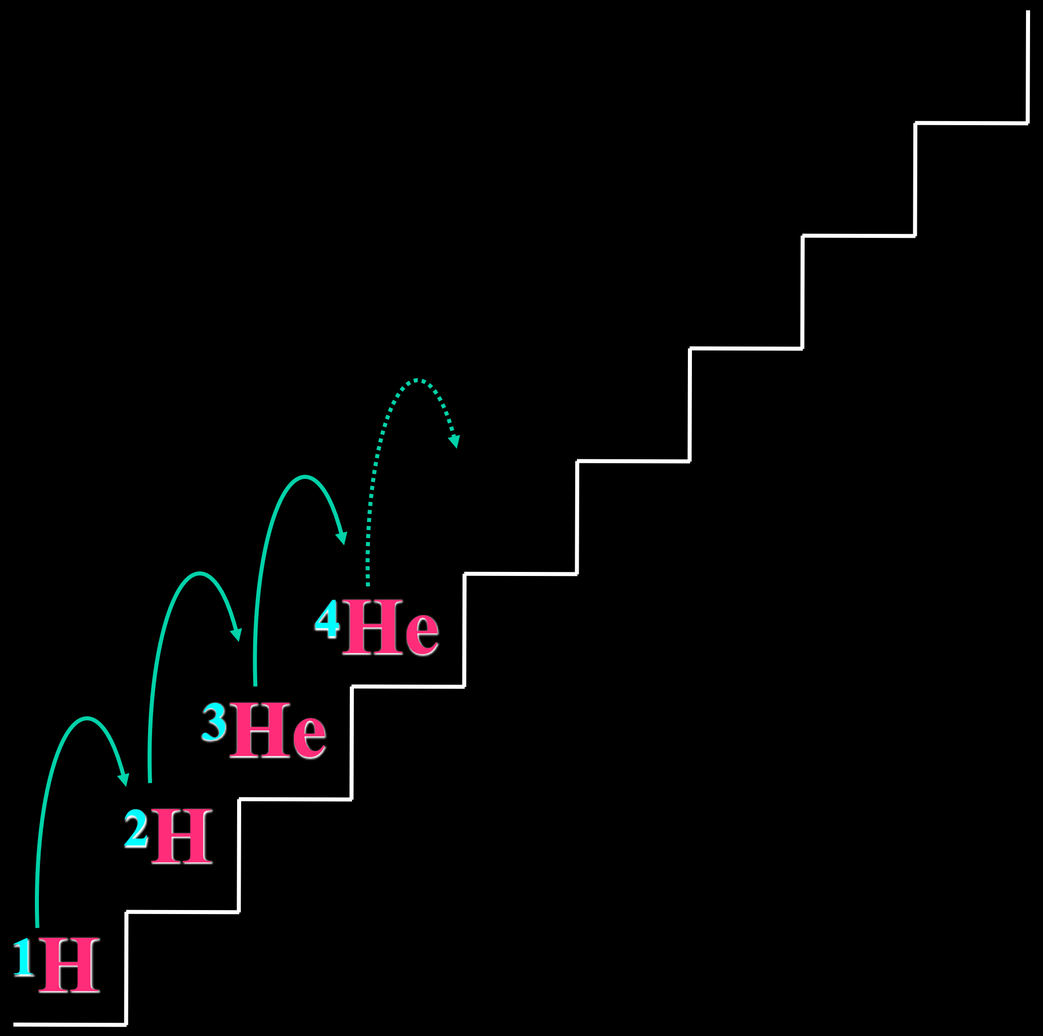


Nucleosíntesis Primordial

protón

neutron

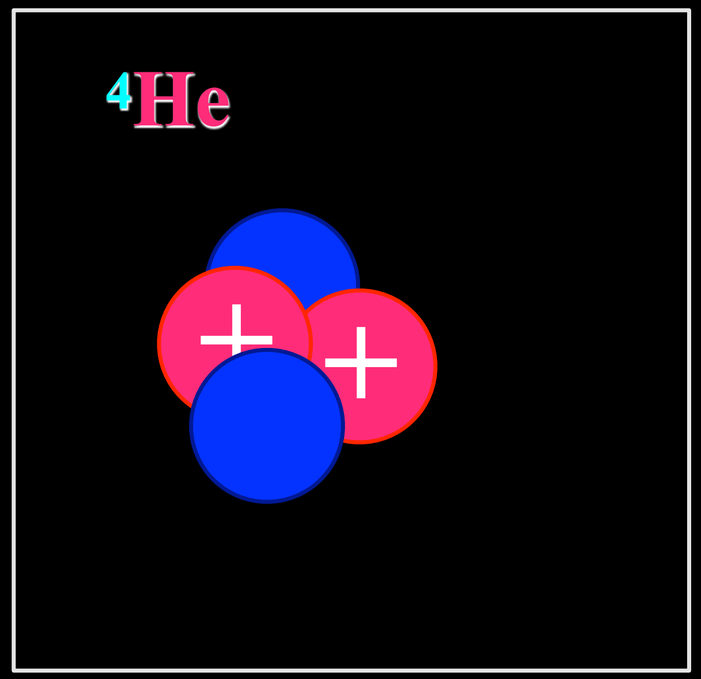


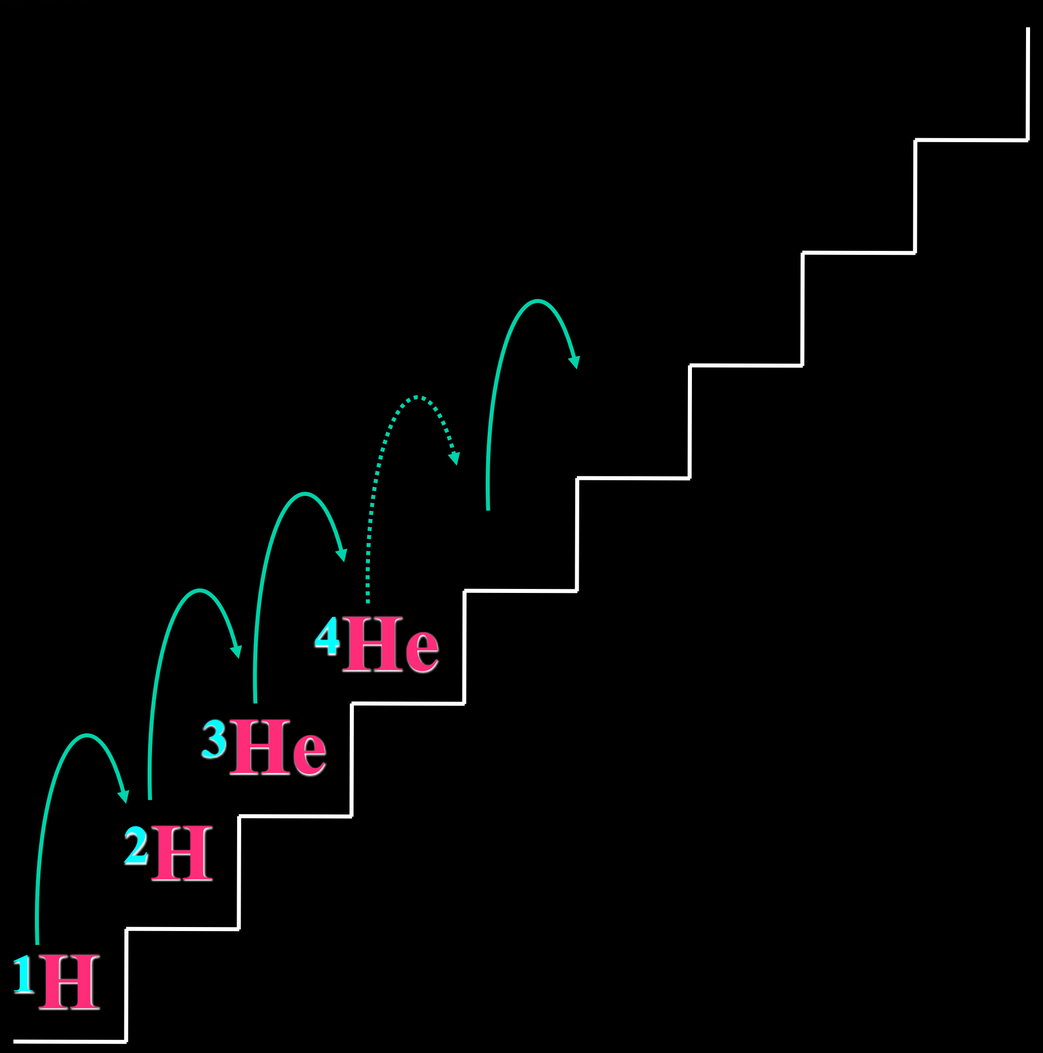


Nucleosíntesis Primordial

protón

neutron

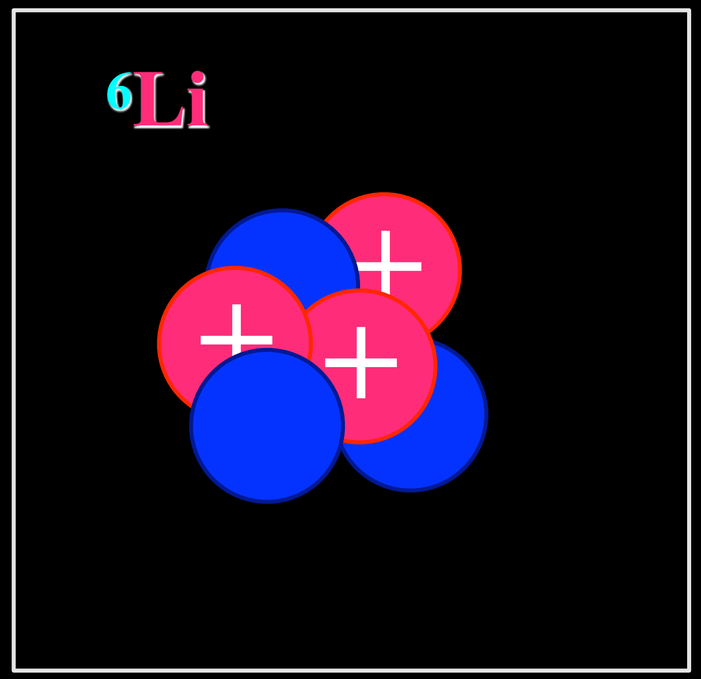


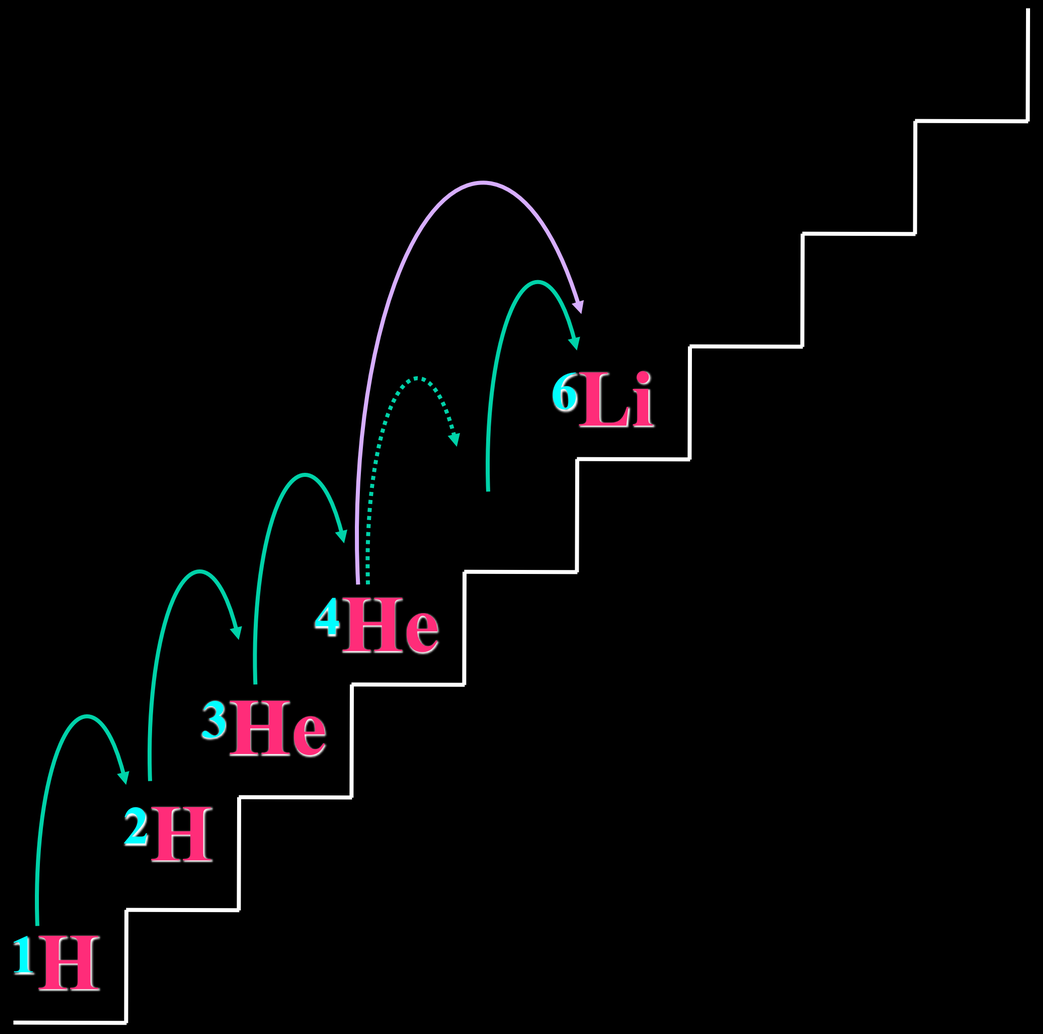


Nucleosíntesis Primordial

protón

neutron

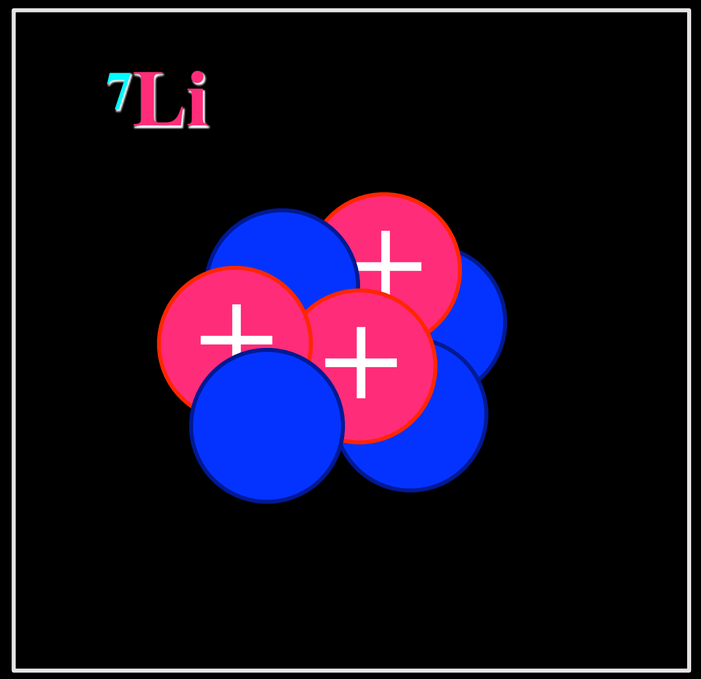


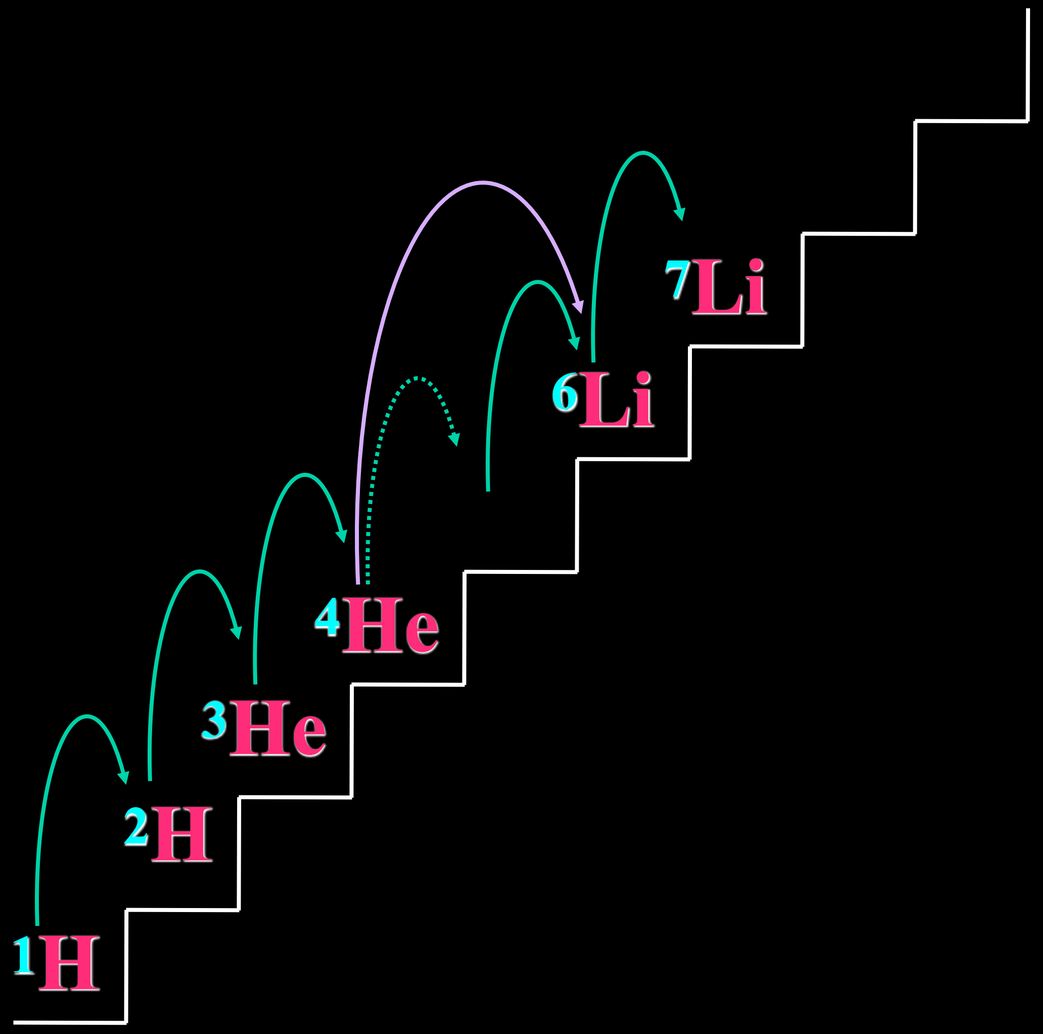


Nucleosíntesis Primordial

protón

neutron

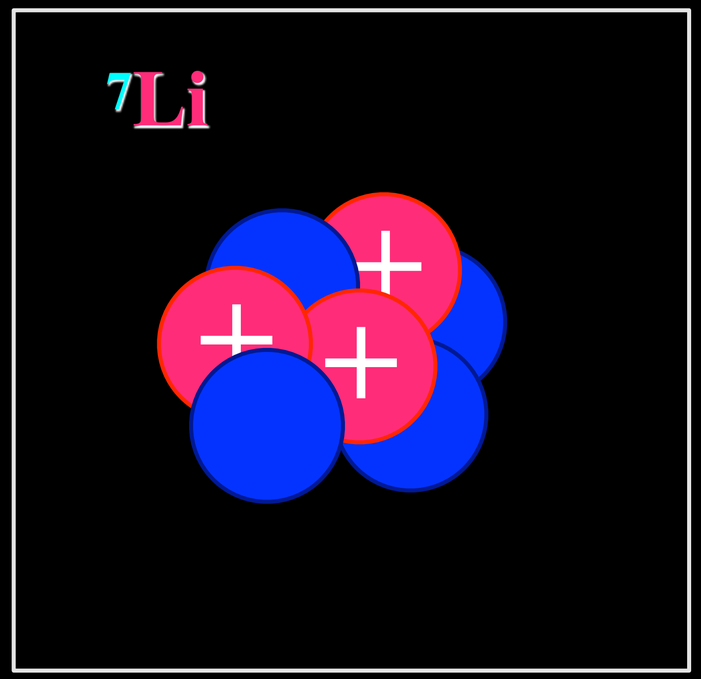


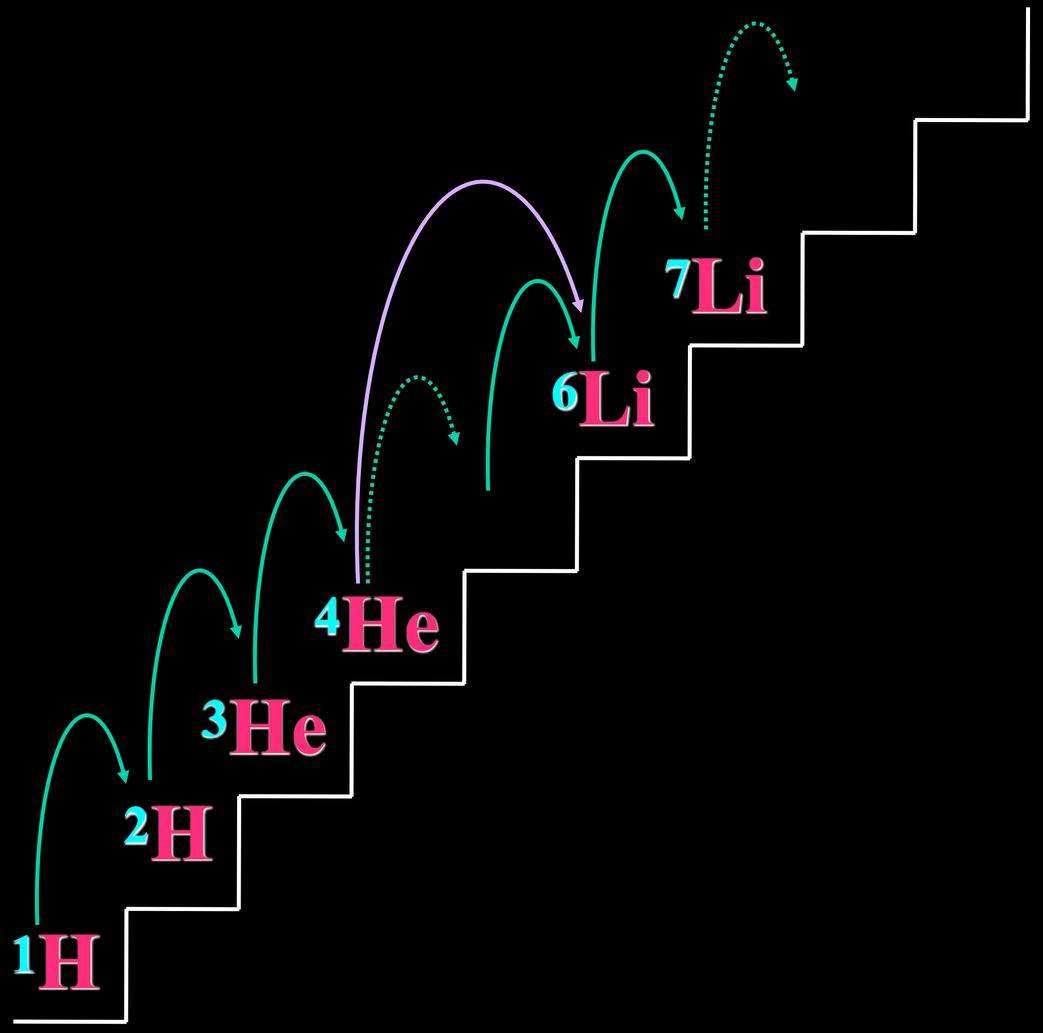


Nucleosíntesis Primordial

protón

neutron

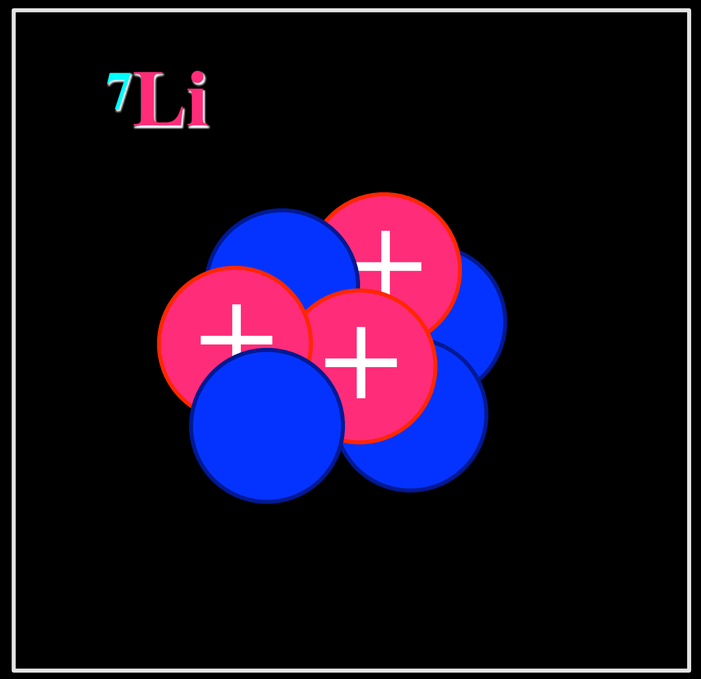


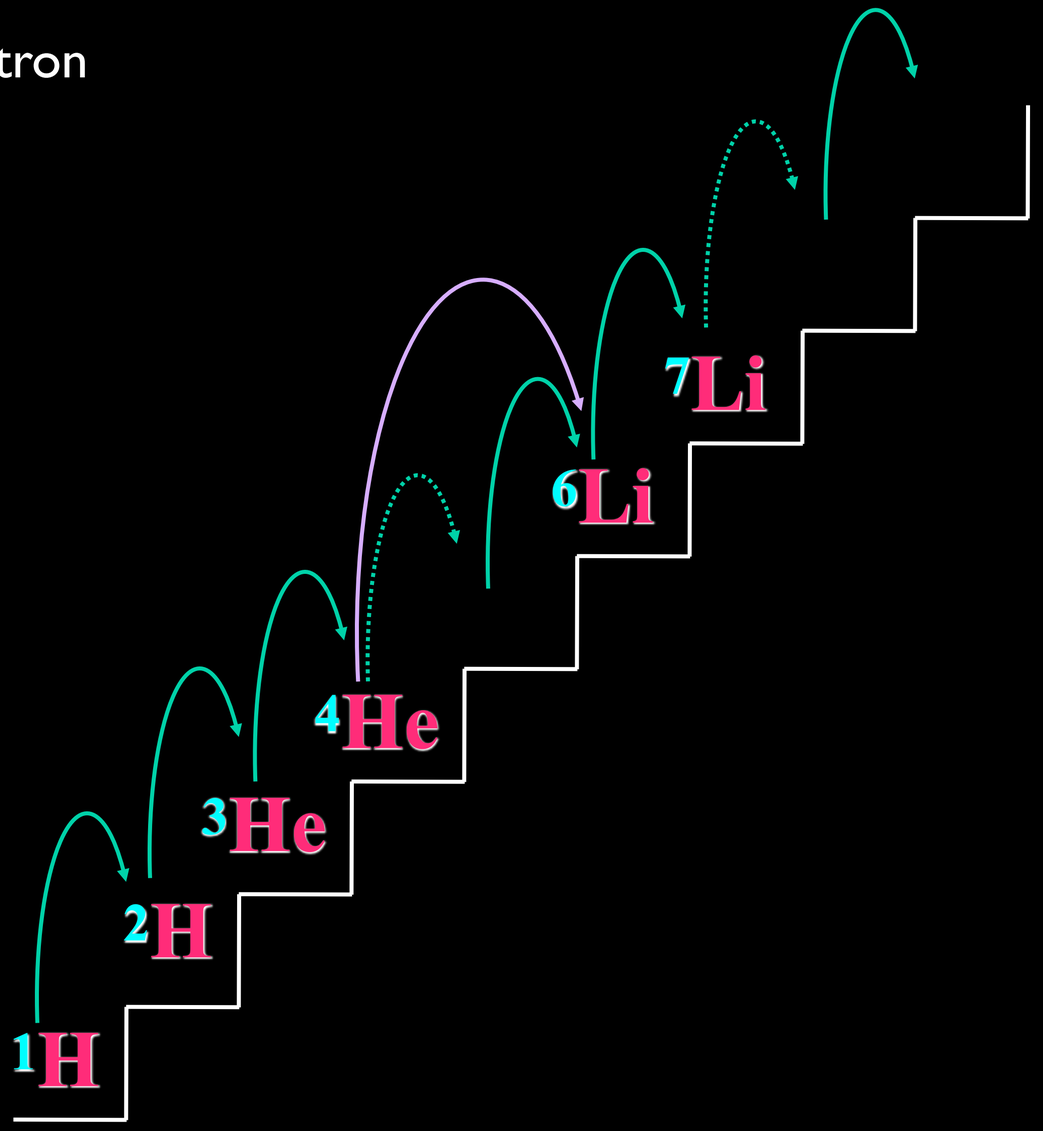


Nucleosíntesis Primordial

protón

neutron

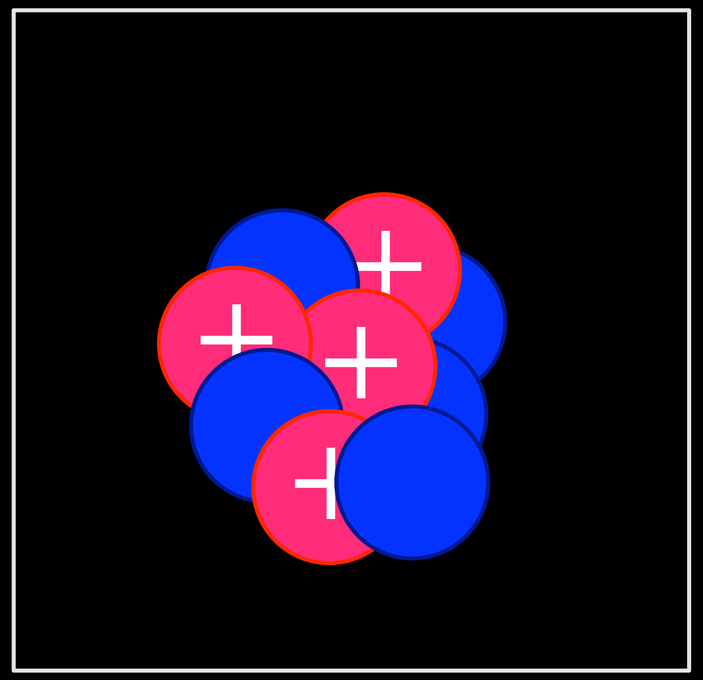


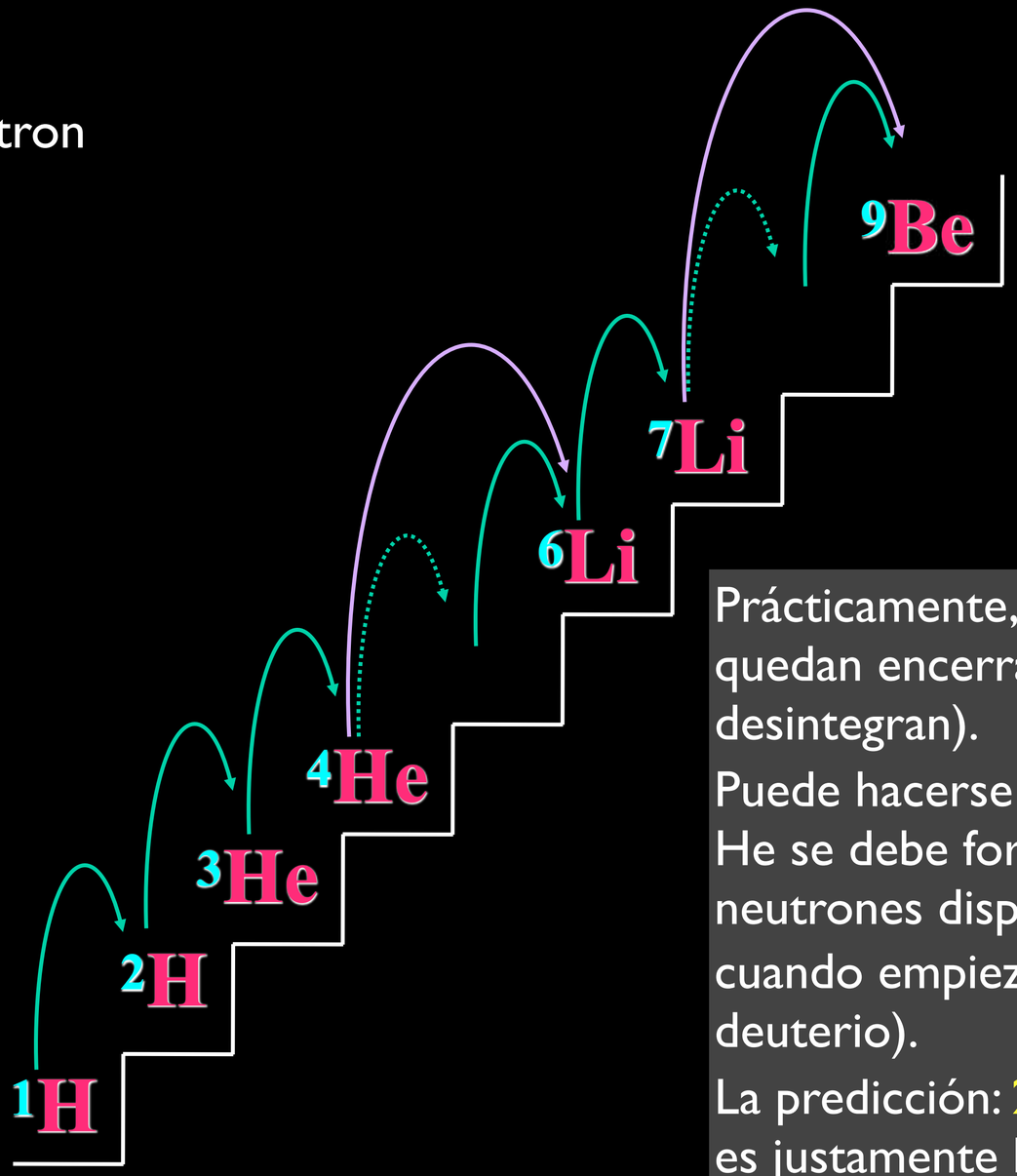


Nucleosíntesis Primordial

protón

neutron





Prácticamente, todos los neutrones quedan encerrados en el ^{4}He (el resto se desintegran).

Puede hacerse una estimación de cuánto He se debe formar a partir de los neutrones disponibles ($N_n/N_p \simeq 0.16$ cuando empieza la formación de deuterio).

La predicción: 24% He, 76% H (en masa) es justamente lo que se mide en el Universo actual

Contenido de materia ordinaria en el Universo

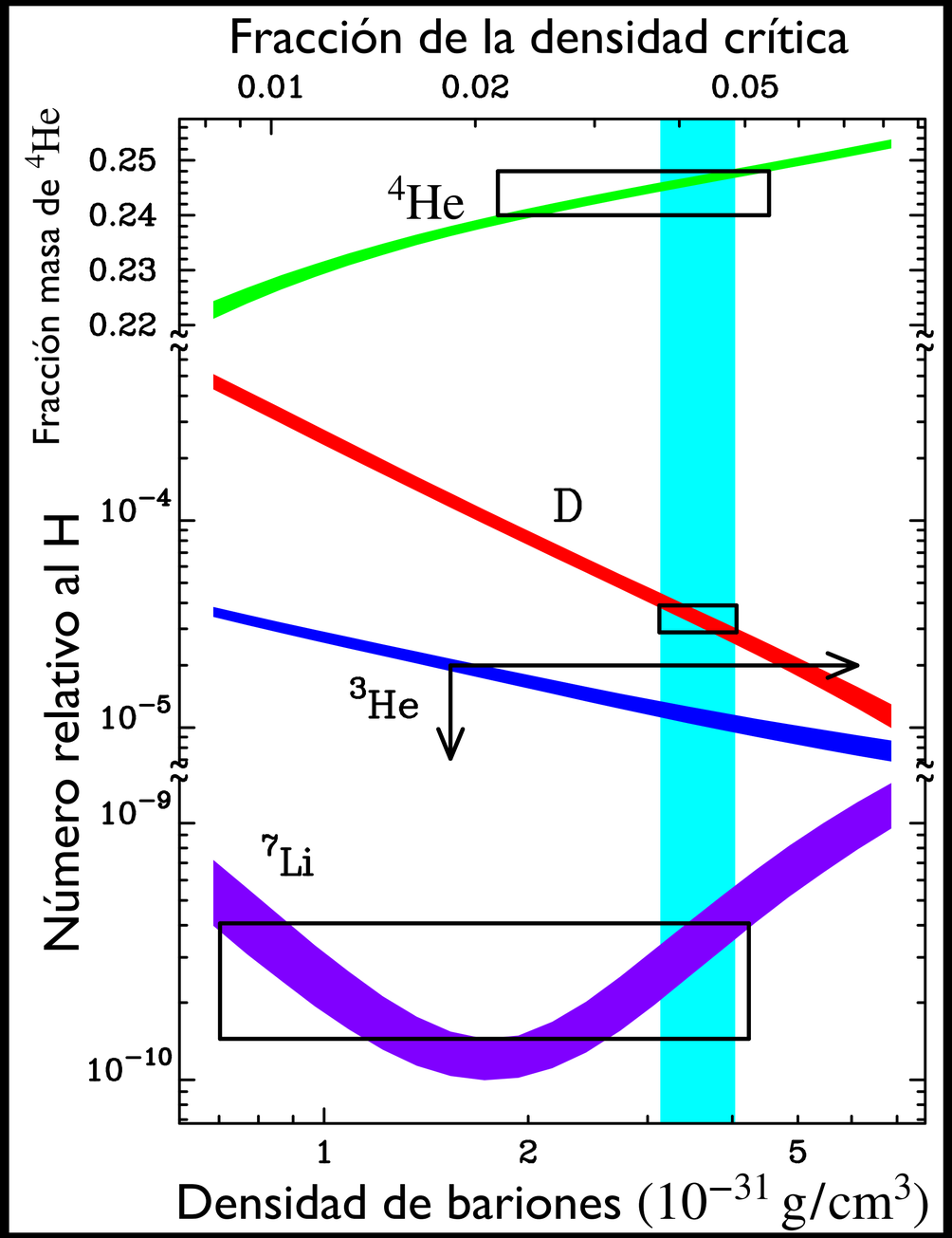


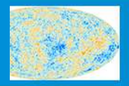
Fig. 3, Freedman & Turner 2003
https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003RvMP...75.1433F/abstract

Predicción de la cantidad de hidrógeno, deuterio, helio y litio generados en los primeros minutos de vida del universo (BBN: *Big Bang Nucleosynthesis*).

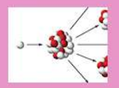
← La cantidad de deuterio es el observable que mejor restringe el valor de la densidad bariónica.

Origen de los elementos químicos detectados en el sistema solar

Big Bang
(Nucleosíntesis primordial)



Fisión por rayos cósmicos



Gráfica creada por Jennifer Johnson
http://www.astronomy.ohio-state.edu/~jaj/nucleo/

Fusión de estrellas de neutrones



Explosión de estrellas masivas



Evolución de estrellas de baja masa



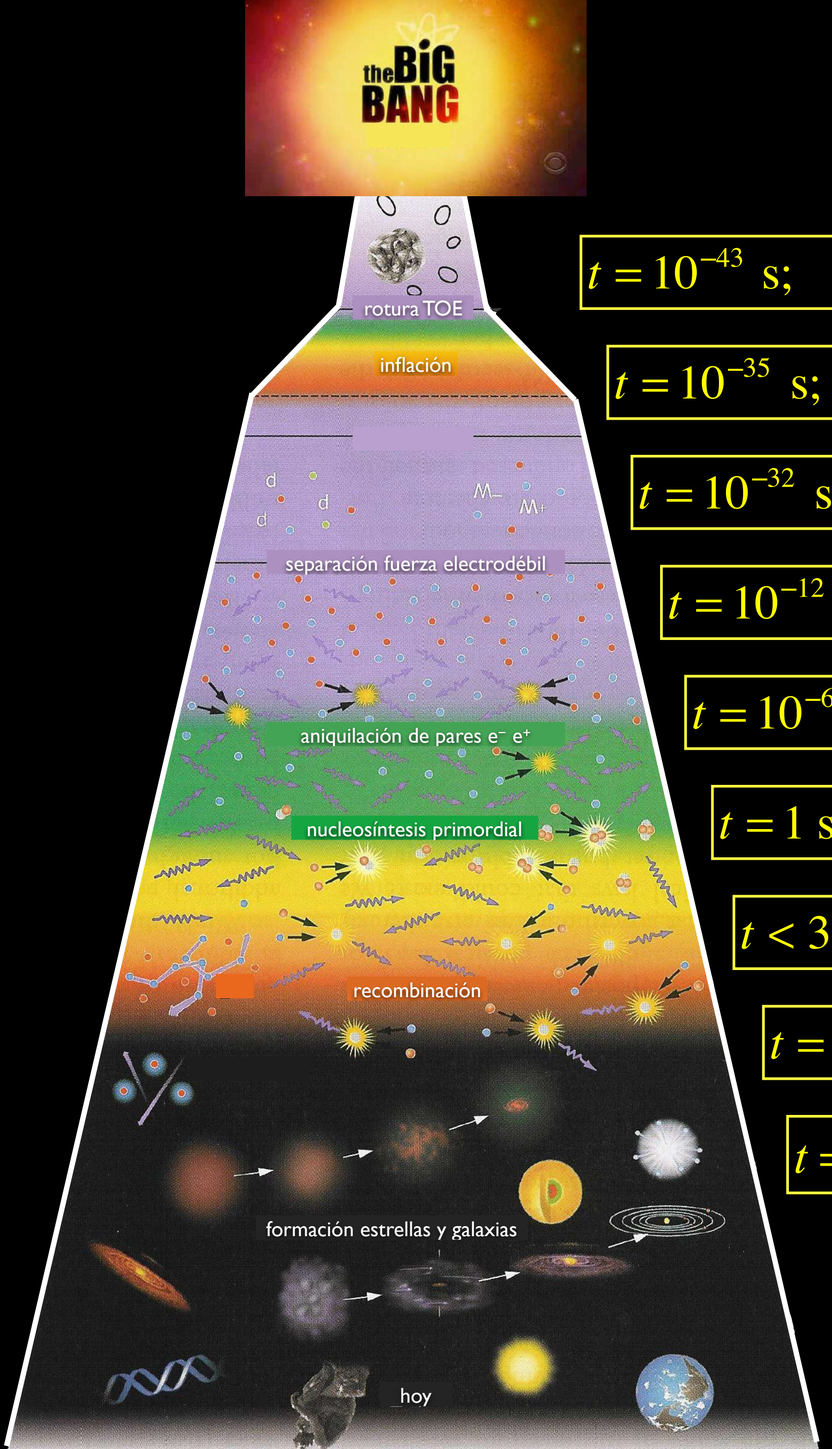
Explosión de enanas blancas



1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	Very radioactive isotopes; nothing left from stars								

Historia térmica del Universo



$t = 10^{-43}$ s; $T = 10^{32}$ K — Era de Planck; ruptura TOE (hipotética Teoría del Todo)

$t = 10^{-35}$ s; $T = 10^{27}$ K — Comienza la inflación; ruptura GUT (Gran Unificación)

$t = 10^{-32}$ s; $T = 10^{26}$ K — Final de la inflación

$t = 10^{-12}$ s; $T = 10^{15}$ K — Separación fuerza electrodébil

$t = 10^{-6}$ s; $T = 10^{13}$ K — Confinamiento quarks (formación de p y n)

$t = 1$ s; $T = 10^{10}$ K — Desacoplamiento ν, aniquilación e^--e^+

$t < 3$ m; $T = 10^{8-9}$ K — Nucleosíntesis primordial

$t = 2 \times 10^4$ a; $T = 1.4 \times 10^4$ K — Final era de la radiación

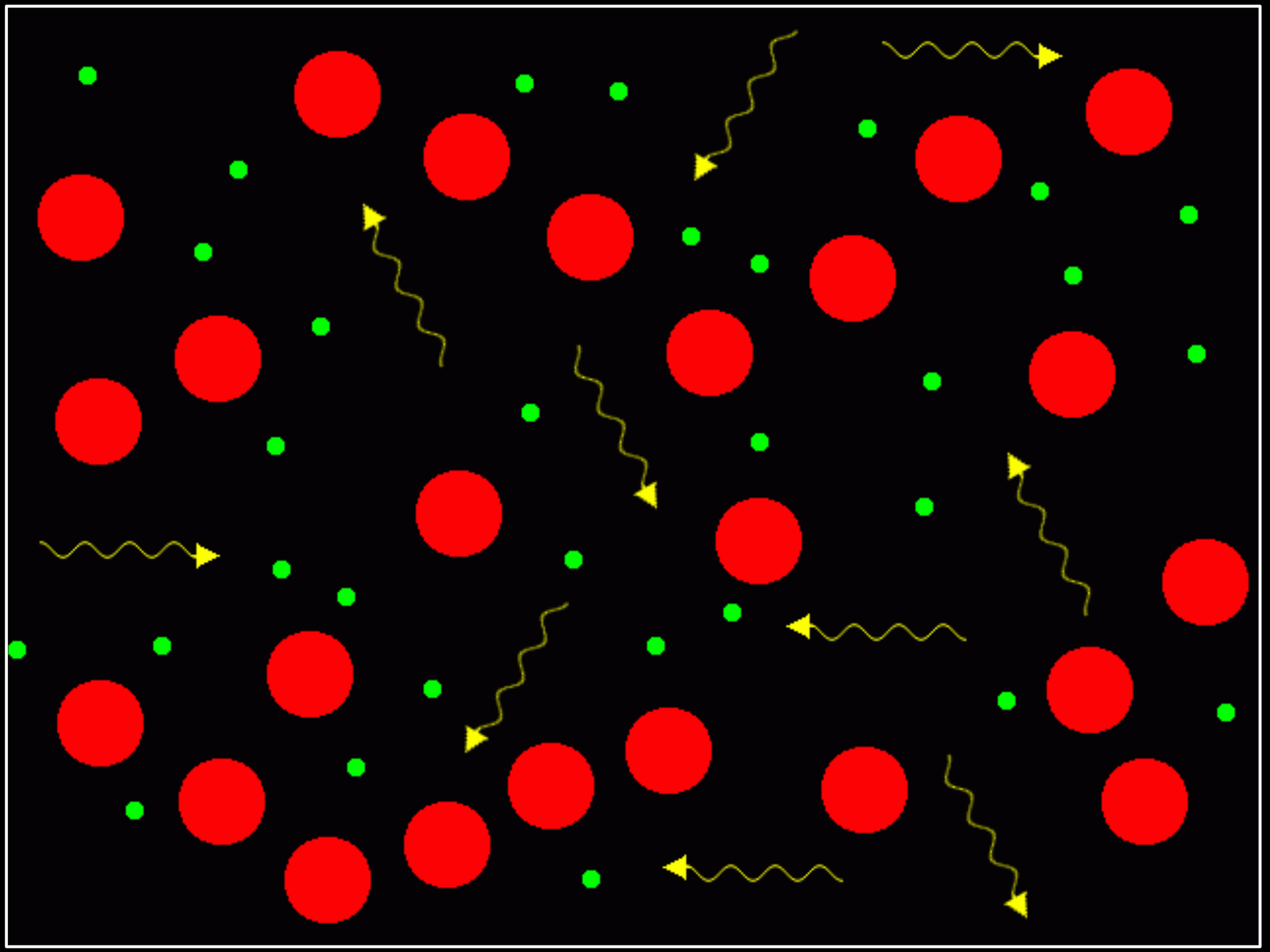
$t = 380000$ a; $T = 3 \times 10^3$ K — Recombinación



Antes de la recombinación

La temperatura es demasiado alta: los electrones y protones no pueden formar todavía átomos estables porque las colisiones evitan que estén unidos.

Como los fotones interactúan fácilmente con los electrones libres, aquellos no pueden viajar libremente. La luz no puede recorrer largas distancias antes de ser dispersada.



electrones

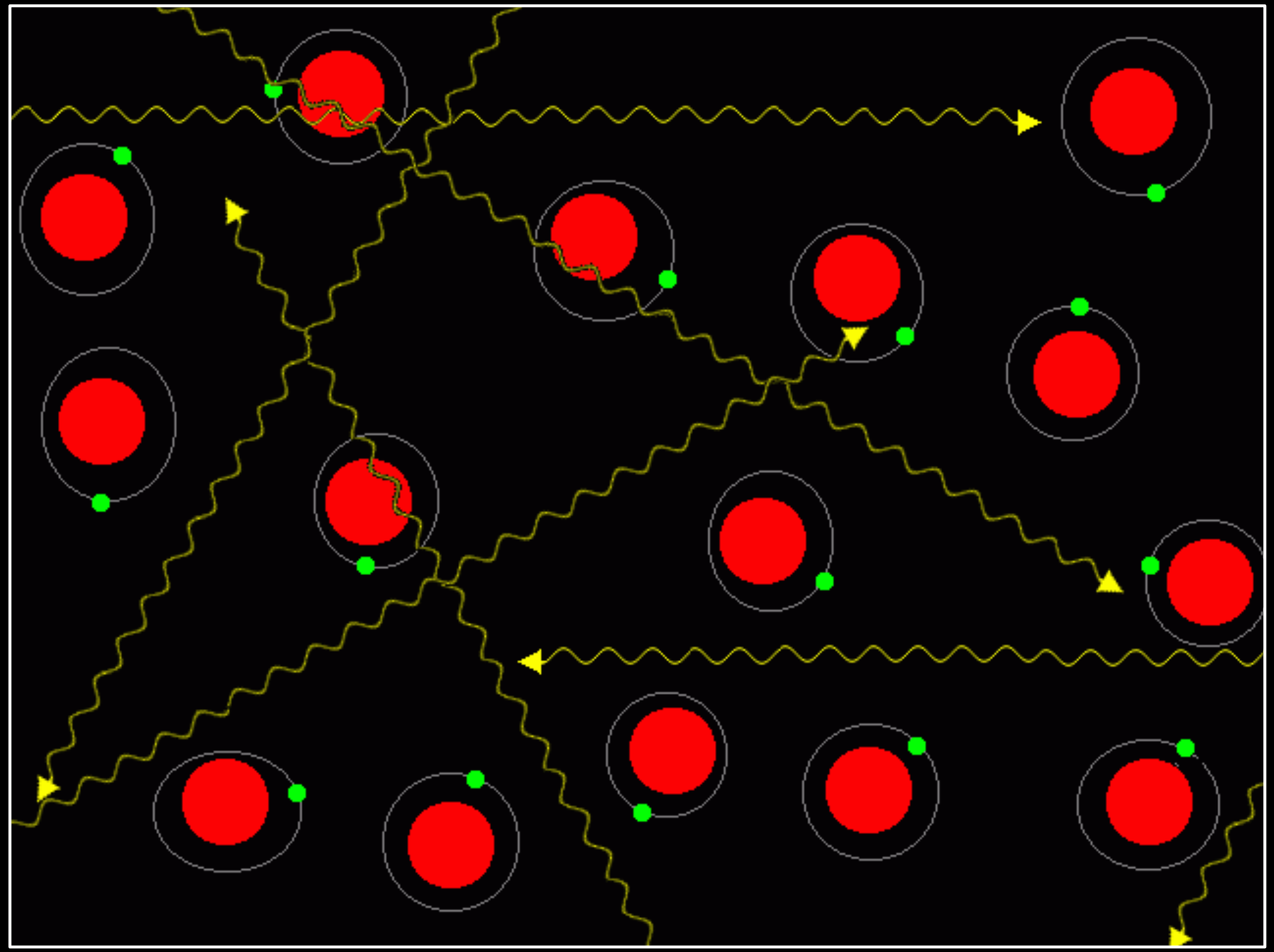
protones

fotones

Después de la recombinación

La temperatura desciende y los electrones y protones pueden, por primera vez en la historia del universo, formar átomos estables

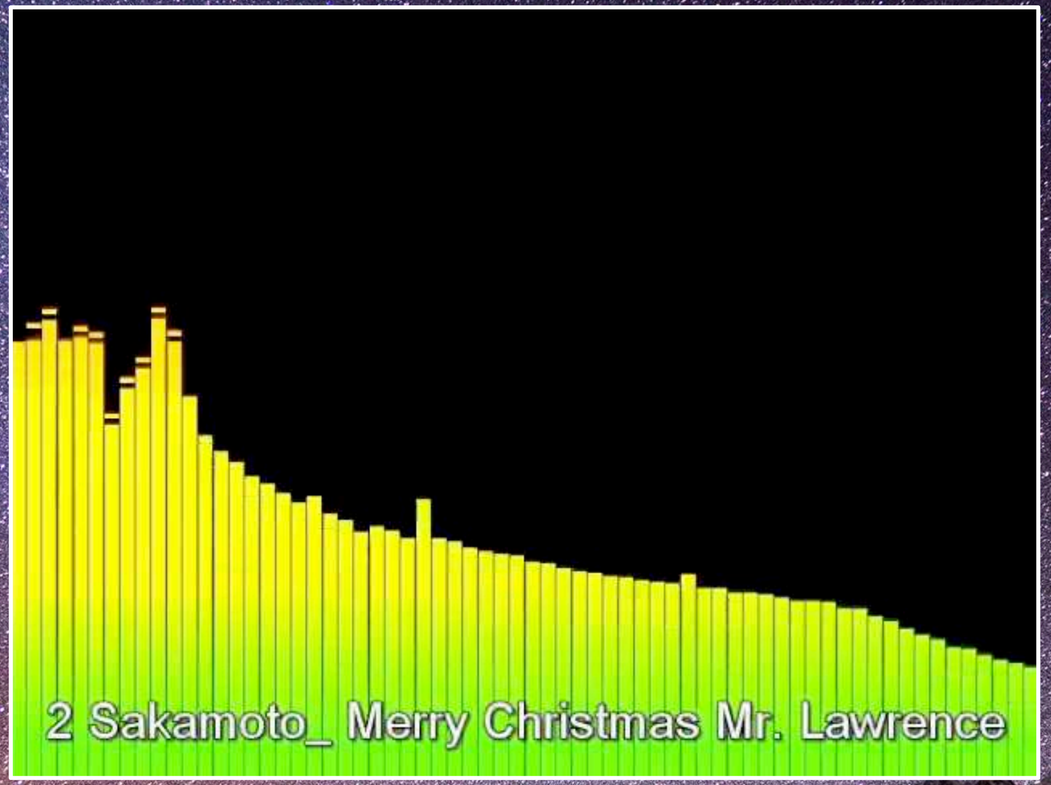
¡A partir de ese momento los fotones pueden viajar libremente por el universo!



electrones

protones

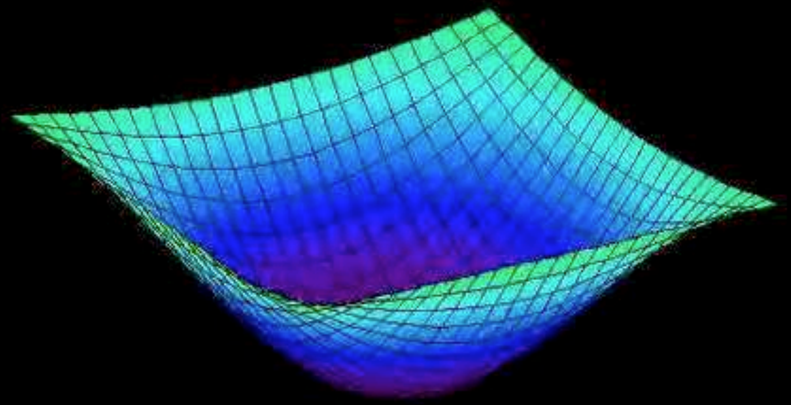
fotones

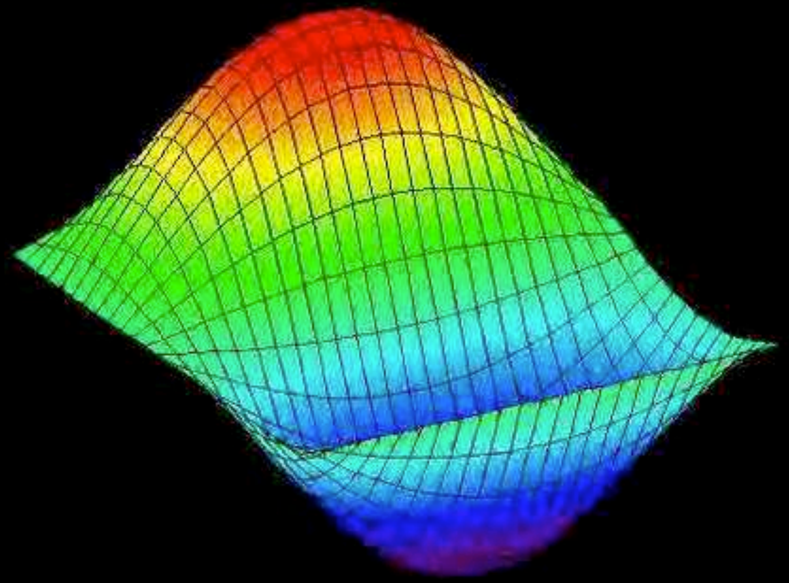


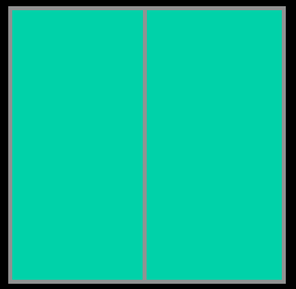


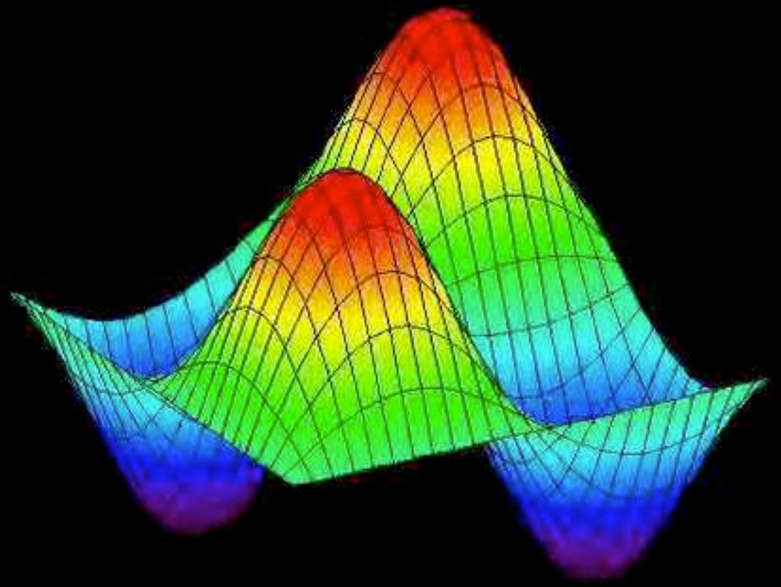
http://www.stickpng.com/img/objects/musical-instruments/piano

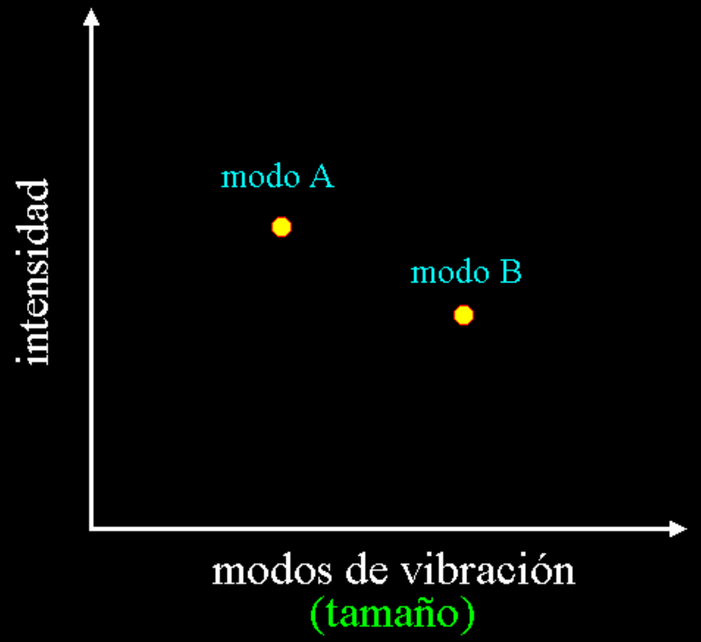
http://www.baltana.com/files/wallpapers-2/Night-Sky-Images-08473.jpg

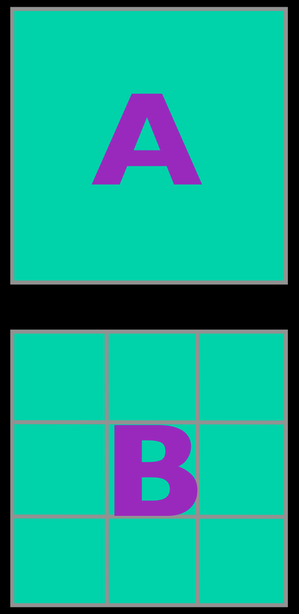


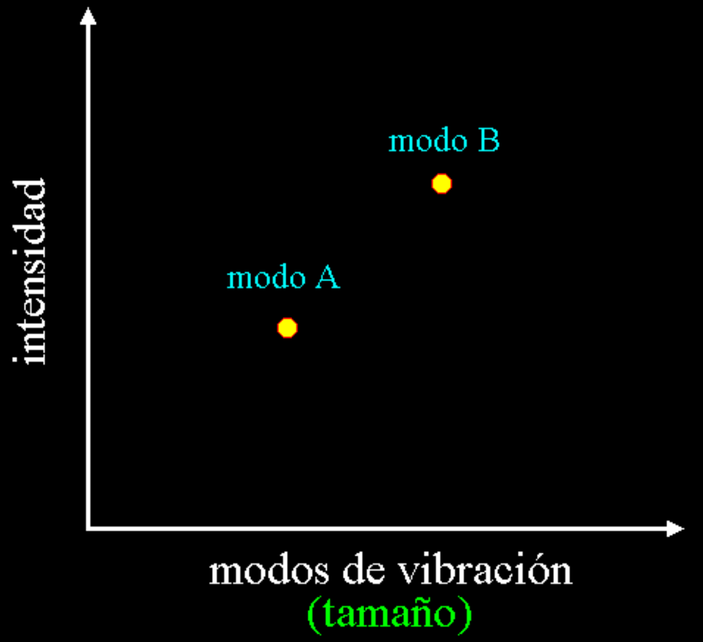


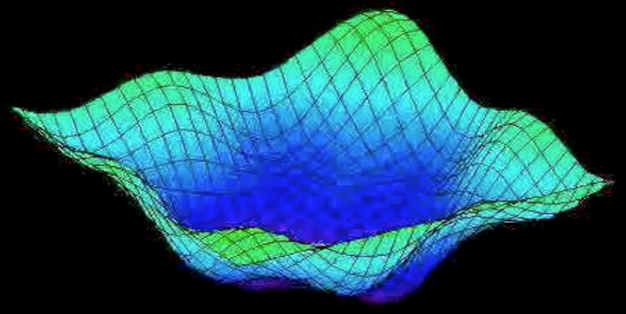


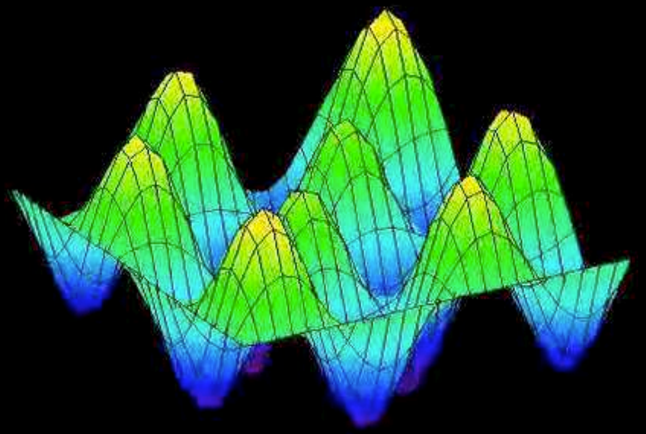


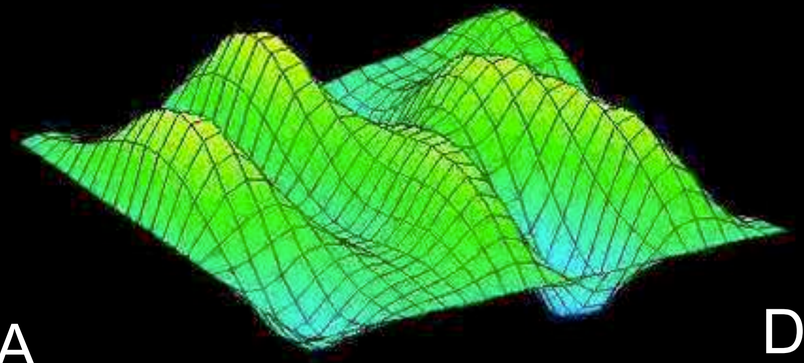

intensidad
modo A
modo B
modos de vibración
(tamaño)


A
B


intensidad
modo B
modo A
modos de vibración
(tamaño)

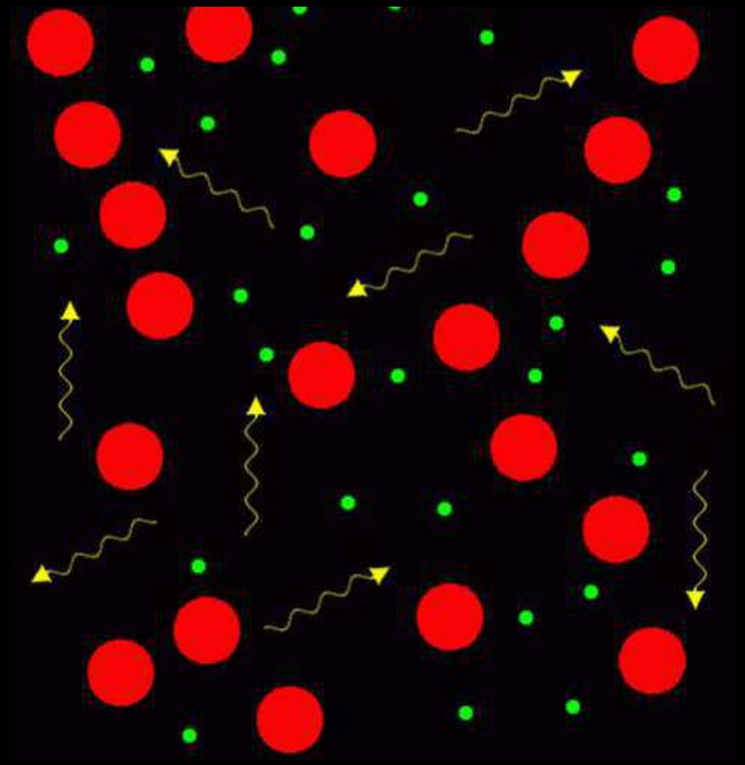


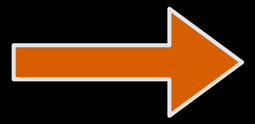


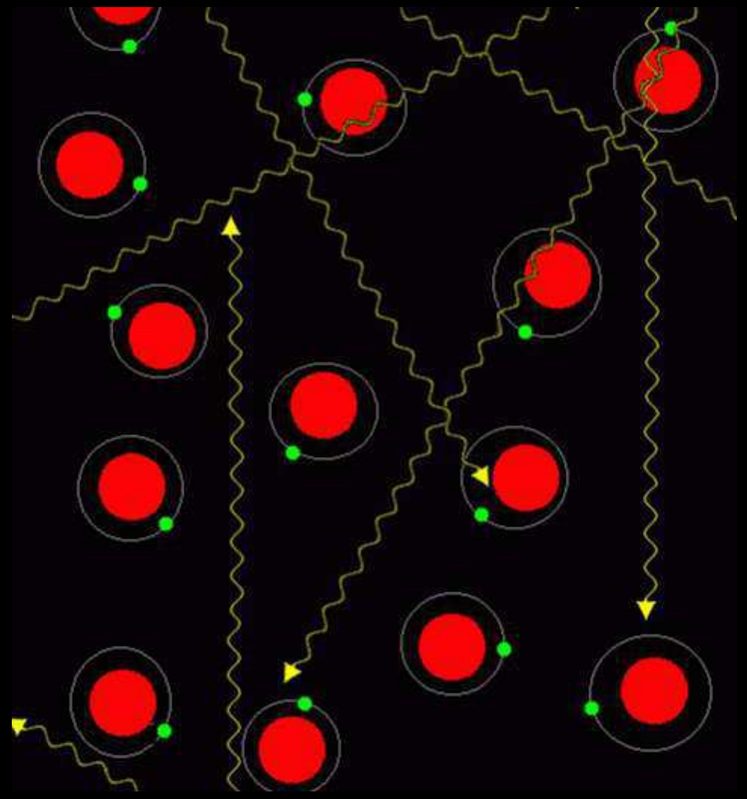


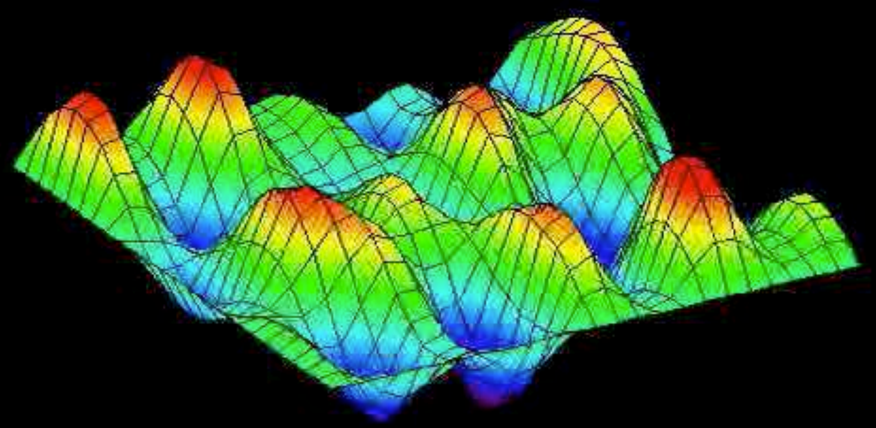
ANTES DE LA RECOMBINACIÓN

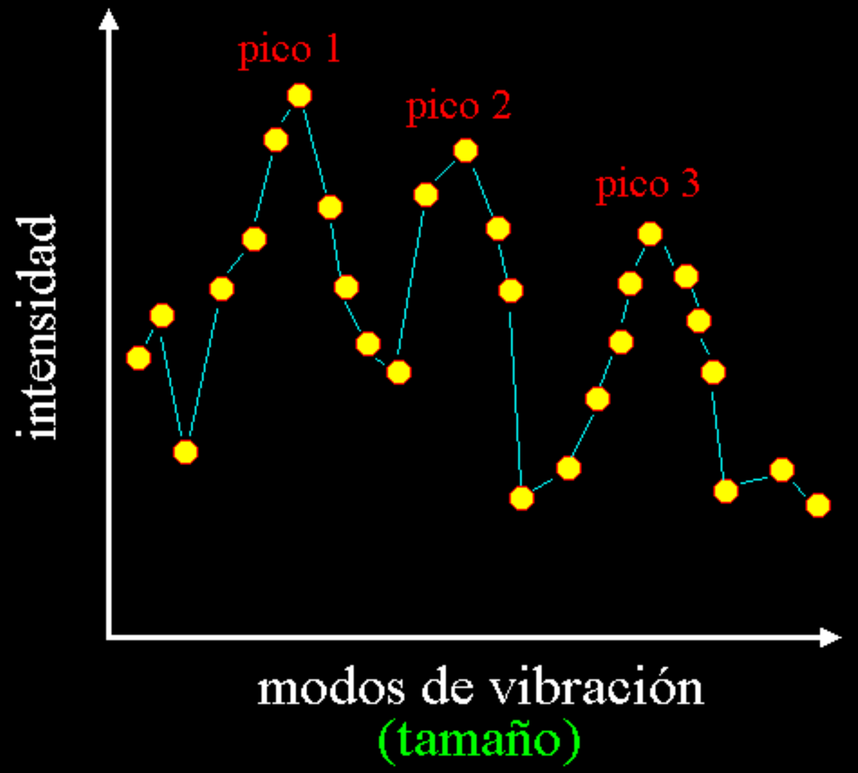
DESPUÉS DE LA RECOMBINACIÓN

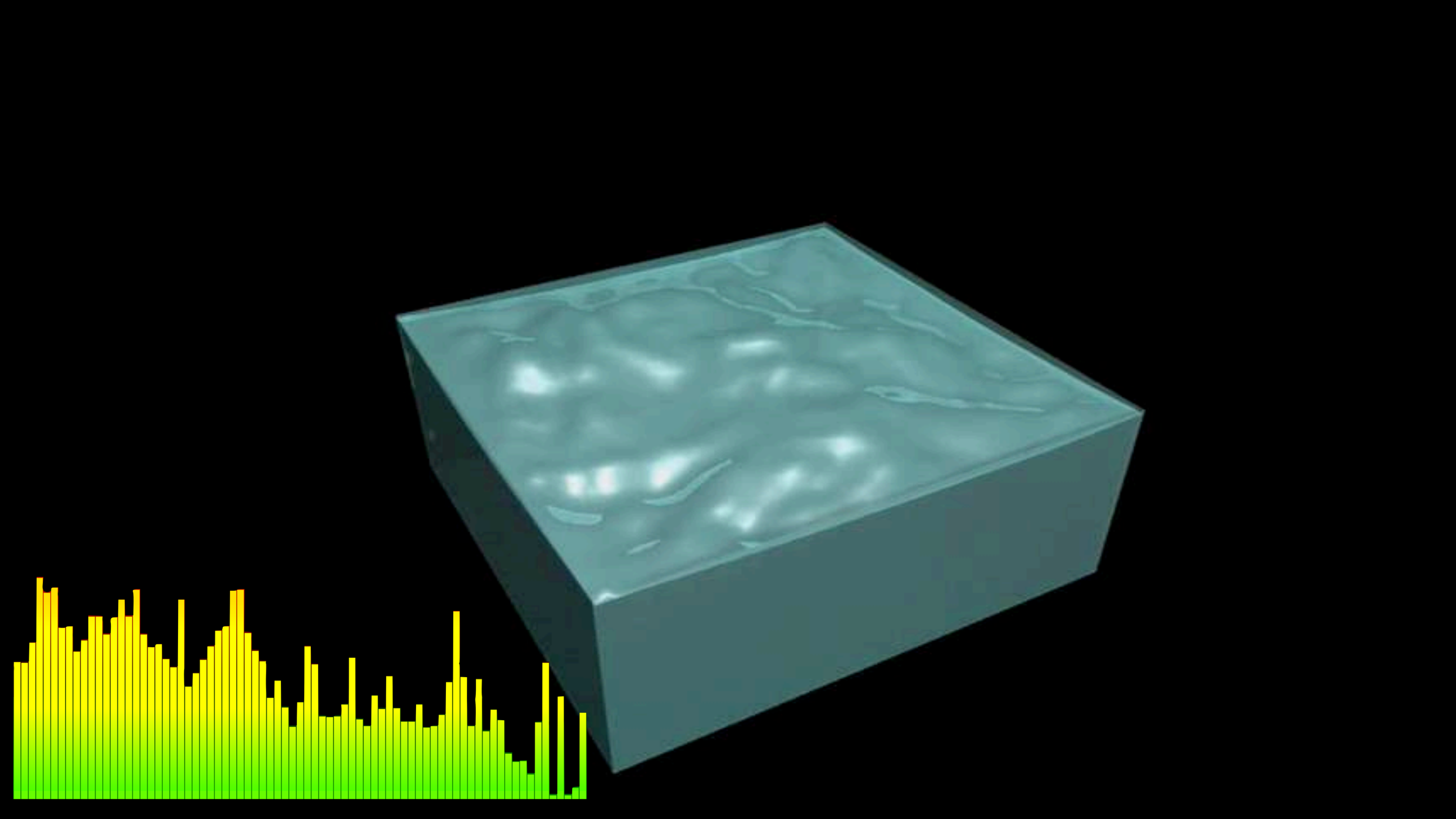




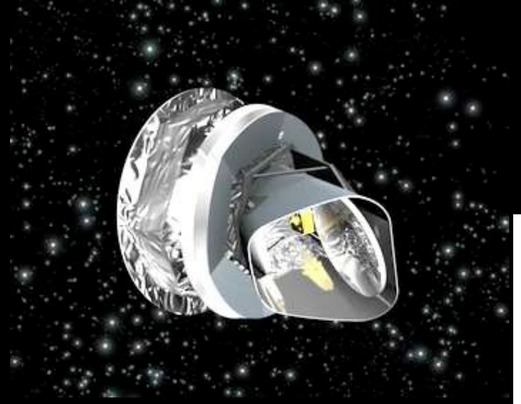




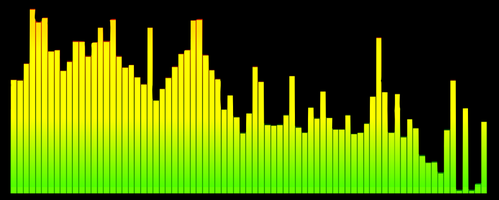

pico 1
pico 2
pico 3
intensidad
modos de vibración
(tamaño)

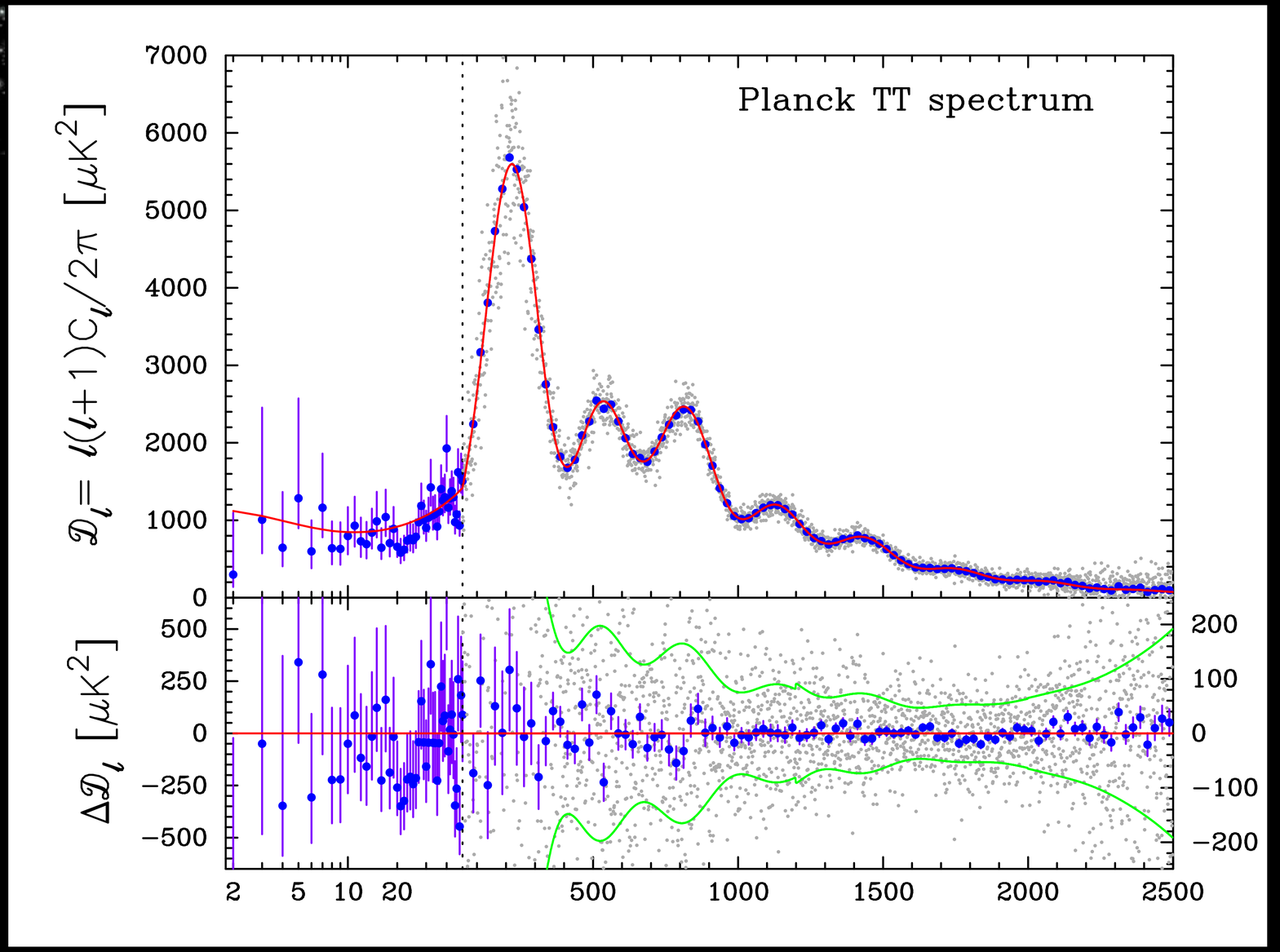


Espectro de potencias con Planck



Planck (2009-2013)

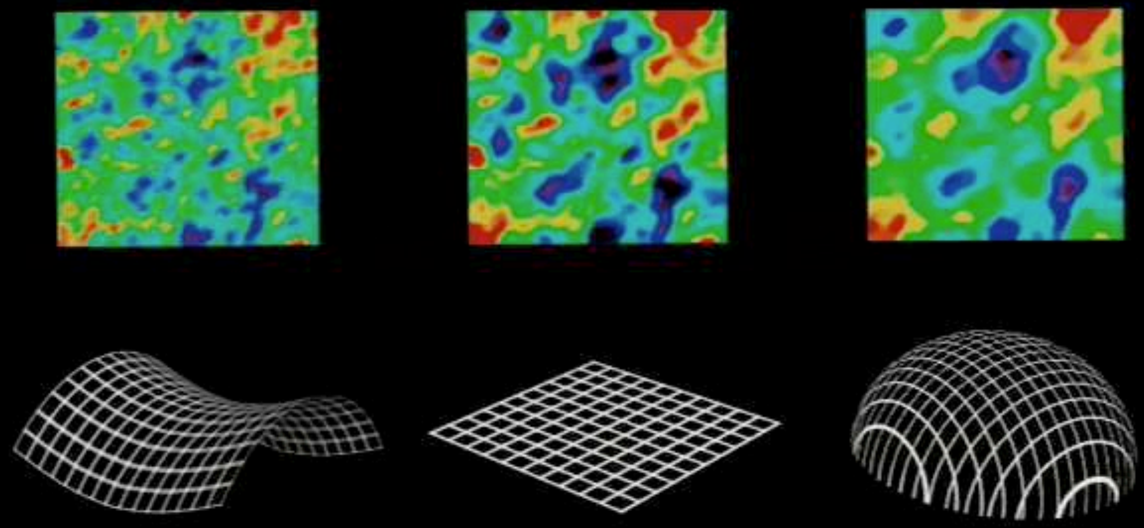




Evidencias de un Universo plano (sin curvatura)

La posición del primer pico depende fuertemente de la curvatura del universo. Su tamaño lineal está fijado por la edad del Universo en la recombinación. La relación entre tamaño lineal y el tamaño angular depende de la curvatura del Universo:

Geometría del Universo



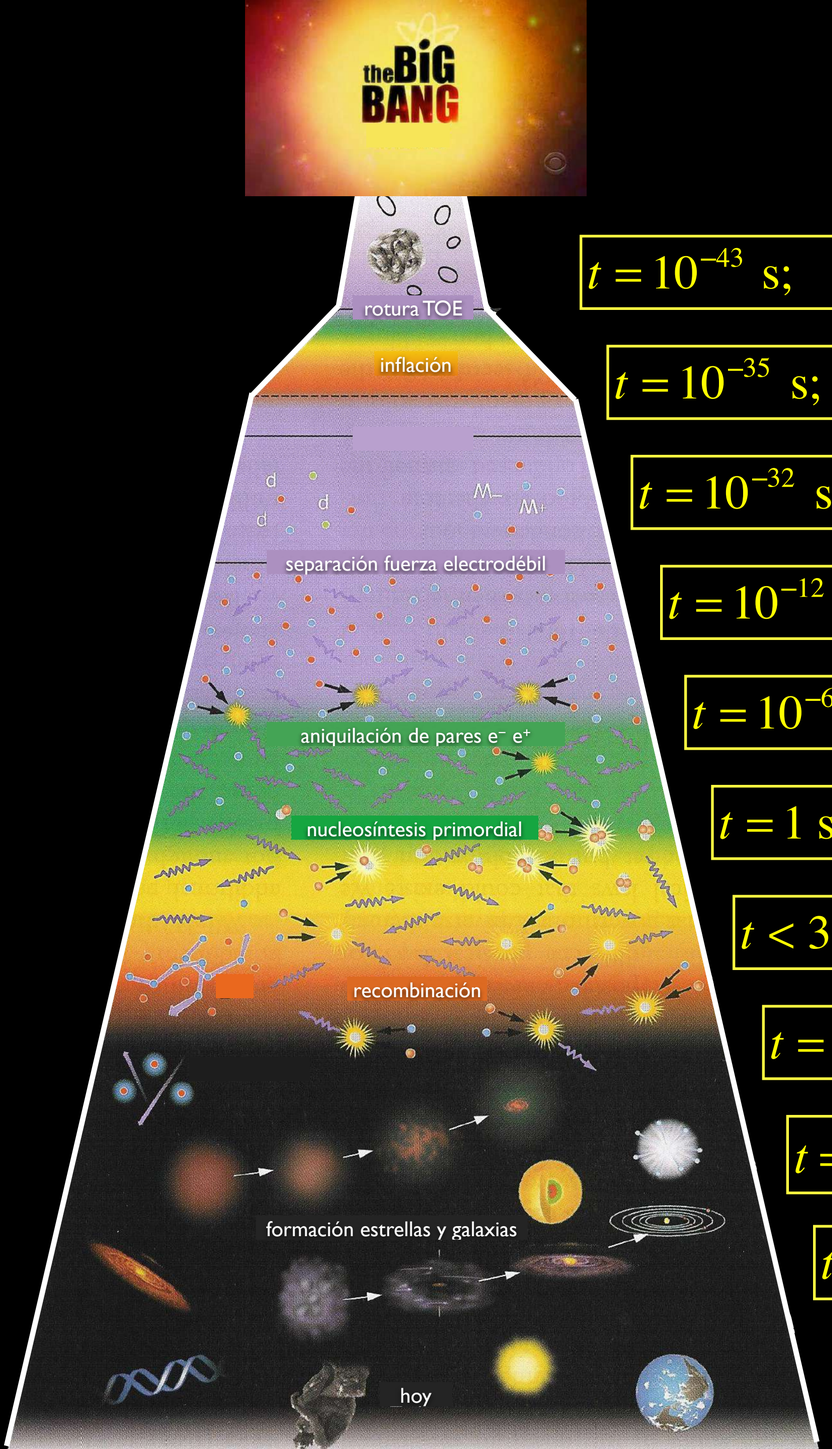
Curvatura negativa

Curvatura nula

Curvatura positiva

¡Esto es lo que se observa!

Historia térmica del Universo



$t = 10^{-43}$ s; $T = 10^{32}$ K — Era de Planck; ruptura TOE (hipotética Teoría del Todo)

$t = 10^{-35}$ s; $T = 10^{27}$ K — Comienza la inflación; ruptura GUT (Gran Unificación)

$t = 10^{-32}$ s; $T = 10^{26}$ K — Final de la inflación

$t = 10^{-12}$ s; $T = 10^{15}$ K — Separación fuerza electrodébil

$t = 10^{-6}$ s; $T = 10^{13}$ K — Confinamiento quarks (formación de p y n)

$t = 1$ s; $T = 10^{10}$ K — Desacoplamiento ν, aniquilación e^--e^+

$t < 3$ m; $T = 10^{8-9}$ K — Nucleosíntesis primordial

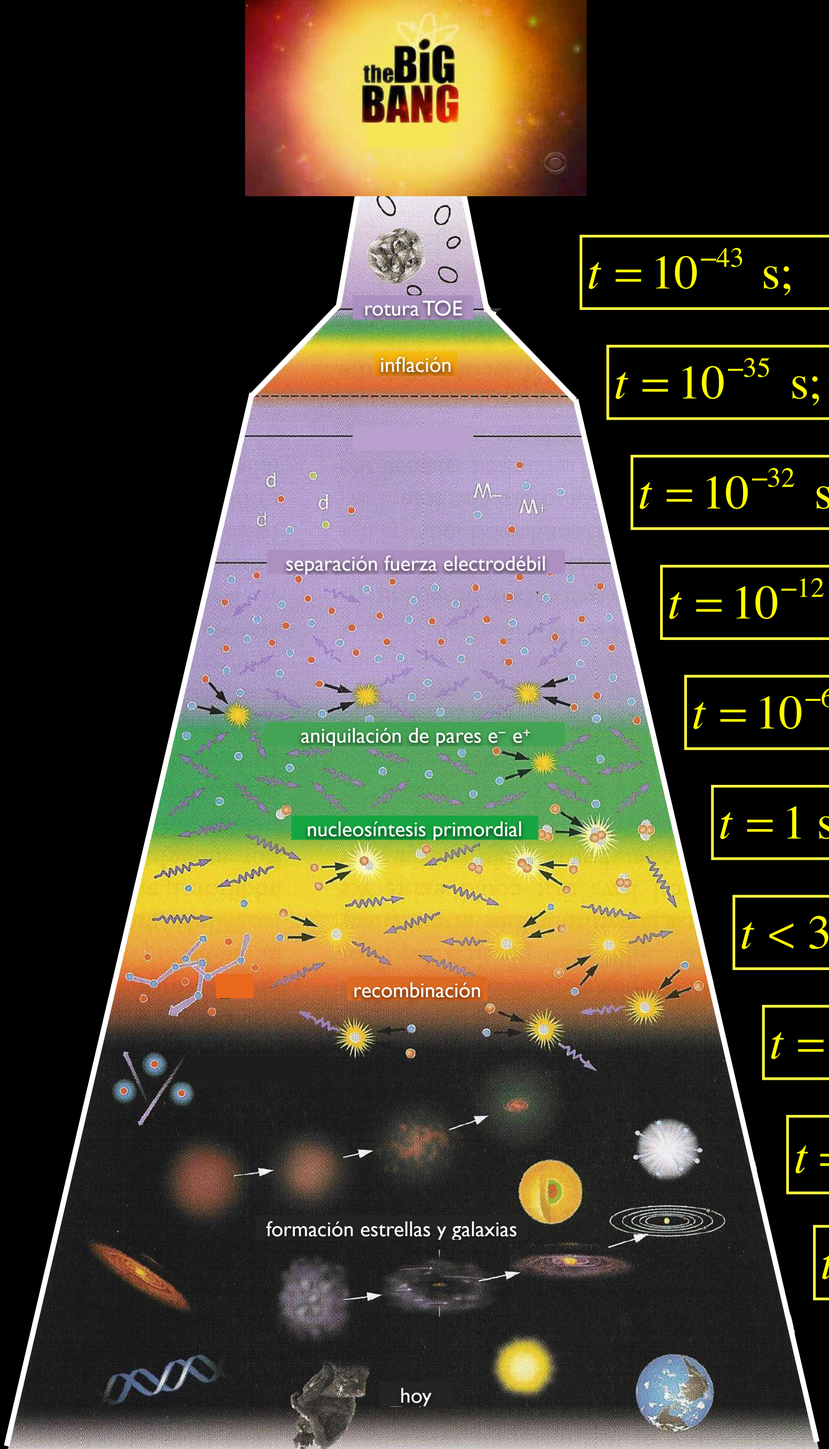
$t = 2 \times 10^4$ a; $T = 1.4 \times 10^4$ K — Final era de la radiación

$t = 380000$ a; $T = 3 \times 10^3$ K — Recombinación

$t = 500 \times 10^6$ a; $T \simeq 30$ K — Formación primeras estrellas y galaxias



Historia térmica del Universo



$t = 10^{-43}$ s; $T = 10^{32}$ K — Era de Planck; ruptura TOE (hipotética Teoría del Todo)

$t = 10^{-35}$ s; $T = 10^{27}$ K — Comienza la inflación; ruptura GUT (Gran Unificación)

$t = 10^{-32}$ s; $T = 10^{26}$ K — Final de la inflación

$t = 10^{-12}$ s; $T = 10^{15}$ K — Separación fuerza electrodébil

$t = 10^{-6}$ s; $T = 10^{13}$ K — Confinamiento quarks (formación de p y n)

$t = 1$ s; $T = 10^{10}$ K — Desacoplamiento ν, aniquilación e^--e^+

$t < 3$ m; $T = 10^{8-9}$ K — Nucleosíntesis primordial

$t = 2 \times 10^4$ a; $T = 1.4 \times 10^4$ K — Final era de la radiación

$t = 380000$ a; $T = 3 \times 10^3$ K — Recombinación

$t = 500 \times 10^6$ a; $T \simeq 30$ K — Formación primeras estrellas y galaxias

$t = 13.8 \times 10^9$ a; $T \simeq 2.7$ K — Hoy



¡El universo tuvo un origen!

El mejor modelo cosmológico disponible es el del "Big Bang" (Gran Explosión)

¿En qué pruebas se basa?

- Expansión del Universo
- Detección de una radiación cósmica de fondo en microondas
- Abundancias de elementos químicos: nucleosíntesis primordial

¡El Universo se expande aceleradamente!

¿De qué depende la evolución del Universo?

Depende de su contenido, que expresamos a través de la **densidad total de energía**:

$$\Omega = \Omega_r + \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

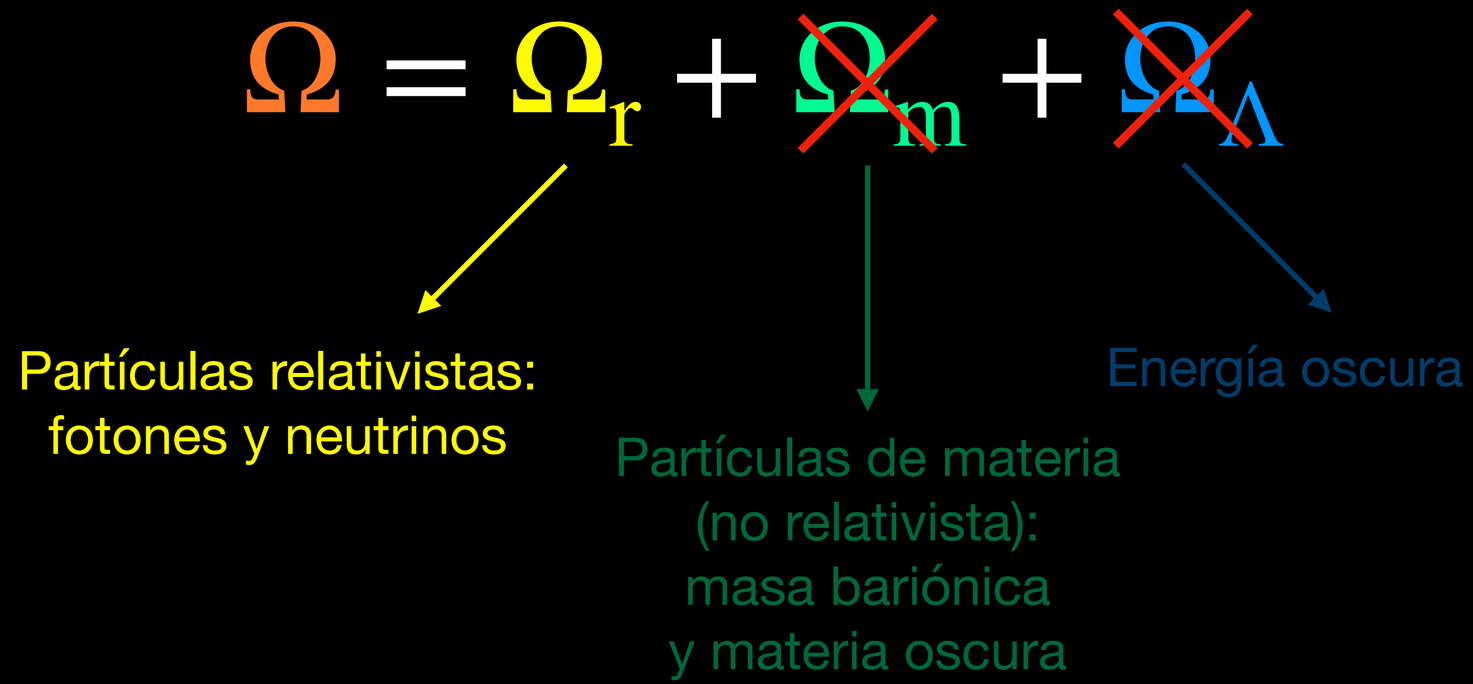
Partículas relativistas:
fotones y neutrinos

Partículas de materia
(no relativista):
masa bariónica
y materia oscura

Energía oscura

¿De qué depende la evolución del Universo?

Depende de su contenido, que expresamos a través de la **densidad total de energía**:



Durante los primeros 50 000 años el Universo está dominado por los fotones.

¿De qué depende la evolución del Universo?

Depende de su contenido, que expresamos a través de la **densidad total de energía**:

$$\Omega = \cancel{\Omega_r} + \Omega_m + \cancel{\Omega_\Lambda}$$

Partículas relativistas: fotones y neutrinos

Partículas de materia (no relativista): masa bariónica y materia oscura

Energía oscura

Entre 50 000 y 10 200 000 000 años el Universo está dominado la materia (bariónica y oscura).

¿De qué depende la evolución del Universo?

Depende de su contenido, que expresamos a través de la **densidad total de energía**:

$$\Omega = \cancel{\Omega_r} + \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

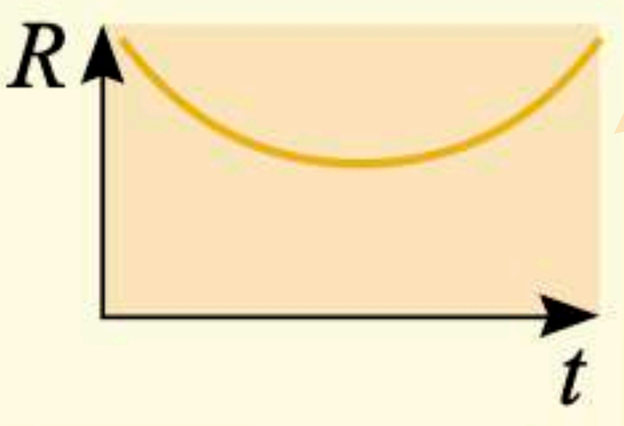
Partículas relativistas:
fotones y neutrinos

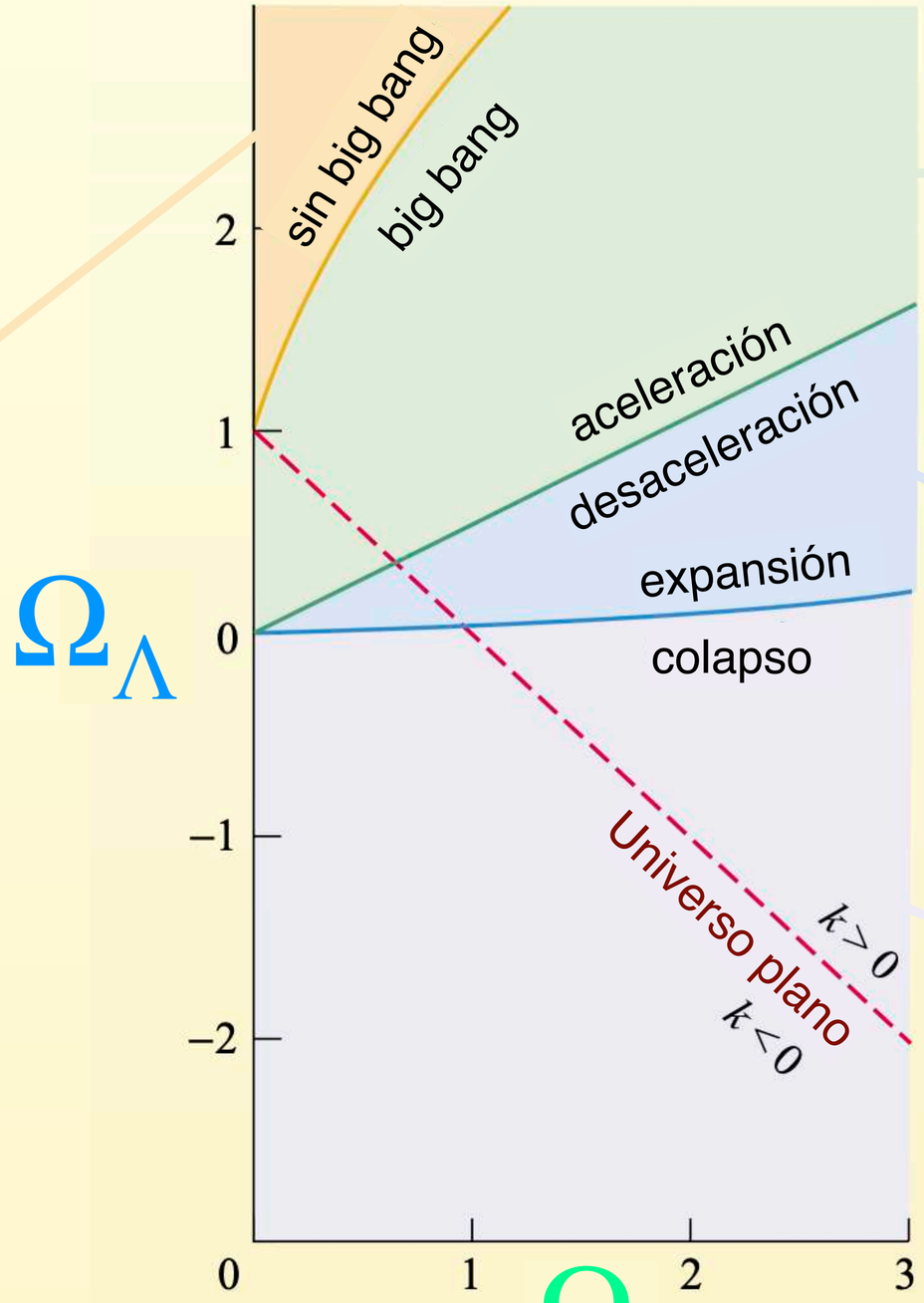
Partículas de materia
(no relativista):
masa bariónica
y materia oscura

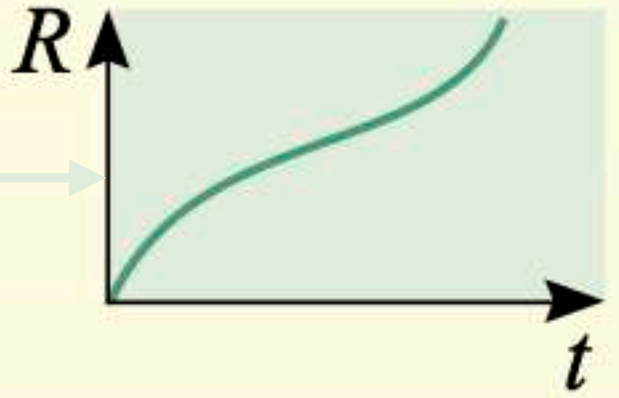
Energía oscura

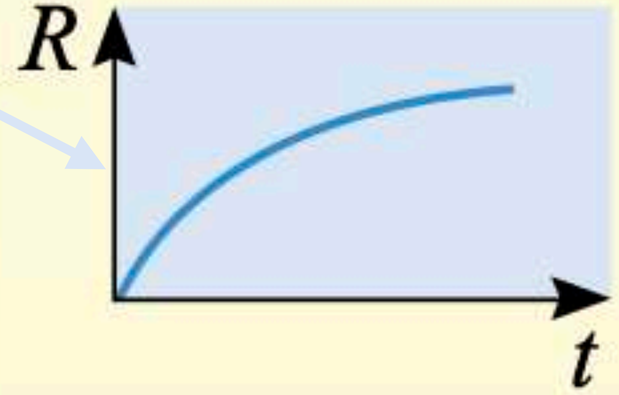
Desde que el universo tiene 10 200 millones de años, la energía oscura empieza a ser dominante.

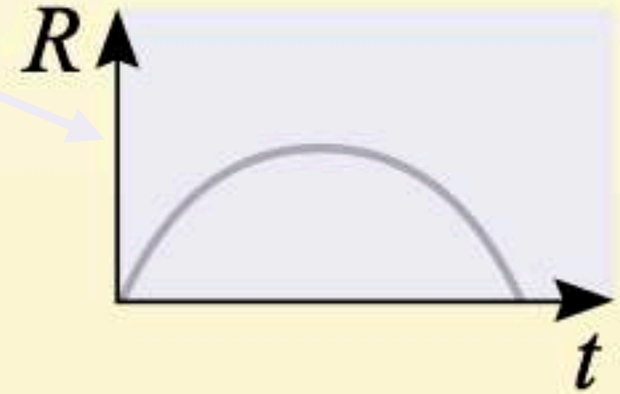
Tipos de Universo



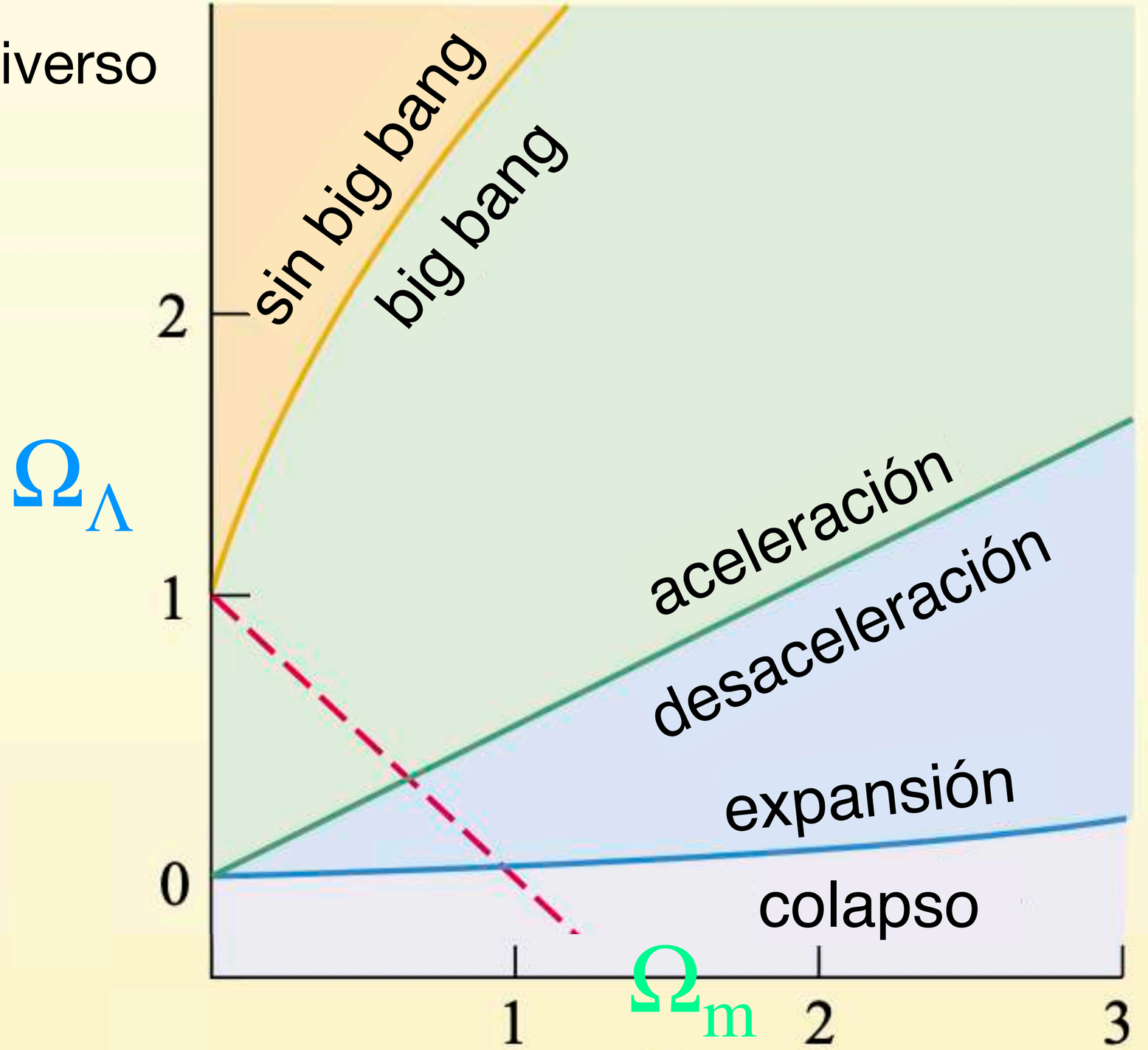




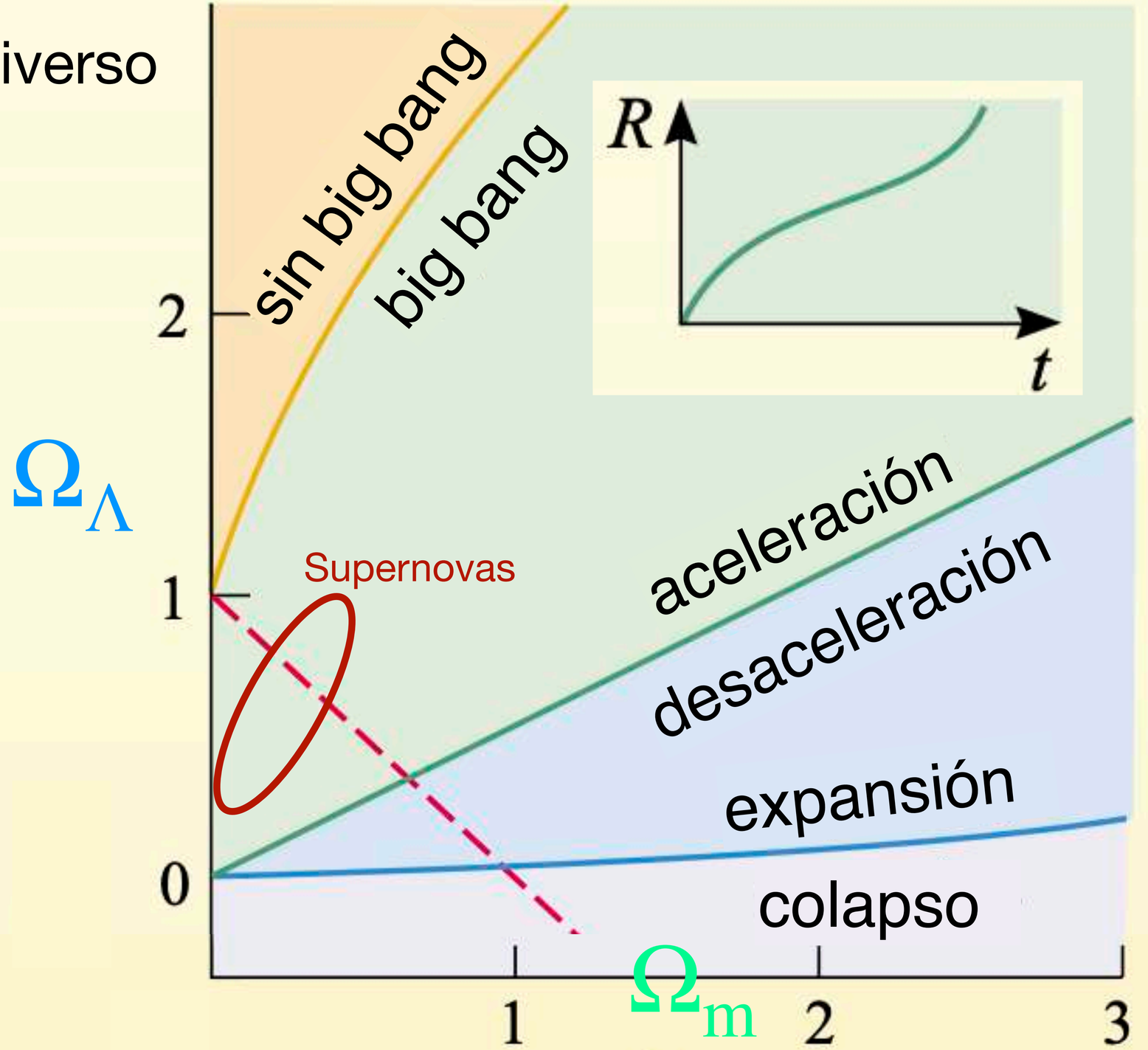




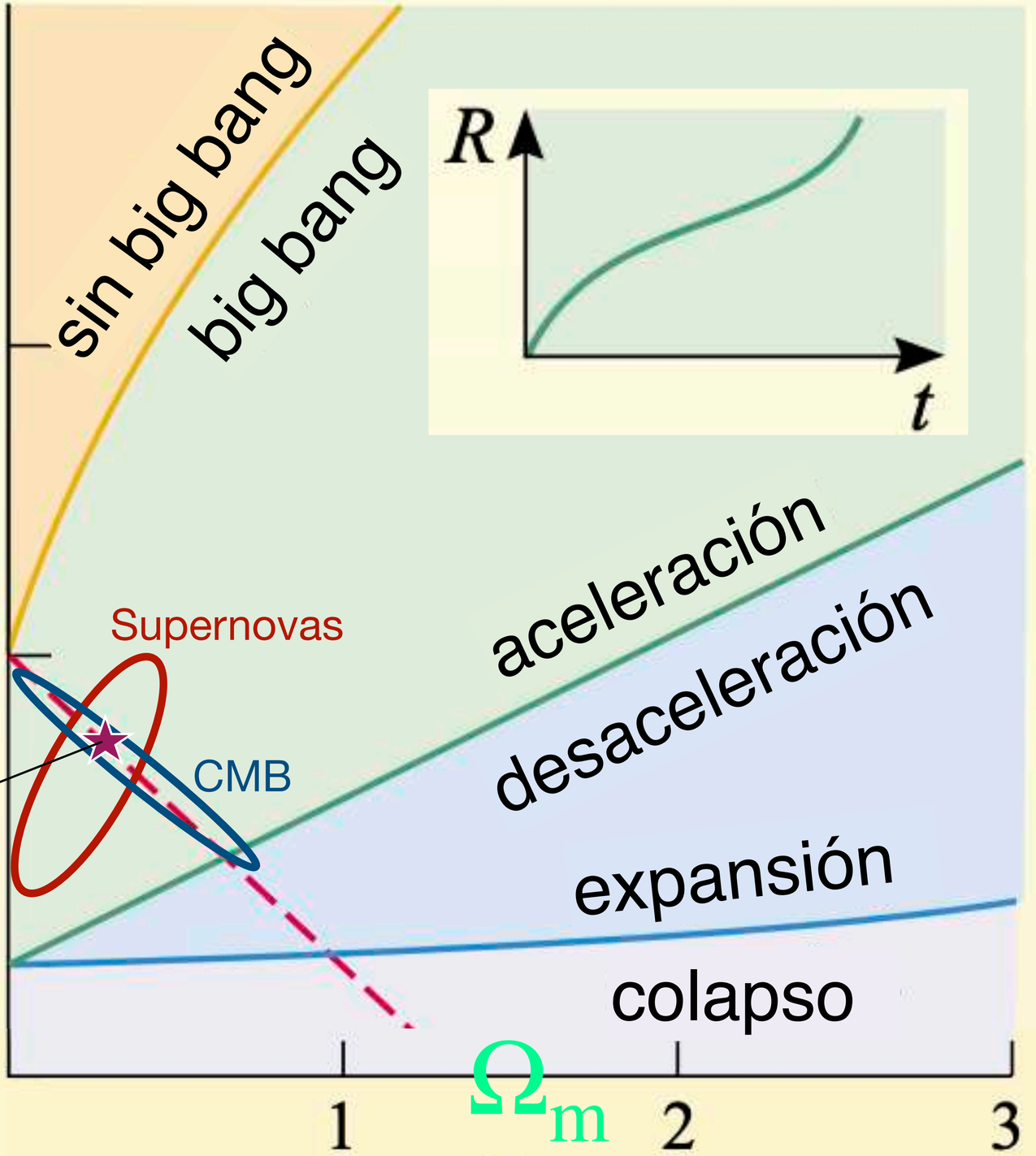
Tipos de Universo



Tipos de Universo



Tipos de Universo



Modelo ΛCDM

$\Omega_{\Lambda,0} \simeq 0.70$

$\Omega_{m,0} \simeq 0.30$

Universo plano
(sin curvatura)

MODELO COSMOLÓGICO ESTÁNDAR

¡El Universo pudo surgir a partir de la nada!



¡Y tuvo que hacerlo con baja entropía!

Radiación de fondo
de microondas (380000 años)
z ~ 1100

Expansión acelerada
(energía oscura)
z = 0

Desarrollo de galaxias,
planetas, etc.

Inflación

Época oscura

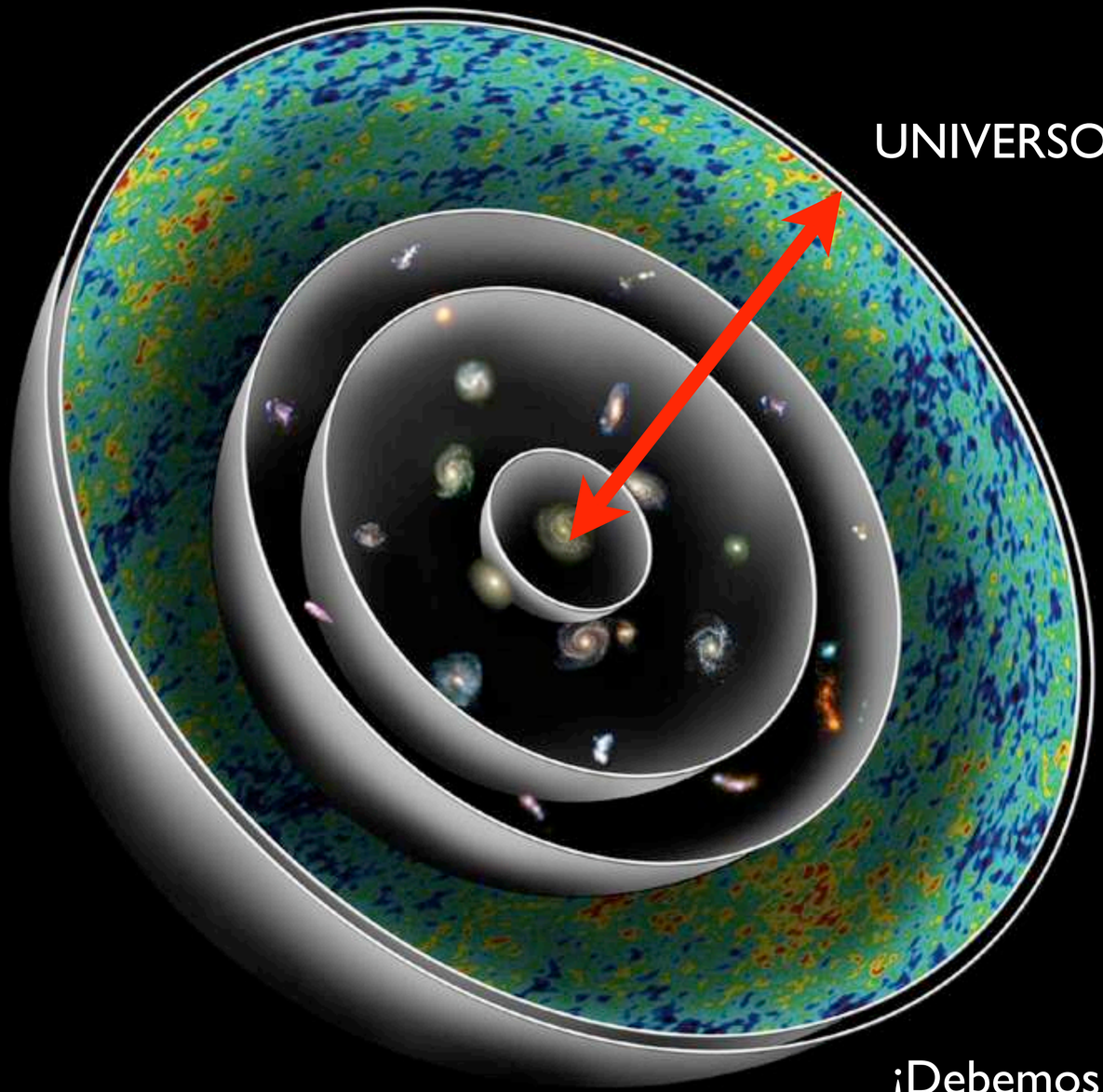
Fluctuaciones
cuánticas

Primeras estrellas y galaxias
400 millones de años
z ~ 10-15

13800 millones de años

Diapositivas utilizadas en el turno de preguntas

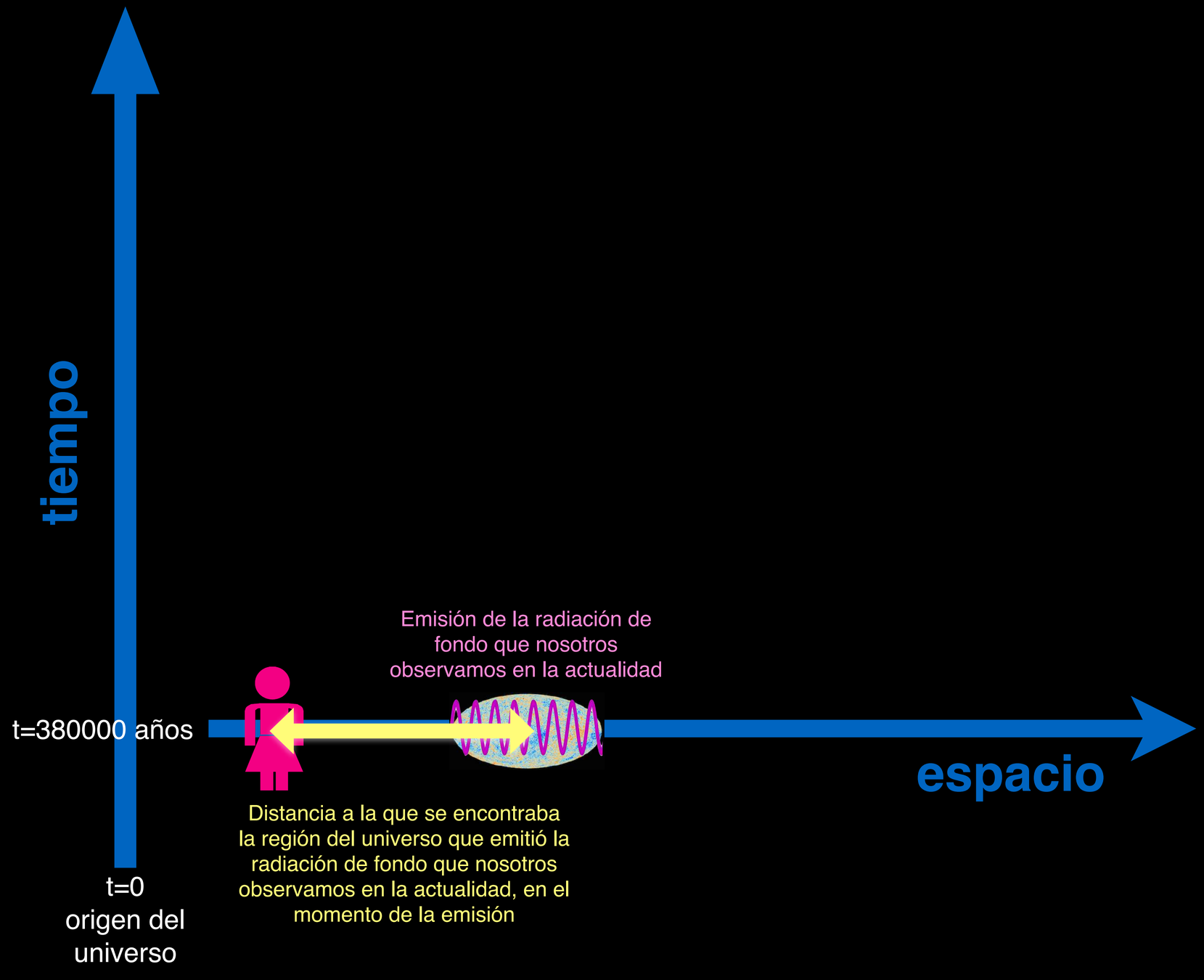
La radiación de fondo se observa en todas direcciones

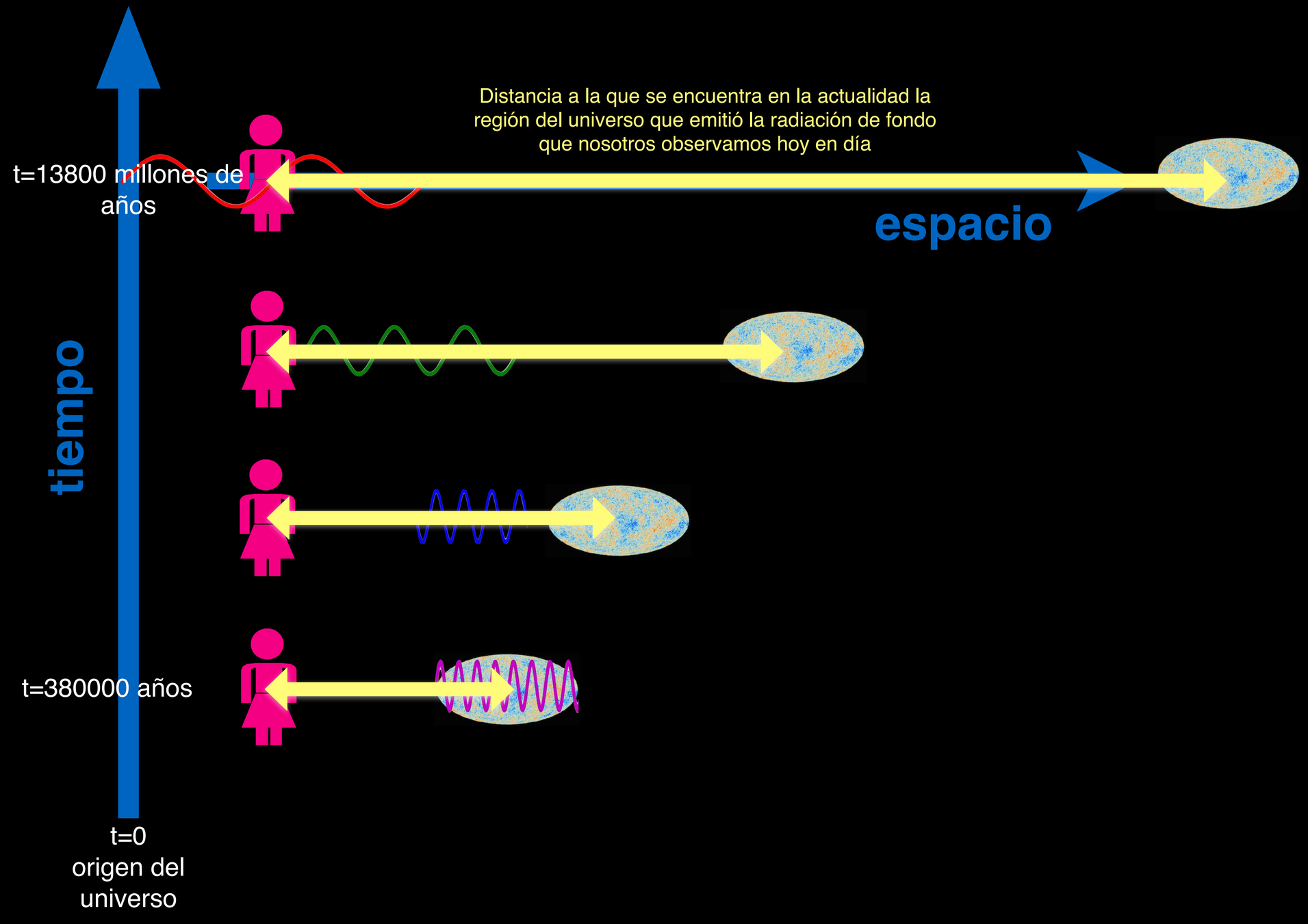


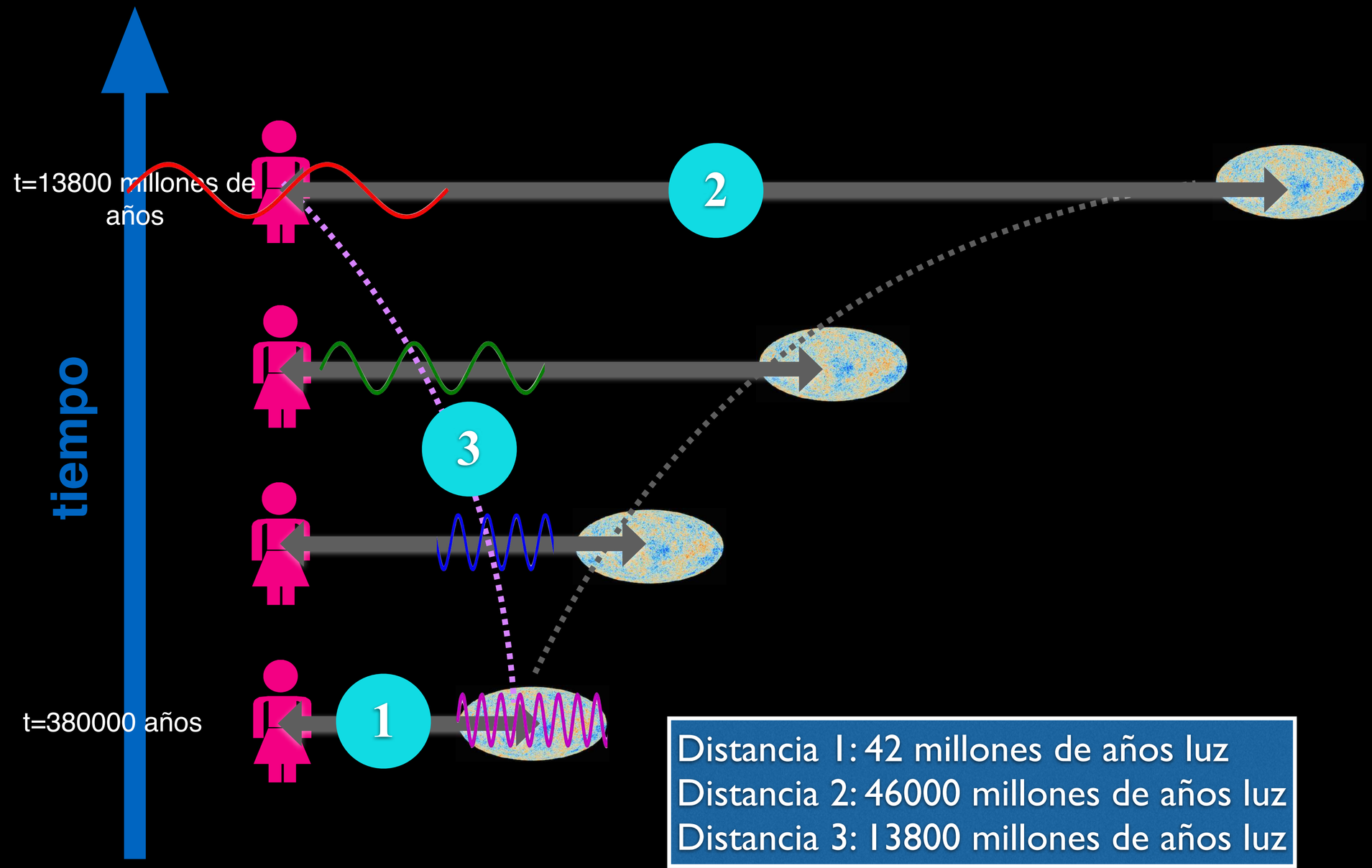
¿A qué distancia se encuentra la región del universo que emitió la radiación de fondo de microondas que observamos en la actualidad?

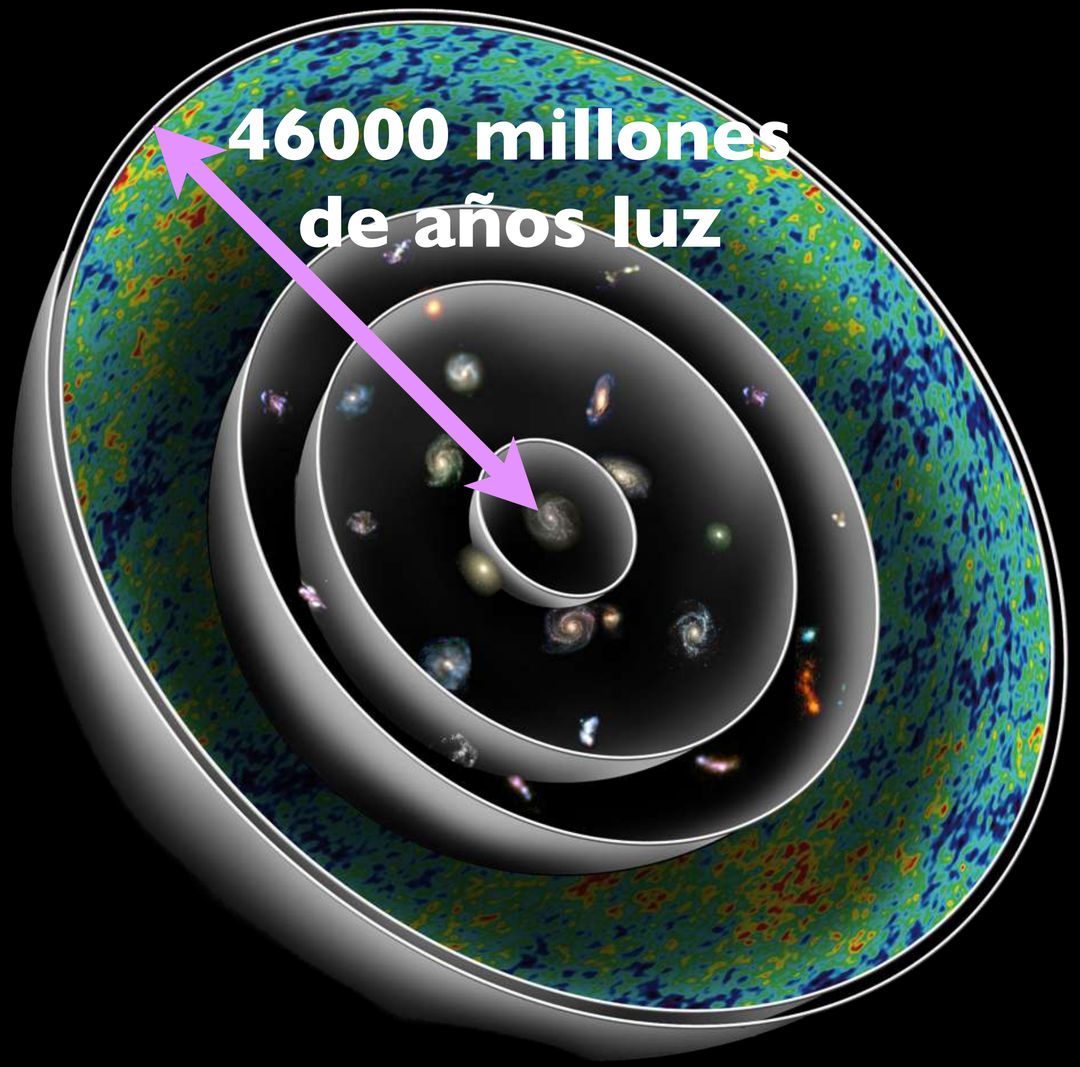
¡Debemos tener en cuenta que el universo (el espacio) se expande!

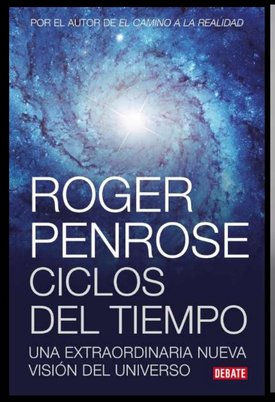

espacio


tiempo
Emisión de la radiación de fondo que nosotros observamos en la actualidad
t=380000 años
espacio
Distancia a la que se encontraba la región del universo que emitió la radiación de fondo que nosotros observamos en la actualidad, en el momento de la emisión
t=0
origen del universo


Distancia a la que se encuentra en la actualidad la región del universo que emitió la radiación de fondo que nosotros observamos hoy en día
t=13800 millones de años
espacio
tiempo
t=380000 años
t=0
origen del universo


t=13800 millones de años
tiempo
t=380000 años
2
3
1
Distancia 1: 42 millones de años luz
Distancia 2: 46000 millones de años luz
Distancia 3: 13800 millones de años luz


46000 millones
de años luz




Roger Penrose (1931 -)



