

Introducción a la Cosmología

Programa Español para Profesores del CERN

Manuel Trashorras

Universidad Autónoma de Madrid

Instituto de Física Teórica

27 de Junio de 2018



Índice

- 1 La ciencia más antigua
- 2 La Tierra en el Universo
- 3 La Teoría de la Relatividad
- 4 La Física de Partículas
- 5 La Cosmología moderna
- 6 Las “edades” del Universo
- 7 Para saber más
- 8 Bibliografía & contacto

1 La ciencia más antigua

- 1 ¿Qué es la cosmología?
- 2 ¿Es la cosmología una ciencia?
- 3 ¿Qué no es la cosmología?

cosmos

Del lat. *cosmos* 'universo' y este del gr. *kósmos* 'universo'.

1. m. Universo.

cosmos

Del lat. *cosmos* 'universo' y este del gr. *kósmos* 'universo'.

1. m. Universo.

universo

Del lat. *universus*, y este del lat. *unus*– 'uno' y el lat. *–versus* 'en dirección de'.

1. m. Conjunto de todo lo existente.

cosmos

Del lat. *cosmos* 'universo' y este del gr. *kósmos* 'universo'.

1. m. Universo.

cosmología

Del lat. *cosmologia*, y este del gr. *kósmos*– 'universo' y el lat. *–logía* 'estudio'.

1. f. Parte de la **astronomía** que trata de las leyes generales, del origen y de la evolución del universo.
2. f. Conocimiento **filosófico** de las leyes que rigen el mundo físico.

universo

Del lat. *universus*, y este del lat. *unus*– 'uno' y el lat. *–versus* 'en dirección de'.

1. m. Conjunto de todo lo existente.

cosmos

Del lat. *cosmos* 'universo' y este del gr. *kósmos* 'universo'.

1. m. Universo.

cosmología

Del lat. *cosmologia*, y este del gr. *kósmos*– 'universo' y el lat. *–logía* 'estudio'.

1. f. Parte de la **astronomía** que trata de las leyes generales, del origen y de la evolución del universo.
2. f. Conocimiento **filosófico** de las leyes que rigen el mundo físico.

universo

Del lat. *universus*, y este del lat. *unus*– 'uno' y el lat. *–versus* 'en dirección de'.

1. m. Conjunto de todo lo existente.

estudio

Del lat. *studium*, 'estudio', 'dedicación', 'afán', 'ardor' o 'empeño'.

1. m. **Esfuerzo** que pone el entendimiento aplicándose a conocer algo.
2. m. **Trabajo** cultivado en aprender una ciencia o arte.

La ciencia más antigua

1

¿Qué es la cosmología?

1



L'atmosphère: météorologie populaire – Camille Flammarion.

Haciendo uso de:

- El **método científico**.
- Datos **observacionales** (astronomía).
- Datos **experimentales** (partículas).

La cosmología pretende explicar:

- El **origen, edad y razón** del Universo.
- La **dinámica y composición** del Universo.
- Las **leyes fundamentales** que lo gobiernan.
- Los **fenómenos, objetos y estructura** en este.
- El **futuro y destino último** del Universo.

La ciencia más antigua

1

¿Es la cosmología una ciencia?

2

¿Qué es ciencia?

- Uso de la lógica.
- Método inductivo.
- Demostrabilidad.



Aristotle
(384-322 AC)



Al Hazam
(965-1039)

- Uso de observación.
- Datos empíricos.
- Reproducibilidad.

Renuncia a su hipótesis explicativa previa con las nuevas observaciones.



Johannes Kepler
(1571-1630)



Galileo Galilei
(1564-1642)

Todo conocimiento empieza en la experiencia y acaba en esta.

La ciencia más antigua

1

¿Es la cosmología una ciencia?

2

El método científico

“Serie ordenada de pasos para producir conocimientos de forma fiable, basado en la medición y el razonamiento”.

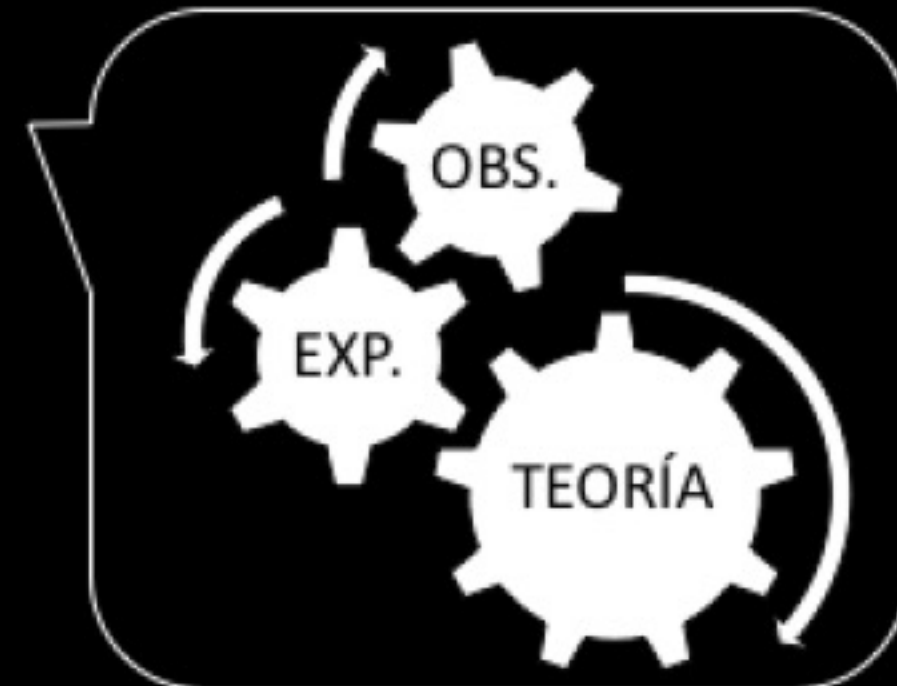
1. Observación.
2. Inducción.
3. Hipótesis.
4. Experimentación.
5. Demostración o refutación.
6. Teoría científica.



Francis Bacon
(1561-1626)

Teoría científica

“Conjunto de proposiciones que permiten construir un modelo aproximado y confiable de la realidad”.



La ciencia más antigua

1

¿Es la cosmología una ciencia?

2

¿Qué requisitos tiene una teoría científica?

Verificacionismo (Empiricismo lógico)

Crit. de verificación:

Dos tipos de enunciados:

- Con sentido, si pueden comprobarse.
- Sin sentido, no pueden comprobarse.

Científico \Leftrightarrow Verificable



Bertrand Russell
(1872-1970)

VS



Karl Popper
(1902-1994)

Falsacionismo (Racionalismo crítico)

Crit. de demarcación:

- No dice si la teoría es verdadera o no.
- Decide si la teoría es científica o no.

Científico \Leftrightarrow Refutable

La ciencia más antigua

1

¿Es la cosmología una ciencia?

2

Problema

El método científico no se adapta bien en cosmología:



Experimentar:

¡No podemos experimentar!



La ciencia más antigua

1

¿Es la cosmología una ciencia?

2

Problema

El método científico no se adapta bien en cosmología:



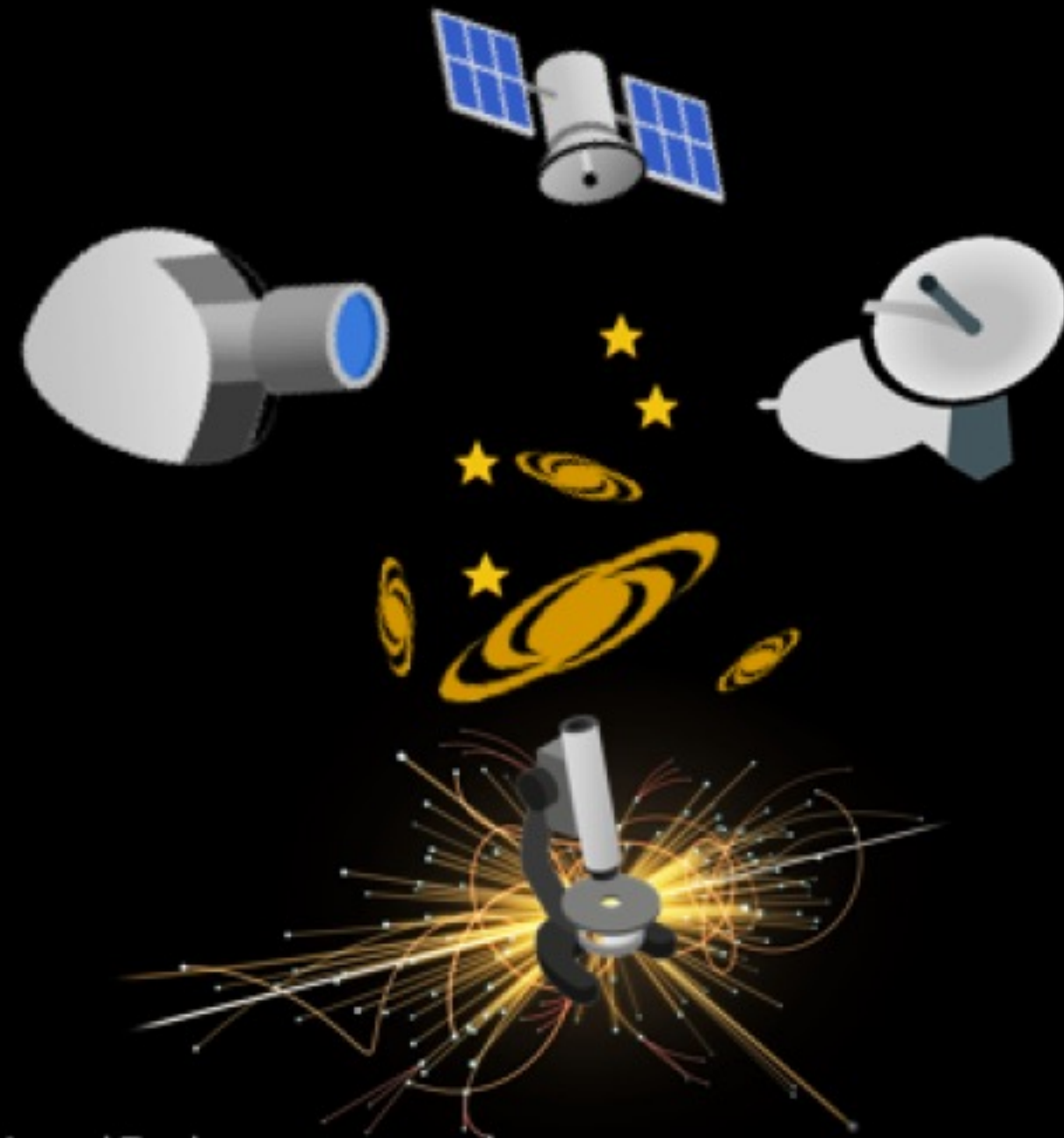
Experimentar:

¡No podemos experimentar!



Observar:

¡Sólo tenemos un Universo!



La ciencia más antigua

1

¿Qué no es la cosmología?

3

La cosmología es:

- Una **ciencia observacional**.
Uso intensivo de computación.
Estadística, matemáticas.
Modelización y simulación.
- Una **ciencia multidisciplinar**:
Química, hidrodinámica, termodinámica.
Física molecular y atómica.
Física nuclear y de partículas.

Se superpone con:

- **Mecánica Cuántica**:
Etapas más tempranas del Universo.
Densidad de energía es muy alta.
Distancias o tiempos muy breves.
- **Relatividad General**:
A lo largo de la evolución del Universo.
Objetos muy masivos, rápidos o ambos.
Distancias o tiempos muy grandes.

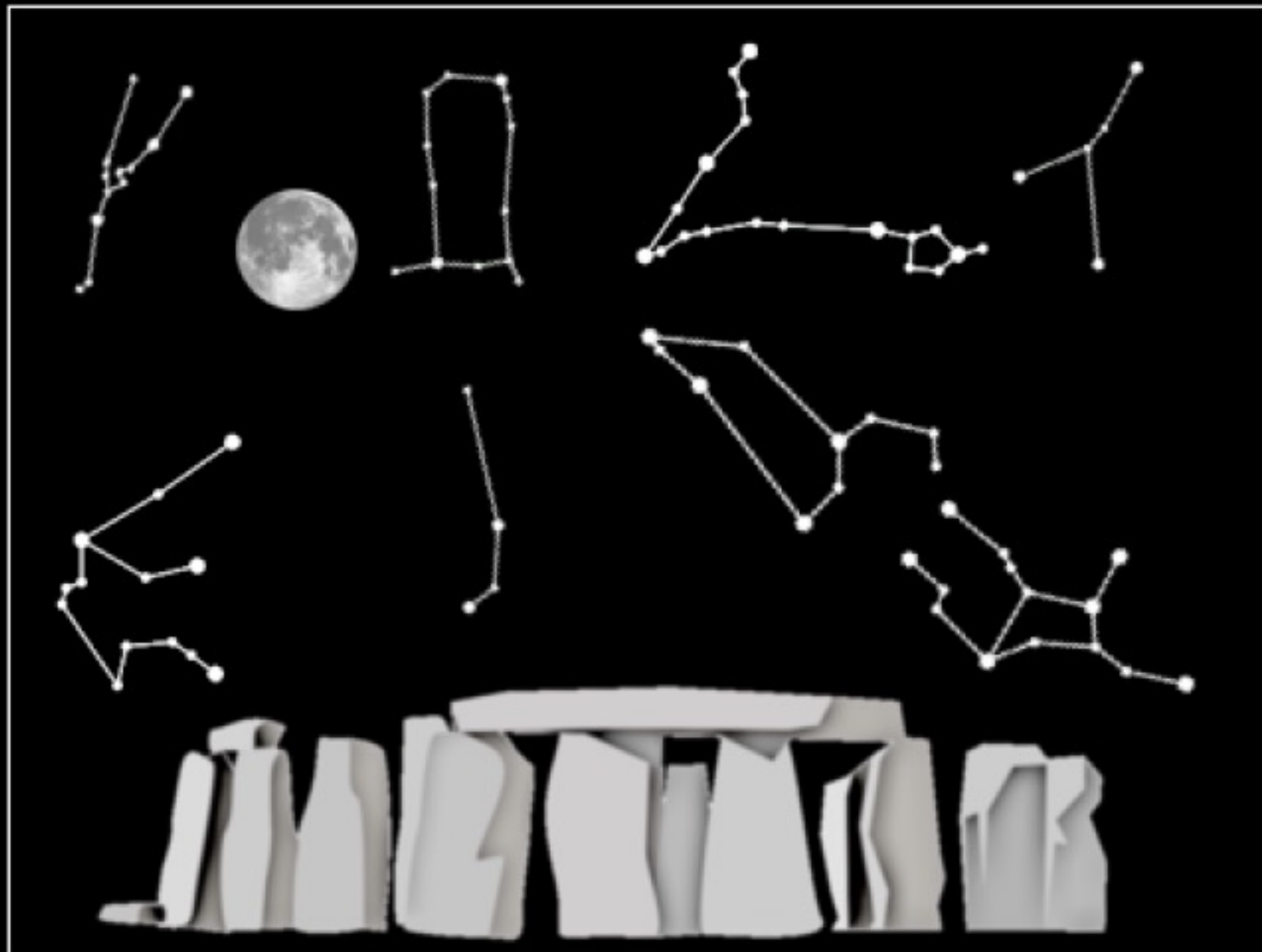
2 La Tierra en el Universo

1 El amanecer de la filosofía

- 1 Los astrónomos helenos
- 2 Los astrónomos romanos
- 3 El fin de la Antigüedad

2 De Copérnico a Einstein

- 1 La Revolución Científica
- 2 Midiendo distancias
- 3 El Gran Debate



Inicialmente, la cosmología está:

- Vinculada en origen con:
 - el **calendario**, la **agricultura**,
 - la **navegación**, la **religión**, etc.
- Íntimamente relacionada con:
 - las **matemát.**, la **física**,
 - la **geografía**, la **alquimia**, etc.
- En Grecia en el s. V AC adquiere carácter científico al buscarse explicaciones racionales a los fenómenos celestes.

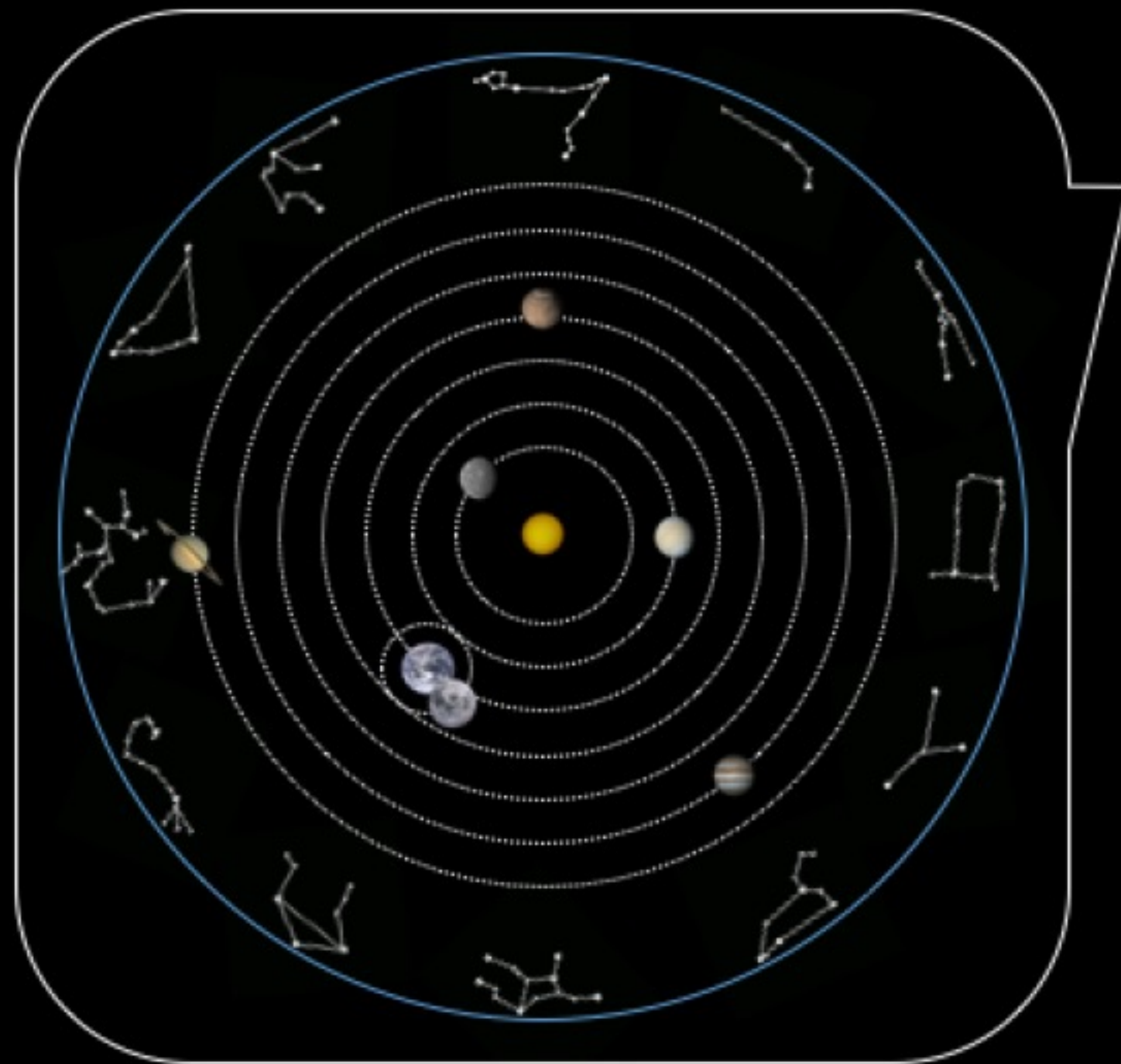
<u>Presocráticos:</u>	Pitágoras	Anaximandro
<u>Eudoxos:</u>	Eudoxo	Platón
<u>Helenísticos:</u>	Aristarco	Arquímedes
	Eratóstenes	Seleuco,
	Hiparco	Tolomeo
	Hipatia	

La Tierra en el Universo

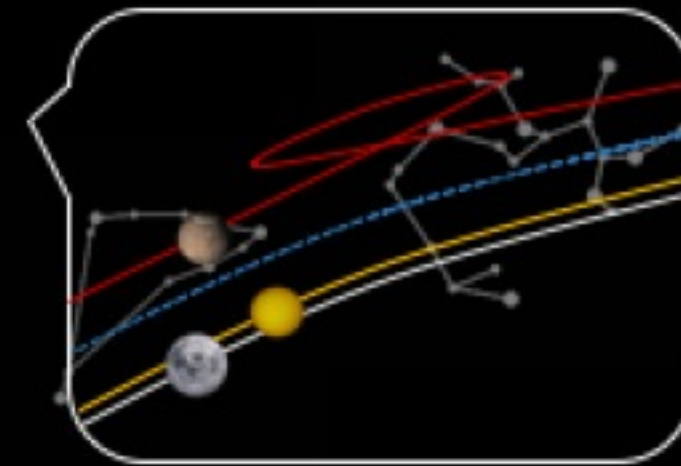
2

El amanecer de la filosofía

1



Aristarco de Samos
(310–230 BC)



Arquímedes de Syracuse
(287–212 BC)

Tamaño del Universo.

Heliocentrismo.
Rotación terrestre.
Dist. Tierra-Luna-Sol.
Radios Luna-Sol.



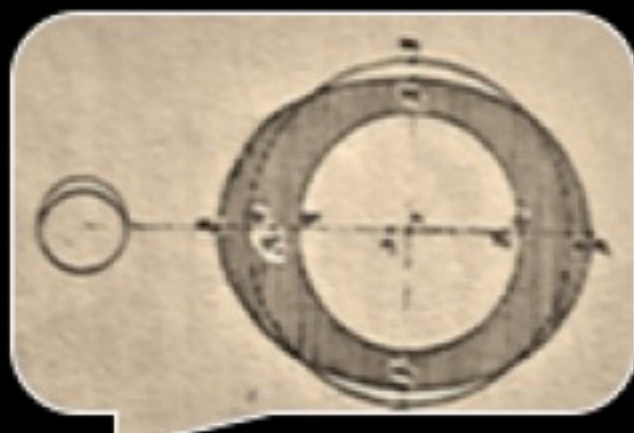


Circunf. terrestre.
Incl. del eje terrestre.
Distancia Tierra-Sol.
Calendario bisiesto.
Paralelos/meridianos.

Eratóstenes de Alejandría
(276–295 BC)



Seleuco de Seleucia
(190–150 BC)



Origen de las mareas.
Universo infinito.

El amanecer de la filosofía

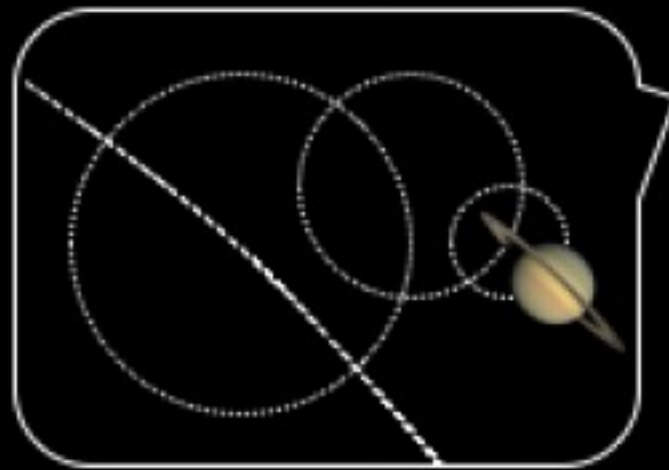
2.1

Los astrónomos romanos

2



Hiparco de Nicea
(190–120 BC)



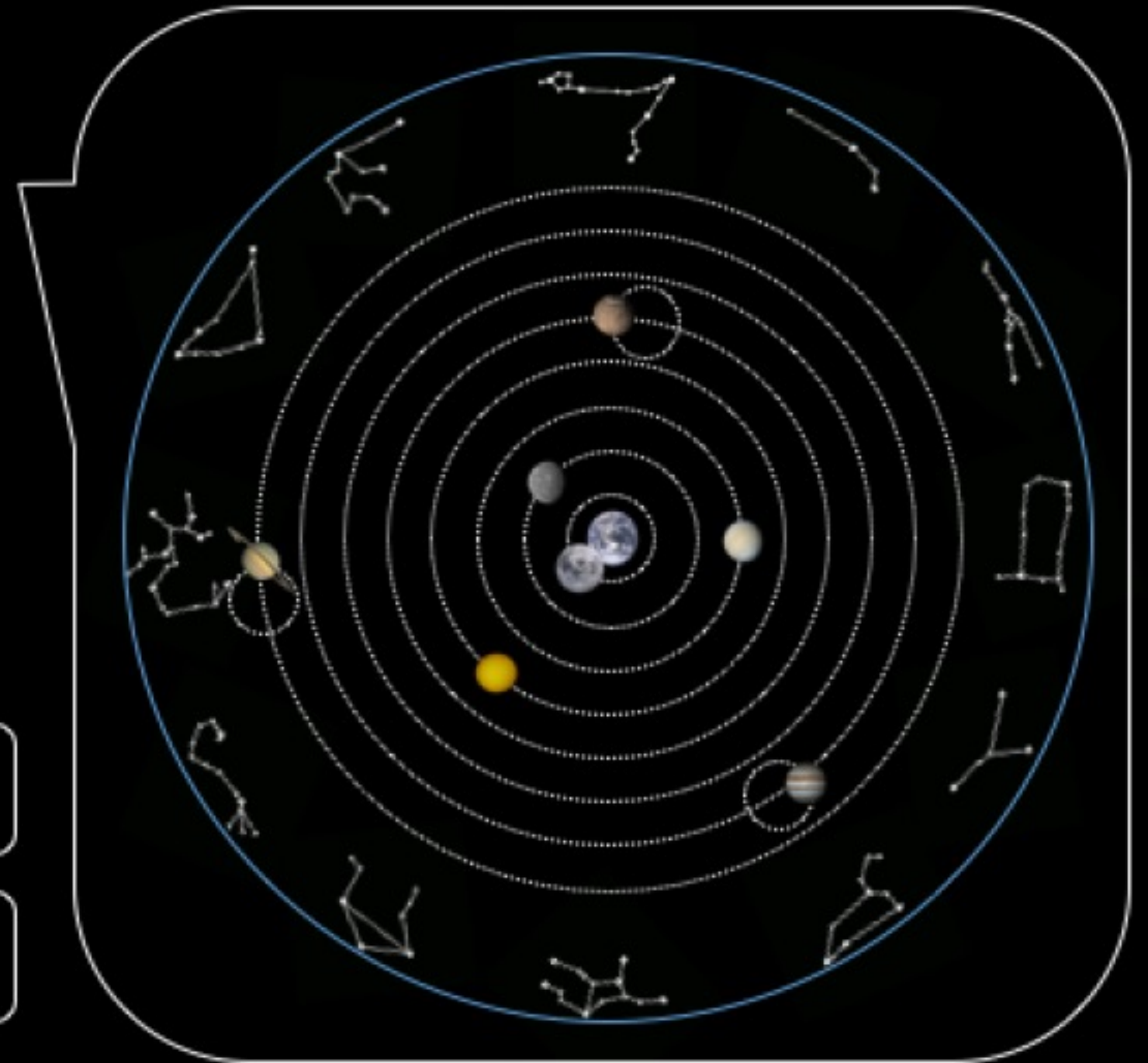
Claudio Tolomeo
(100–170 AD)

Catálogo de estrellas.
Precesión de los eqs.
Predicción eclipses.
Inv. astrolabio.
Inv. esfera armilar.



Geocentrismo.

Al-Magesto.



Fin del Período Clásico.



Hipatia de Alejandría
(360–415)

- No hay **ningún avance reseñable** ni en Europa ni Asia en los siguientes 1000 años.
- En Oriente se traducen al árabe algunas obras, que luego reentrarán en Occidente.
- La mayoría de obras grecorromanas se pierden con gran parte del saber clásico.

La Tierra en el Universo

De Copérnico a Einstein

2.2

2





¡Eppur si muove!



Nicolás Copérnico
(1473–1543)

La Revolución Copernicana

• Observaciones planetarias:

-  -3', -15', - 1'.
-  -24'.
-  +2', +20', +77', +137'.
-  +32', +51', -11', +15'.

• Sistema heliocéntrico:

- Órbitas circulares.
- Ausencia de equantes.
- Aún más epiciclos.



De Rev. Orbium Celestium.



Galileo Galileo
(1564–1642)

El método científico

Experimentos:

- Inercia y gravedad.

Observaciones:

- Noevae stella.
- Las fases de Venus.
- Las estrellas de Médici.
- Planetas con “orejas”.
- Los cráteres lunares.
- Las manchas solares.
- Un río de estrellas.



Systema Cosmicum.

“La filosofía está escrita en el lenguaje de las matemáticas, y sus personajes son fig. geométricas.”

De Copérnico a Einstein

La Revolución Científica

2.2

1

El fin del misticismo


Leyes de Kepler del mov. planetario:

1. Ley de elipses.
2. Ley de áreas.
3. Ley de períodos.

Transición misticismo-empiricismo.

Abandono de modelos geométricos.

Divorcio de astrología y astronomía.

 *Astronomía Nova, Harmonices Mundi.*



Johannes Kepler
(1571–1630)



La Teoría de la Gravedad

Leyes de Newton del movimiento:


1. Ley de inercia.
2. Ley del impulso.
3. Ley de acción-reacción.

Ley de la Gravitación.

Naturaleza corpuscular de la luz.

Interac. Instantánea a distancia.

Universo estático e infinito.

 *Principia Matemática.*



Isaac Newton
(1642–1727)



De Copérnico a Einstein

La Revolución Científica

2.2

1



James Clerk Maxwell
(1831–1879)

La unificación electromagnética

Unificación de la luz con:

- Electricidad.
- Magnetismo.

Naturaleza ondulatoria de la luz.

Ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \rho & \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\partial_t \vec{B} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 & \vec{\nabla} \times \vec{H} &= +\partial_t \vec{D} + \vec{j} \\ F_{EM} &= q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \end{aligned}$$

$$c^{-2} \partial_{tt} \begin{pmatrix} \vec{E} \\ \vec{B} \end{pmatrix} - \nabla^2 \begin{pmatrix} \vec{E} \\ \vec{B} \end{pmatrix} = 0$$

A Dynamical Theory of the EM Field.



Emmy Noether
(1882–1935)

Simetrías y leyes de conservación

Teorema de Noether:

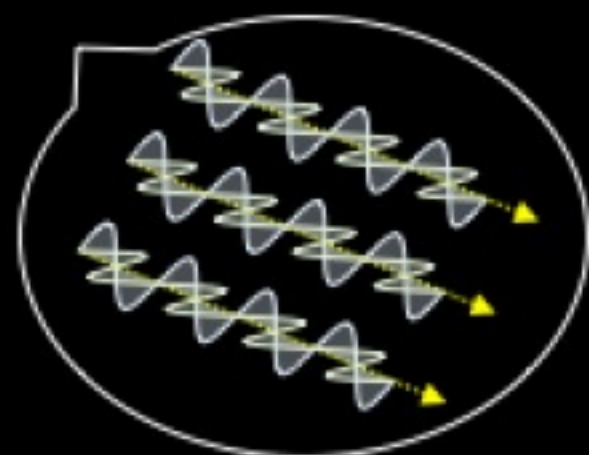
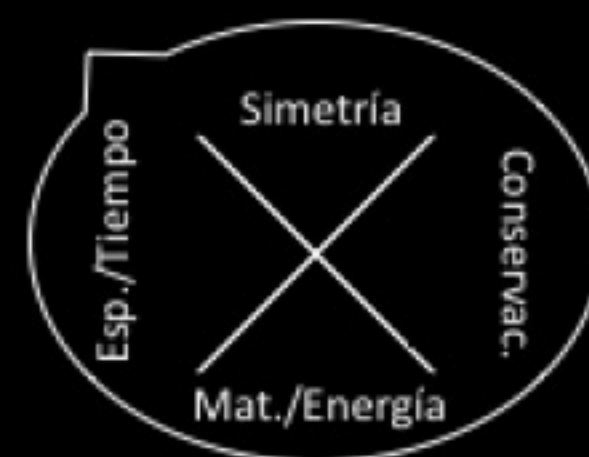
- Por cada simetría de un sist:
- \exists una corr. conservada.
- \exists una cant. conservada.

$$\mathcal{C} = \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} - \mathcal{L} \right) T_r - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} \bar{X}_r$$

$$\delta t = \epsilon_r T_r, \quad \delta \bar{x} = \epsilon_r \bar{X}_r$$

- Inv. temp. $\rightarrow E$
- Inv. traslac. $\rightarrow \vec{p}$
- Inv. rotac. $\rightarrow \vec{l}$
- Inv. gauge $\rightarrow Q_E, Q_W, Q_C$

Varios artículos.



Midiendo distancias

Midiendo distancias en el Universo

Métodos geométricos:

- $D < 10^2$ al. Paralaje.

Candelas estándar:

- $D < 10^5$ al. Secuencia principal.
- $D < 10^7$ al. Variables cefeidas.
- $D < 10^9$ al. Ex. de supernova.



Sirenas estándar:

- $D < 10^{10}$ al. Ondas gravitacionales.

Reglas estándar:

- $D > 10^{10}$ al. Osc. Bariónica Acústica.

Distancias mayores:

- $D > 10^8$ al. Flujo de Hubble.

De Copérnico a Einstein

Midiendo distancias

2.2

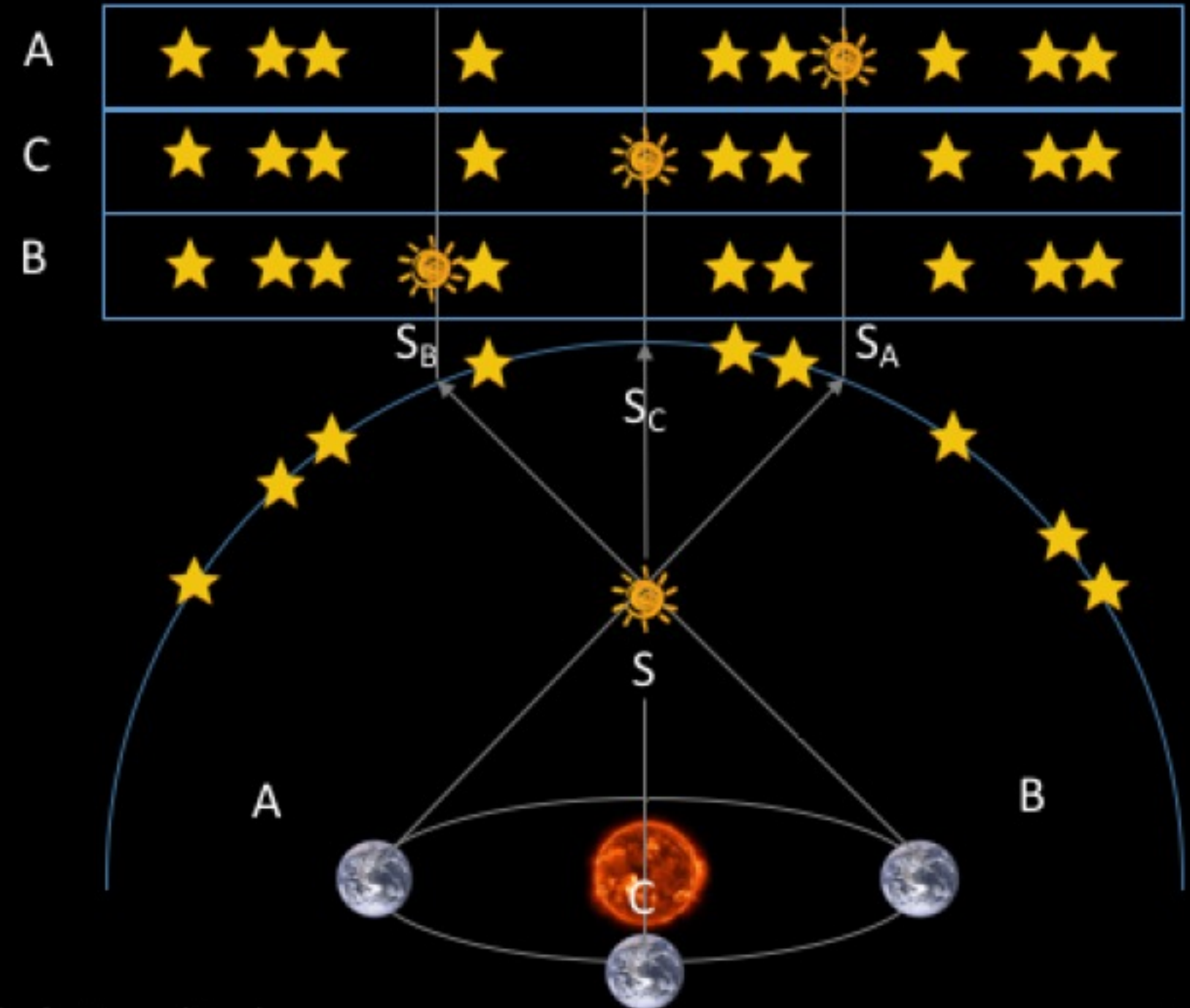
2

Midiendo distancias en el Universo

- Con el **paralaje estelar**.
- Distancias menores a 10^2 años luz.



Friedrich Wilhelm Bessel
(1784-1846)



De Copérnico a Einstein

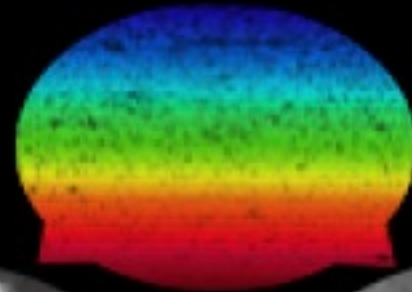
Midiendo distancias

2.2

2

Midiendo distancias en el Universo

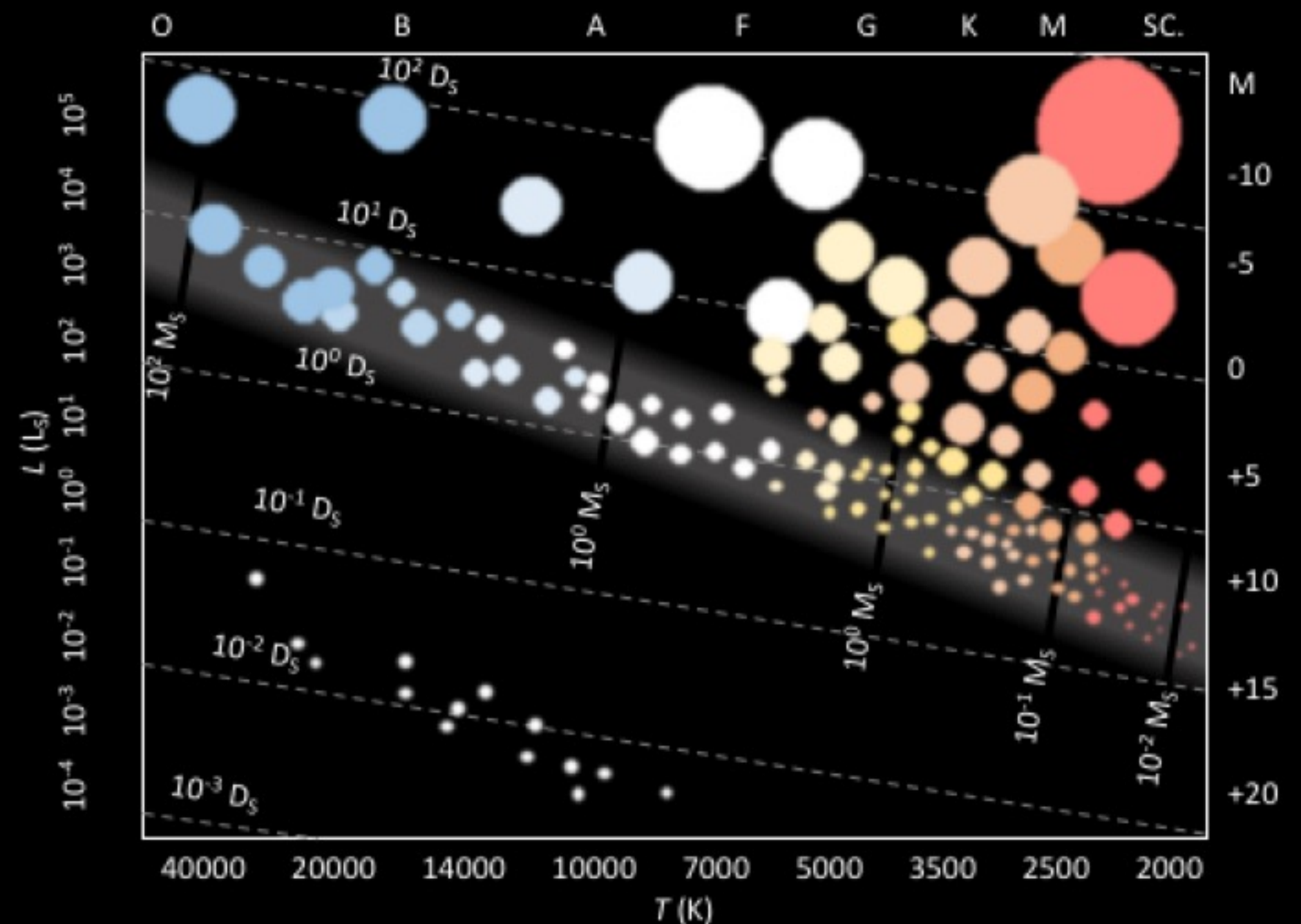
- Con la **secuencia principal**.
- Distancias menores a 10^5 años luz.



Ejnar Hertzsprung
(1873–1967)



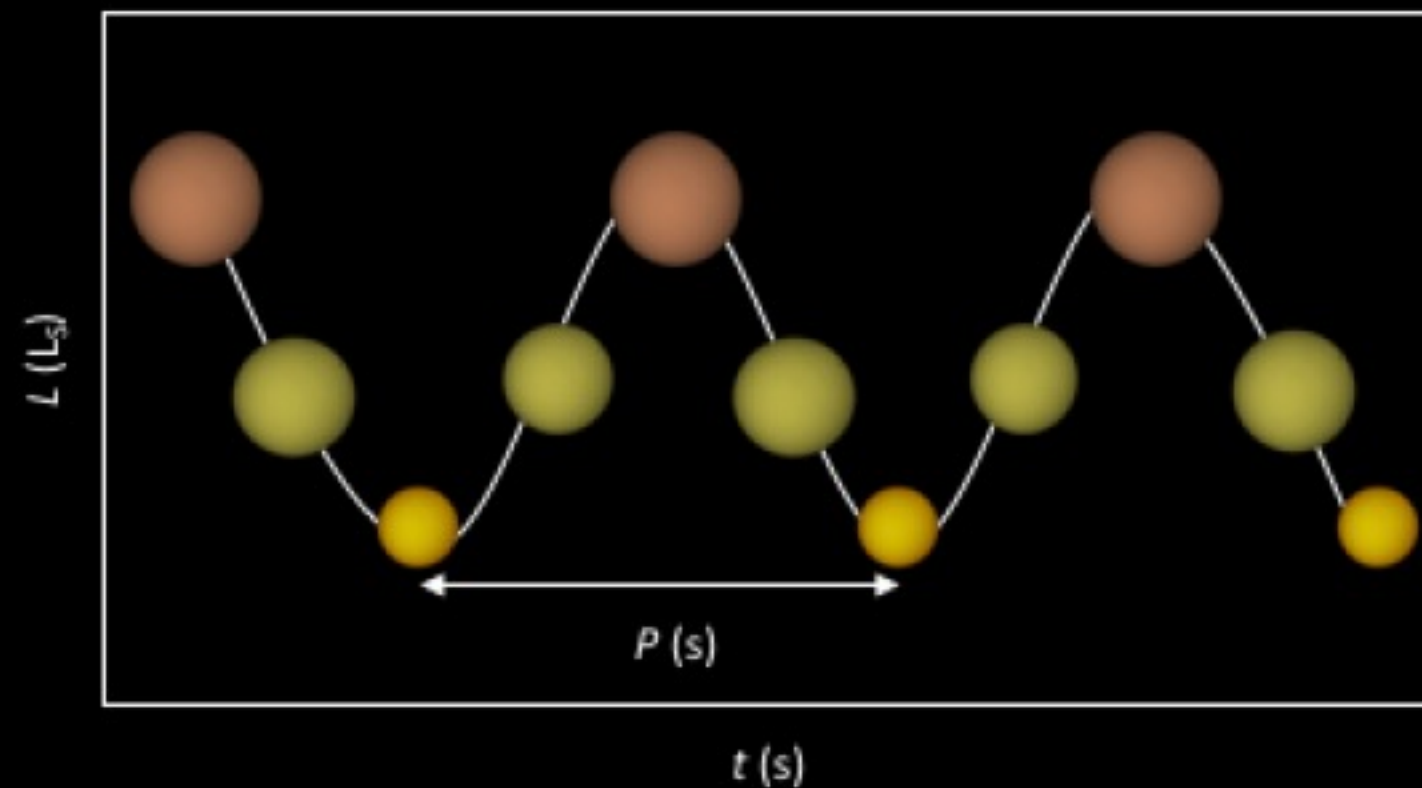
Henry Norris Russell
(1877–1957)



Midiendo distancias

Midiendo distancias en el Universo

- Con **variables cefeidas**.
- Distancias menores a 10^7 años luz.



Henrietta Swan Leavitt
(1864-1921)

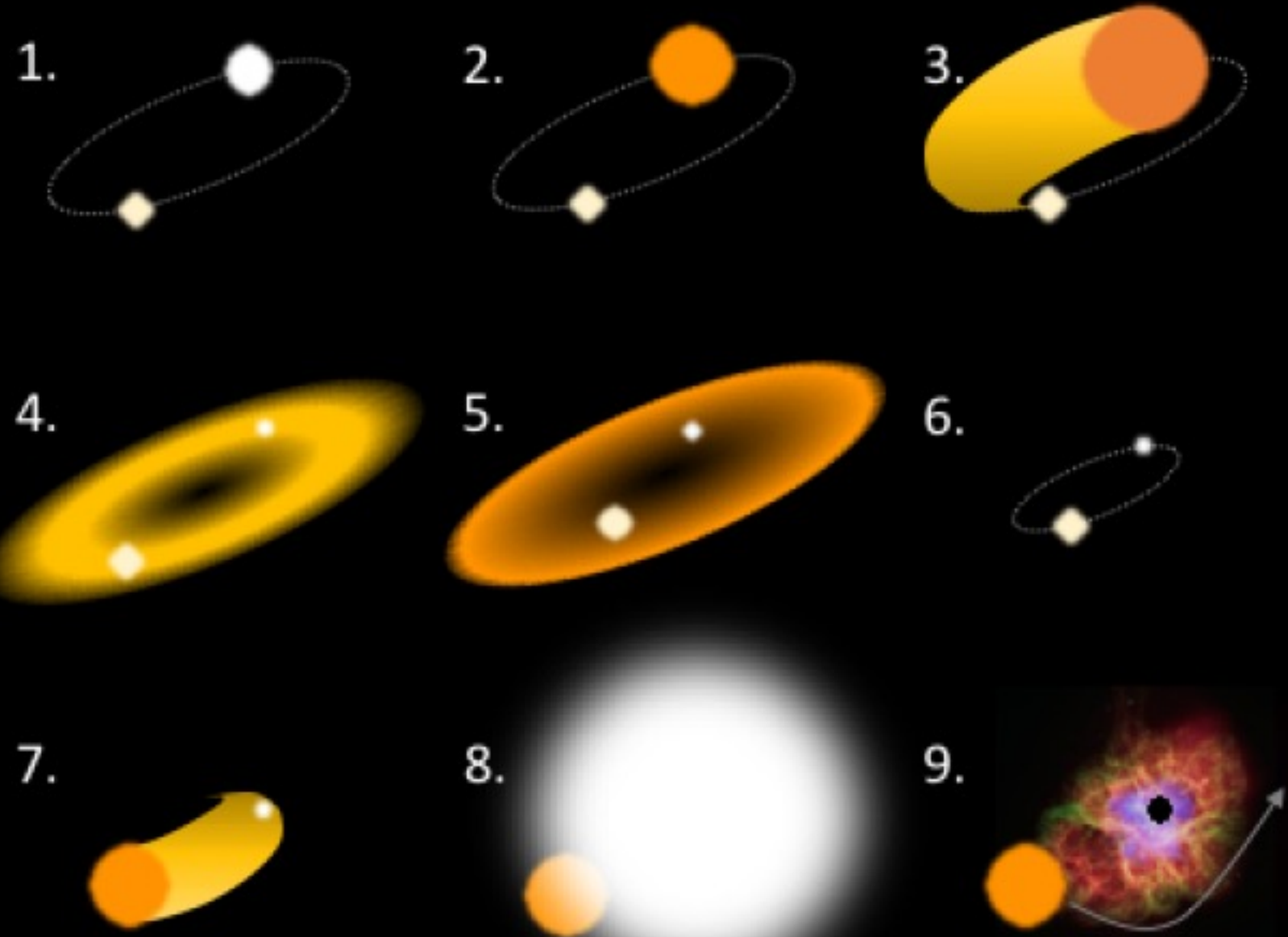
Midiendo distancias

Midiendo distancias en el Universo

- Con **explosiones de supernova**.
- Distancias menores a 10^9 años luz.



Fritz Zwicky
(1898-1974)



De Copérnico a Einstein

2.2

El Gran Debate

3

s. XIX:
(pri.) Muchos objetos conocidos como nebulosas en espiral como M31 se reconocen como conglomeraciones de estrellas.



Harlow Shapley
(1885-1972)



Heber Curtis
(1872-1942)

VS

Washington (1920): “La escala de distancia del Universo”.

s. XIX:
(pri.) Muchos objetos conocidos como nebulosas en espiral como M31 se reconocen como conglomeraciones de estrellas.

s. XX:
(pri.) Estos conglomerados se conocen como universos insulares. La expresión cae en desuso y se reemplaza por galaxias.



Harlow Shapley
(1885-1972)



Heber Curtis
(1872-1942)

De Copérnico a Einstein

2.2

El Gran Debate

3

EEUU (1923): Cefeidas descubiertas en M31.

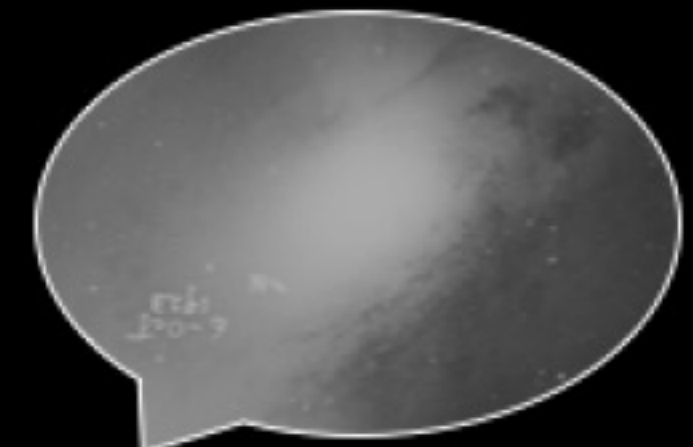
s. XIX:
(pri.) Muchos objetos conocidos como nebulosas en espiral como M31 se reconocen como conglomeraciones de estrellas.

s. XX:
(pri.) Estos conglomerados se conocen como universos insulares. La expresión cae en desuso y se reemplaza por galaxias.

s. XX:
(med.) Las galaxias no se distribuyen en el espacio al azar. Aparecen en estructuras coherentes: racimos, filamentos y paredes entre huecos.

Variables
Cepheidas en
Andrómeda

Andrómeda
está fuera de
la Vía Láctea



Edwin Hubble
(1924-1953)

3 La Teoría de la Relatividad

1 La Relatividad Especial

- 1 La dilatación temporal
- 2 La contracción espacial
- 3 Una ecuación famosa

2 La Relatividad General

- 1 El tejido espacio-tiempo
- 2 Los agujeros negros
- 3 Las ondas gravitacionales
- 4 Las lentes gravitacionales



James Clerk Maxwell
(1831–1879)

Entschuldigung!

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \rho \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\partial_t \vec{B} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} &= +\partial_t \vec{D} + j\end{aligned}$$

$$c^{-2} \partial_{tt} \begin{pmatrix} \vec{E} \\ \vec{B} \end{pmatrix} - \nabla^2 \begin{pmatrix} \vec{E} \\ \vec{B} \end{pmatrix} = 0$$

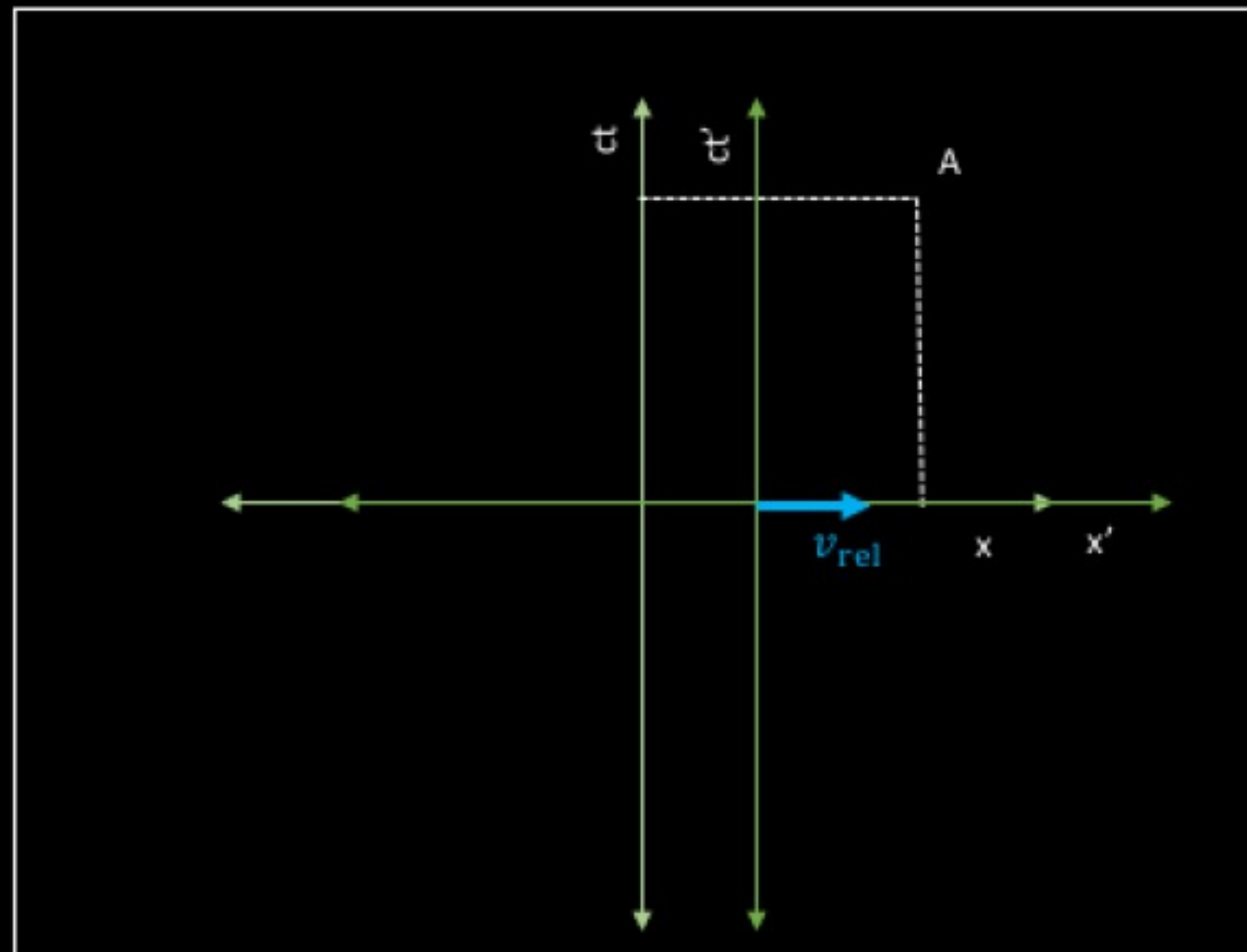
- La velocidad de la luz aparece como constante en las Ecs. de Maxwell.

¿Medio de propagación?

- Hipótesis: ligero y fluido, el éter.

¿Velocidad relativa al medio?

- Observaciones: $v = \mathcal{O}(10^5)$ km/s



Transformaciones Galileanas

Espacio y tiempo **absolutos**.

$$\begin{pmatrix} x' \\ ct' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -v \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ ct \end{pmatrix}$$

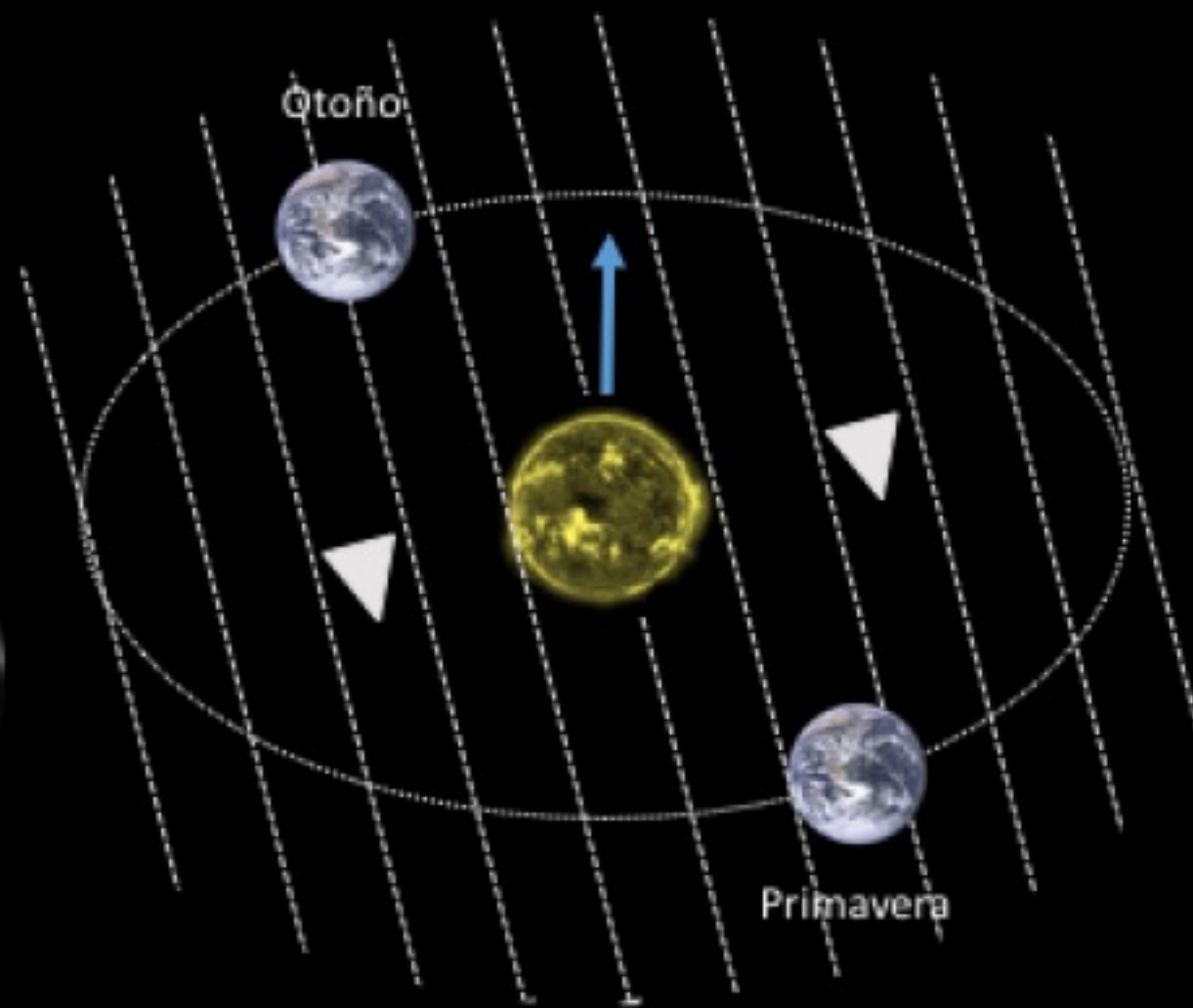
$$v' = v - v_{rel}$$



Albert Michelson
(1852–1931)

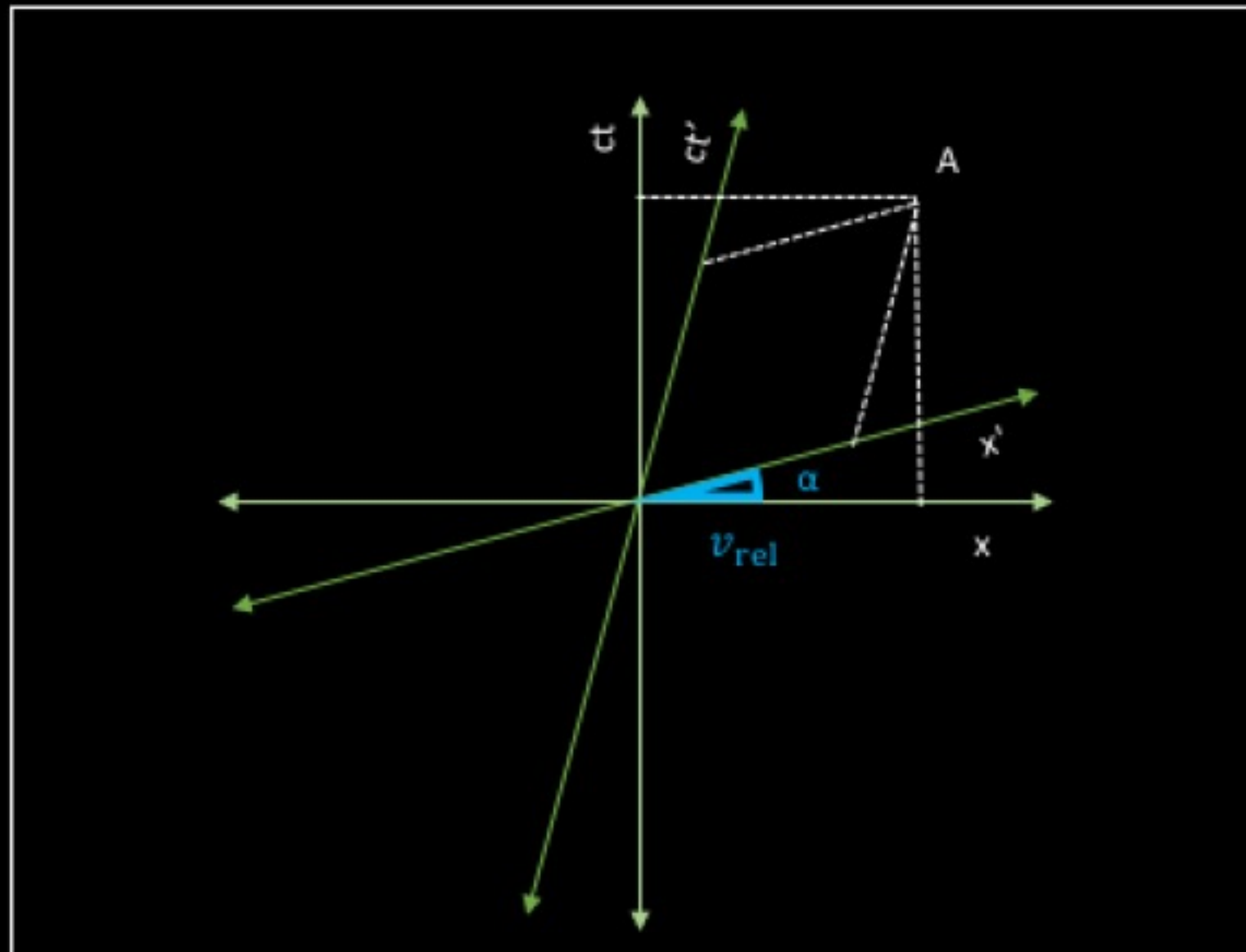


Edward Morley
(1903–1961)



Exp. de Michelson & Morley (1887)

- Compara la velocidad de la luz en varias direcciones.
- Mide la dirección relativa del Sol respecto al éter interestelar.
- La velocidad de la luz es una constante universal, la misma en cualquier dirección dada.
- En adelante, se la denomina c .



Transformaciones Lorentzianas

Espacio y tiempo **relativos**.

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}, \beta = v/c$$

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\gamma v \\ -\gamma v & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix}$$

$$v' = \frac{v - v_{rel}}{1 - vv_{rel}/c^2}$$


Teoría de la **Relatividad Especial**.

(Con Einstein, Poincaré, y otros).

La velocidad de la luz c , invariante.

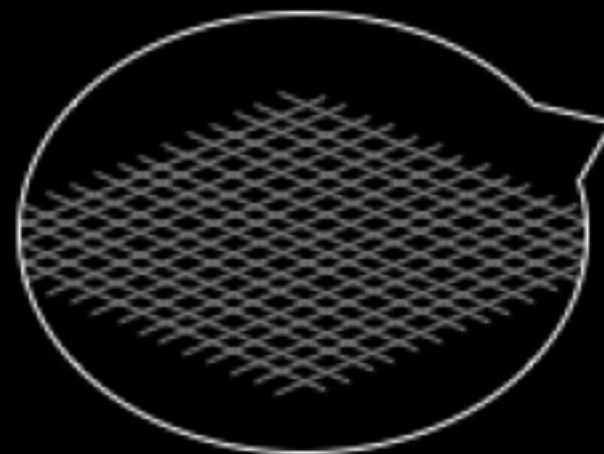
- Relac. entre esp. y tiempo.
- Dilatación temporal.
- Contracción espacial.

Masa \leftrightarrow Energía.

 *Varios artículos.*



Hendrik Lorentz
(1853–1928)




Teoría de la **Relatividad General**.

(Fundamentalmente Einstein).

Teoría métrica de la gravedad.

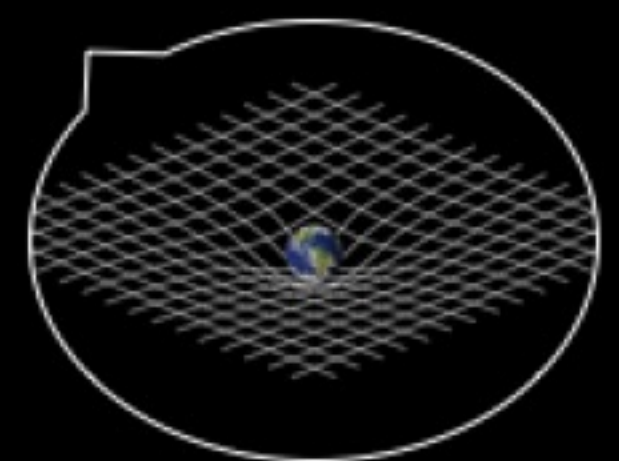
- Tejido espacio-tiempo.
- Expansión del Universo.
- Agujeros negros.
- Ondas gravitacionales.
- Lentes gravitacionales.

Masa/Energía \leftrightarrow Geometría.

 *Varios artículos.*



Albert Einstein
(1879–1955)



La Teoría de la Relatividad

3

La Relatividad Especial

1

- Primer Postulado:

“Las leyes de la física son las mismas en todos los sist. de referencia inerciales.”

∄ un sist. de referencia absoluto.

- Segundo Postulado:

“La velocidad de la luz en el vacío es una constante universal, c .”

c ind. del mov. de la fuente de luz.

La Teoría de la Relatividad

3

La Relatividad Especial

1

Ich.

Teoría de la Relatividad Especial.

La velocidad de la luz c , inv.

- Rel. entre esp. y tiempo.
- Dilatación temporal.
- Contracción espacial.
- Masa \leftrightarrow Energía.

Ppio. de Rel. Especial:

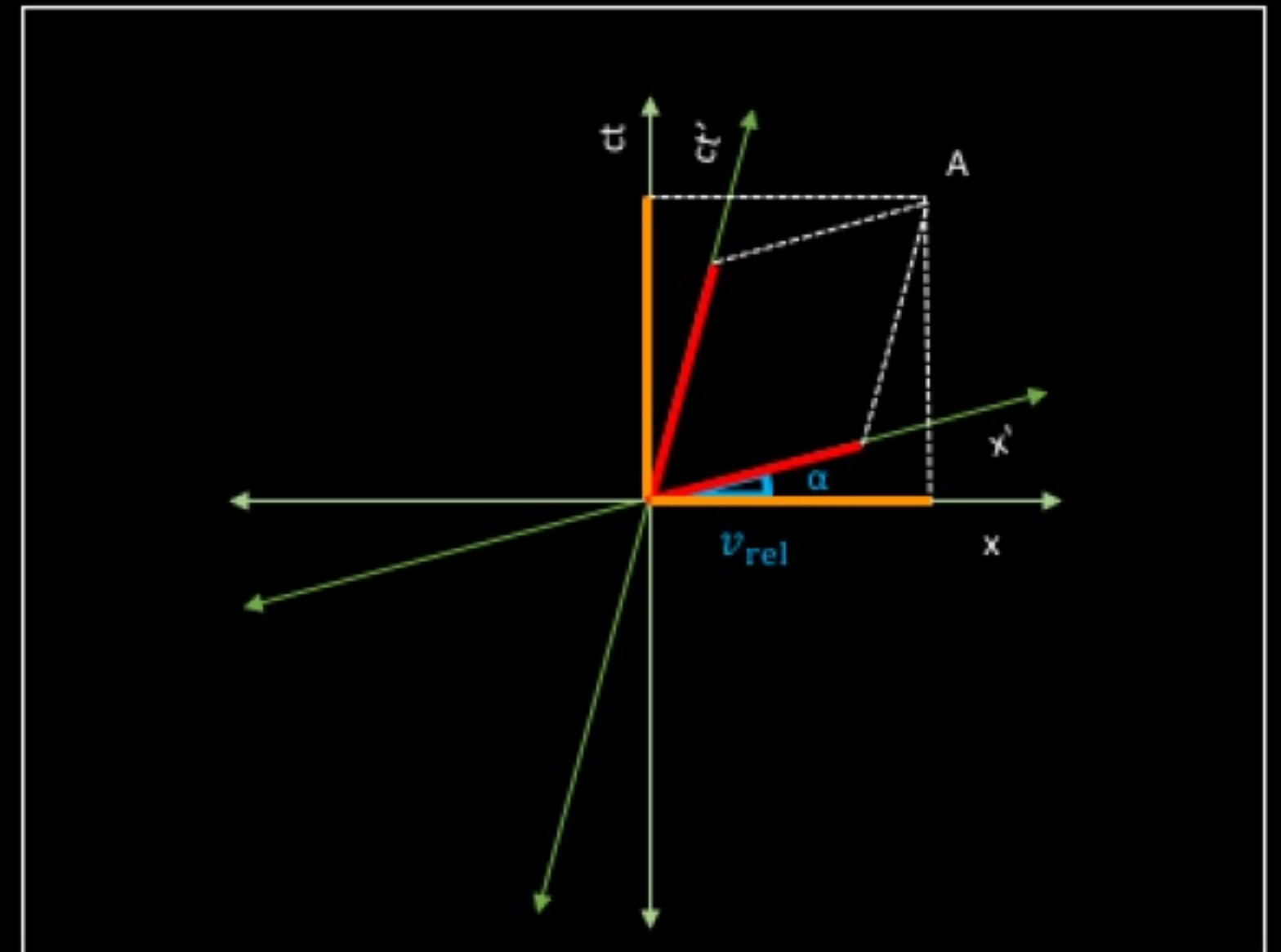
“Las ecuaciones que describen un sistema físico deben ser inv. de Lorentz.”

= inv. de Lorentz.
= inv. bajo transf. inercial.

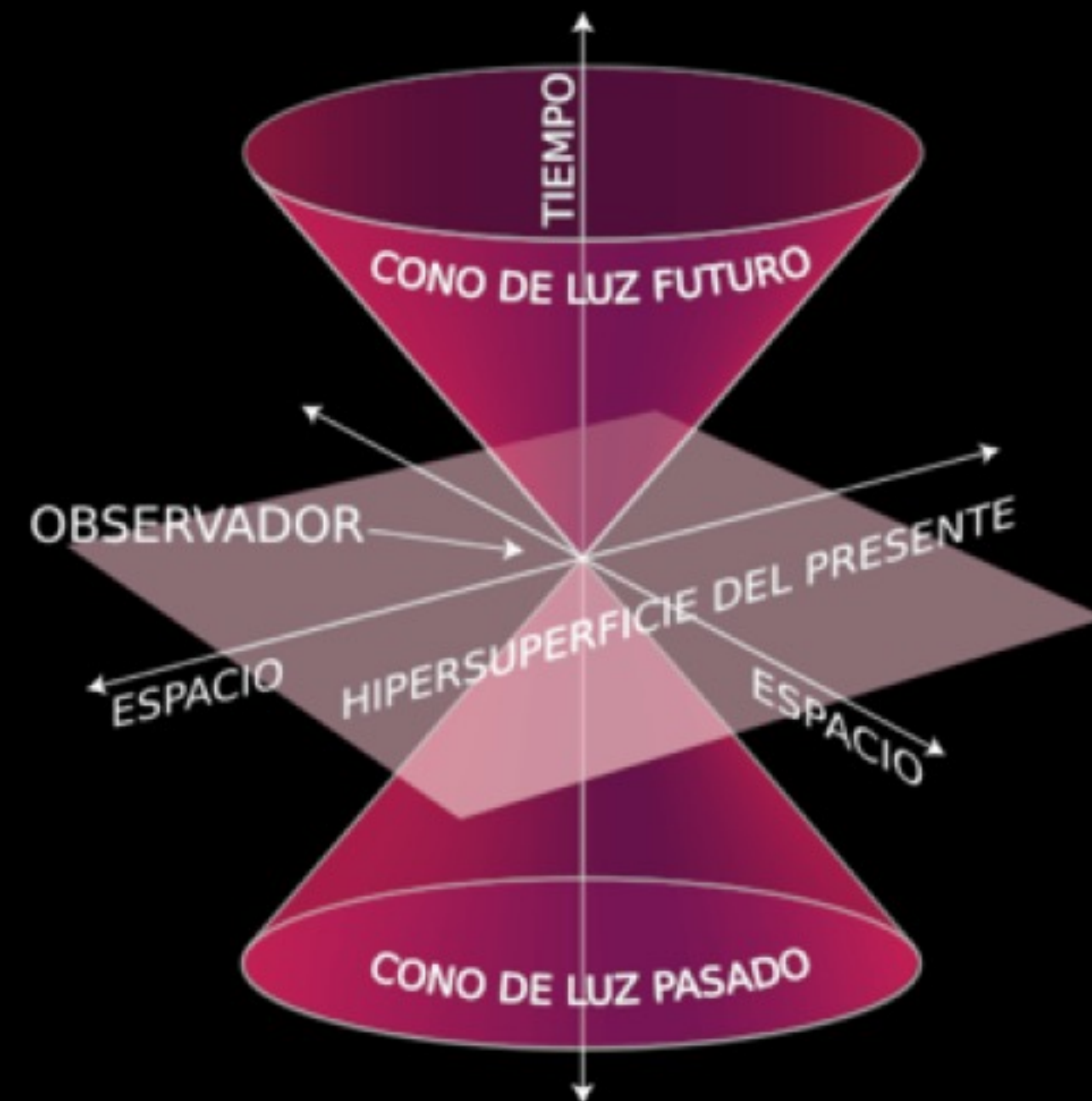


Albert Einstein
(1879–1955)

- Relac. entre esp. y tiempo.
- Dilat. Temporal: $\Delta t' = \gamma \Delta t$
- Contr. Espacial: $\Delta l' = \gamma^{-1} \Delta l$
- Masa \leftrightarrow Energía: $E = mc^2$

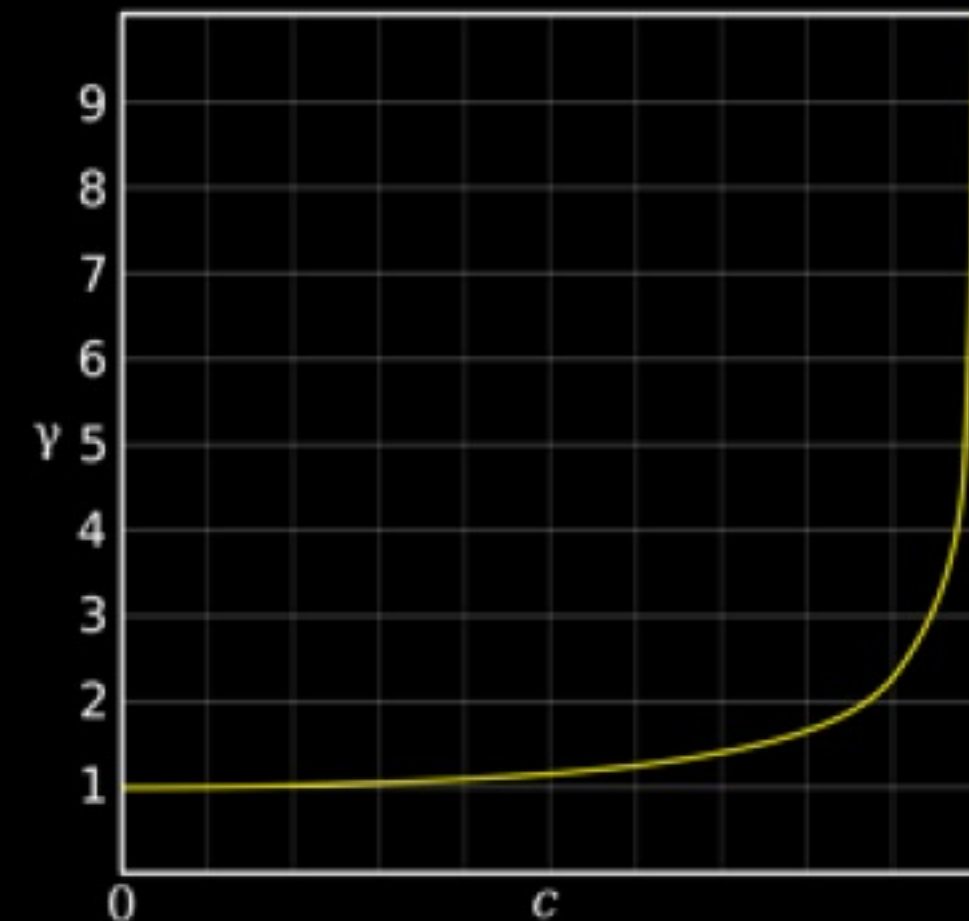


- ¡Principio de Causalidad!
- Dilat. Temporal: $\Delta t' = \gamma \Delta t$
- Contr. Espacial: $\Delta l' = \gamma^{-1} \Delta l$
- Masa \leftrightarrow Energía: $E = mc^2$



$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \beta = v/c$$

- Relac. entre esp. y tiempo.
- Dilat. Temporal: $\Delta t' = \gamma \Delta t$
- Contr. Espacial: $\Delta l' = \gamma^{-1} \Delta l$
- Masa \leftrightarrow Energía: $E_0 = mc^2$



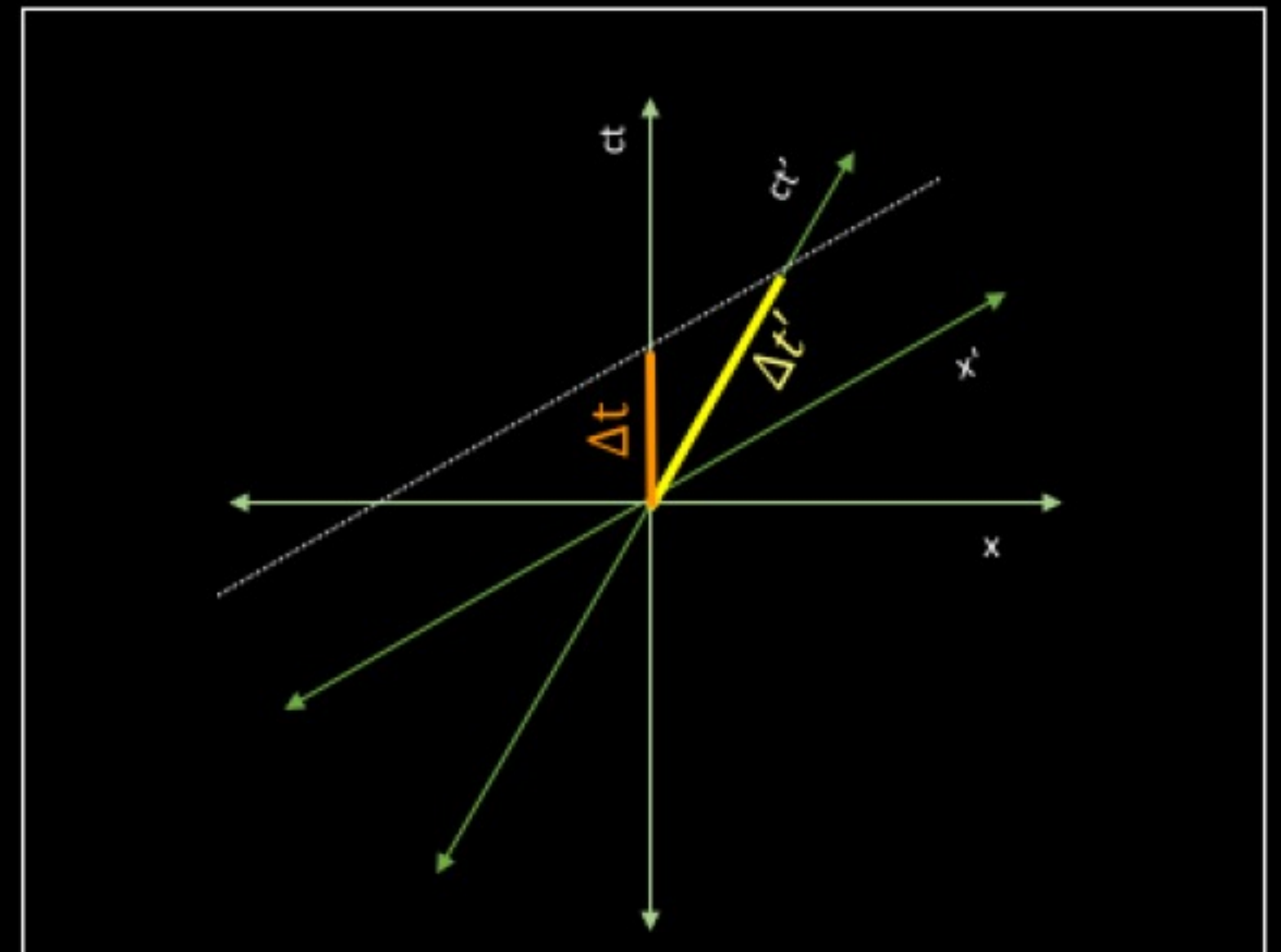
La Relatividad Especial

3.1

La dilatación temporal

1

- Relac. entre esp. y tiempo.
- Dilat. Temporal: $\Delta t' = \gamma \Delta t$
- Contr. Espacial: $\Delta l' = \gamma^{-1} \Delta l$
- Masa \leftrightarrow Energía: $E = mc^2$



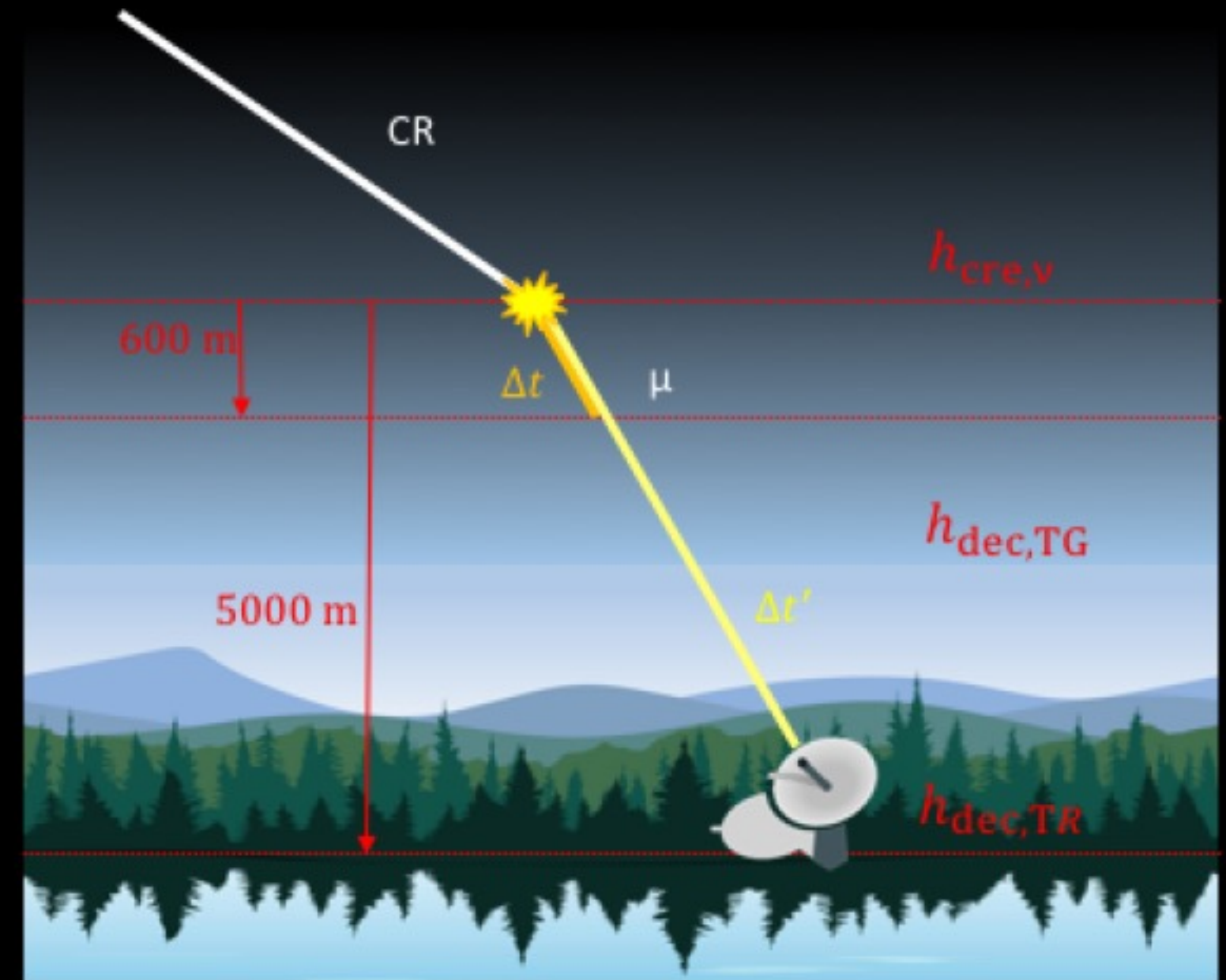
La Relatividad Especial

3.1

La dilatación temporal

1

- Relac. entre esp. y tiempo.
- Dilat. Temporal: $\Delta t' = \gamma \Delta t$
- Contr. Espacial: $\Delta l' = \gamma^{-1} \Delta l$
- Masa \leftrightarrow Energía: $E = mc^2$



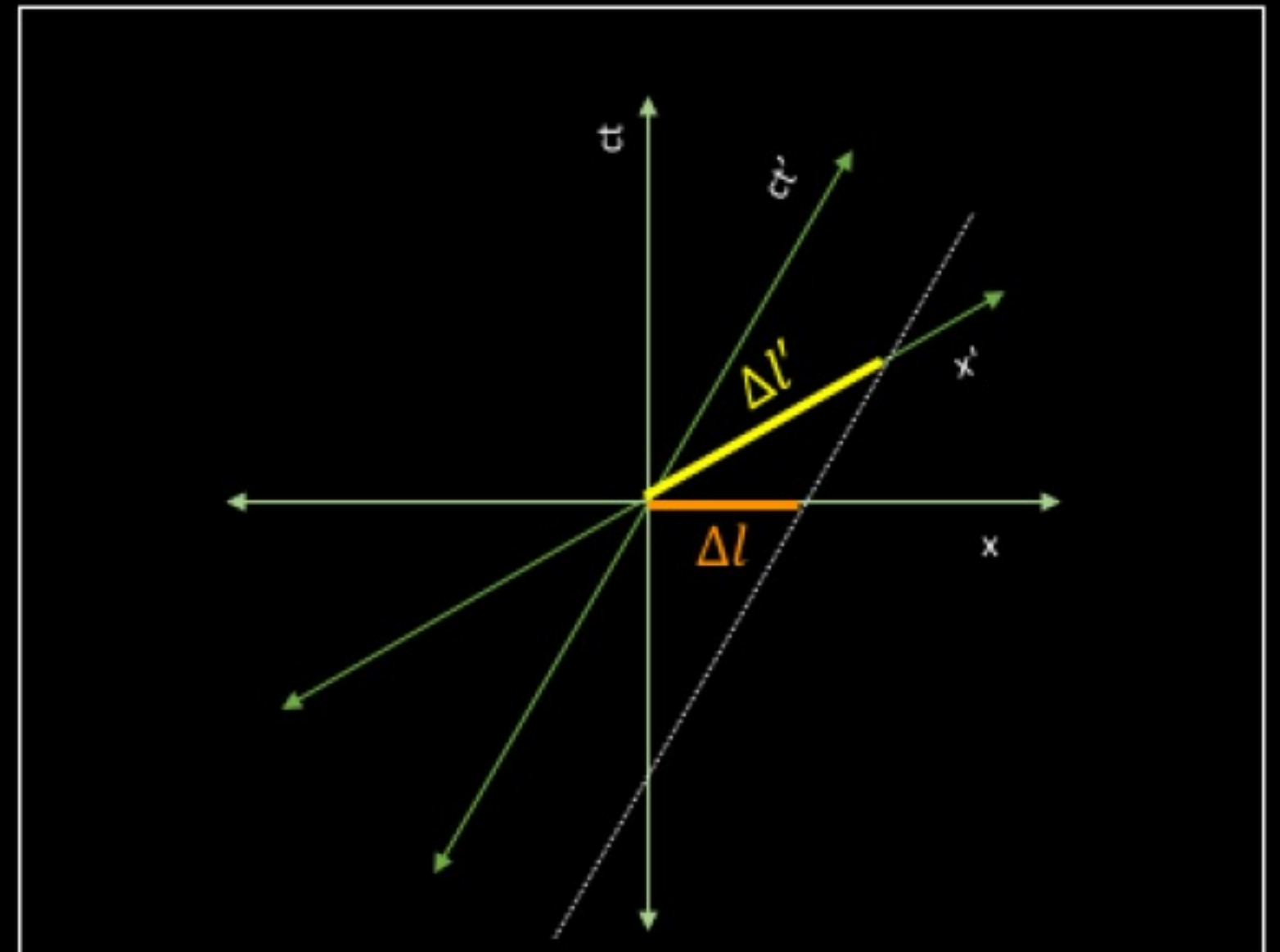
La Relatividad Especial

3.1

La contracción espacial

2

- Relac. entre esp. y tiempo.
- Dilat. Temporal: $\Delta t' = \gamma \Delta t$
- Contr. Espacial: $\Delta l' = \gamma^{-1} \Delta l$
- Masa \leftrightarrow Energía: $E = mc^2$



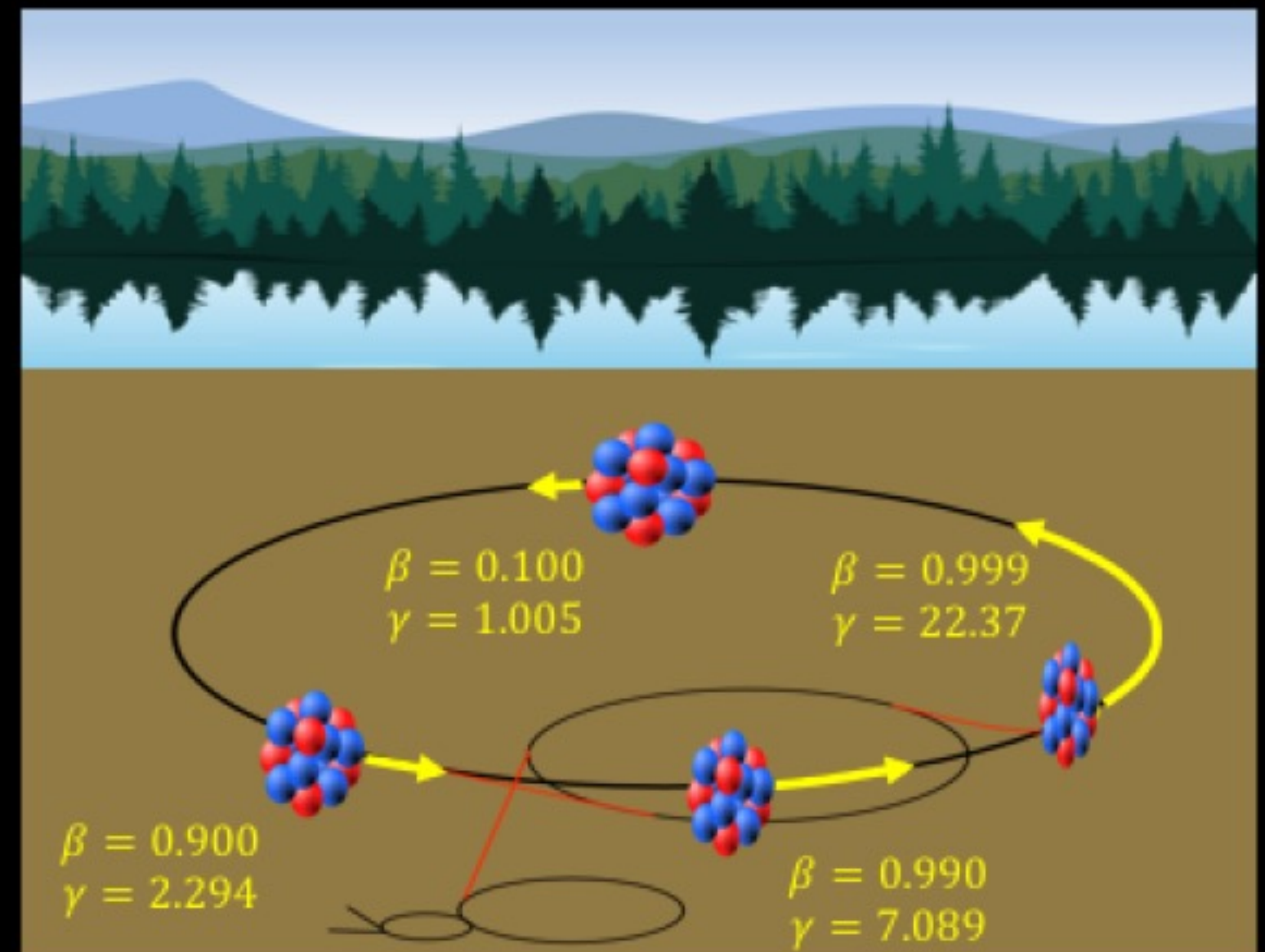
La Relatividad Especial

La contracción espacial

3.1

2

- Relación entre esp. y tiempo.
- Dilat. Temporal: $\Delta t' = \gamma \Delta t$
- Contr. Espacial: $\Delta l' = \gamma^{-1} \Delta l$
- Masa \leftrightarrow Energía: $E = mc^2$



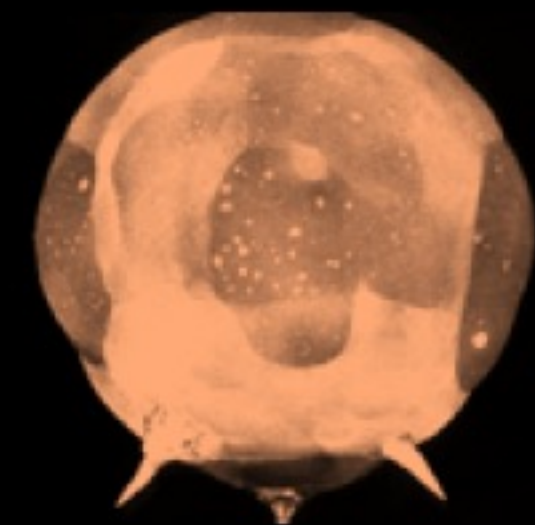
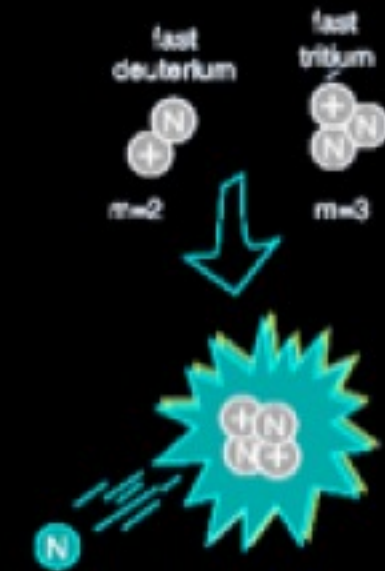
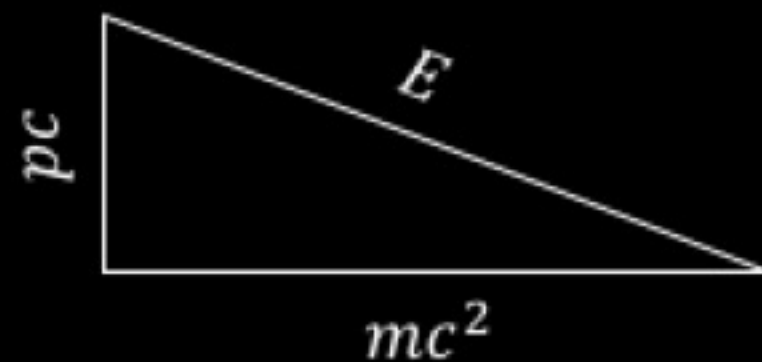
La Relatividad Especial

Una ecuación famosa

3.1

3

- Relac. entre esp. y tiempo.
- Dilatación Temporal: $\Delta t' = \gamma \Delta t$
- Contracción Espacial: $\Delta l' = \gamma^{-1} \Delta l$
- Masa ↔ Energía: $E_0 = mc^2$



La Teoría de la Relatividad

3

La Relatividad General

2

Ich, wieder.

Teoría de la Relatividad General.

Teoría métrica de la gravedad.

- Tejido espacio-tiempo.
- Agujeros negros.
- Ondas gravitacionales.
- Lentes gravitacionales.
- Expansión del Universo.
- Masa/energía \leftrightarrow Geom.

Ppio. de Equivalencia:

“Un sistema no inercial es localmente indistinguible de un sistema inercial sometido a un campo gravitatorio.”

⇒ **Aceleración a y gravedad g son indistinguibles**



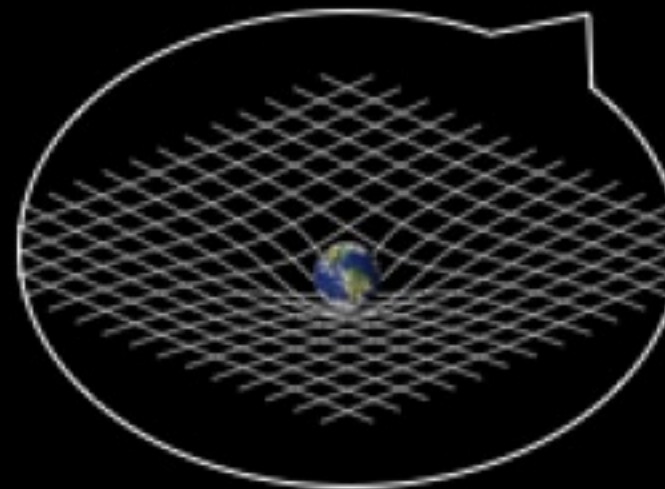
Albert Einstein
(1879–1955)

La acción de la Relatividad General

Teoría de la **Relatividad General**.

Teoría métrica de la gravedad.

- Tejido espacio-tiempo.
- Agujeros negros.
- Ondas gravitacionales.
- Lentes gravitacionales.
- Expansión del Universo.
- Masa/Energía \leftrightarrow Geom.



$$\mathcal{L} = \frac{c^4}{16\pi G} (R(g_{\mu\nu}) - 2\Lambda) + \mathcal{L}_M$$

R \rightarrow Geometría \leftrightarrow Métrica.

$g_{\mu\nu}$ \rightarrow Geometría \leftrightarrow Métrica.

Λ \rightarrow Constante cosmológica.

\mathcal{L}_M \rightarrow Materia/Energía.

La Relatividad General

El tejido espacio-tiempo

3

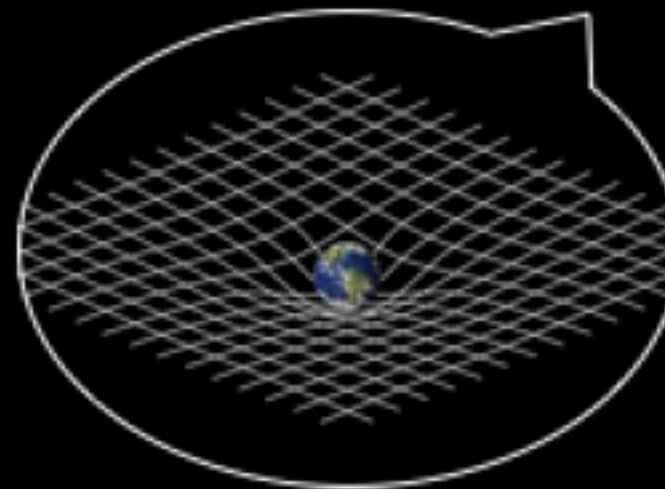
2.1

Las Ecuaciones de Einstein:

Teoría de la **Relatividad General**.

Teoría métrica de la gravedad.

- Tejido espacio-tiempo.
- Agujeros negros.
- Ondas gravitacionales.
- Lentes gravitacionales.
- Expansión del Universo.
- Masa/Energía ↔ Geom.



$$G_{\mu\nu}(g_{\mu\nu}) + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

$G_{\mu\nu} \rightarrow$ Geometría ↔ Métrica.

$g_{\mu\nu} \rightarrow$ Geometría ↔ Métrica.

$\Lambda \rightarrow$ Constante cosmológica.

$T_{\mu\nu} \rightarrow$ Materia/Energía.

Materia/Energía ↔ Geometría:

$$g_{\mu\nu} \leftrightarrow G_{\mu\nu} \propto T_{\mu\nu}$$

La Relatividad General

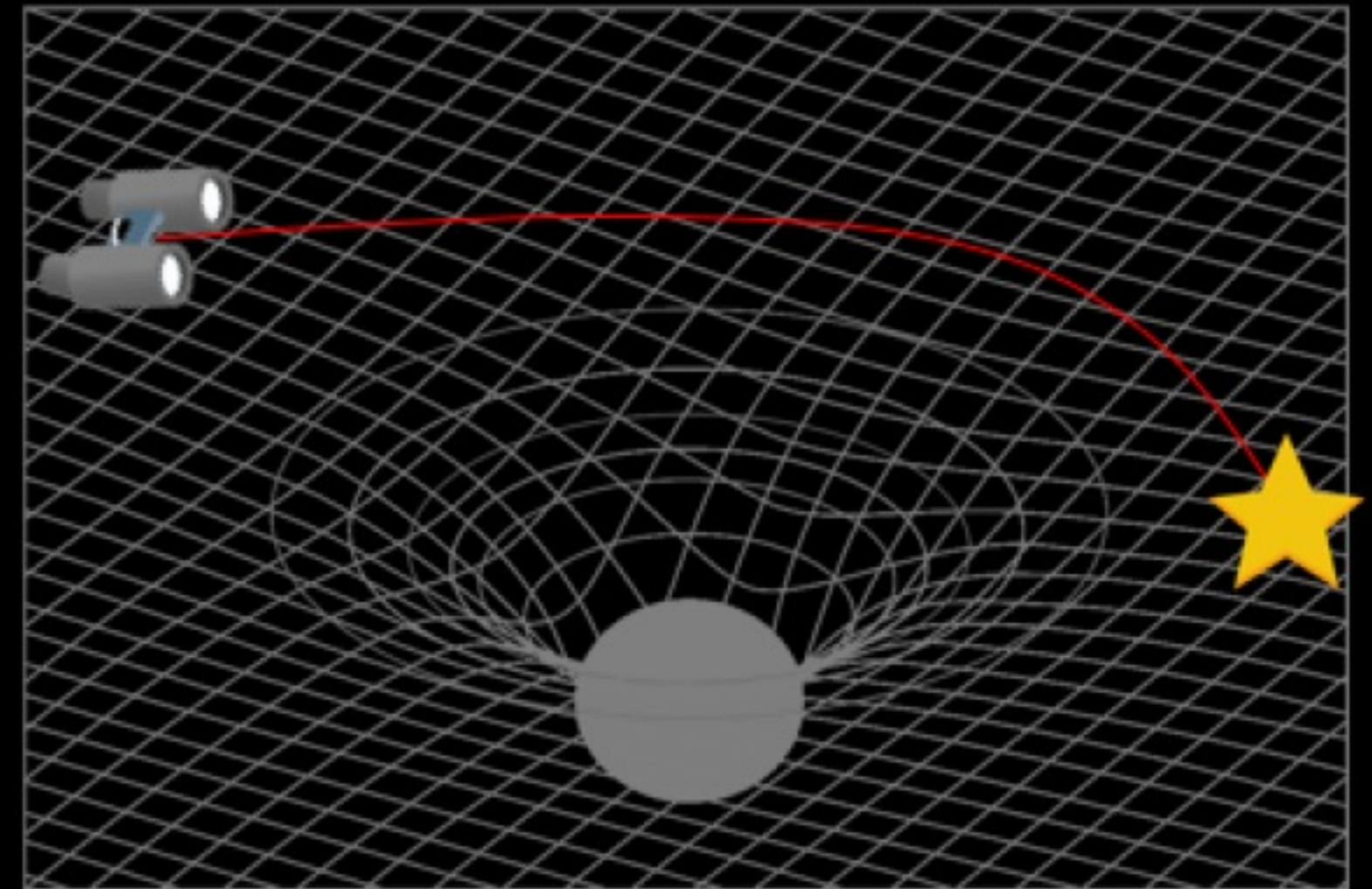
El tejido espacio-tiempo

3

2.1

- Deflexión de la luz.
- Precesión del perihelio de los planetas.
- Corrimiento al rojo/azul gravitacional.
- Ralentización temporal gravitacional.

- Existencia de agujeros negros.
- Emisión de ondas gravitacionales.
- Observación de lentes gravitacionales.



La Relatividad General

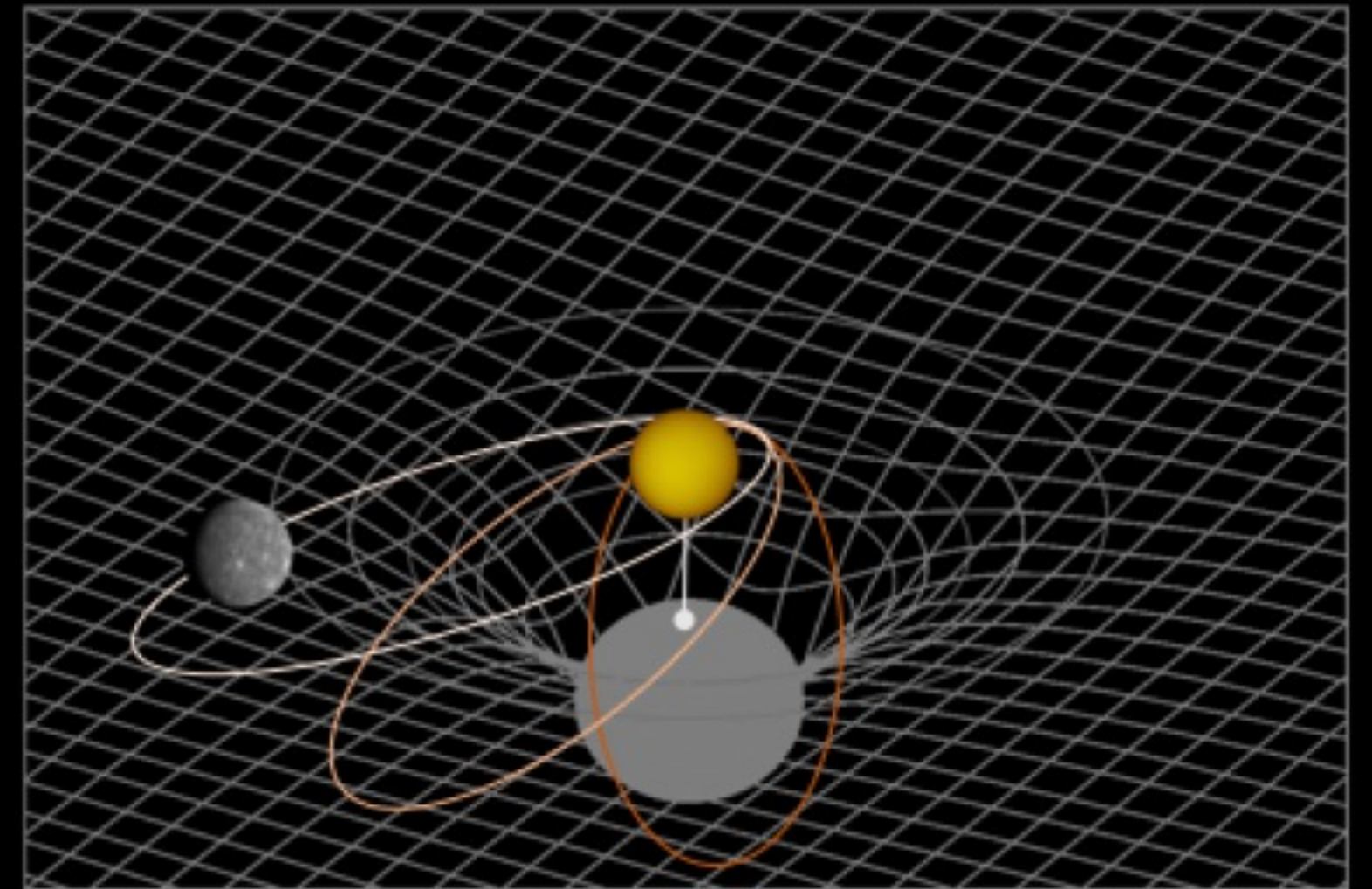
El tejido espacio-tiempo

3

2.1

- Deflexión de la luz.
- **Precesión del perihelio de los planetas.**
- Corrimiento al rojo/azul gravitacional.
- Ralentización temporal gravitacional.

- Existencia de agujeros negros.
- Emisión de ondas gravitacionales.
- Observación de lentes gravitacionales.



La Relatividad General

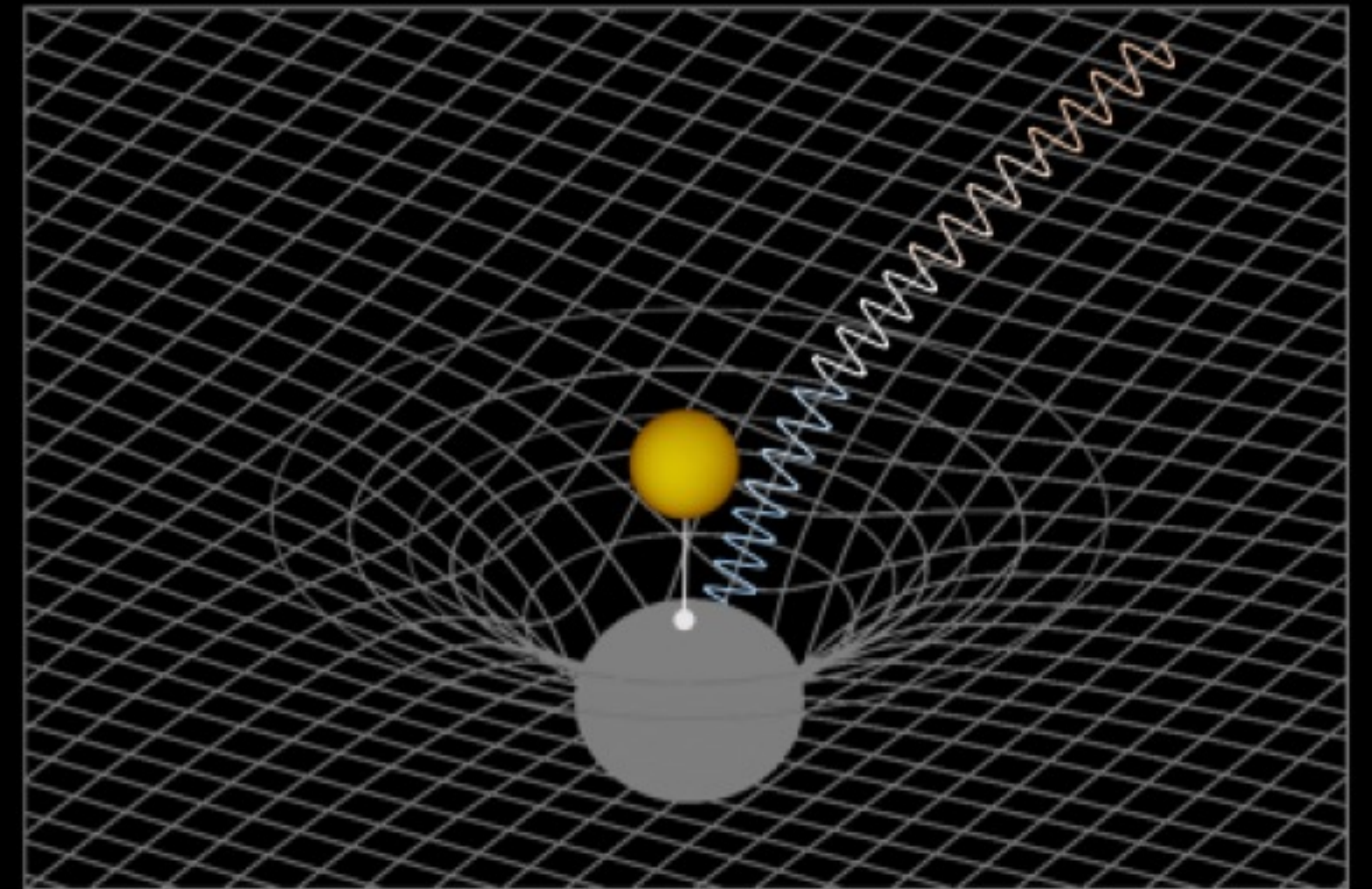
3

El tejido espacio-tiempo

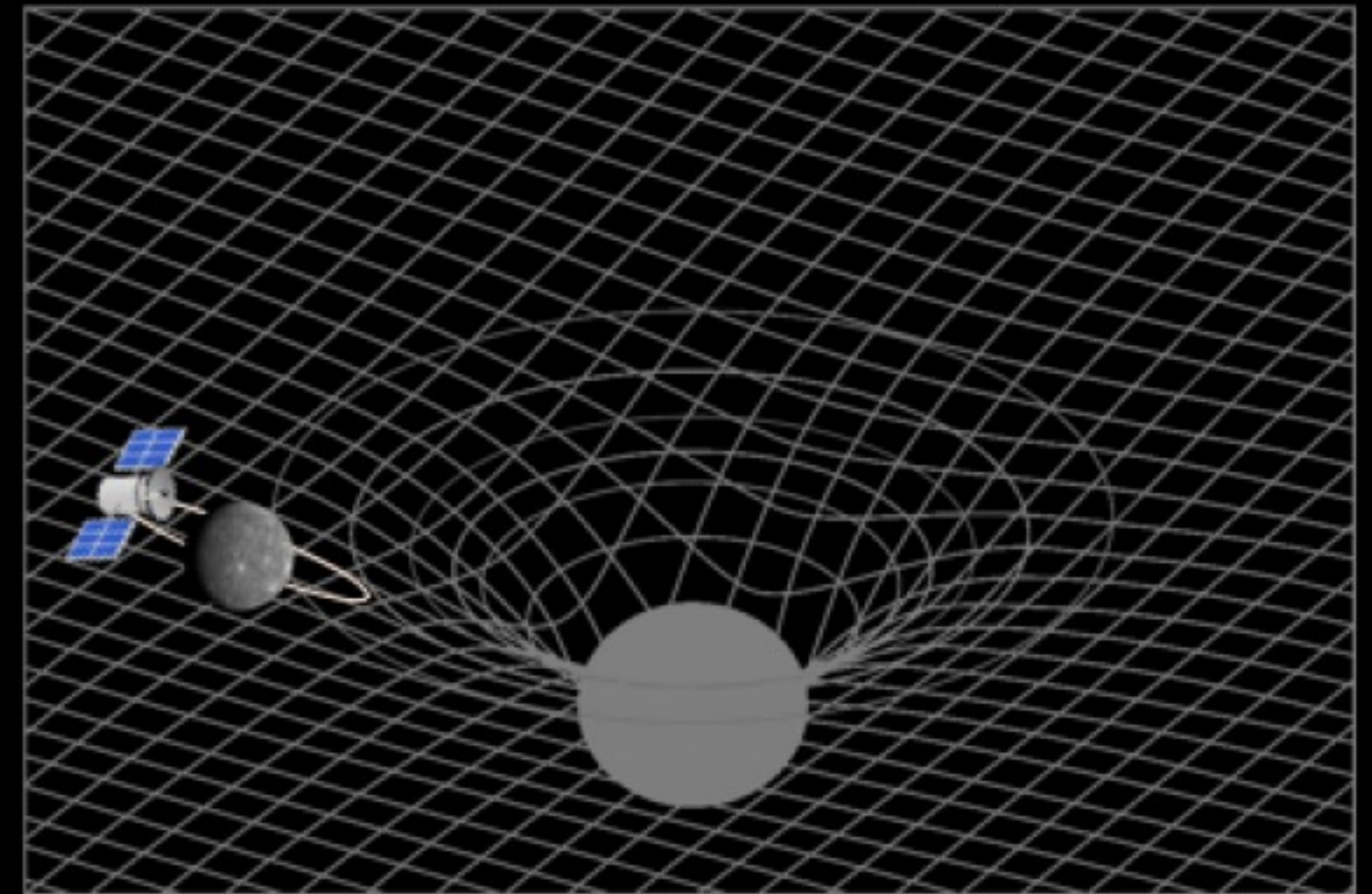
2.1

- Deflexión de la luz.
- Precesión del perihelio de los planetas.
- **Corrimiento al rojo/azul gravitacional.**
- Ralentización de los relojes.

- Existencia de agujeros negros.
- Emisión de ondas gravitacionales.
- Observación de lentes gravitacionales.



- Deflexión de la luz.
- Precesión del perihelio de los planetas.
- Corrimiento al rojo/azul gravitacional.
- **Ralentización temporal gravitacional.**
- Existencia de agujeros negros.
- Emisión de ondas gravitacionales.
- Observación de lentes gravitacionales.





Karl Schwarzschild
(1873–1916)

Sol. de las Ecs. de Einstein:

- ¿Campo gravitatorio exterior a una masa?
- ¿Estrellas u objetos con simetría esf./axial?



Agujeros negros:
“Concentración de masa en un espacio muy pequeño.”



$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

Radio Schwarzschild.

Horizonte de sucesos.

$$R_\gamma = \frac{3R_S}{2}$$

Esfera de fotones.

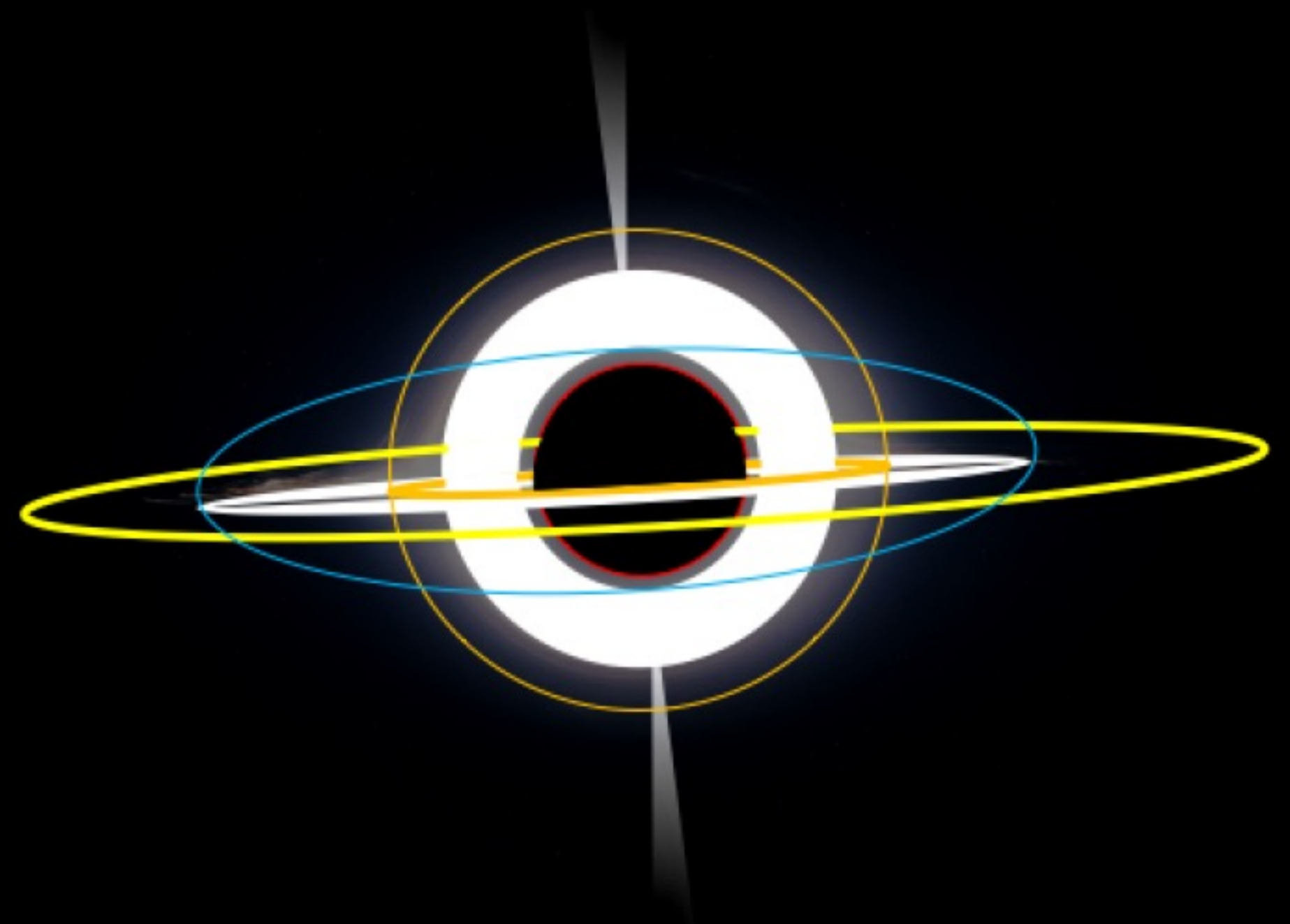
$$R_O = 6R_S$$

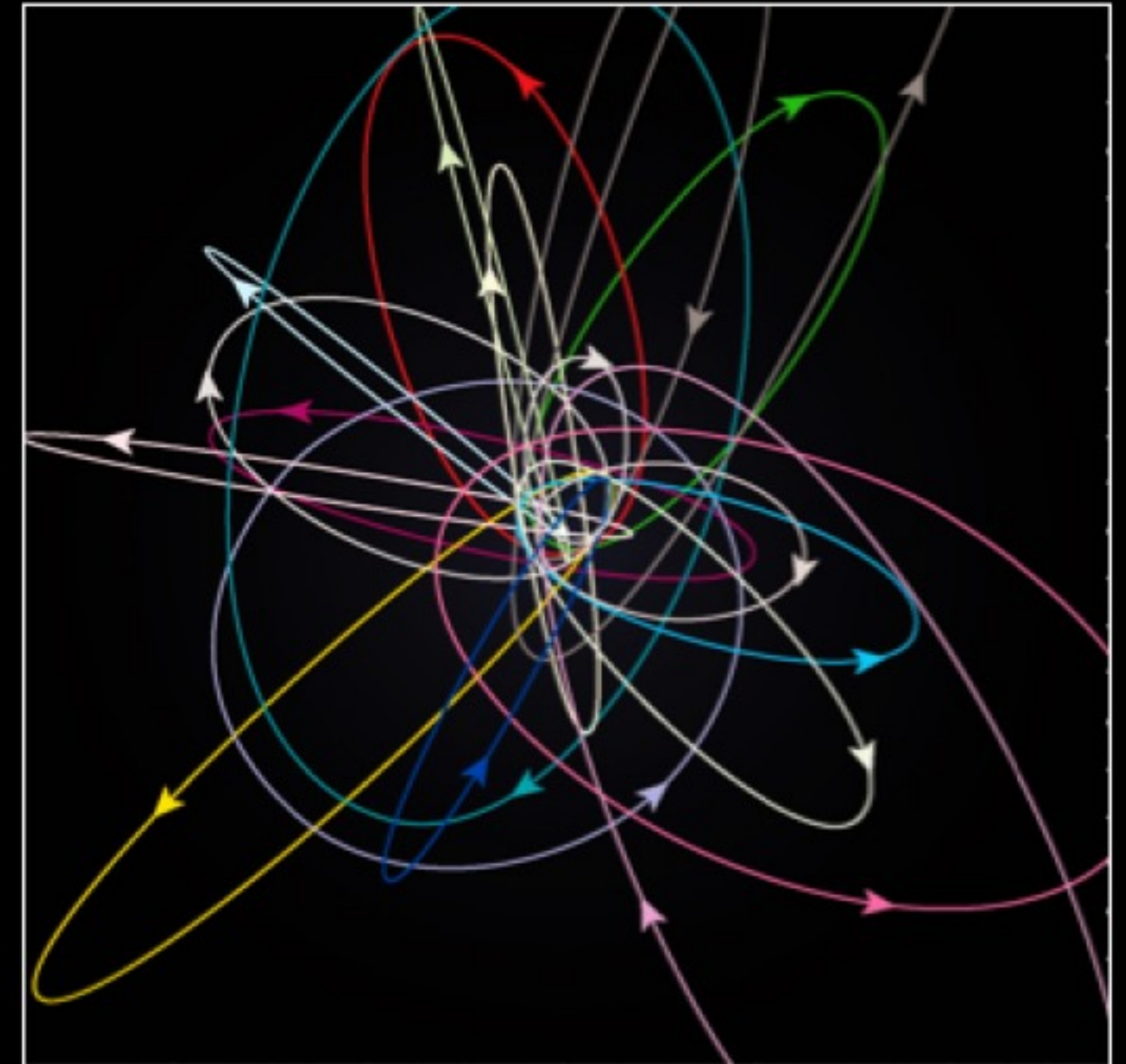
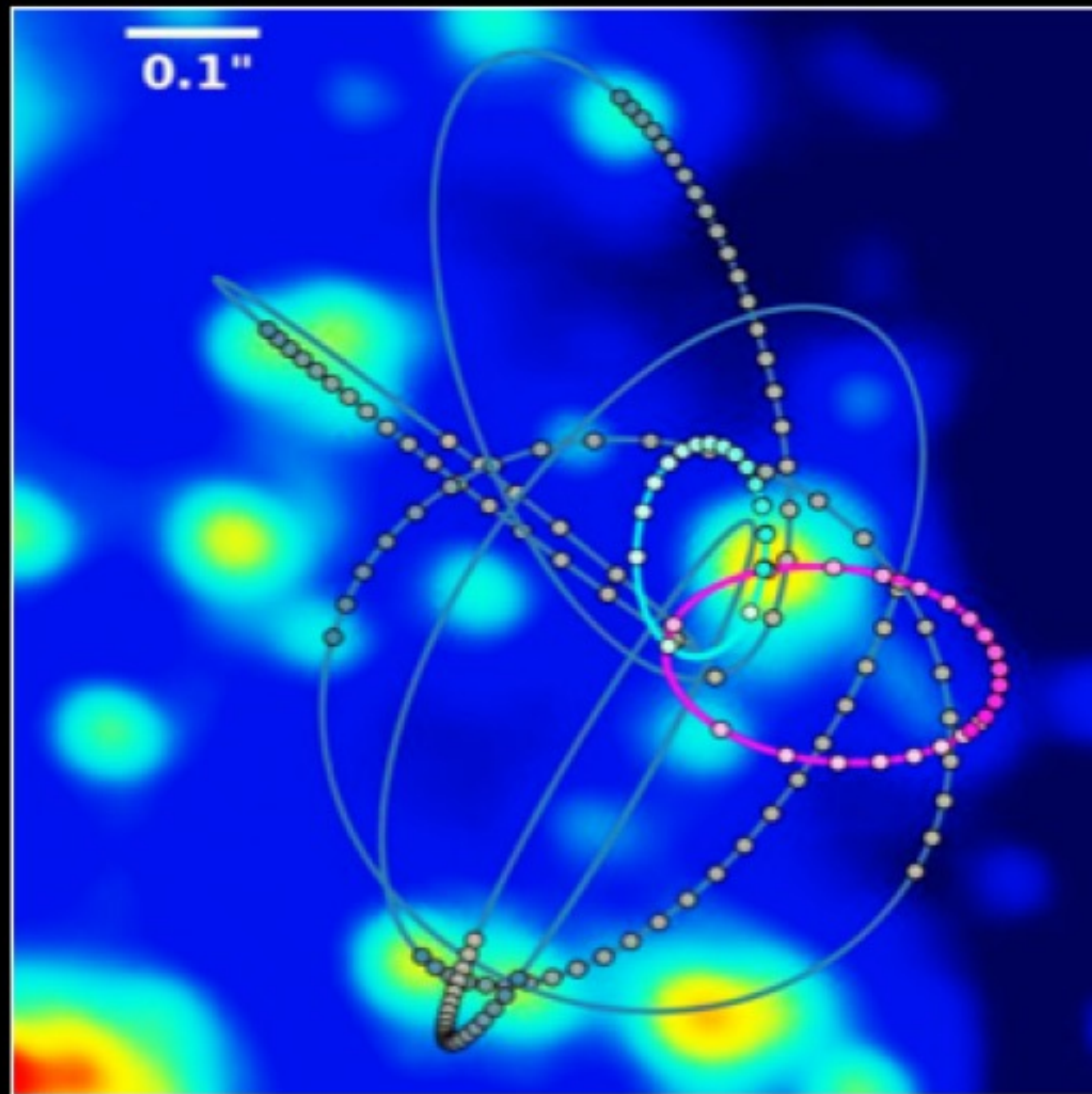
Mín. orb. int. estable.

Ergosfera.

Disco de acreción.

Chorro relativista.





La Relatividad General

3

Los agujeros negros

2.2



La Relatividad General

Las ondas gravitacionales

3

2.3



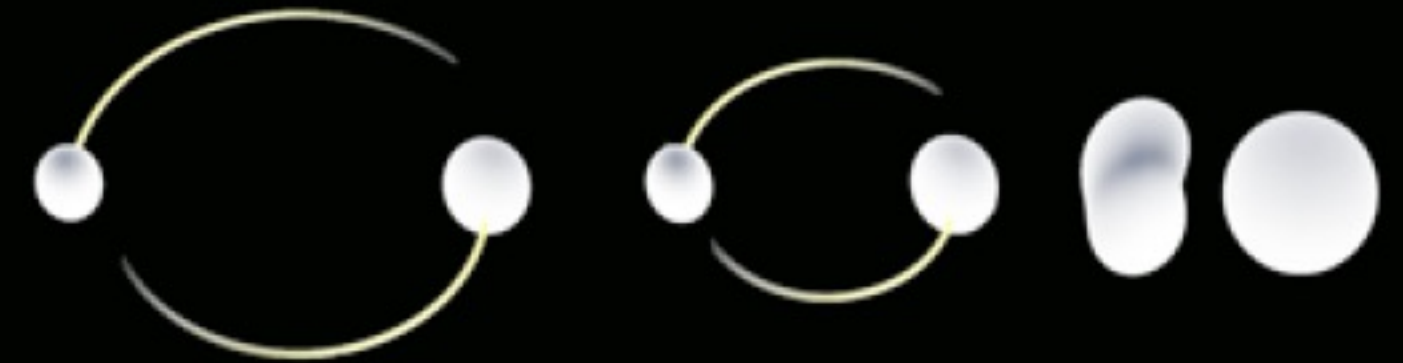
Albert Einstein
(1879–1955)

Sol. de las Ecs. de Einstein:

- ¿Geometría del espacio-tiempo en el vacío?
- ¿Ausencia de fuentes de energía o materia?

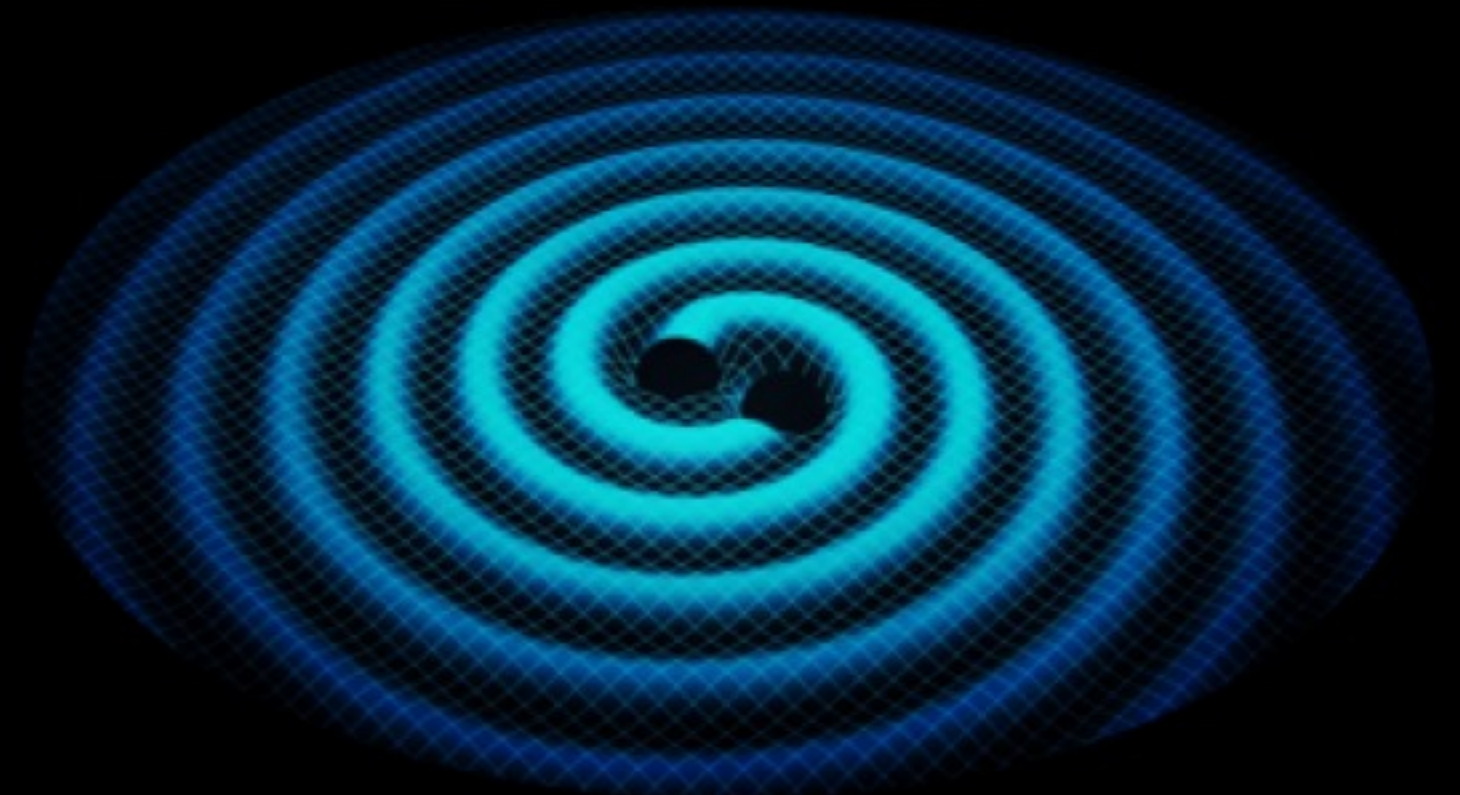


Ondas gravitacionales:
“Oscilaciones del espacio-tiempo por mov. de masa.”



Inspirar

Fusión

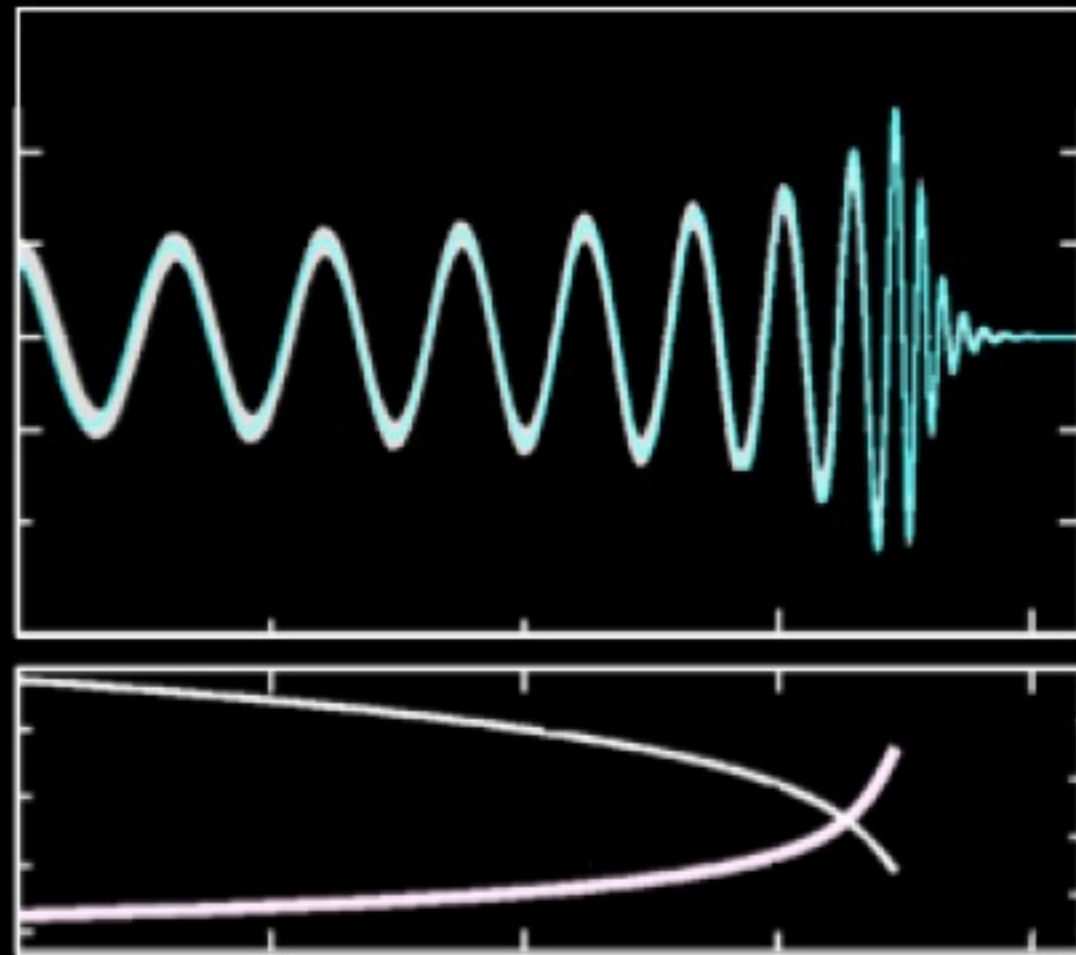


La Relatividad General

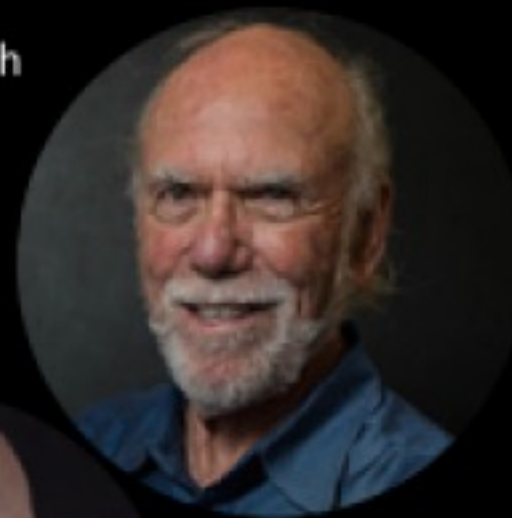
Las ondas gravitacionales

3

2.3



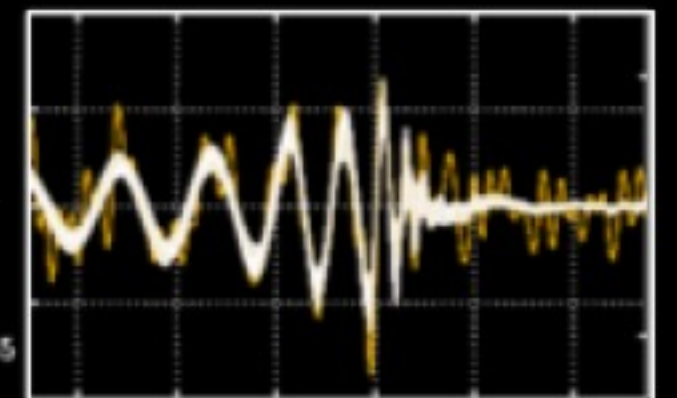
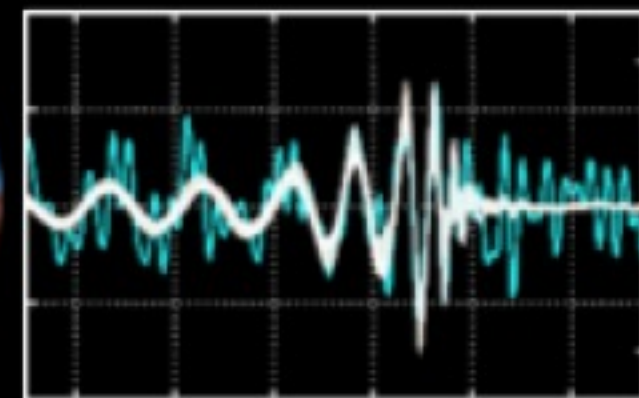
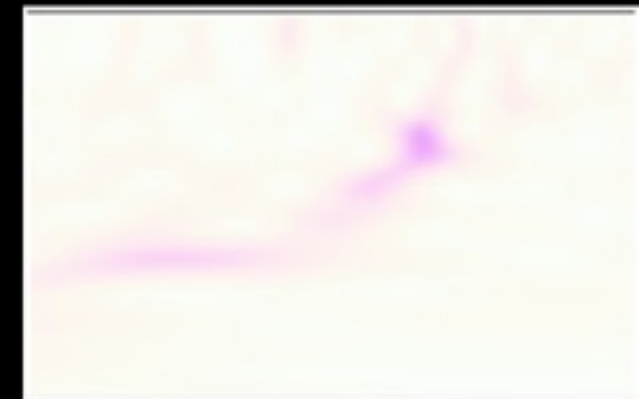
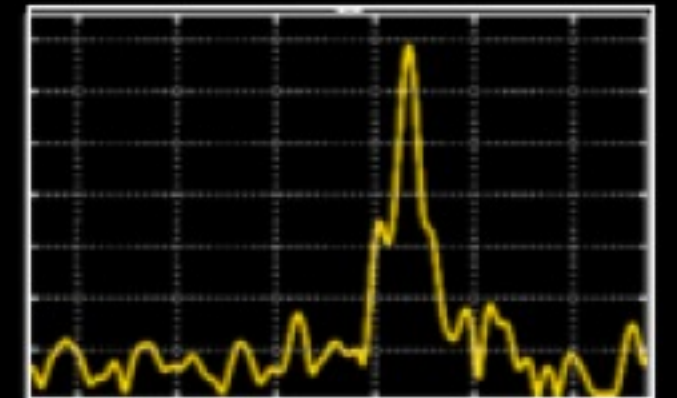
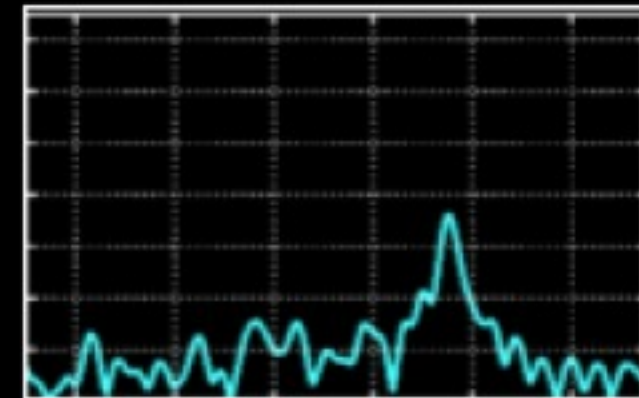
Barry Barish
(1936)



Kip Thorne
(1940)



Rainer Weiss
(1932)



La Relatividad General

Las lentes gravitacionales

3

2.4



Albert Einstein
(1879–1955)



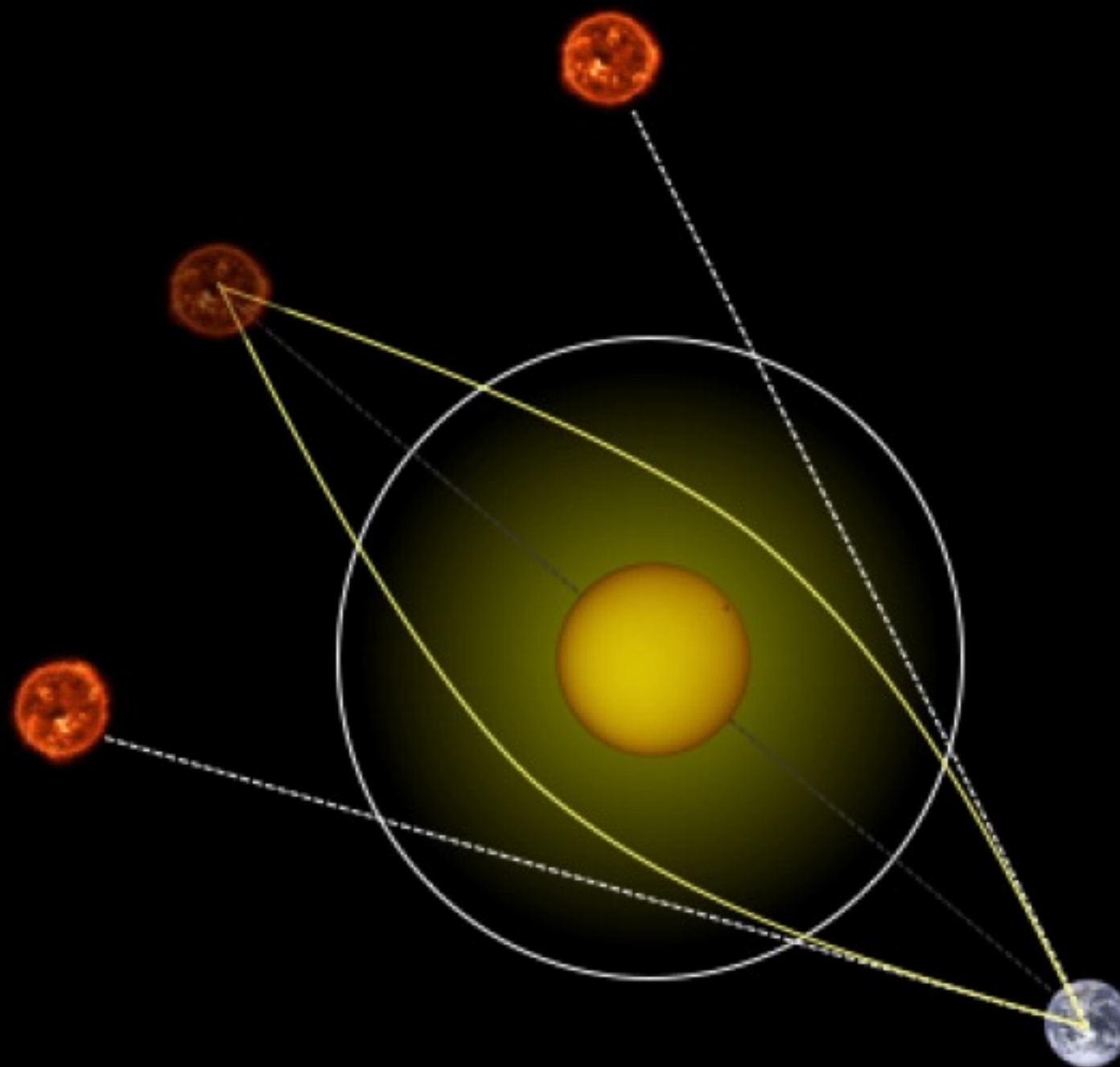
Orest Khvolson
(1852–1934)

Sol. de las Ecs. de Einstein:

- Los cuerpos se mueven en geodésicas.
- Fotones (energía) como cuerpos (materia) sienten el campo grav.



Lentes gravitacionales:
"Deflexión de la luz por curvatura del espacio-tiempo."

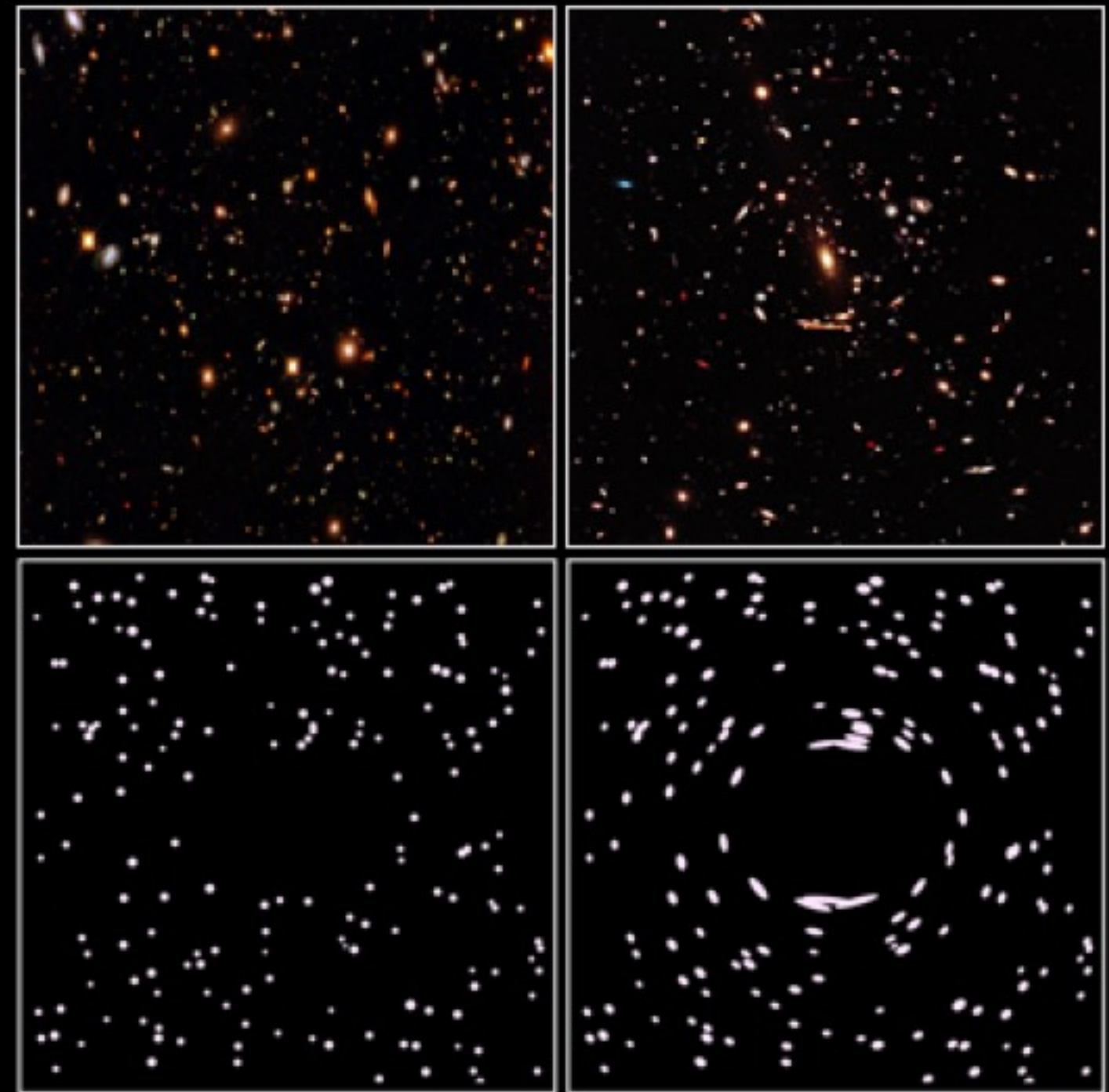


La Relatividad General

3

Las lentes gravitacionales

2.4



4 La Física de Partículas

- 1 El Universo como gran acelerador
- 2 El problema de la gravedad
- 3 Una Teoría para gobernarlas a todas

	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

Una nueva tabla periódica

Partículas de materia

u, d, c, s, t, b

$e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$

- Fermiones: $s = 1/2$.
- Leptones y quarks.

Portadores de fuerzas

g, γ, Z, W^-, W^+

- Bosones: $s = 0$.

Partícula de Higgs

H

- Bosón: $s = 1$.

3 familias. 6 sabores.

Cargas: color, isospin, hipercarga.

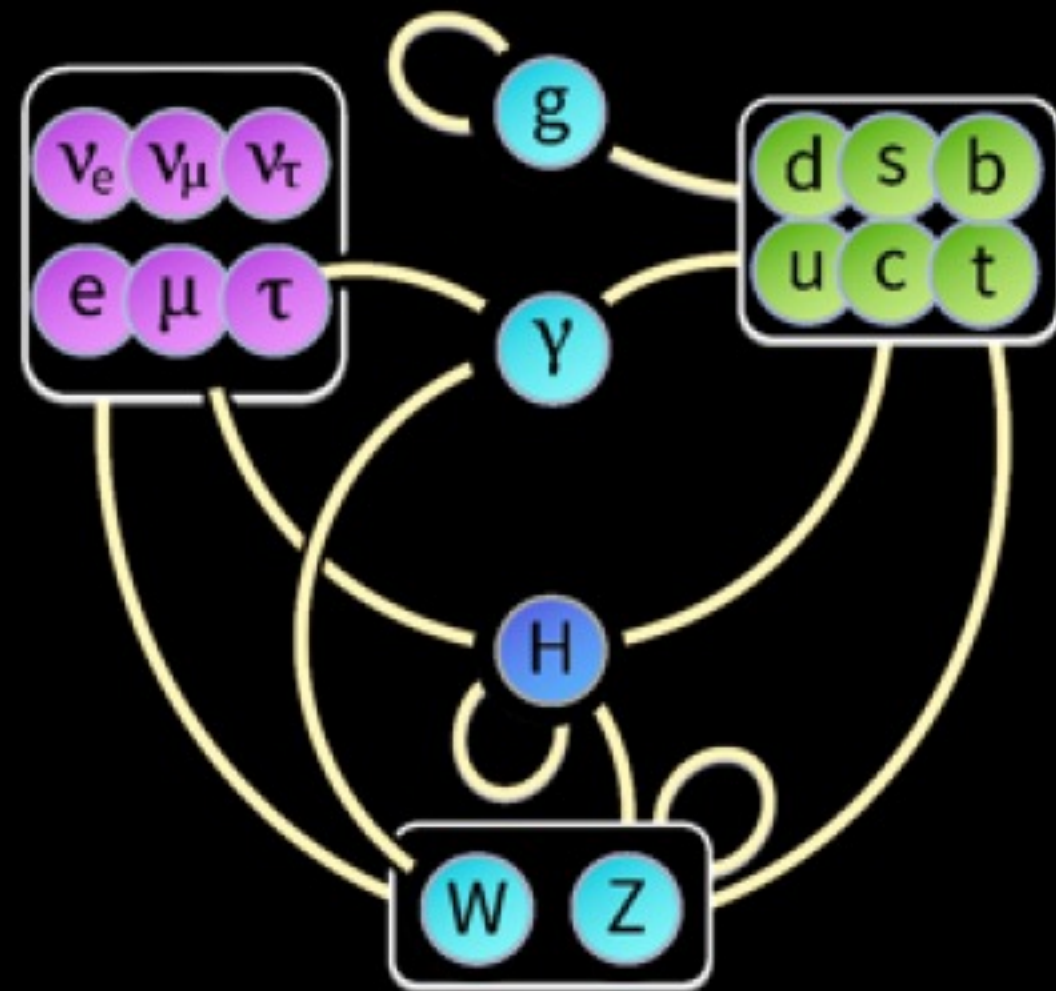
Cond. Fermi-Dirac. Ppio. Exclusión ✓

Interacciones: fuerte y electrodébil.

Cond. Bose-Einstein. Ppio. Exclusión ✗

Mecanismo de Higgs.

- Descubierta en el CERN (2012).



Una nueva tabla periódica

Partículas de materia

u, d, c, s, t, b

$e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$

- Fermiones: $s = 1/2$.
- Leptones y quarks.

Portadores de fuerzas

g, γ, Z, W^-, W^+

- Bosones: $s = 0$.

Partícula de Higgs

H

- Bosón: $s = 1$.

3 familias. 6 sabores.

Cargas: **color**, **isospin**, **hipercarga**.

Cond. Fermi-Dirac. Ppio. Exclusión ✓

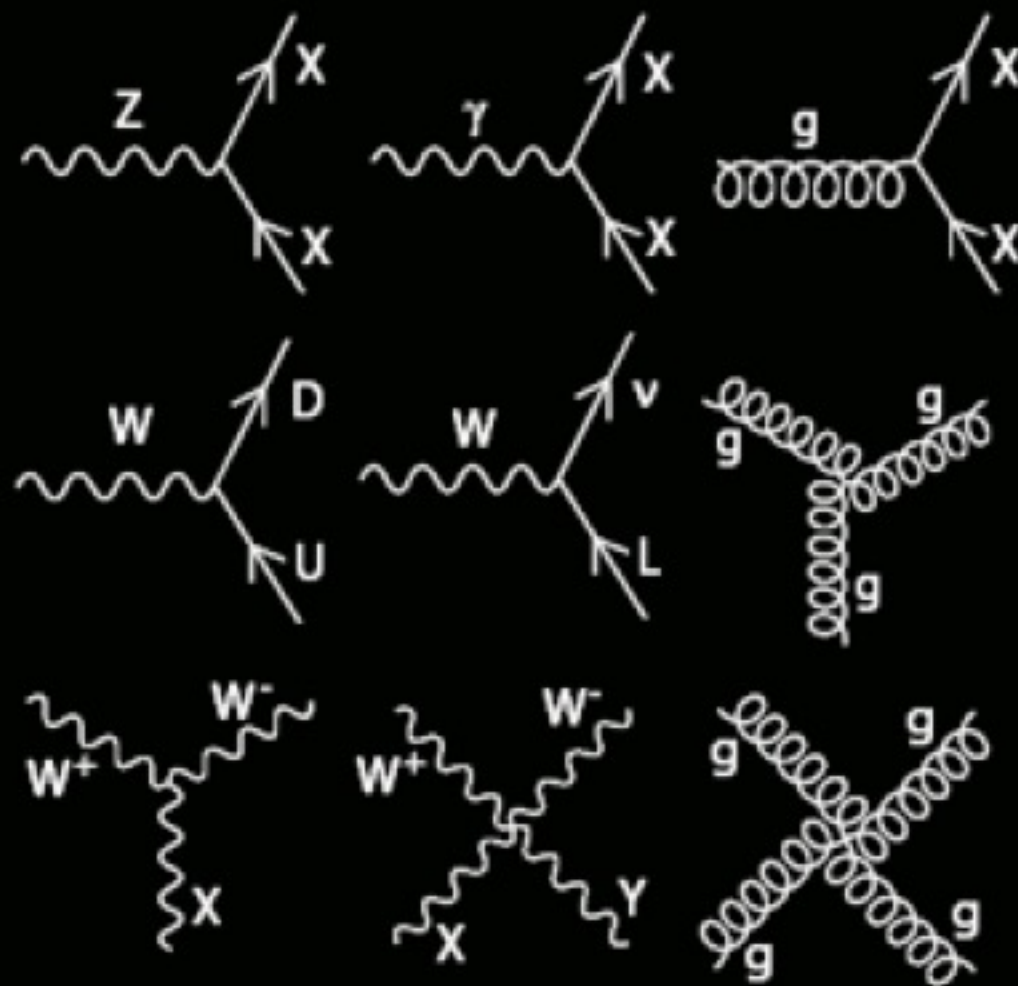
Interacciones: **fuerte** y **electrodébil**.

Cond. Bose-Einstein. Ppio. Exclusión ✗

Mecanismo de Higgs.

- Descubierta en el CERN (2012).

Una nueva tabla periódica



Partículas de materia

u, d, c, s, t, b

e, ν_e , μ , ν_μ , ν , τ , ν_τ

- Fermiones: $s = 1/2$.

- Leptones y quarks.

Portadores de fuerzas

g, γ , Z, W^- , W^+

- Bosones: $s = 0$.

Partícula de Higgs

H

- Bosón: $s = 1$.

3 familias. 6 sabores.

Cargas: color, isospin, hipercarga.

Cond. Fermi-Dirac. Ppio. Exclusión ✓

Interacciones: fuerte y electrodébil.

Cond. Bose-Einstein. Ppio. Exclusión ✗

Mecanismo de Higgs.

- Descubierto en el CERN (2012).

La acción del Modelo Estándar

Gauge **electromagnético, débil y fuerte:**

Interacciones (EM, D, F) con leptones:

Masas de e, μ, τ:

Masas de ν_e, ν_μ, ν_τ :

Interacciones (EM, D, F) con quarks:

Masas de d, s, b:

Masas de u, c, t:

Interacciones, v.e.v. y masa del H:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{8} \text{tr}(\mathbf{W}_{\mu\nu} \mathbf{W}^{\mu\nu}) - \frac{1}{2} \text{tr}(\mathbf{G}_{\mu\nu} \mathbf{G}^{\mu\nu}) \\
 & + (\bar{\nu}_L, \bar{e}_L) \bar{\sigma}^\mu i D_\mu \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L + \bar{u}_R \sigma^\mu i D_\mu u_R + \bar{d}_R \sigma^\mu i D_\mu d_R + h.c. \\
 & - \frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L) \phi M^e e_R + \bar{e}_R \bar{M}^e \bar{\phi} \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L \right] \\
 & - \frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{e}_L, \bar{\nu}_L) \phi^* M^\nu \nu_R + \bar{\nu}_R \bar{M}^\nu \phi^T \begin{pmatrix} -e \\ \nu \end{pmatrix}_L \right] \\
 & + (\bar{u}_L, \bar{d}_L) \bar{\sigma}^\mu i D_\mu \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L + \bar{u}_R \sigma^\mu i D_\mu u_R + \bar{d}_R \sigma^\mu i D_\mu d_R + h.c. \\
 & - \frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{u}_L, \bar{d}_L) \phi M^d d_R + \bar{d}_R \bar{M}^d \bar{\phi} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \right] \\
 & - \frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{d}_L, \bar{u}_L) \phi^* M^u u_R + \bar{u}_R \bar{M}^u \phi^T \begin{pmatrix} -d \\ u \end{pmatrix}_L \right] \\
 & + (D_\mu \phi)^\dagger D^\mu \phi - m_h^2 [\bar{\phi} \phi - v^2/2]^2 / 2v^2
 \end{aligned}$$

La Física de Partículas

5

El Universo como gran acelerador

1



Energía máxima:

$$E_{SCM,max} = 14 \text{ TeV} = 2.2 \times 10^{-6} \text{ J}$$



Ventajas:

Detectación controlada.

Alto número de eventos.

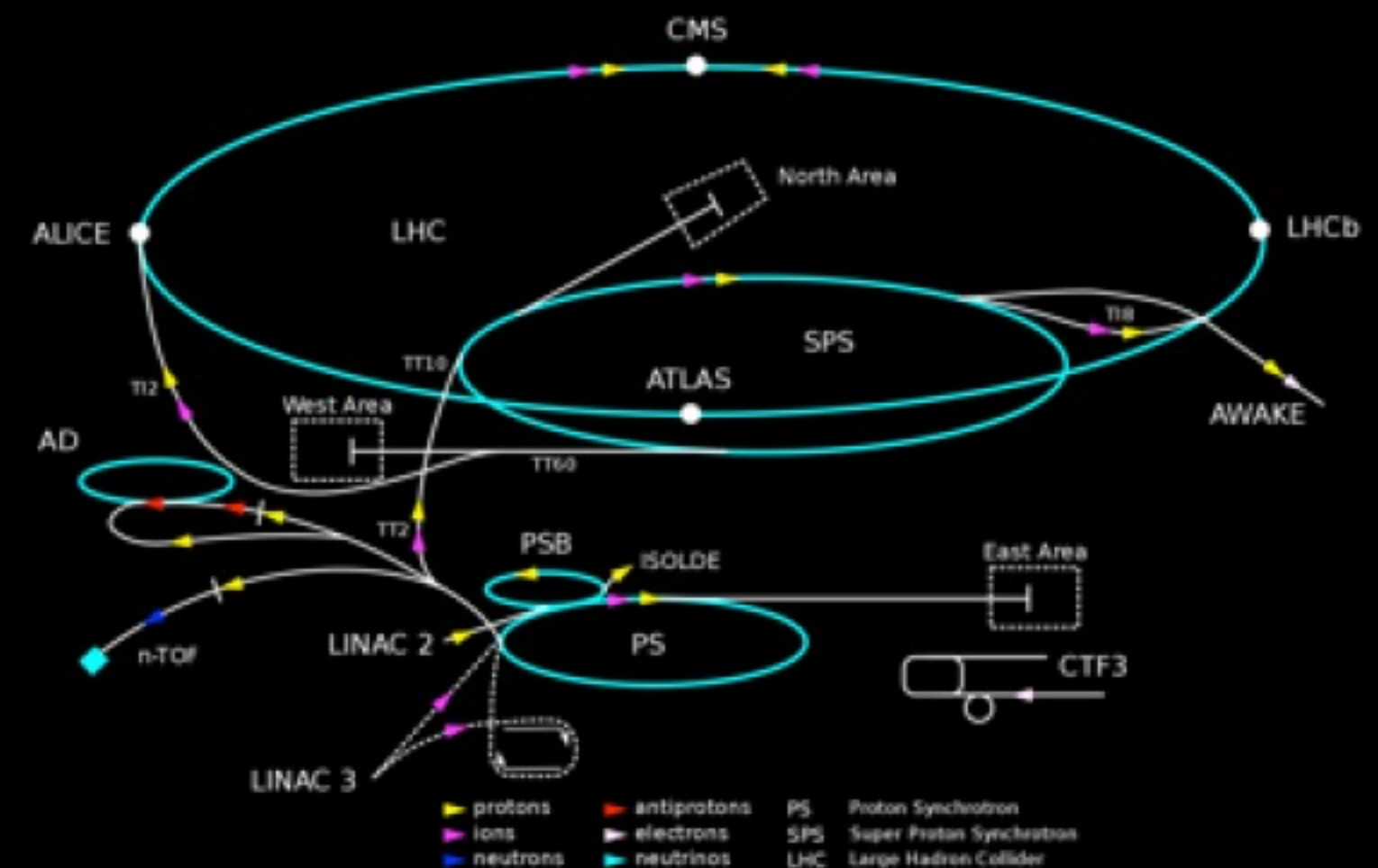
Posibilidad de grandes detectores.



Desventajas:

Rango limitado en energía.

Acelerador de partículas (CERN)





Energía máxima:

$$E_{SL,max} = 10^9 \text{ TeV} = 160 \text{ J}$$



Ventajas:

Rango amplio de energías.



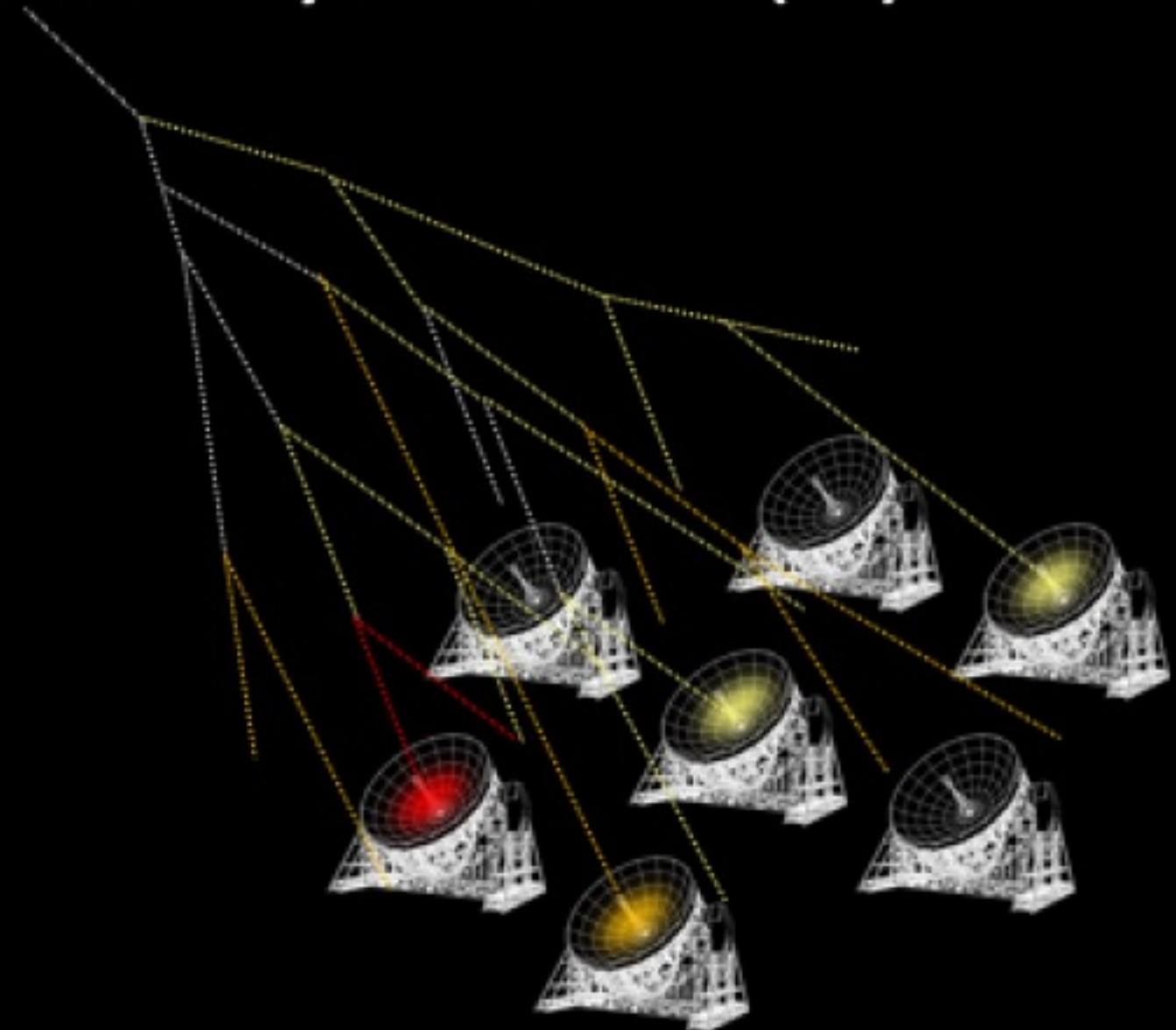
Desventajas:

Detección impredecible.

Bajo número de eventos.

Imp. de grandes detectores.

Obs. de rayos cósmicos (PA)



La Física de Partículas

4

El problema de la gravedad

2

Fís. Clásica

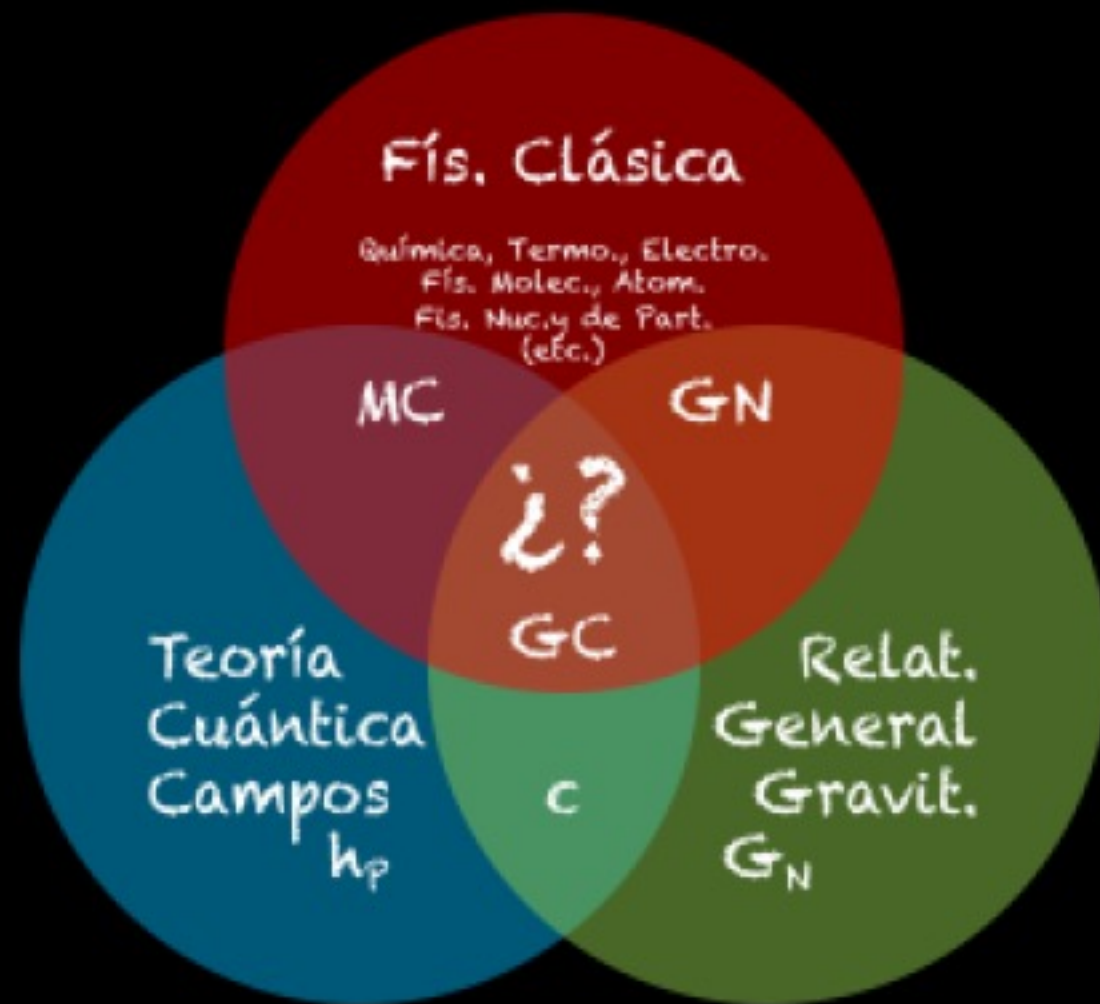
Química, Termo., Electro.
Fís. Molec., Atom.
Fís. Nuc. y de Part.
(etc.)

La Física de Partículas

4

El problema de la gravedad

2

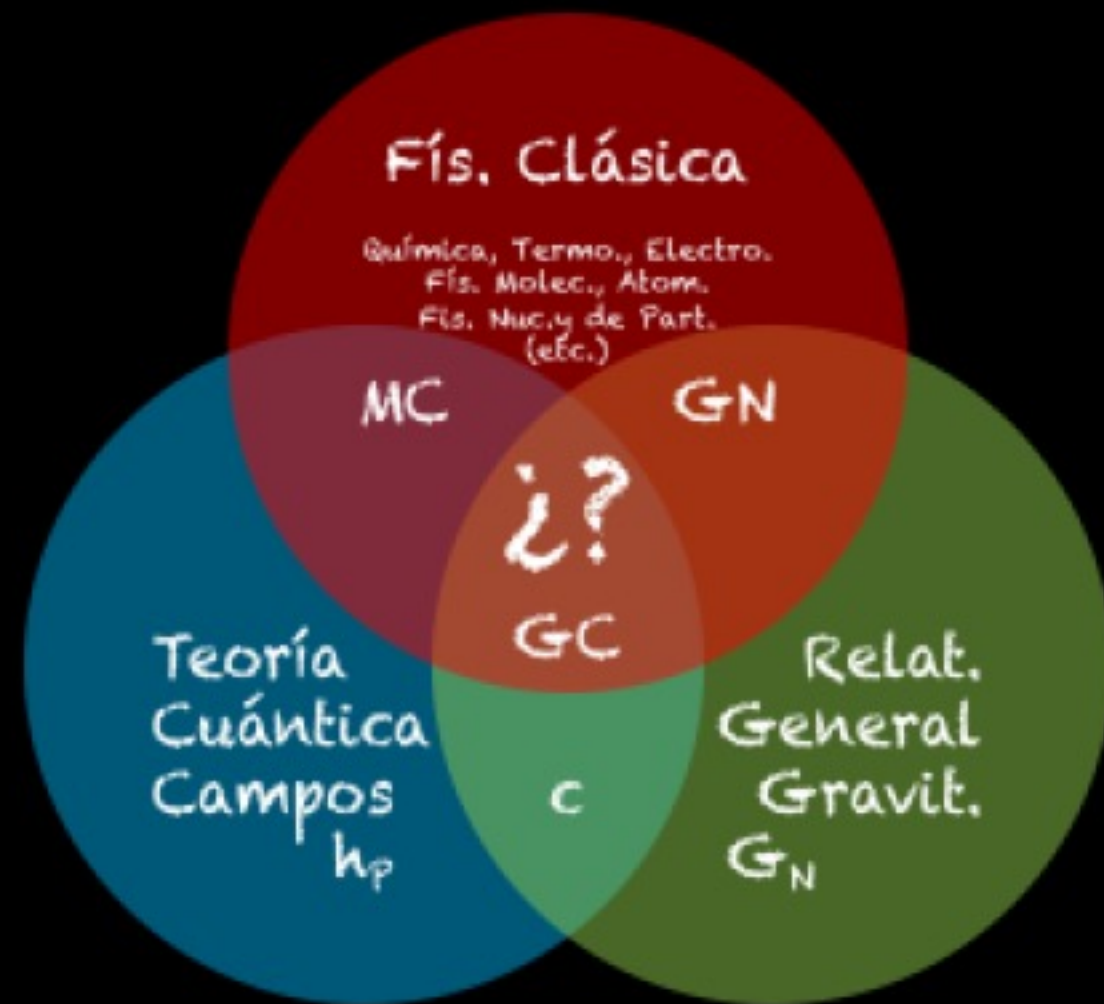


La Física de Partículas

4

El problema de la gravedad

2



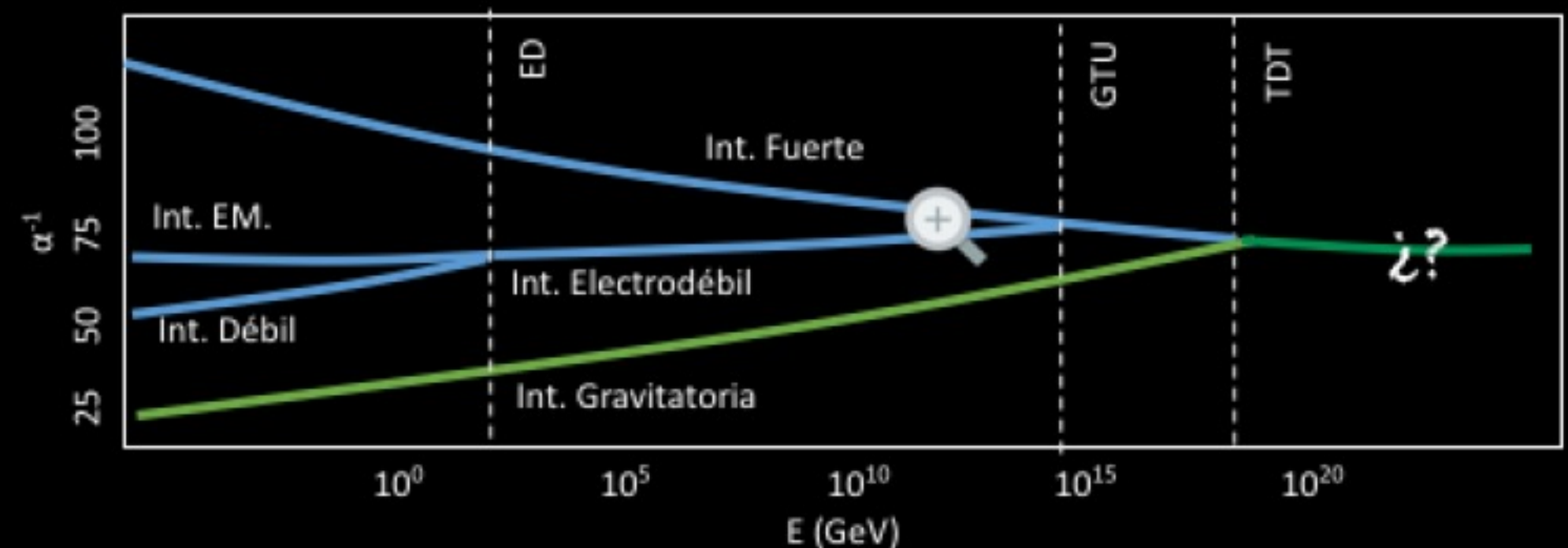
¿La peor predicción de la historia?

Pre.: $r_v \approx 1 \times 10^{74} \text{ GeV}^4 \approx 3 \times 10^{91} \text{ g/cm}^3$

Obs.: $r_v \approx r_c \approx 3 \times 10^{-11} \text{ GeV}^4 \approx 1 \times 10^{-29} \text{ g/cm}^3$



¡120 órdenes de magnitud de diferencia!



La Física de Partículas

4

El problema de la gravedad

3



Relat. General (Gravitación)



Teoría Cuántica (de Campos)



- Escala cosmológicas.
 - Comienzo del Big Bang.
 - Ondas gravitacionales.
 - Estrellas de neutrones.
 - Agujeros negros, etc.
- Fenómenos gravitatorios:
 $\uparrow \Delta t, \uparrow \Delta x, \downarrow \Delta E, \downarrow \Delta p$.
- Teoría no renormalizable.
Habría ∞ parámetros libres.

- Escalas subatómicas.
 - Moléculas, Átomos, núcleos.
 - Colisiones de partículas.
 - Condensados, superestados.
 - Rayos cósmicos, etc.
- Fenómenos cuánticos:
 $\downarrow \Delta t, \downarrow \Delta x, \uparrow \Delta E, \uparrow \Delta p$.
- Teoría si renormalizable.
Cálculos con resultado ∞ .



Teoría del Todo (Gravedad Cuántica)



- Unifica (1) la Teoría Cuántica de Campos, con (2) la Gravedad:
Teoría de Campo Unificado.
- Cuantiza los campos...
Y cuantiza el espacio-tiempo.
- Abarca todos los fenómenos:
 $\uparrow \Delta t, \uparrow \Delta x, \uparrow \Delta E, \uparrow \Delta p.$
- Teoría si renormalizable.
Cálculos con resultado ∞ .

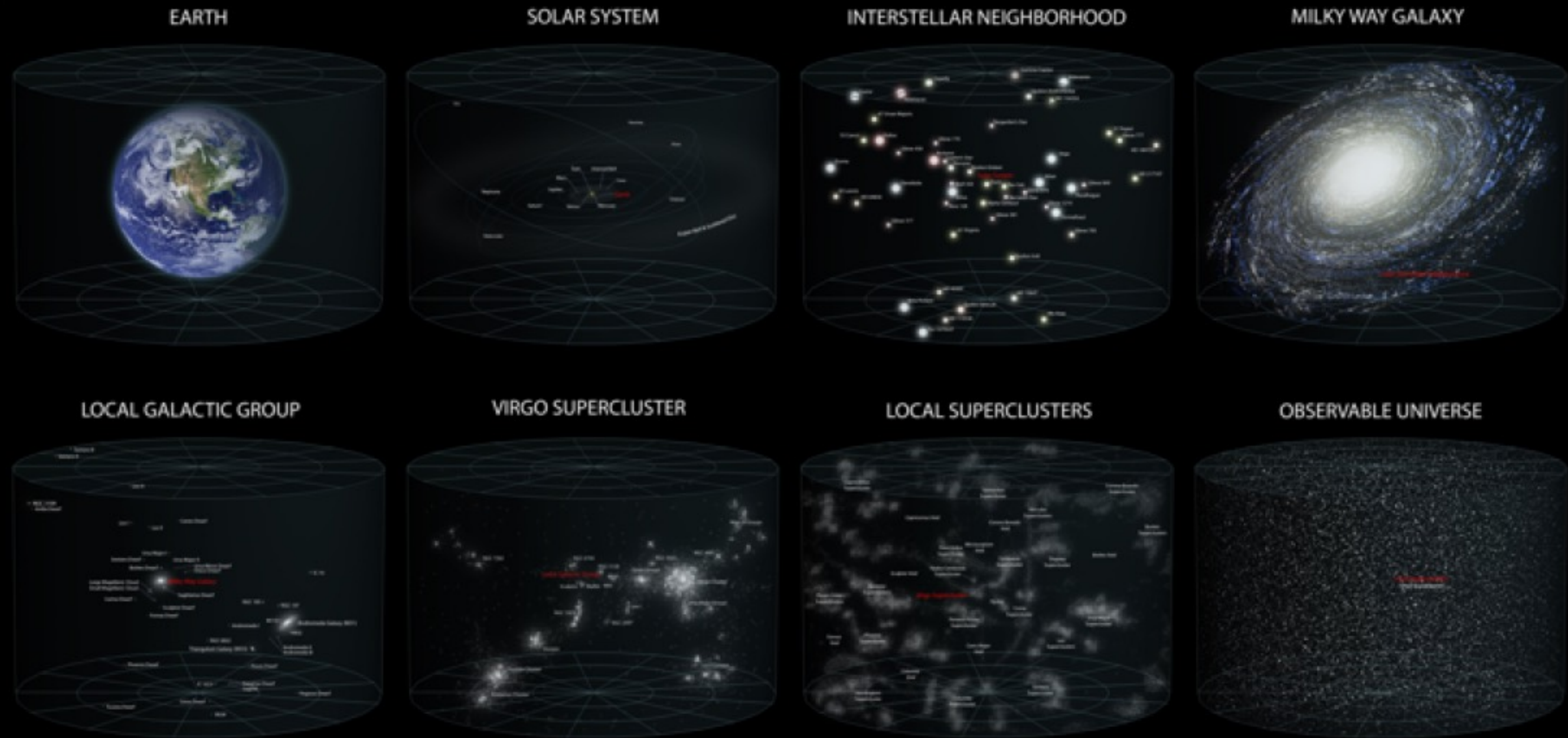
5 La Cosmología moderna

- 1 El Universo en cifras
- 2 La distribución de materia
- 3 Homogeneidad e isotropía
- 4 La geometría del Universo

- 5 El contenido del Universo
 - 1 La materia bariónica
 - 2 La materia oscura
 - 3 La energía oscura

La Cosmología moderna

5



Contenido = Radiación + Materia + Energía



$$R_{\text{OBS}} \approx 10^{11} \text{ ly} \approx 10^{27} \text{ m}$$
$$V_{\text{OBS}} \approx 10^{33} \text{ ly}^3 \approx 10^{80} \text{ m}^3$$
$$M_{\text{OBS}} \approx 10^{21} M_{\text{S}} \approx 10^{53} \text{ kg}$$



$$t_0 = 13.8 \times 10^9 \text{ yr}$$
$$\rho_0 = 4.9 \times 10^{-31} \text{ g cm}^{-3}$$
$$T_0 = 2.7 \text{ K}$$
$$K_0 = 0.000 \pm 0.004$$

$$\Omega_{0,\text{R}} = 10^{-4}\%$$
$$\Omega_{0,\text{MB}} = 4.90\%$$
$$\Omega_{0,\text{MO}} = 26.8\%$$
$$\Omega_{0,\text{EO}} = 68.3\%$$



Estructura a gran escala

Las galaxias se agrupan en:
Cúmulos, filamentos, muros y vacíos.

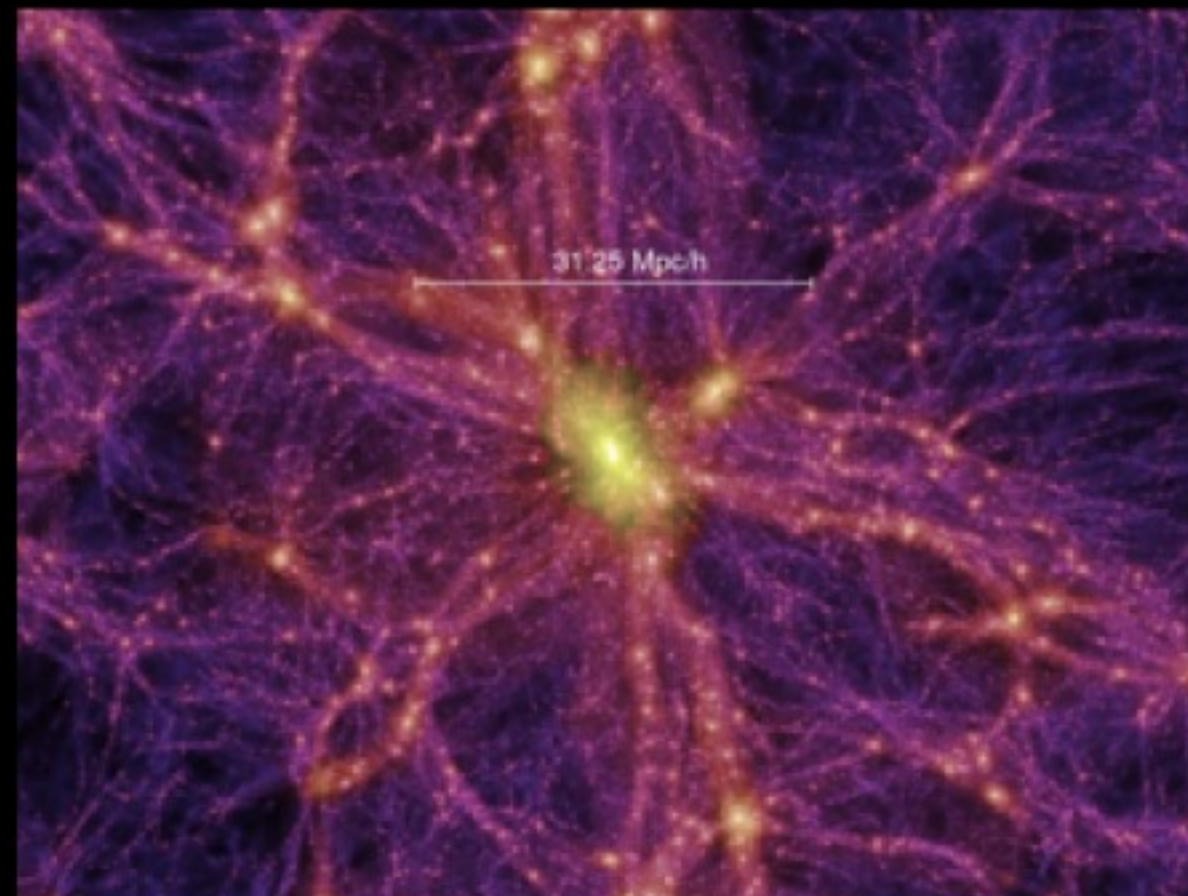
Existe una historia rica de:
Agrupamiento, colisiones y fusiones.

$L \ll 150$ Mpc Estructura fractal.

$L \approx 120$ Mpc Osc. bariónicas acústicas.

$L \approx 150$ Mpc Escala de homogeneidad.

$L > 150$ Mpc Estructura homogénea.



$z = 0.0$

$t = 13.6$ Gyr

La Cosmología moderna

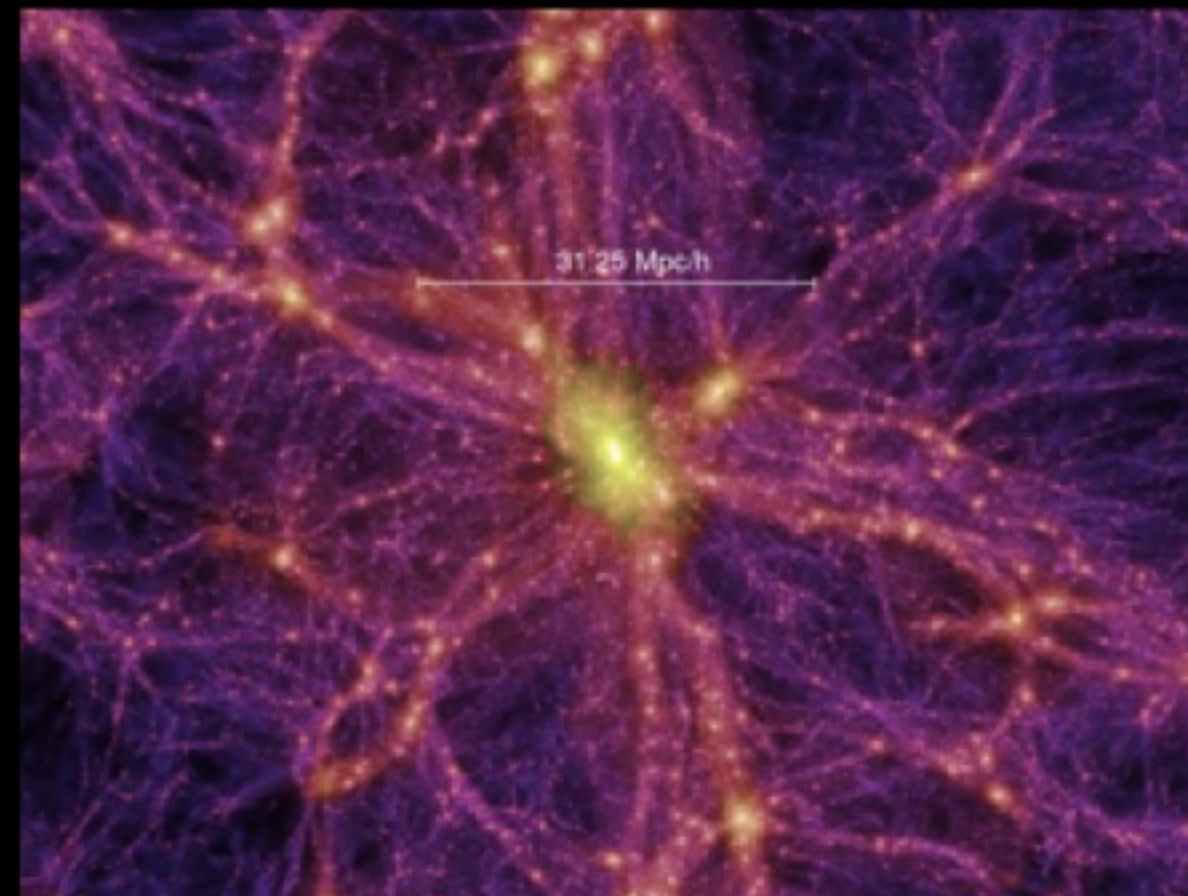
5

La distribución de materia

2



Estructura a gran escala



$z = 0.0$

$t = 13.6 \text{ Gyr}$

Parámetros cosmológicos (Planck 2015+BAO+SN+ H_0)

$\Omega_b h^2$	0.02227	0.0002	0.90
$\Omega_c h^2$	0.1184	0.0012	1.0
$100\theta^*$	1.04106	0.00041	0.039
τ	0.067	0.013	19
$\ln(10^{10} A_s)$	3.064	0.024	0.78
n_s	0.9681	0.0044	0.45
T_0 [K]	2.7255	0.0006	0.022

El Principio Cosmológico

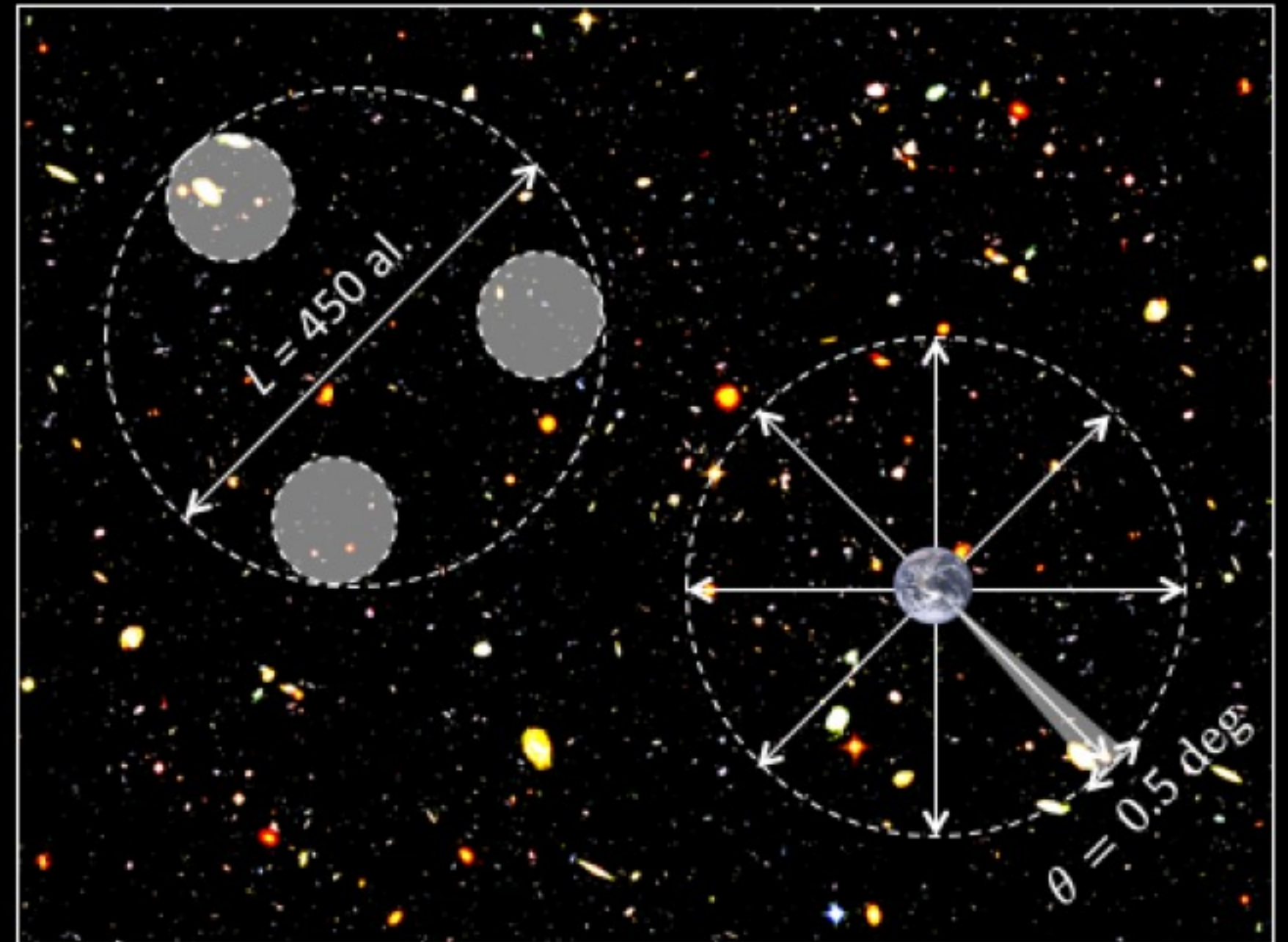
“La Tierra no ocupa un lugar particularmente interesante en el Universo”.

- Homogeneidad: ($L > 450 \text{ lyr}$).

El campo densidad, velocidad, temperatura etc. del universo **se ve (estadísticamente) igual a escalas suficientemente grandes.**

- Isotropía: ($\theta > 0.5 \text{ deg}$).

Dichas propiedades son, vistas desde la Tierra, en cualquier **dirección las mismas para separaciones suficientemente grandes.**



La Cosmología moderna

5

La geometría del Universo

4



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Métrica = Homogeneidad + Isotropía

Métrica FRWL (Friedmann–Robertson–Walker–Lemaître):

$$ds^2 = -d\tau^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 \left(\frac{1}{1 - kr^2} dr^2 + r^2 d\Omega^2 \right)$$

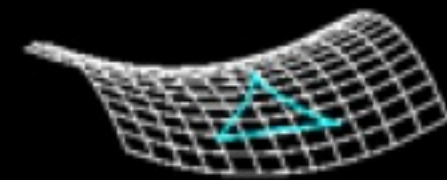
$a(t) \in (0,1)$

Factor de escala.

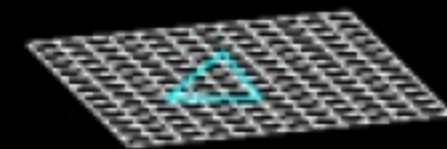
$k \in \{-1, 0, +1\}$

Curvatura del Universo.

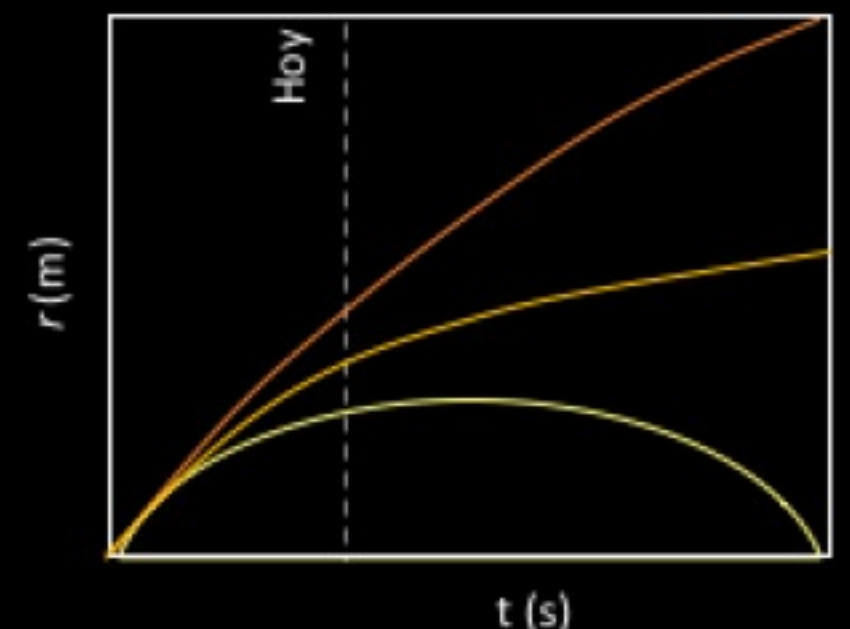
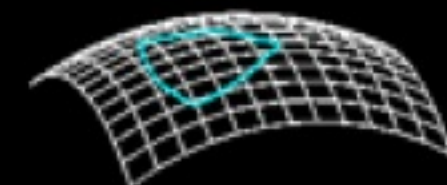
❖ Abierto.
 $k = +1, \Omega_0 < 1$



❖ Plano.
 $k = 0, \Omega_0 = 1$



❖ Cerrado.
 $k = -1, \Omega_0 > 1$



La Cosmología moderna

5

La geometría del Universo

4



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Métrica = Homogeneidad + Isotropía

Métrica FRWL (Friedmann–Robertson–Walker–Lemaître):

$$ds^2 = -d\tau^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 \left(\frac{1}{1 - kr^2} dr^2 + r^2 d\Omega^2 \right)$$

$$a(t) \in (0,1)$$

Factor de escala.

$$k \in \{-1, 0, +1\}$$

Curvatura del Universo.

$$d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi$$

Conexión con Relatividad General: ¡métrica FRWL $\rightarrow g_{\mu\nu}$!

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad dx^\mu = (dt, dr, d\theta, d\phi)$$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -c^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{a(t)}{1 - kr^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a(t)^2 r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a(t)^2 r^2 \sin^2\theta \end{pmatrix}$$

La Cosmología moderna

5

La geometría del Universo

4



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Las Ecuaciones de Friedmann

A partir de las Ecs. De Einstein:

(Geom. ↔ Mat./Ene.)

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

Se deducen las Ecs. de Friedman:

(Evolución del Universo)

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{kc^2}{a^2} - \frac{\Lambda c^2}{3} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

$$\frac{2\ddot{a}}{a} + \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{kc^2}{a^2} - \Lambda c^2 = -\frac{8\pi G p}{c^2}$$



¡Suficiente para determinar el ritmo de expansión!

La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$):

$$\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$$

$$\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$$

❖ Materia (B+O):

$$\Omega_M = \Omega_{MB} + \Omega_{MO}$$

$$\Omega_M = \Omega_{0,M} a^{-3}$$

❖ Curvatura:

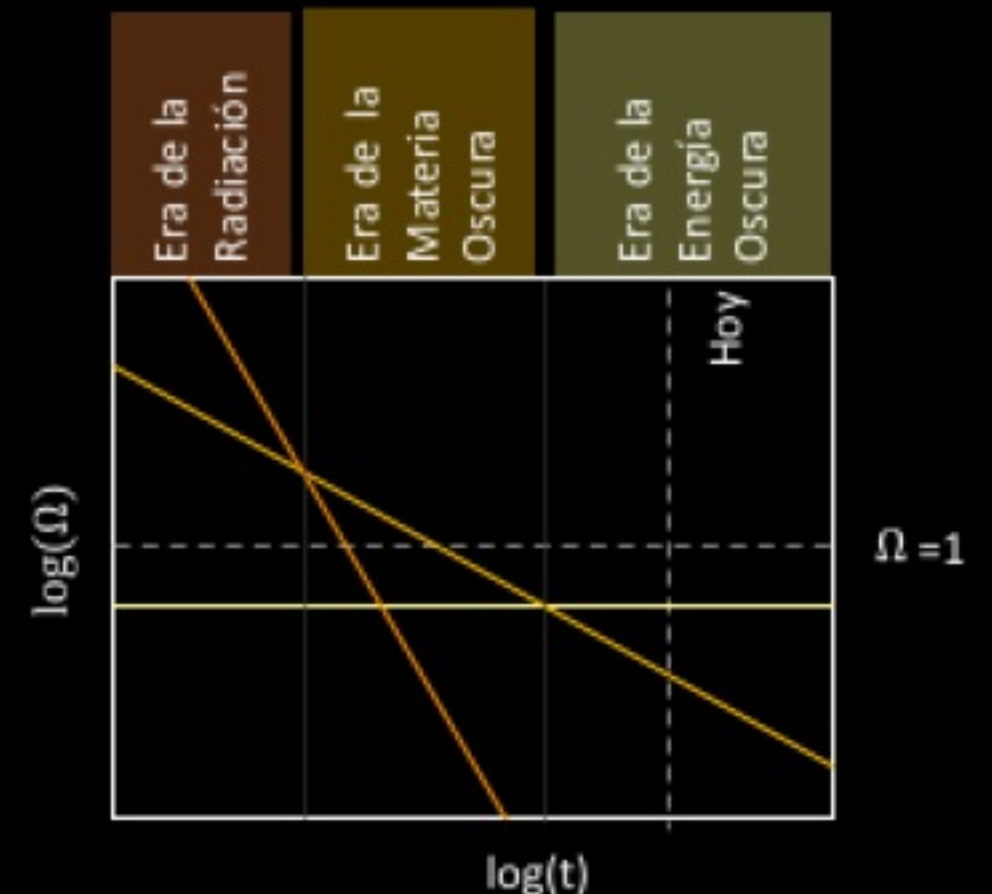
$$\Omega_K$$

$$\Omega_K = \Omega_{0,K} a^{-2}$$

❖ Energía Oscura:

$$\Omega_\Lambda$$

$$\Omega_\Lambda = \Omega_{0,\Lambda} a^{-3}$$



La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$):

$$\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$$
$$\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$$



La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$):

$$\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$$
$$\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$$



La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

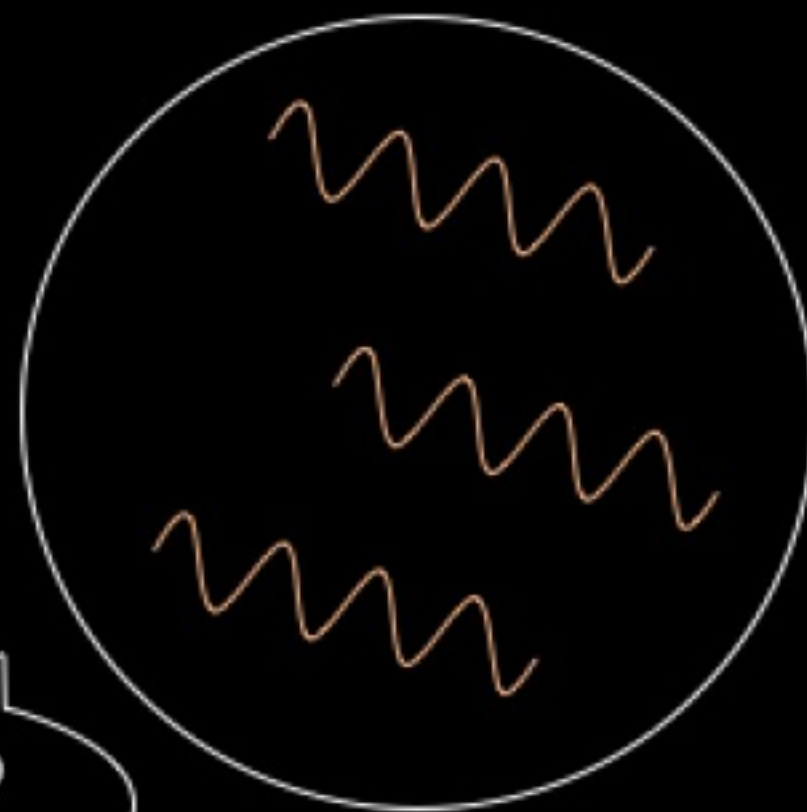
$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$):

$$\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$$

$$\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$$

$$1 + z = \frac{\lambda_0}{\lambda_E} = \frac{E_E}{E_0}$$



¡Corrimiento
al rojo!

La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$):

$$\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$$
$$\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$$

❖ Materia (B+O):

$$\Omega_M = \Omega_{MB} + \Omega_{MO}$$
$$\Omega_M = \Omega_{0,M} a^{-3}$$



La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$):

$$\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$$
$$\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$$

❖ Materia (B+O):

$$\Omega_M = \Omega_{MB} + \Omega_{MO}$$
$$\Omega_M = \Omega_{0,M} a^{-3}$$



La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

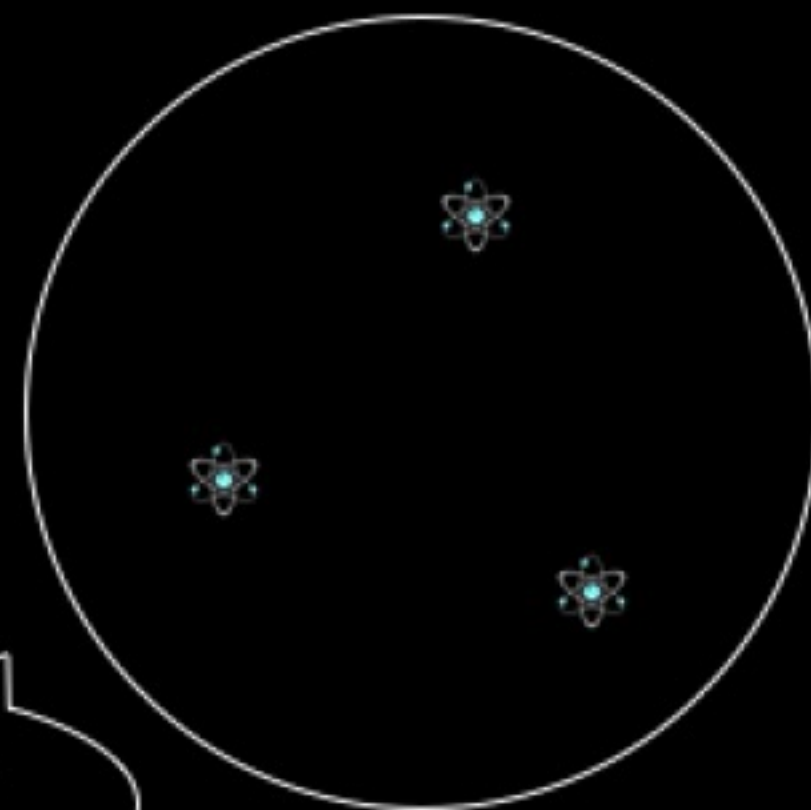
$$\rho = \frac{M(\text{const.})}{V(\text{var.})}$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$):

$$\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$$
$$\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$$

❖ Materia (B+O):

$$\Omega_M = \Omega_{MB} + \Omega_{MO}$$
$$\Omega_M = \Omega_{0,M} a^{-3}$$



¡Dilución de la materia!

La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$):

$$\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$$
$$\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$$

❖ Materia (B+O):

$$\Omega_M = \Omega_{MB} + \Omega_{MO}$$
$$\Omega_M = \Omega_{0,M} a^{-3}$$

❖ Curvatura:

$$\Omega_K$$
$$\Omega_K = \Omega_{0,K} a^{-2}$$



La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$):

$$\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$$
$$\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$$

❖ Materia (B+O):

$$\Omega_M = \Omega_{MB} + \Omega_{MO}$$
$$\Omega_M = \Omega_{0,M} a^{-3}$$

❖ Curvatura:

$$\Omega_K$$
$$\Omega_K = \Omega_{0,K} a^{-2}$$



La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$):

$$\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$$

$$\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$$

❖ Materia (B+O):

$$\Omega_M = \Omega_{MB} + \Omega_{MO}$$

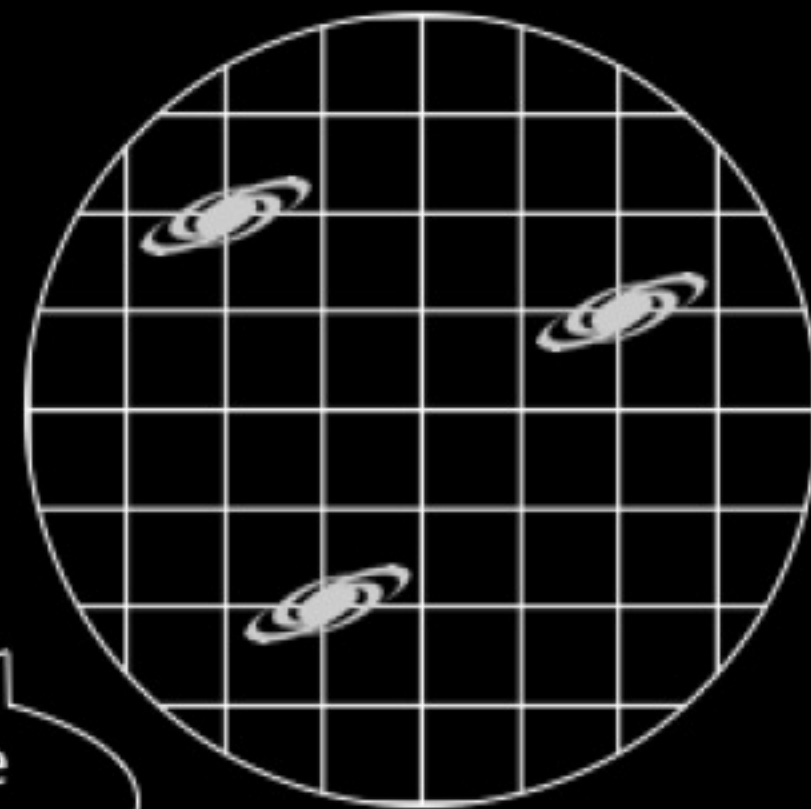
$$\Omega_M = \Omega_{0,M} a^{-3}$$

❖ Curvatura:

$$\Omega_K$$

$$\Omega_K = \Omega_{0,K} a^{-2}$$

$$v_{\text{REC}} = H_0 z$$



¡Recesión de las galaxias!

La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$): $\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$
 $\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$

❖ Materia (B+O): $\Omega_M = \Omega_{MB} + \Omega_{MO}$
 $\Omega_M = \Omega_{0,M} a^{-3}$

❖ Curvatura: Ω_K
 $\Omega_K = \Omega_{0,K} a^{-2}$

❖ Energía Oscura: Ω_Λ
 $\Omega_\Lambda = \Omega_{0,\Lambda} a^{-3}$



La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$): $\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$
 $\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$

❖ Materia (B+O): $\Omega_M = \Omega_{MB} + \Omega_{MO}$
 $\Omega_M = \Omega_{0,M} a^{-3}$

❖ Curvatura: Ω_K
 $\Omega_K = \Omega_{0,K} a^{-2}$

❖ Energía Oscura: Ω_Λ
 $\Omega_\Lambda = \Omega_{0,\Lambda} a^{-3}$



La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$$

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$):

$$\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$$

$$\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$$

❖ Materia (B+O):

$$\Omega_M = \Omega_{MB} + \Omega_{MO}$$

$$\Omega_M = \Omega_{0,M} a^{-3}$$

❖ Curvatura:

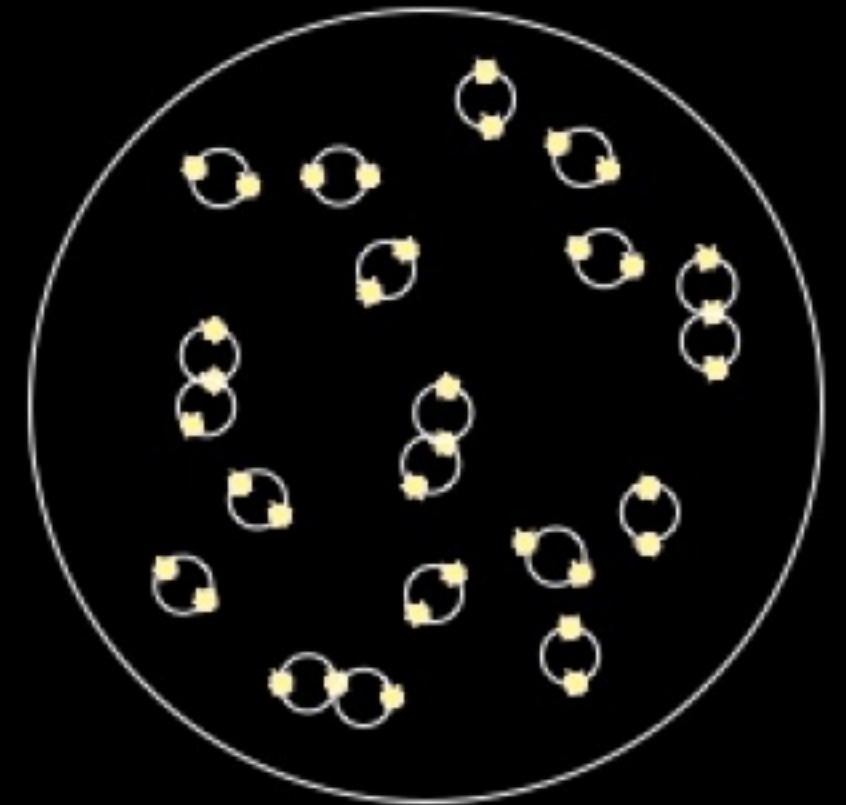
$$\Omega_K$$

$$\Omega_K = \Omega_{0,K} a^{-2}$$

❖ Energía Oscura:

$$\Omega_\Lambda$$

$$\Omega_\Lambda = \Omega_{0,\Lambda} a^{-3}$$



La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

El Universo contiene energía en forma de:

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda$$

$\rho_\Lambda = \text{const.}$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$):

$$\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$$

$$\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$$

❖ Materia (B+O):

$$\Omega_M = \Omega_{MB} + \Omega_{MO}$$

$$\Omega_M = \Omega_{0,M} a^{-3}$$

❖ Curvatura:

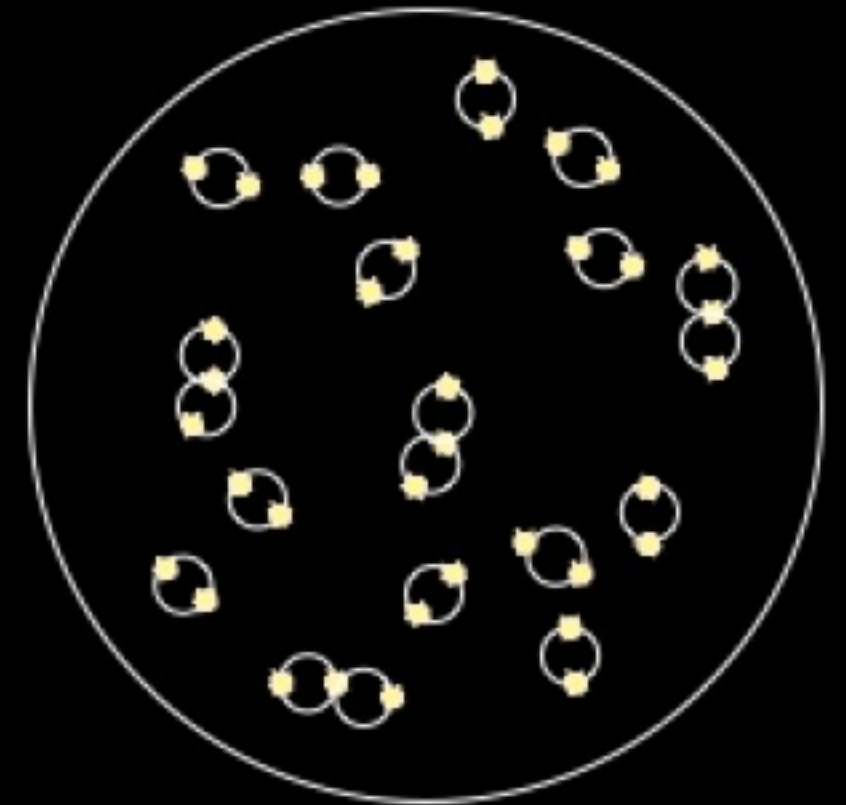
$$\Omega_K$$

$$\Omega_K = \Omega_{0,K} a^{-2}$$

❖ Energía Oscura:

$$\Omega_\Lambda$$

$$\Omega_\Lambda = \Omega_{0,\Lambda} a^{-3}$$



La Cosmología moderna

5

El contenido del Universo

5



Alexander Friedmann
(1888–1925)



Arthur Geoffrey Walker
(1909–2001)



Howard Robertson
(1903–1961)



Georges Lemaître
(1894–1966)

Contenido = Radiación + Materia + Energía

Regla de Suma Cósmica:

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda = \Omega_0 = 1$$

❖ Radiación ($\gamma + \nu$):

$$\Omega_R = \Omega_{R\gamma} + \Omega_{R\nu}$$

$$\Omega_R = \Omega_{0,R} a^{-4}$$

❖ Materia (B+O):

$$\Omega_M = \Omega_{MB} + \Omega_{MO}$$

$$\Omega_M = \Omega_{0,M} a^{-3}$$

❖ Curvatura:

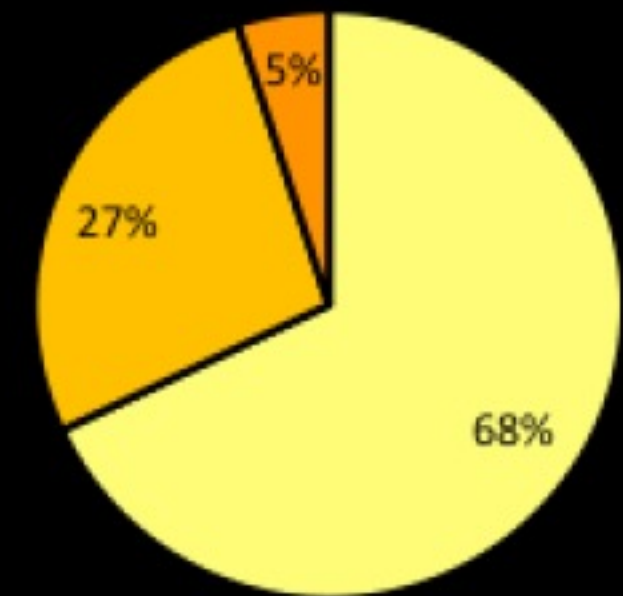
$$\Omega_K$$

$$\Omega_K = \Omega_{0,K} a^{-2}$$

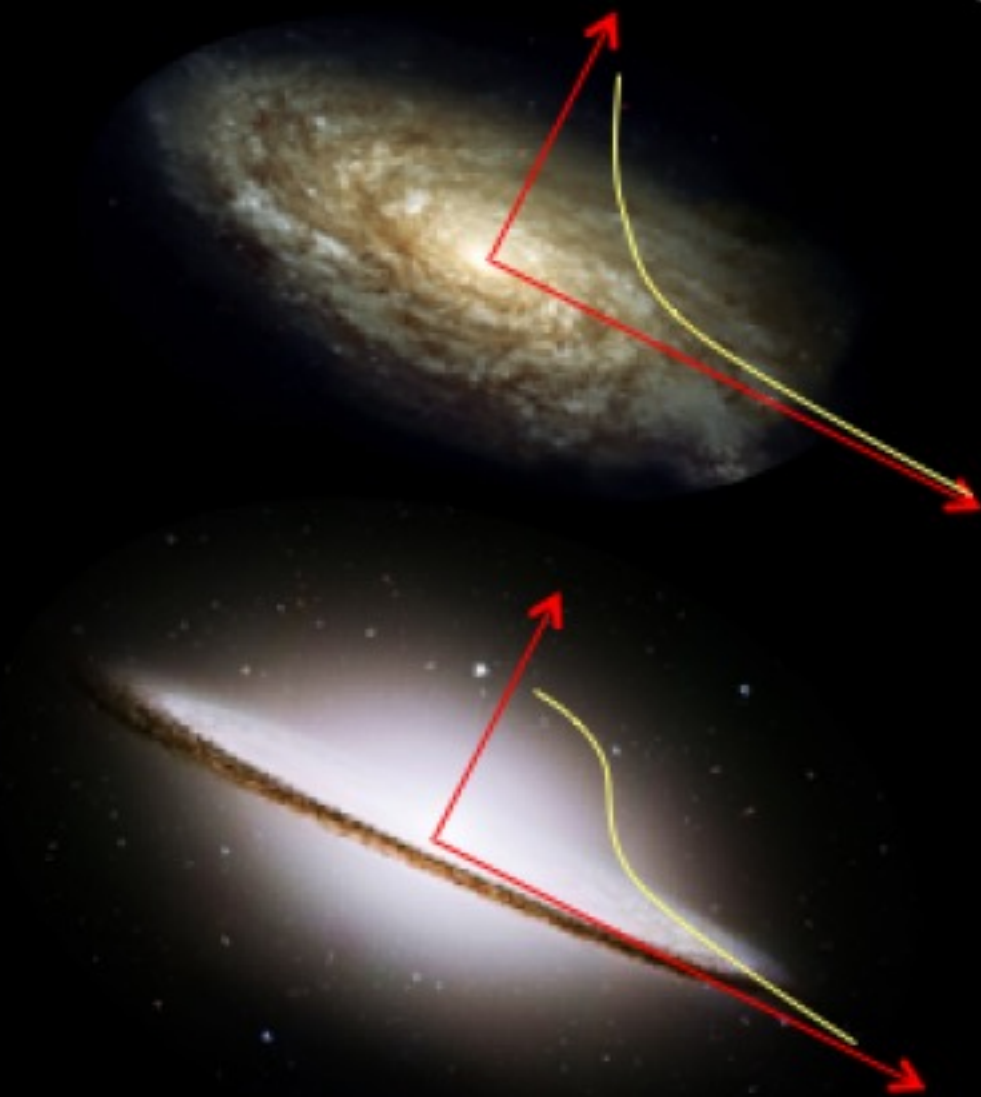
❖ Energía Oscura:

$$\Omega_\Lambda$$

$$\Omega_\Lambda = \Omega_{0,\Lambda} a^{-3}$$



Planck Collaboration 2015.



- Galaxias espirales: $I_S(r) = I_0 e^{-kr/r_h}$
Con forma de disco y mucha formación estelar.

- Galaxias elípticas: $I_S(r) = I_0 e^{-k((r/r_h)^n - 1)}$
Con forma de lente, y poca formación estelar.

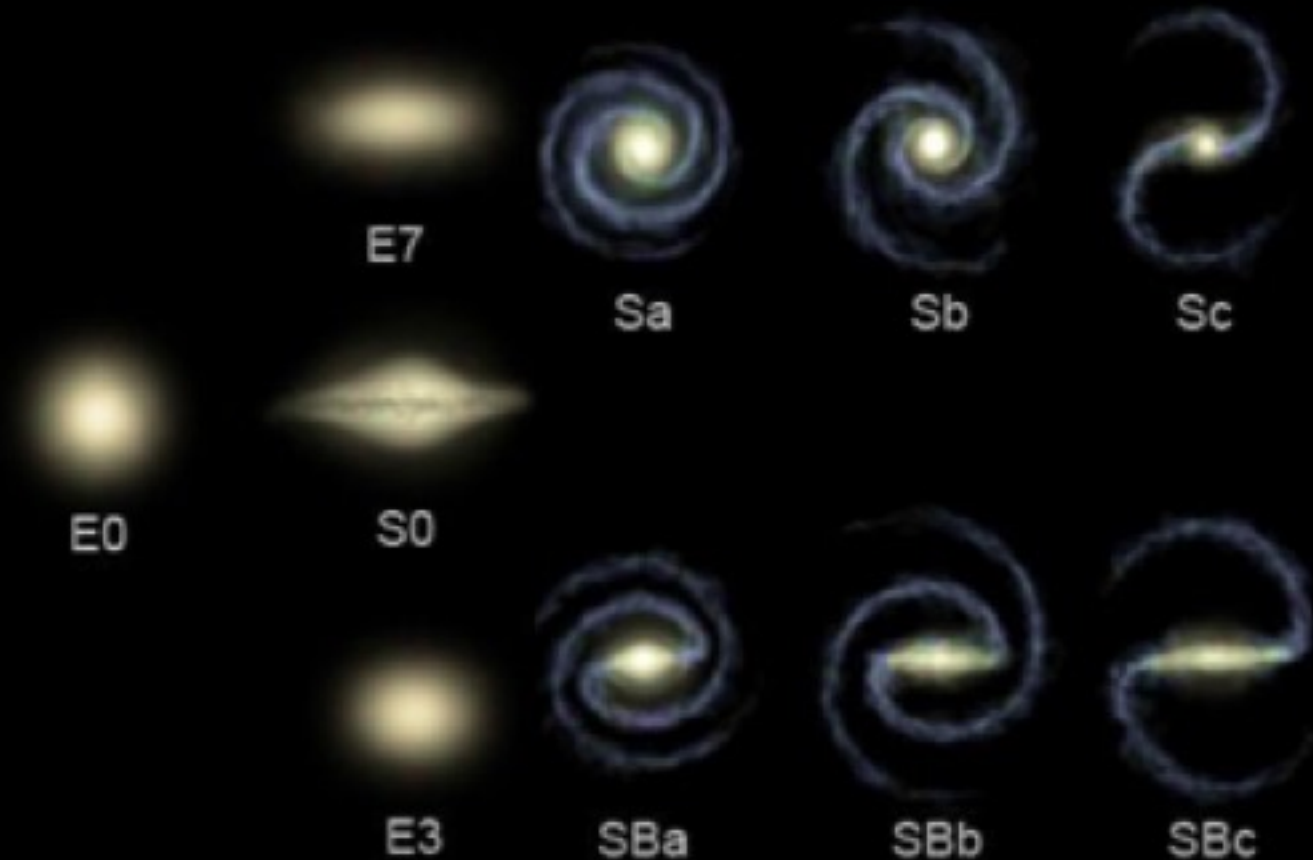
Galaxias irregulares: Poco masivas.



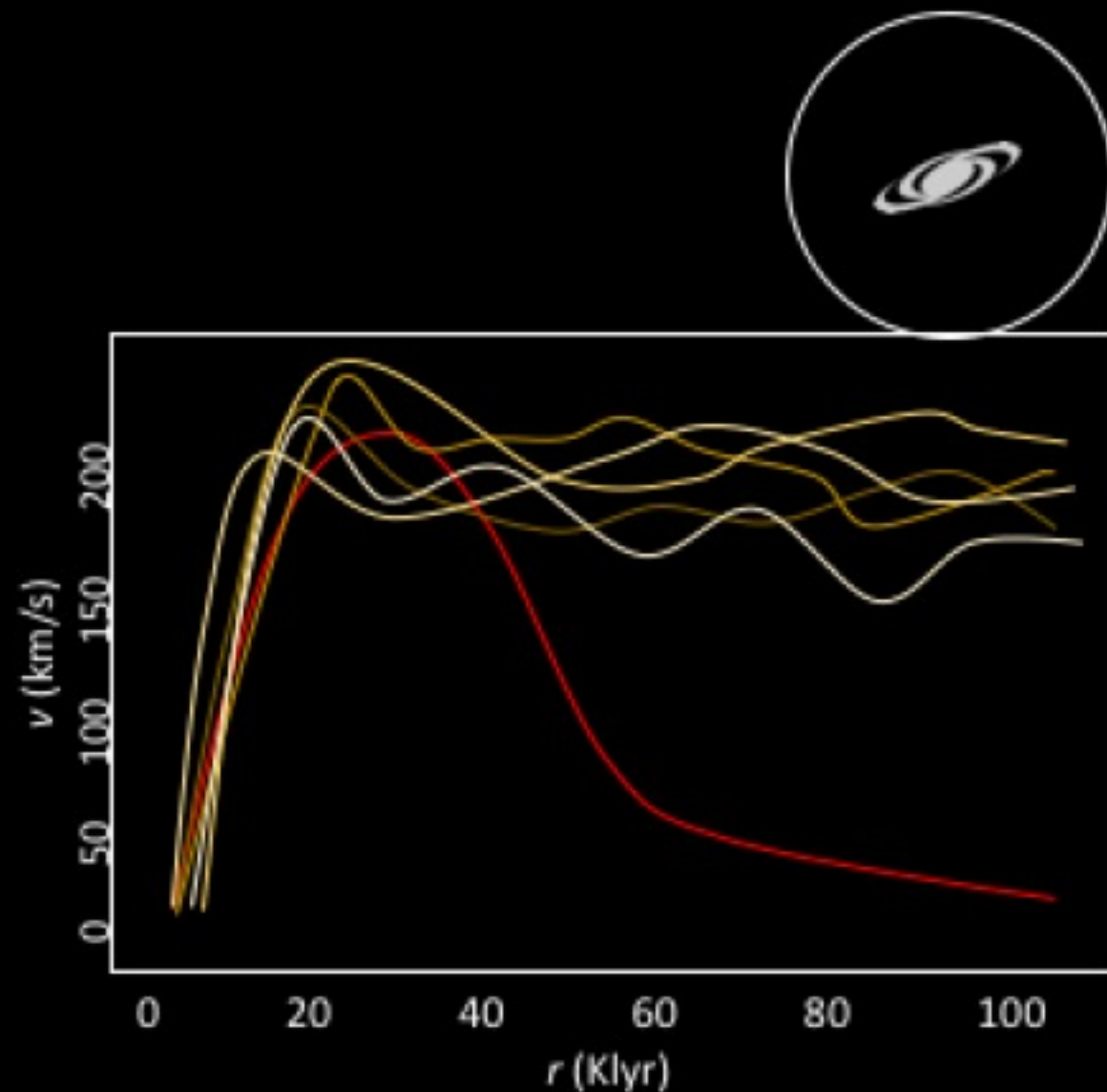
- Galaxias espirales: $I_S(r) = I_0 e^{-kr/r_h}$
Con forma de disco y mucha formación estelar.

- Galaxias elípticas: $I_S(r) = I_0 e^{-k((r/r_h)^n - 1)}$
Con forma de lente, y poca formación estelar.

Galaxias irregulares: Poco masivas.



La materia oscura



- Detectadas midiendo curvas de rotación galácticas.
- Se observa que un 80% de la materia no es visible.
- Candidatos actuales:
MACHOs, WIMPs, PBHs...



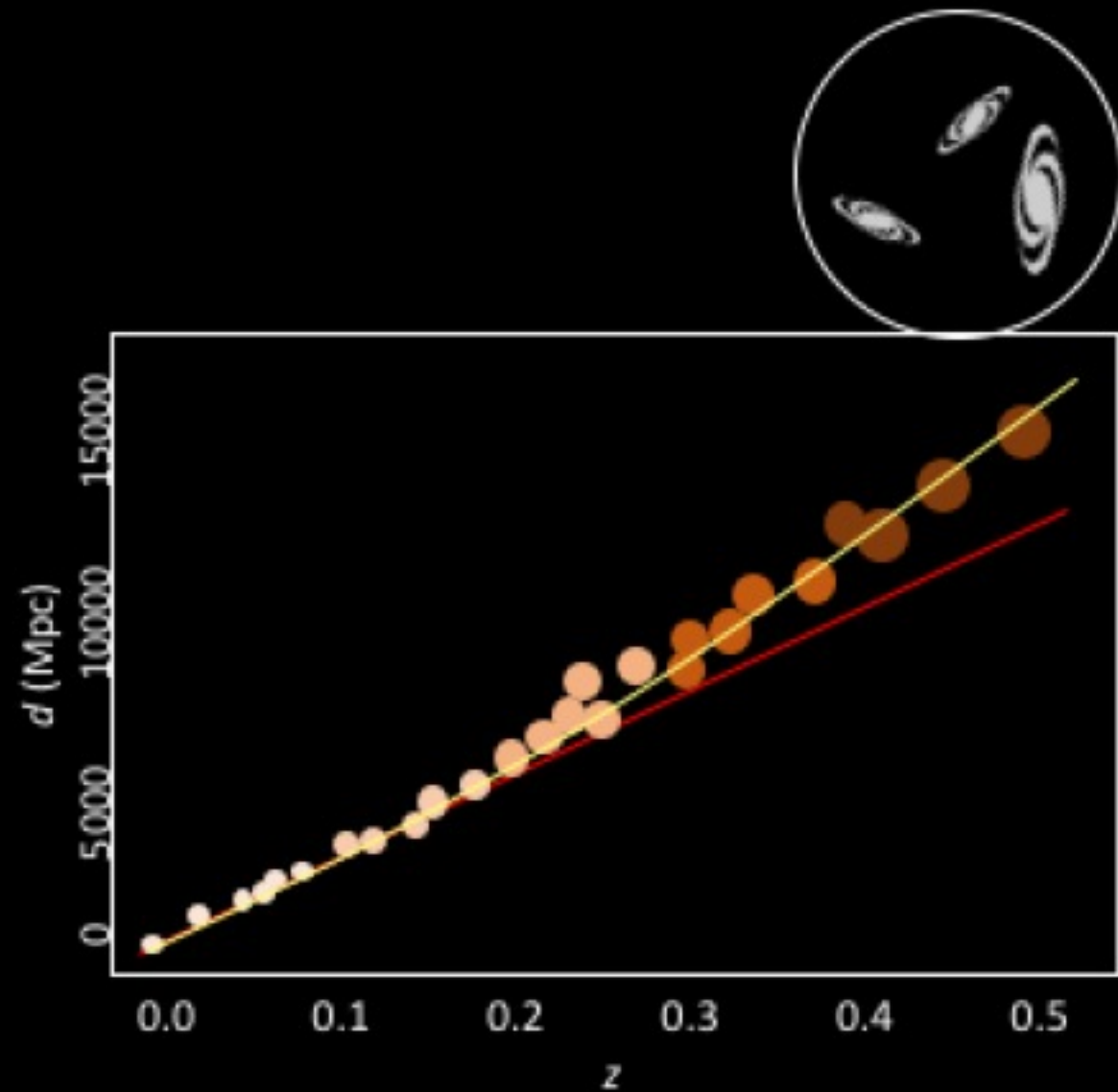
Vera Rubin
(1928–2016)

El contenido del Universo

5.3

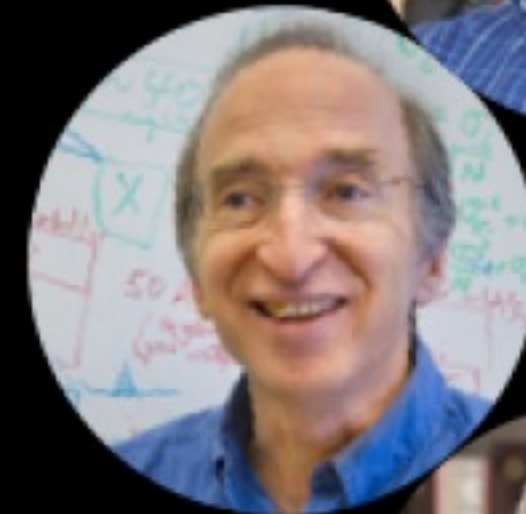
La energía oscura

3



- Detectadas via dist. de luminosidad de SN.
- Las SN se encuentran más lejos de lo predicho.
- Candidatos actuales:
 Λ , QE, IDE, TBGR...

Adam Riess
(1969)



Saul Perlmutter
(1959)

Brian Schmidt
(1967)



6 Las “edades” del Universo

1 El primer instante

1 La Era de Plank

2 La era Inflacionaria

3 Las primeras partículas

2 Los primeros tres minutos

1 Los primeros núcleos

3 La Era de Radiación

1 Los primeros átomos

4 La Edad Oscura

1 Grumos en la sopa

5 La Edad de la Materia Oscura

1 Las primeras estrellas

2 Las primeras galaxias

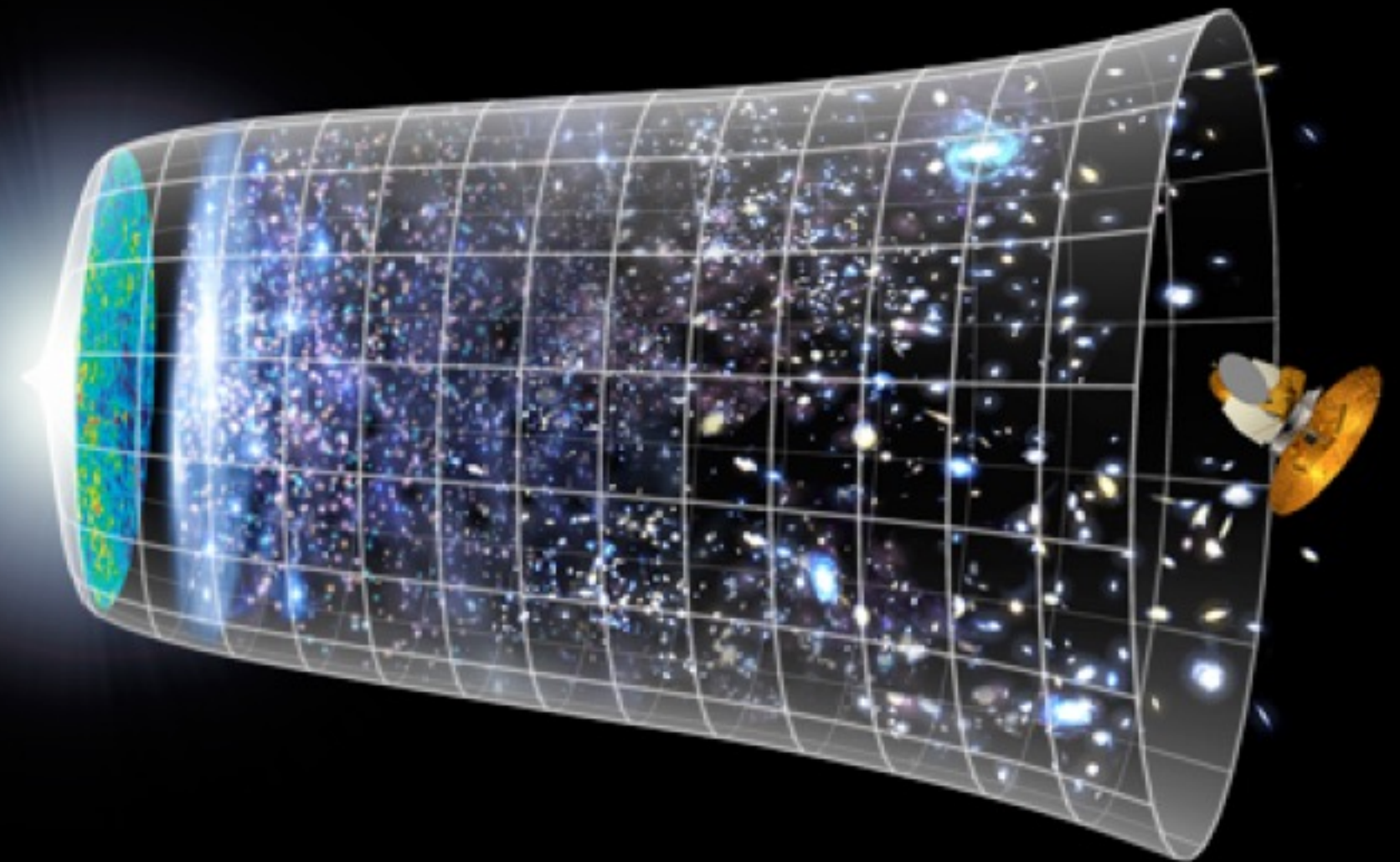
6 La Edad de la Energía Oscura

1 La expansión acelerada

2 El Universo actual

Las “edades” del Universo

6



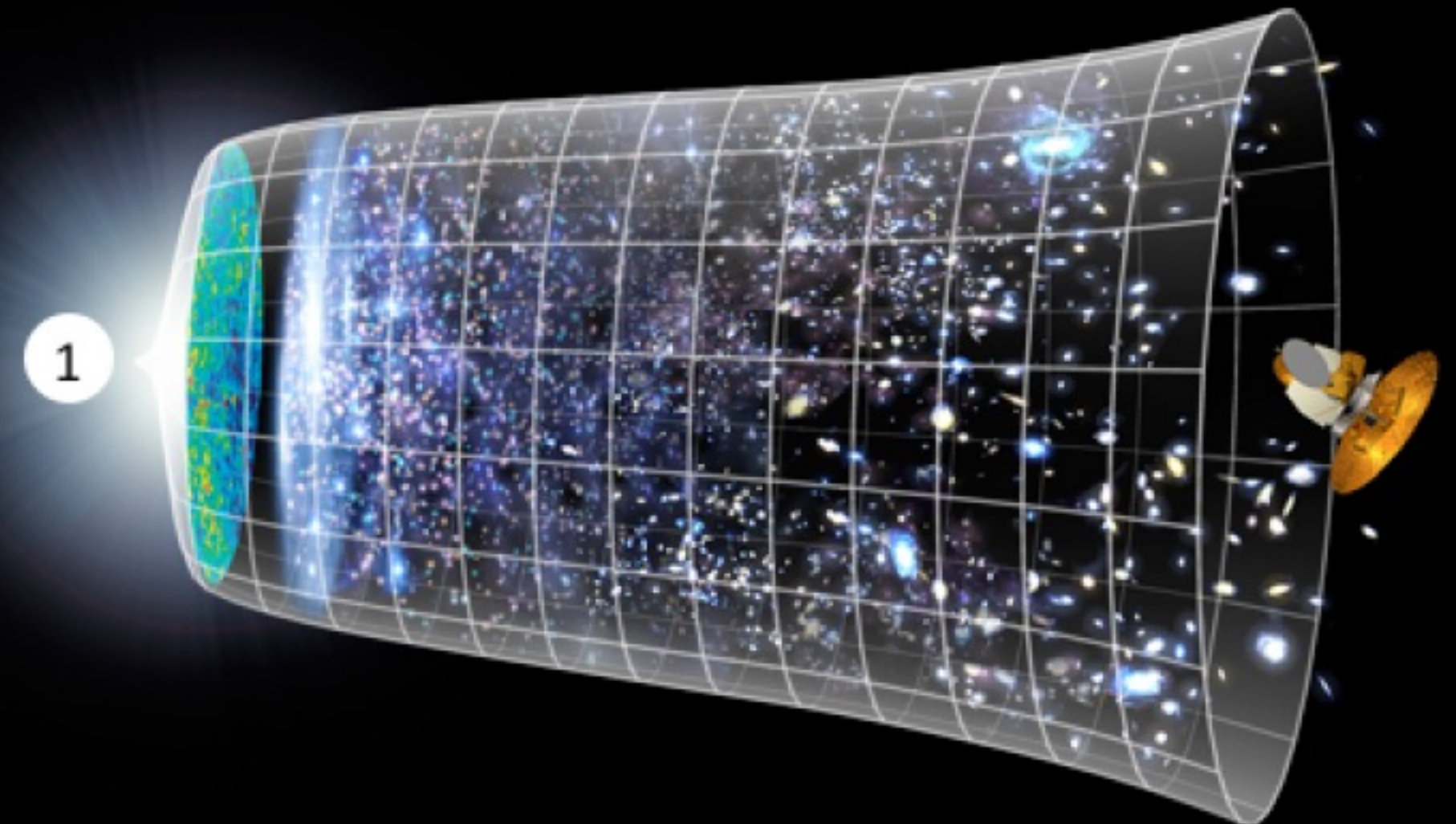
Las “edades” del Universo

6

Teoría del Big Bang

Modelo Λ CDM

1. Momento inicial extraordinariamente caliente y denso.



La Cosmología moderna

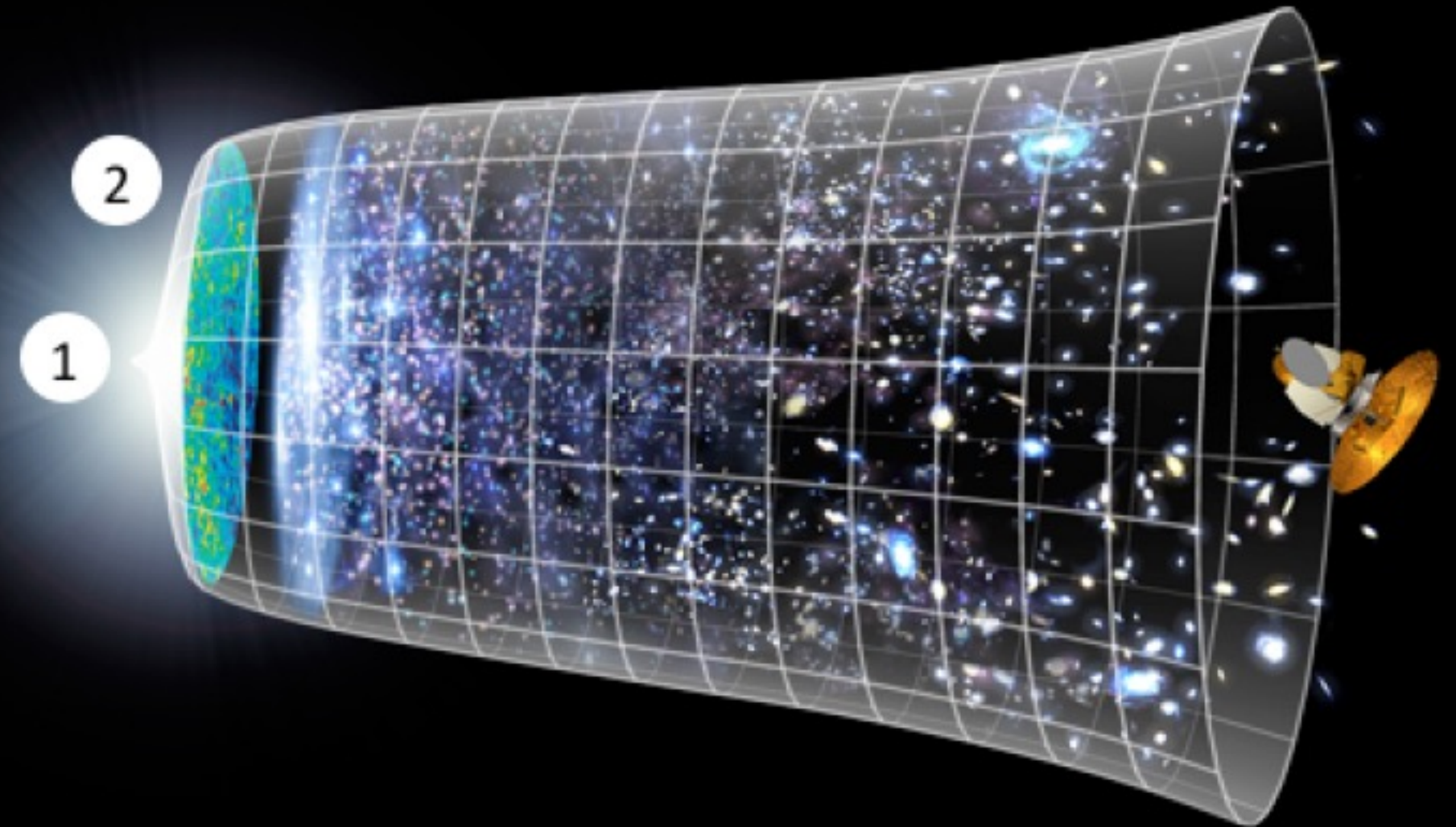
Breve historia del cosmos

6

Teoría del Big Bang

Modelo Λ CDM

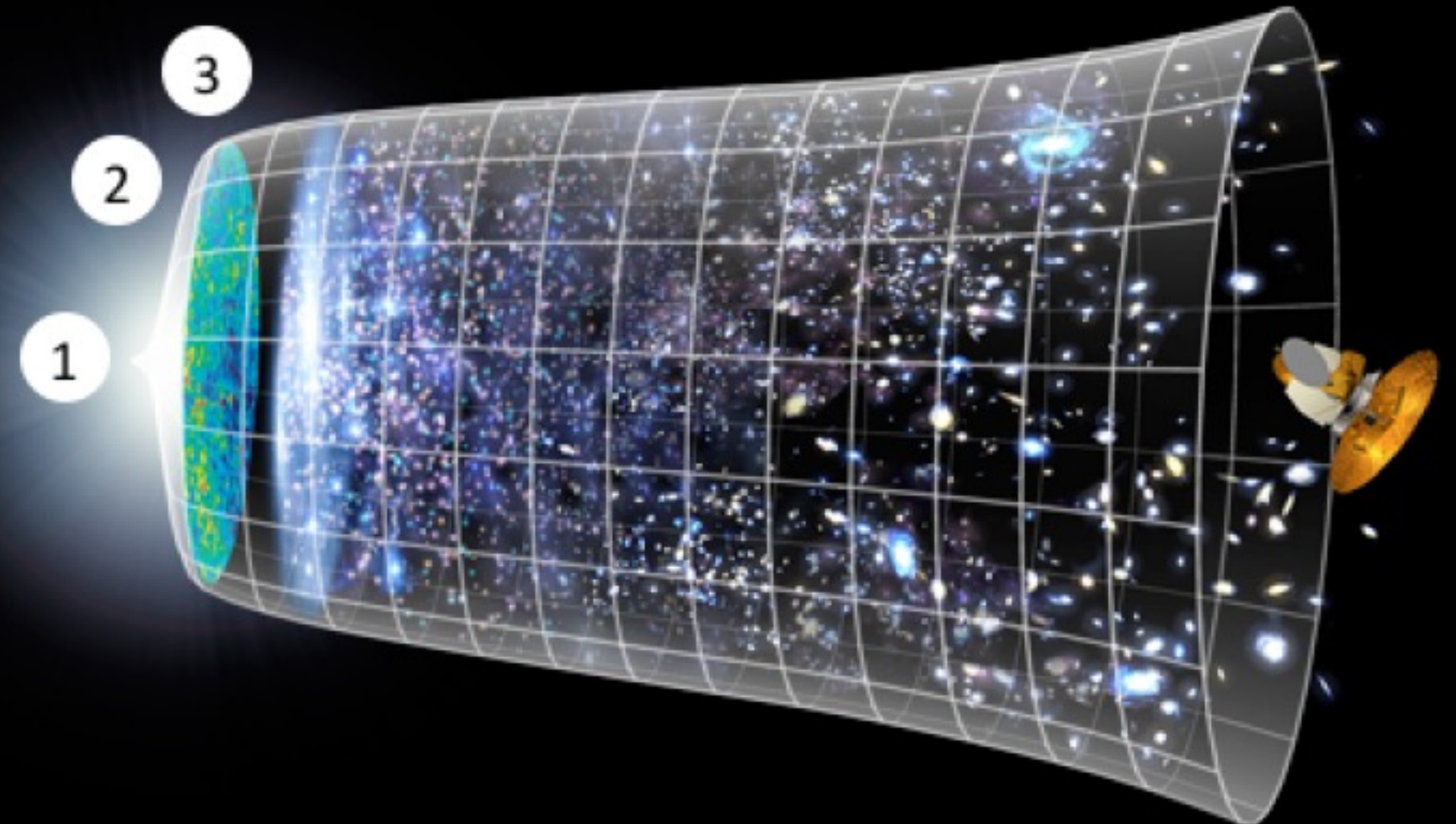
1. Momento inicial extraordinariamente caliente y denso.
2. Enfriamiento y expansión gradual. Aparecen p/n, núc., atm. y molec.



Teoría del Big Bang

Modelo Λ CDM

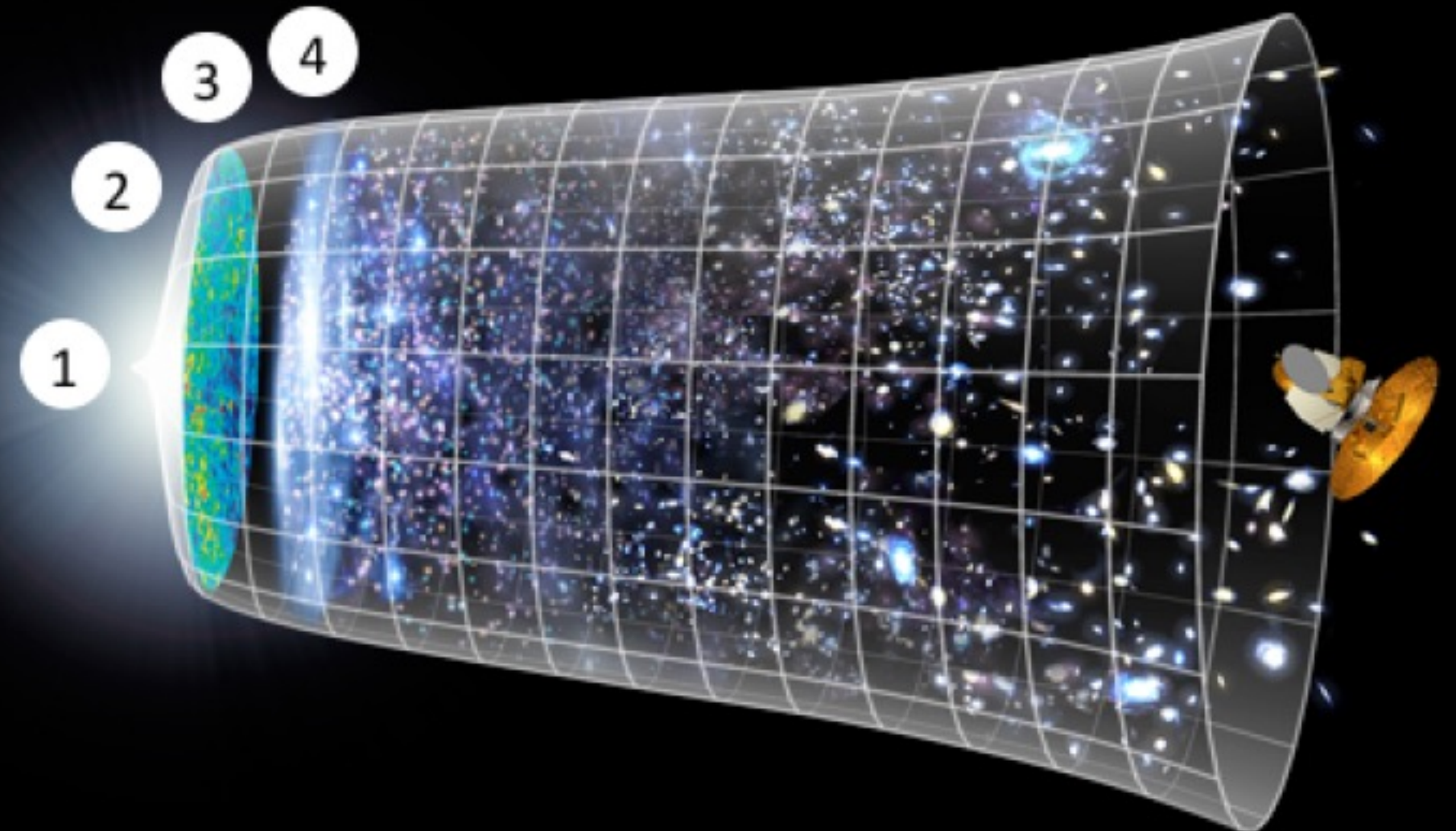
1. Momento inicial extraordinariamente caliente y denso.
2. Enfriamiento y expansión gradual. Aparecen p/n, núc., atm. y molec.
3. Dominan sucesivamente el presupuesto energético primero radiación, y luego materia oscura.



Teoría del Big Bang

Modelo Λ CDM

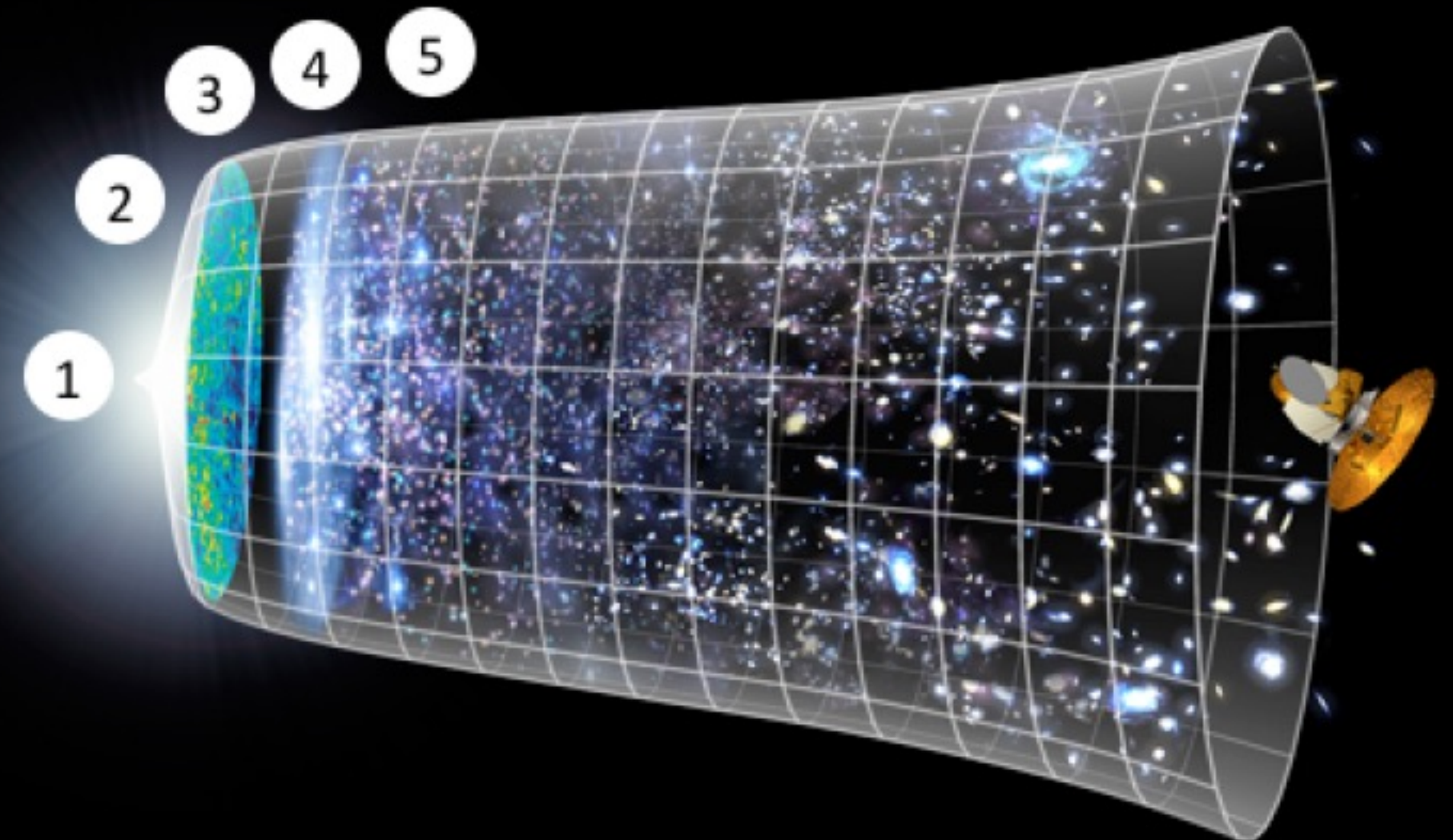
1. Momento inicial extraordinariamente caliente y denso.
2. Enfriamiento y expansión gradual. Aparecen p/n, núc., atm. y molec.
3. Dominan sucesivamente el presupuesto energético primero radiación, y luego materia oscura.
4. Cuando el Universo se enfría suficientemente frío, se vuelve transparente y oscuro y decelera.



Teoría del Big Bang

Modelo Λ CDM

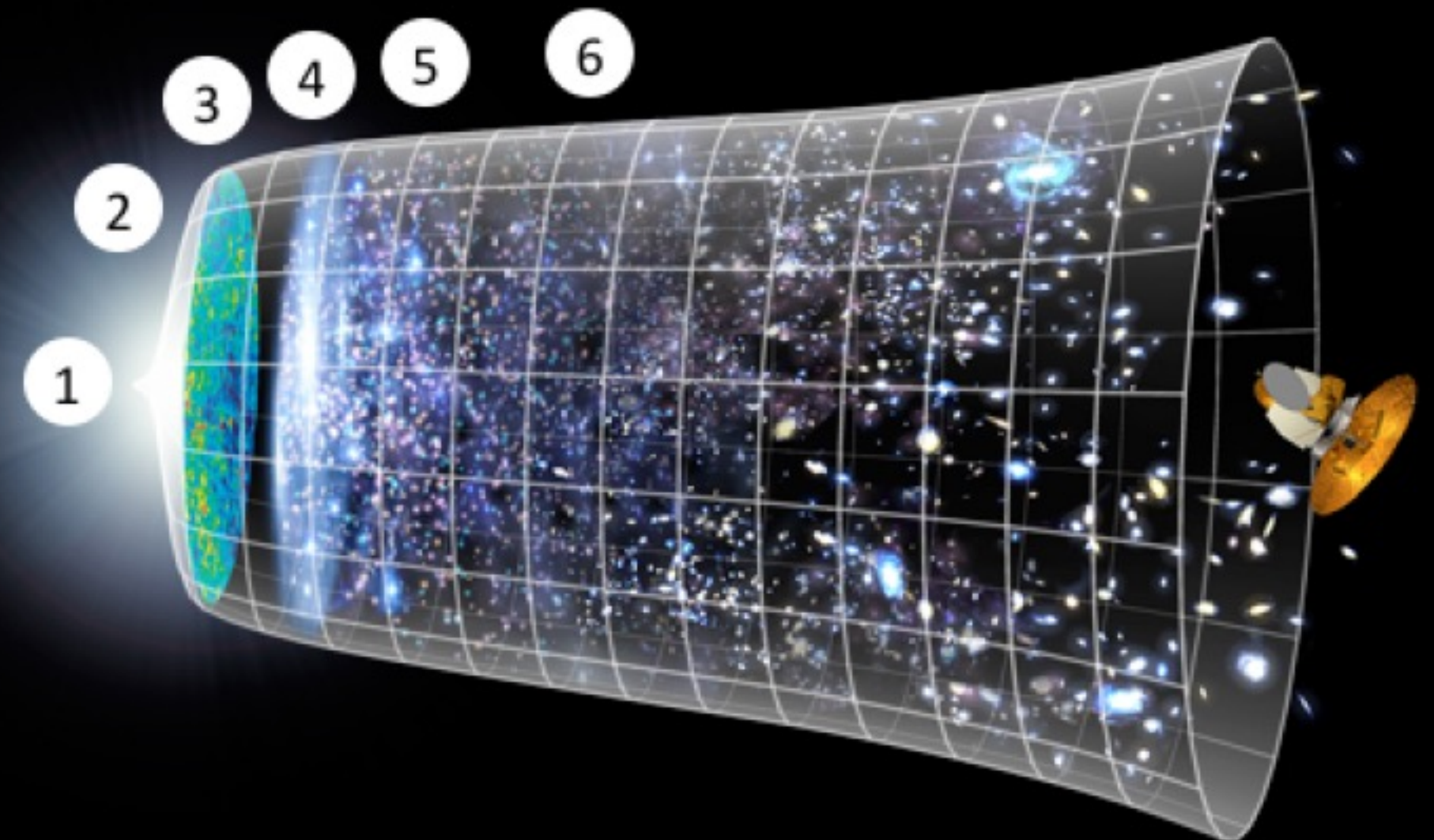
5. Formación temprana de las primeras estrellas, luego galaxias, cúmulos y supercúmulos.



Teoría del Big Bang

Modelo Λ CDM

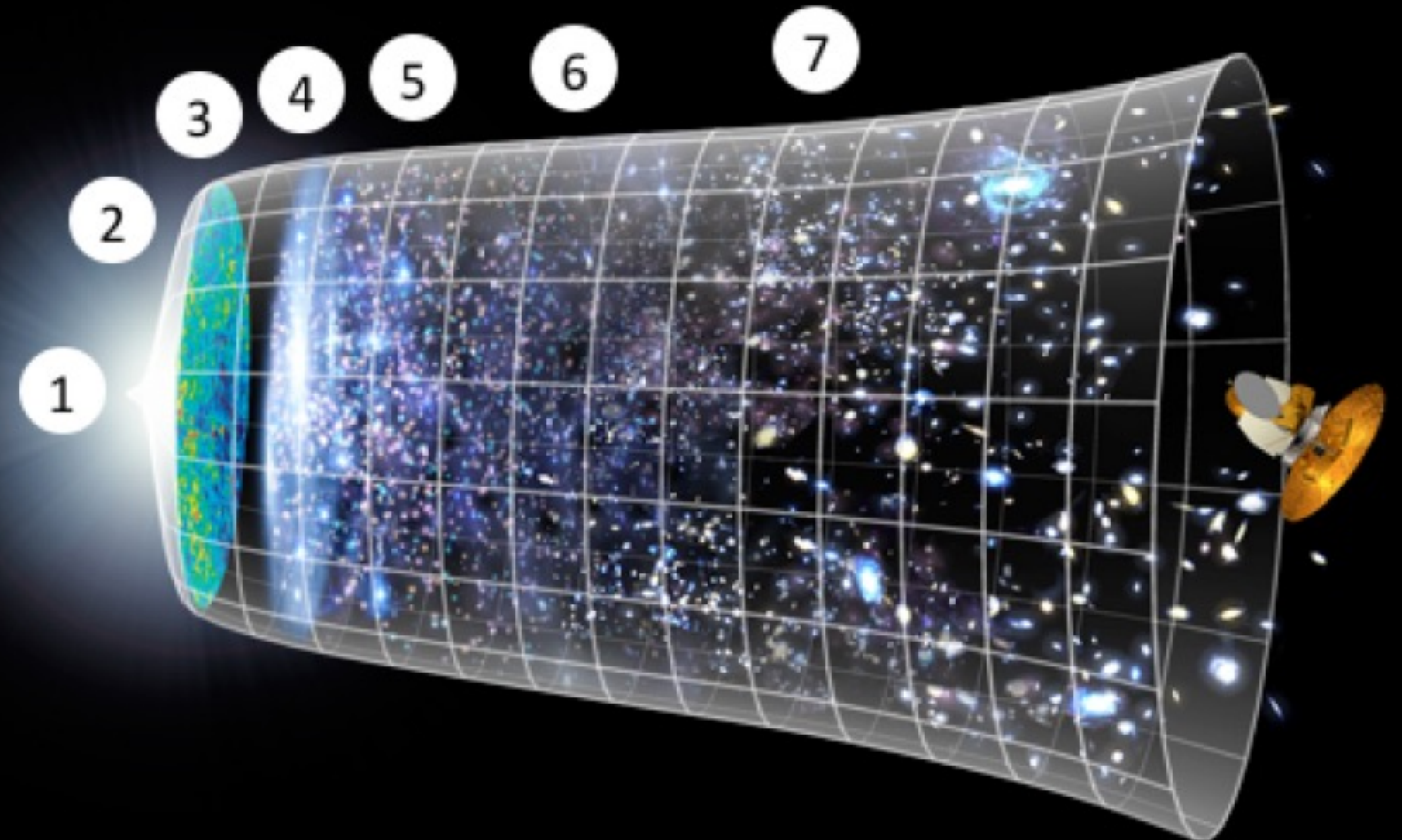
5. Formación temprana de las primeras estrellas, luego galaxias, cúmulos y supercúmulos.
6. La estructura se forma jerárquicamente de menos a más masa. Historia rica de acreción.



Teoría del Big Bang

Modelo Λ CDM

5. Formación temprana de las primeras estrellas, luego galaxias, cúmulos y supercúmulos.
6. La estructura se forma jerárquicamente de menos a más masa. Historia rica de acreción.
7. La energía oscura pasa a dominar la densidad energética del Universo. Comienza por ello un nuevo período de expansión acelerada.



- El “calendario” cósmico



“Concentramos en un año los 13.8×10^9 yr de historia del Universo.”

Inicio: lunes 1 de enero.

Final: lunes 31 de diciembre.

Las "edades" del Universo

6

El primer instante

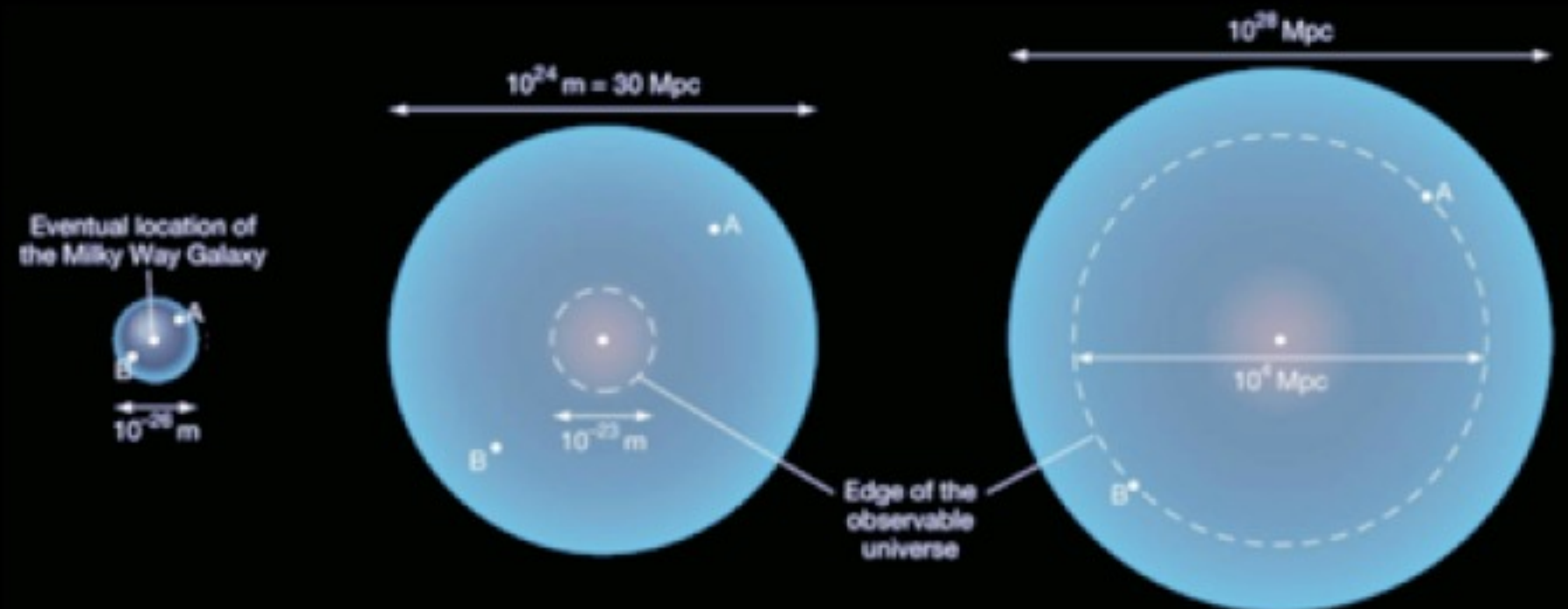
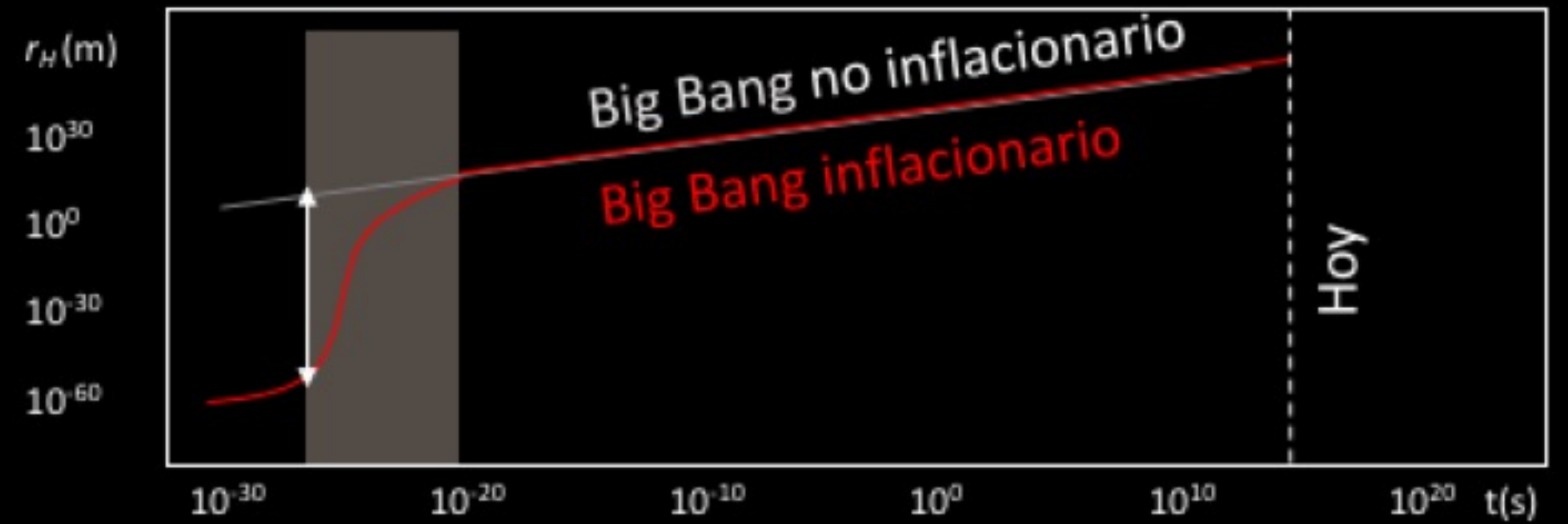
1

January

1	3	4	5	6	7
9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20
22	23	24	25	26	27
29	30	31			



00:00:00



El primer instante

6.1

La Era de Plank

1



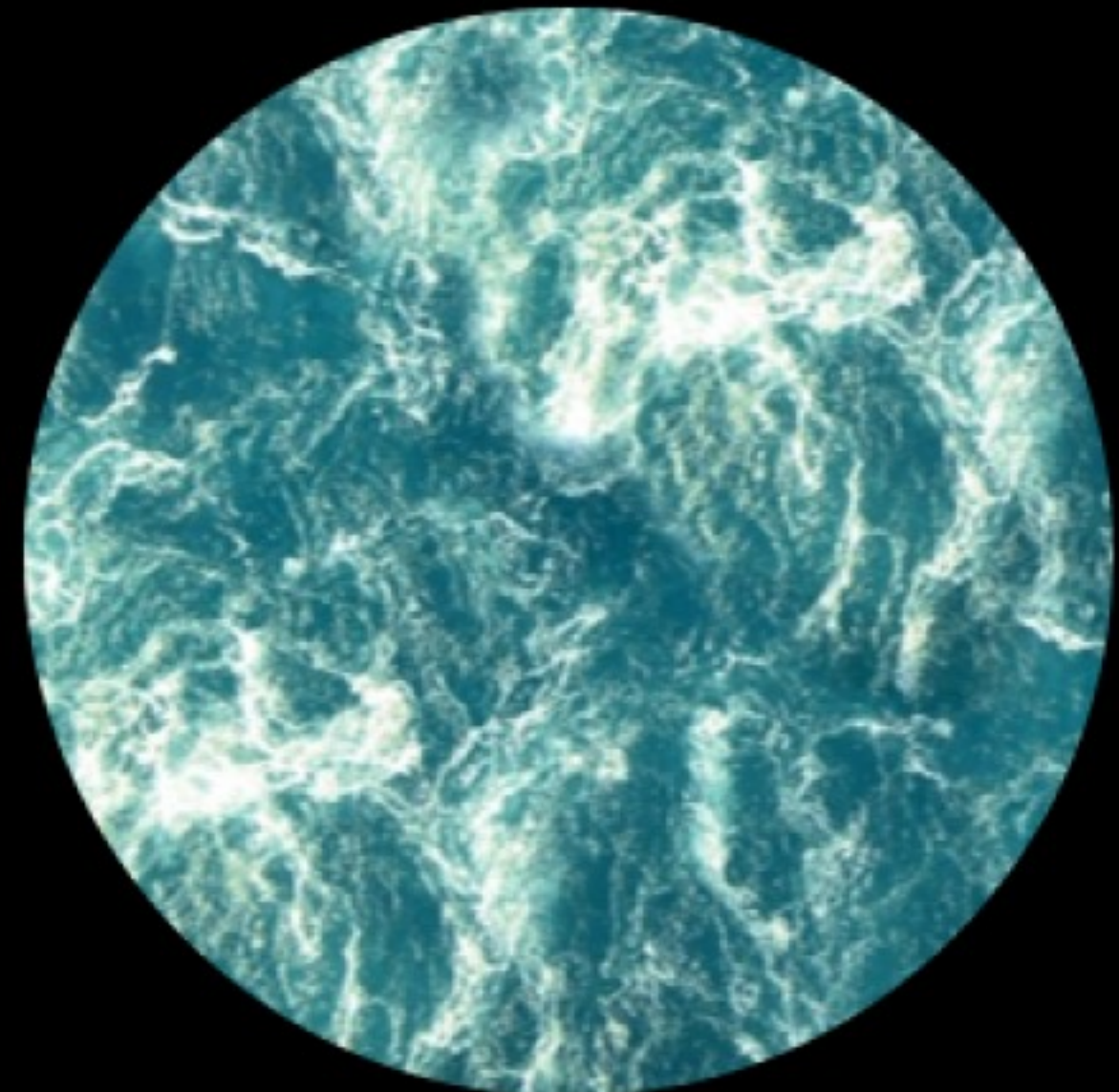
$$t < 10^{-43} \text{ s}$$

$$T > 10^{32} \text{ K}$$

$$E > 10^{19} \text{ GeV}$$

$$00:00:10^{-53}$$

Domina la Gravedad Cuántica.



El primer instante

6.1

La Era Inflacionaria

2



00:00:10⁻⁴⁸ – 00:00:10⁻⁴³

$$t \approx (10^{-36} - 10^{-32}) \text{ s}$$

$$T \approx (10^{29} - 10^{22}) \text{ K}$$

El Universo sufre grandes cambios:

Se expande en un factor de $\sim 10^{26}$.

Resolviendo así varios problemas:

- ¿Por qué el Universo es tan plano?
AKA: homogeneidad, isotropía.
- ¿Por qué el estado inicial es tan especial?
- ¿Por qué no se observan part. exóticas?



El primer instante

6.1

La Era Inflacionaria

2



00:00:10⁻⁴⁸ – 00:00:10⁻⁴³

$$t \approx (10^{-36} - 10^{-32}) \text{ s}$$

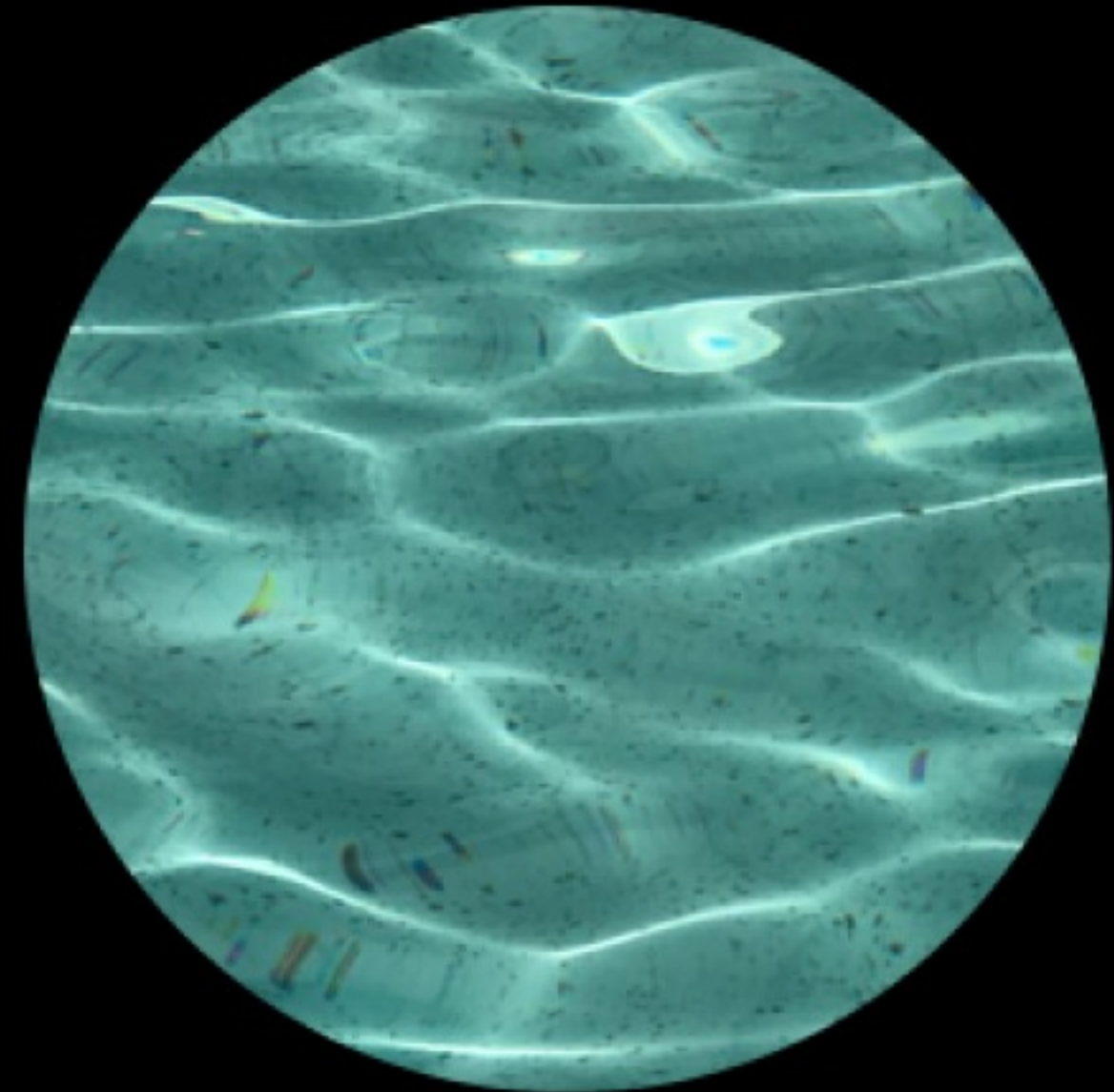
$$T \approx (10^{29} - 10^{22}) \text{ K}$$

El Universo sufre grandes cambios:

Se expande en un factor de $\sim 10^{26}$.

Resolviendo así varios problemas:

- ¿Por qué el Universo es tan plano?
AKA: homogeneidad, isotropía.
- ¿Por qué el estado inicial es tan especial?
- ¿Por qué no se observan part. exóticas?



El primer instante

La Era Inflacionaria

6.1

2



00:00:10⁻⁴⁸ – 00:00:10⁻⁴³

$$t \approx (10^{-36} - 10^{-32}) \text{ s}$$

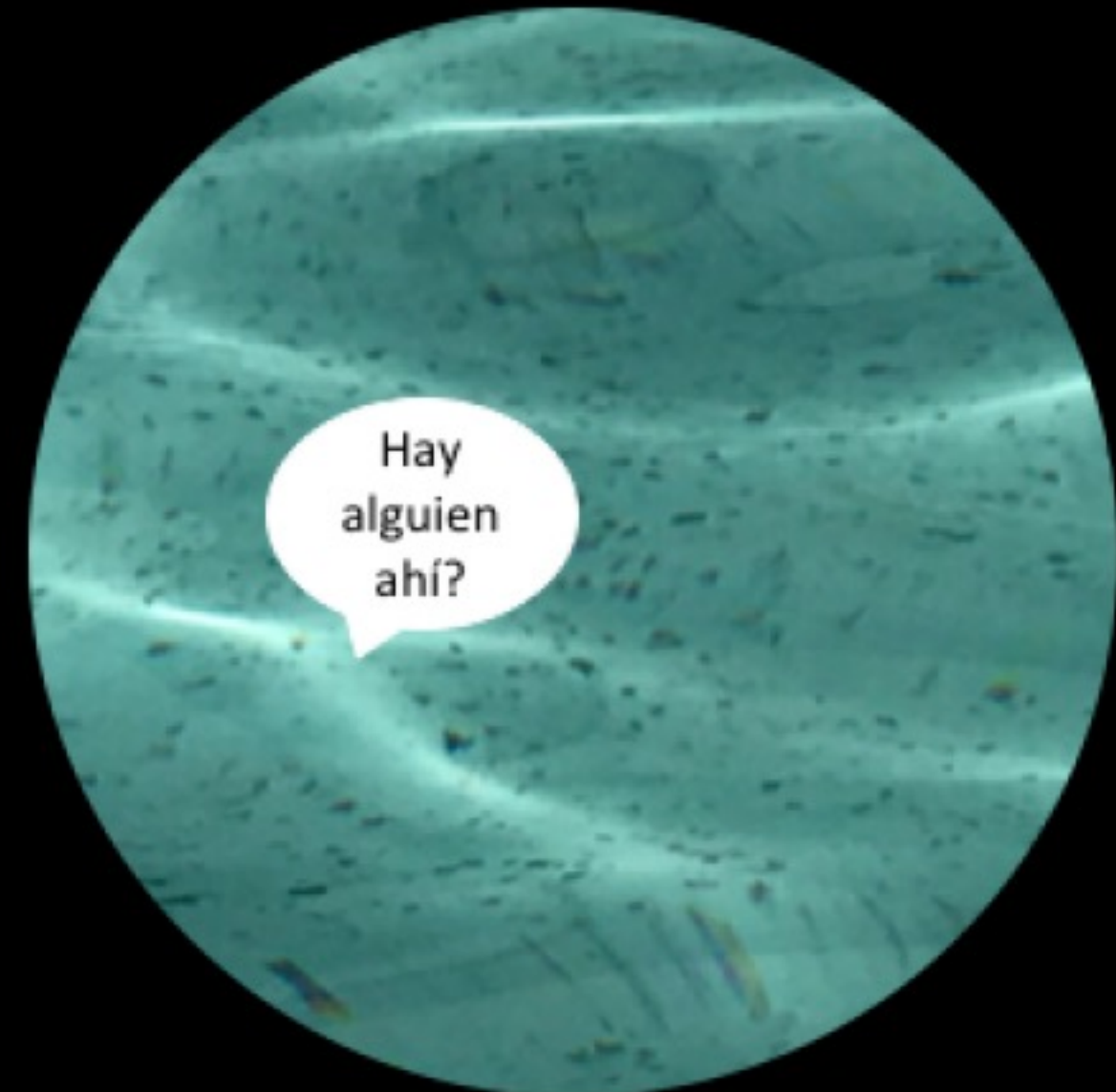
$$T \approx (10^{29} - 10^{22}) \text{ K}$$

El Universo sufre grandes cambios:

Se expande en un factor de $\sim 10^{26}$.

Resolviendo así varios problemas:

- ¿Por qué el Universo es tan plano?
AKA: homogeneidad, isotropía.
- ¿Por qué el estado inicial es tan especial?
- ¿Por qué no se observan part. exóticas?



El primer instante

6.1

Las primeras partículas

3

La era de Gran Unificación

$t_i \approx 10^{-36}$ s Las fuerzas del Modelo Estándar están unificadas.

$T > 10^{29}$ K
 $E > 10^{16}$ GeV **La GTU manda en el Universo.**



00:00:10⁻⁴⁸

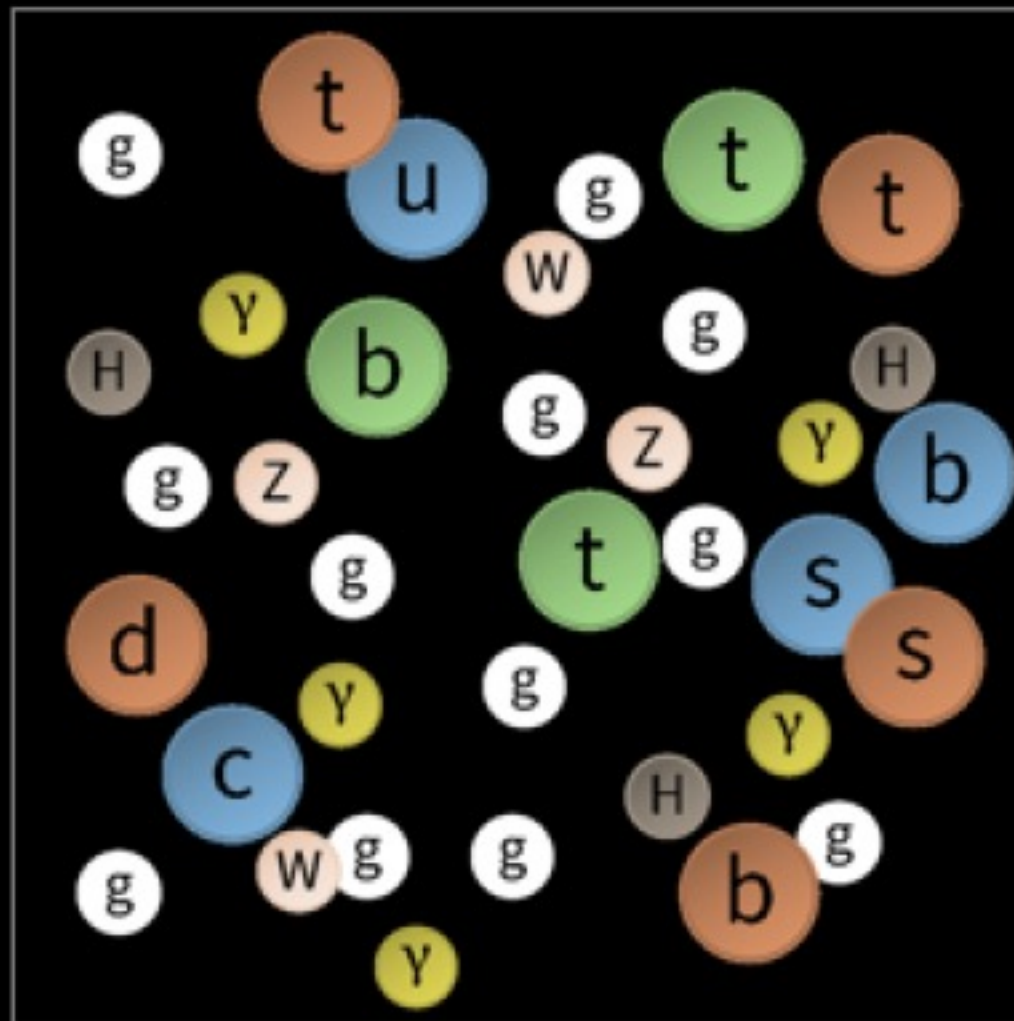


El primer instante

6.1

Las primeras partículas

3



$t_i \approx 10^{-12}$ s Plasma de quarks y gluones,
 $T > 10^{12}$ K incapaces de formar hadrones.
 $E > 10^2$ MeV **Energías comparables al CERN.**

00:00:10⁻²³



El primer instante

6.1

Las primeras partículas

3



00:00:10⁻¹⁷

La era Hadrónica

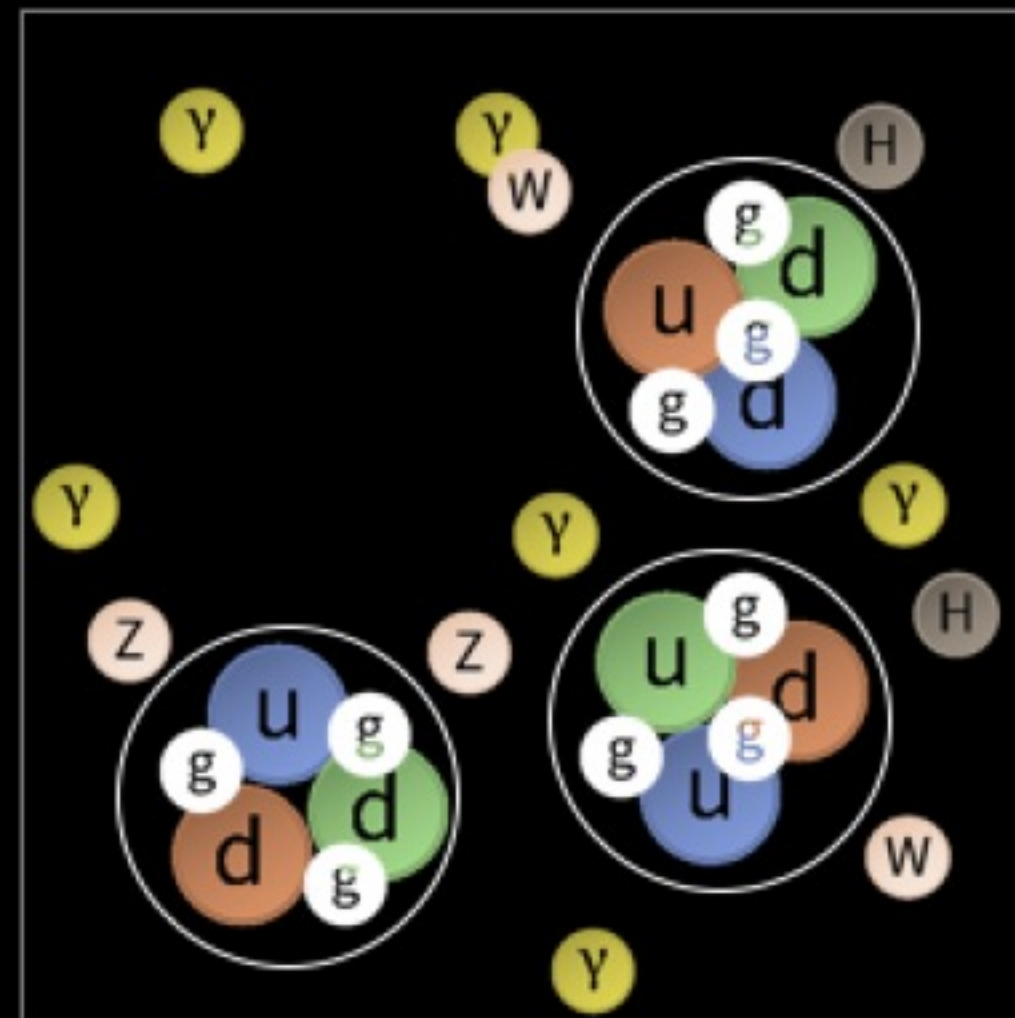
$t_i \approx 10^{-6} \text{ s}$

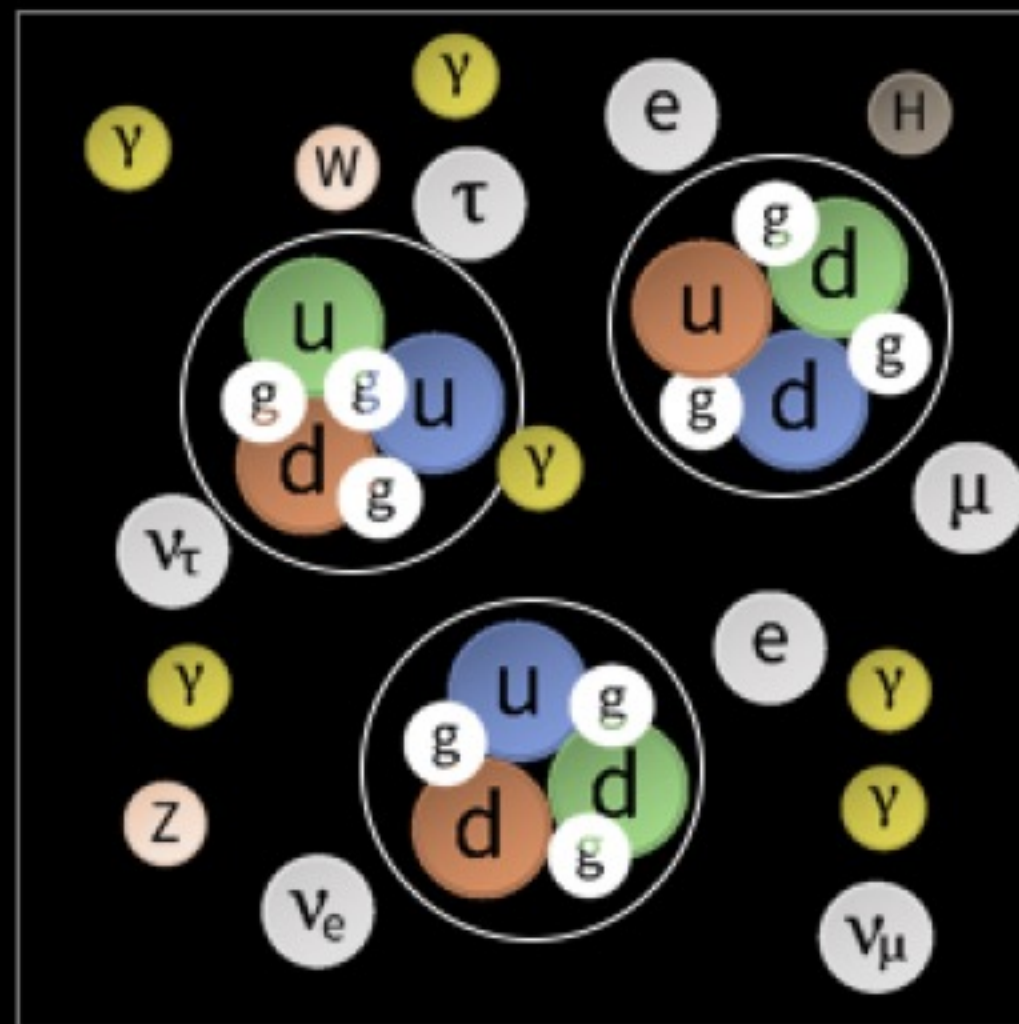
$T > 10^{10} \text{ K}$

$E > 5 \text{ MeV}$

Los quarks se agrupan en part. comp., como los nucleones.

Asimetría materia/antimateria.





00:00:10⁻¹¹



La era Leptónica

$t_i \approx 1 \text{ s}$
 $T > 10^9 \text{ K}$
 $E > 1 \text{ Mev}$

Leptones/antileptones en eq,
no los quarks/antiquarks.

Desacoplo de los neutrinos.

Los primeros tres minutos

6.2

Las primeros núcleos

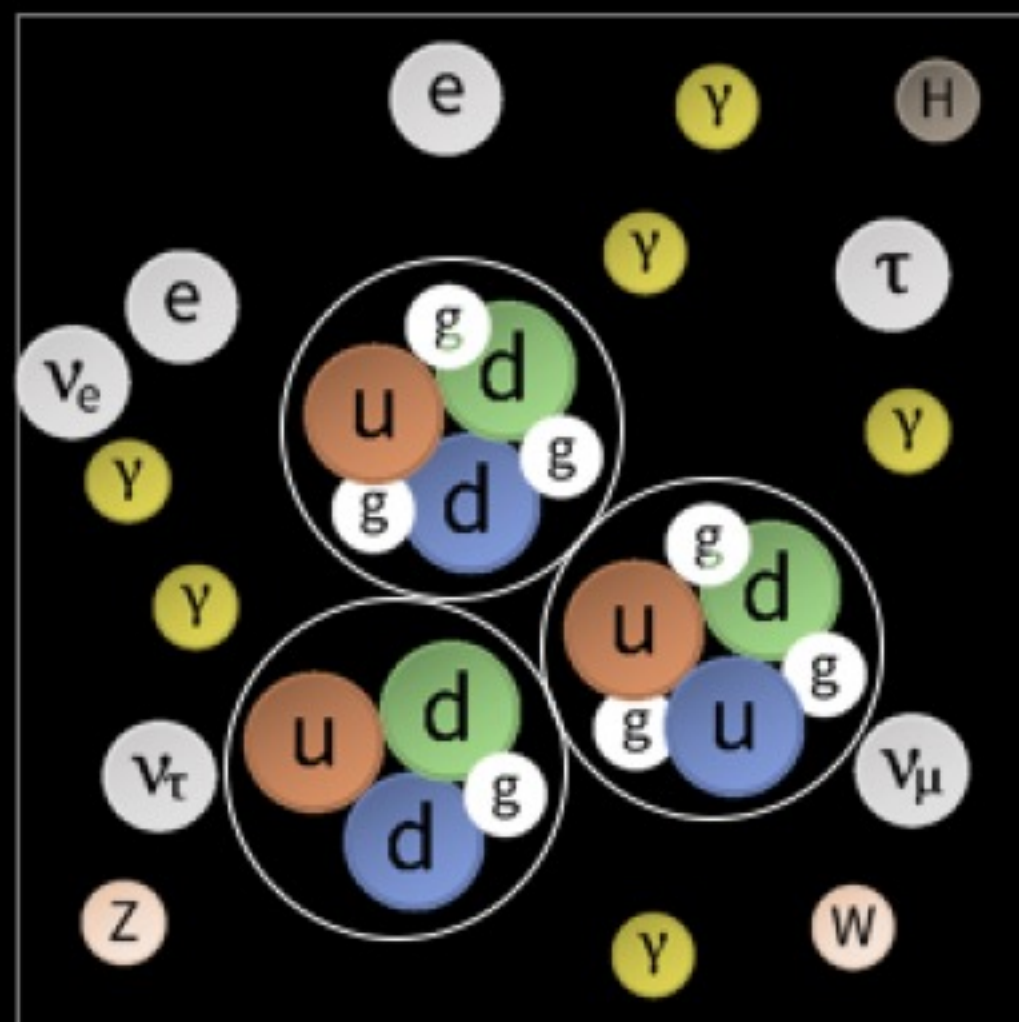
1

$$t_i \approx (1 - 100) \text{ s}$$
$$T > (10^9 - 10^7) \text{ K}$$
$$E > (10^2 - 1) \text{ Kev}$$



00:00:10⁻¹¹

00:00:10⁻¹⁰



Nucleosíntesis

- Los protones y neutrones se agrupan en núcleos de ^1H y ^4He .
- Trazas de otros elementos se forman también: ^2H , ^3H , ^3He y ^7Li .
- El Universo observable mide unos 300 lyr de extremo a extremo.
- Tiene una densidad de energía de en torno al 10^{-3} atm.

Los primeros tres minutos

6.2

Las primeros núcleos

1

$$t_i \approx (1 - 100) \text{ s}$$
$$T > (10^9 - 10^7) \text{ K}$$
$$E > (10^2 - 1) \text{ Kev}$$



00:00:10⁻¹¹
00:00:10⁻¹⁰

Nucleosíntesis



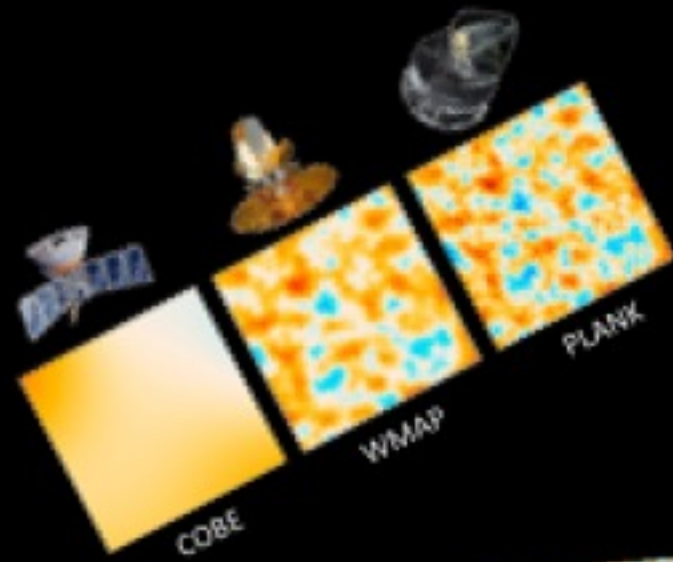
- Los protones y neutrones se agrupan en núcleos de ^1H y ^4He .
- Trazas de otros elementos se forman también: ^2H , ^3H , ^3He y ^7Li .
- El Universo observable mide unos 300 lyr de extremo a extremo.
- Tiene una densidad de energía de en torno al 10^{-3} atm.

Las “edades” del Universo

6

La Era de Radiación

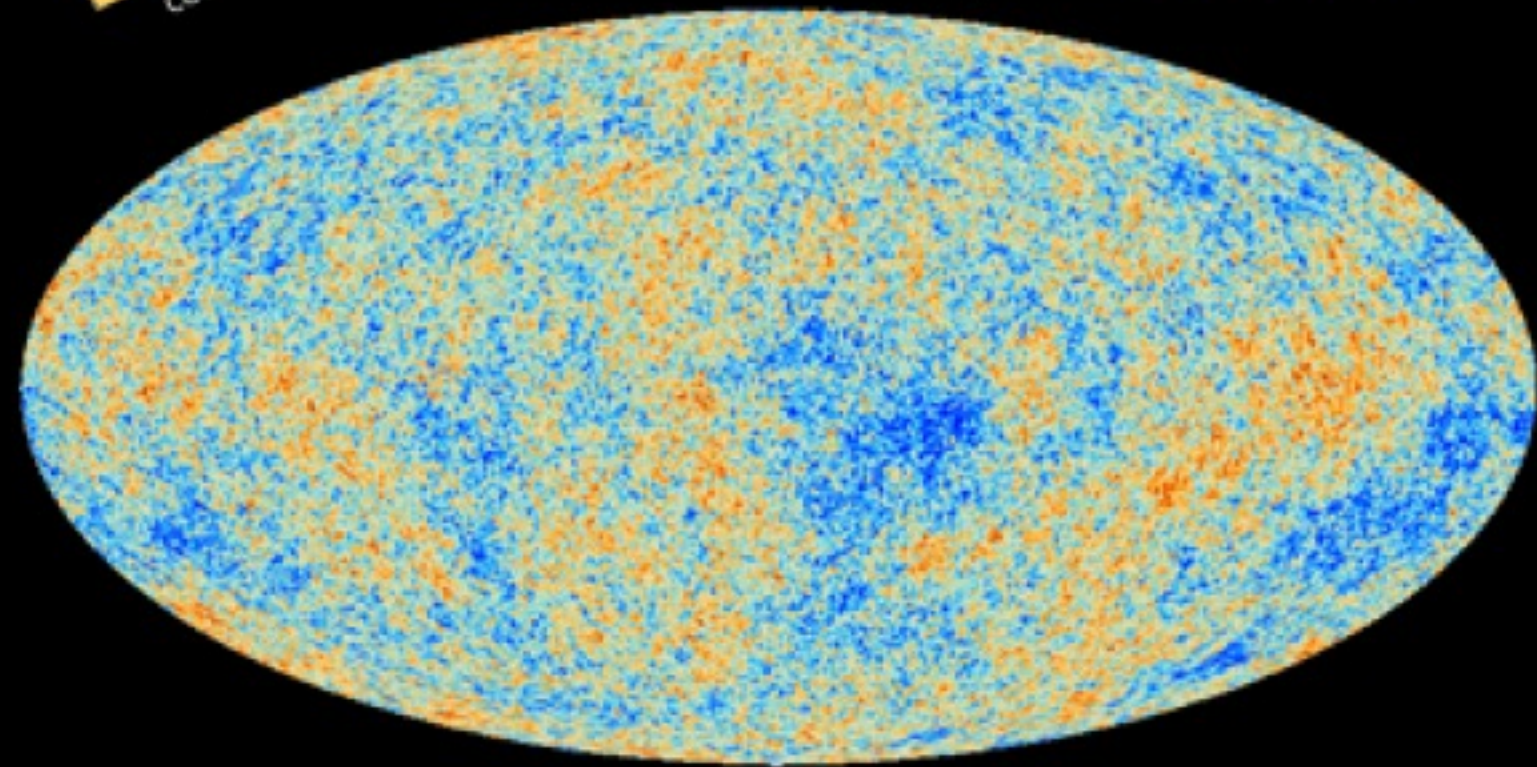
3



$t_i \approx 10 \text{ s} - 380 \text{ Kyr}$
 $T > (10^9 - 4000) \text{ K}$
 $E > 10^2 \text{ KeV} - 0.4 \text{ eV}$



00:00:10⁻¹¹
00:00:10¹



- Nucleones, electrones y fotones conviven en un plasma caliente.
- El Universo es análogo a una sopa densa, viscosa y opaca a la luz.
- La luz no puede atravesar la neblina, los fotones no viajan libres.
- La dens. de radiación, Ω_R , domina.
- **Exp. desacelerada:** $a(t) \propto t^{1/3}$.

La Era de Radiación

Los primeros átomos

6.3

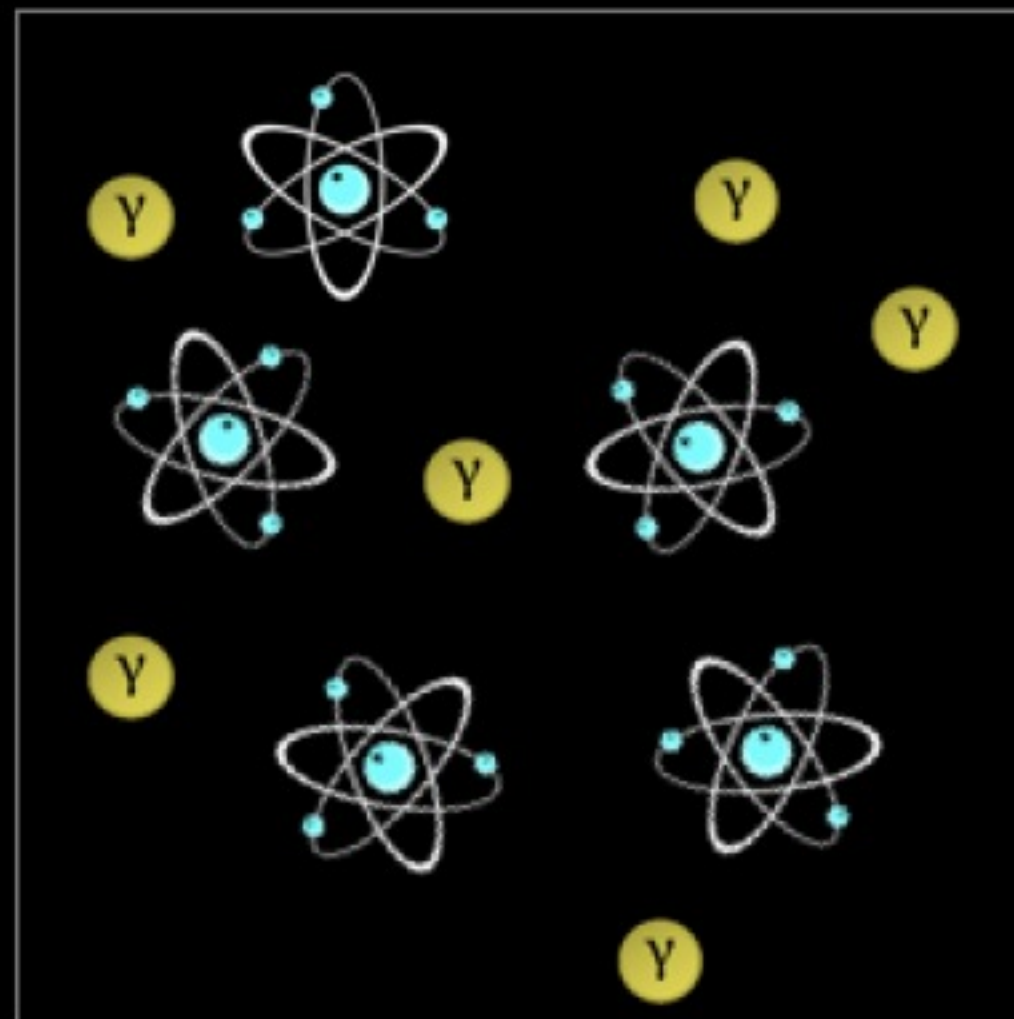
1

$t_i \approx 380 \text{ Kyr}$
 $T > 4000 \text{ K}$
 $E > 0.4 \text{ eV}$

Recombinación



00:00:14



- Electrones y nucleones se combinan en los primeros átomos.
- Desacoplo de los fotones.
- Fondo Cósmico de Radiación (emite en el espectro visible).
- El Universo observable mide unos $5 \times 10^6 \text{ lyr}$ de extremo a extremo.
- Tiene una densidad de energía de en torno al 10^{-7} atm .

Las “edades” del Universo

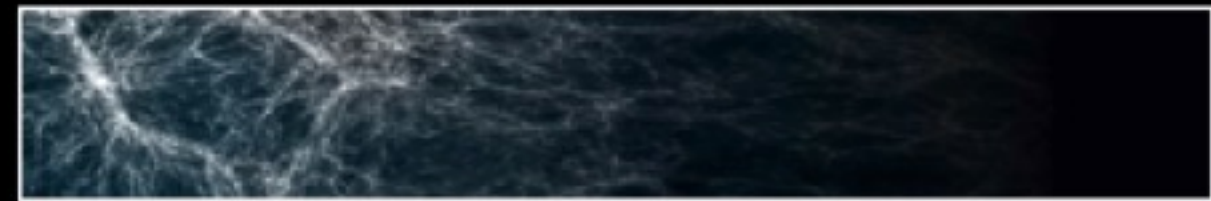
6

La Edad Oscura

4

January

1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

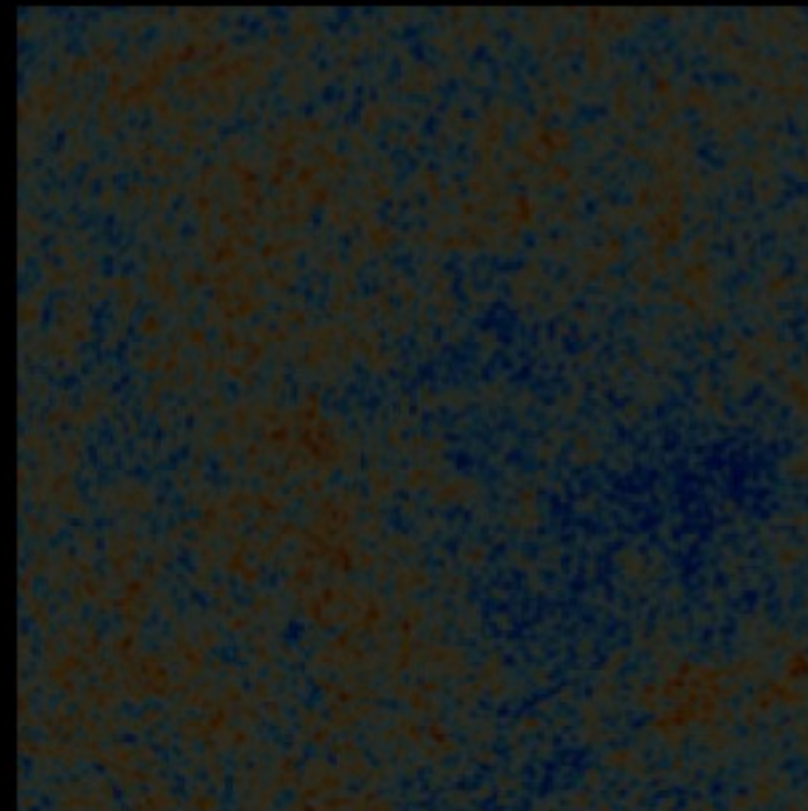


- Única fuente de fotones: ^1H neutro, el cual emite ondas de radio.
- Los fotones se mueven libres.
- Fondo Cósmico de Radiación (corrimiento al infrarrojo).

$$t_i \approx (0.38 - 150) \text{ Myr}$$
$$T > (400 - 60) \text{ K}$$

00:00:14 – 01:34:54





Secretamente y a oscuras...

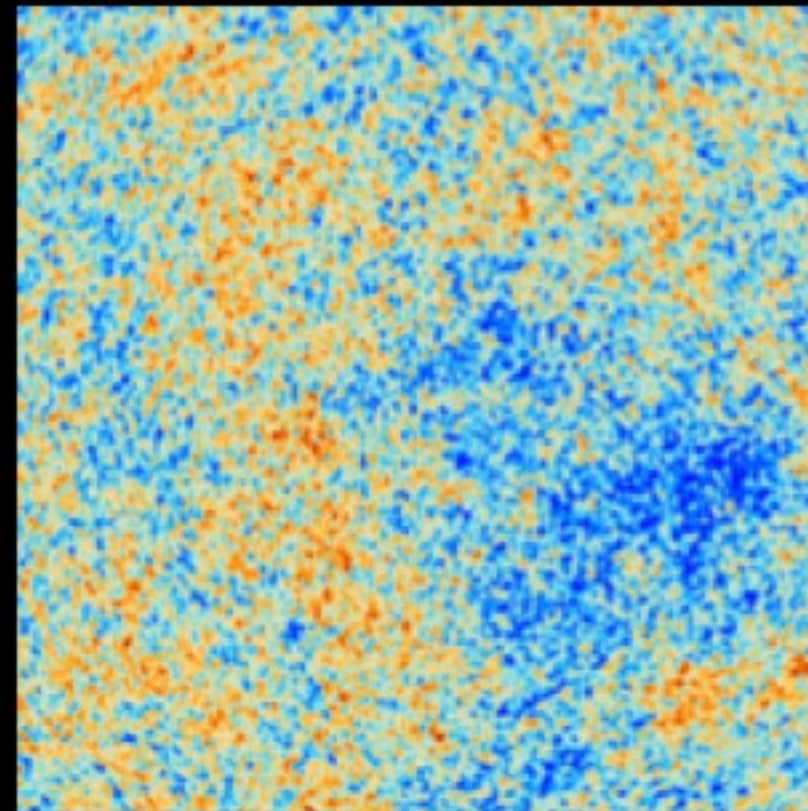
- Las primeras estructuras han empezado a formarse.
- Los primeros cúmulos de gas frío empiezan a formarse.
- Colapso esférico de la materia.

Grumos calientes:

Estrellas.

Grumos fríos:

Vacíos.



Secretamente y a oscuras...

- Las primeras estructuras han empezado a formarse.
- Los primeros cúmulos de gas frío empiezan a formarse.
- Colapso esférico de la materia.

Grumos calientes:

Estrellas.

Grumos fríos:

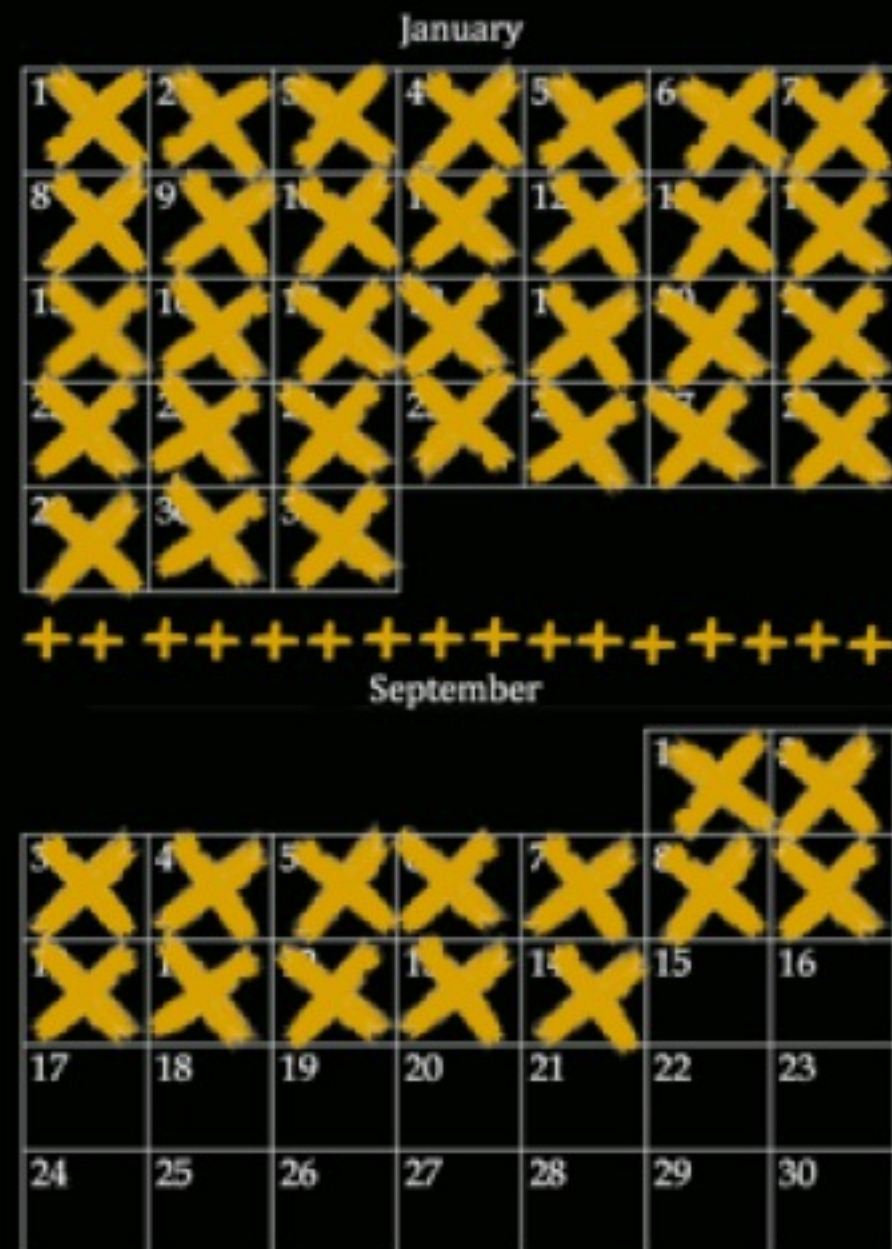
Vacíos.

Las “edades” del Universo

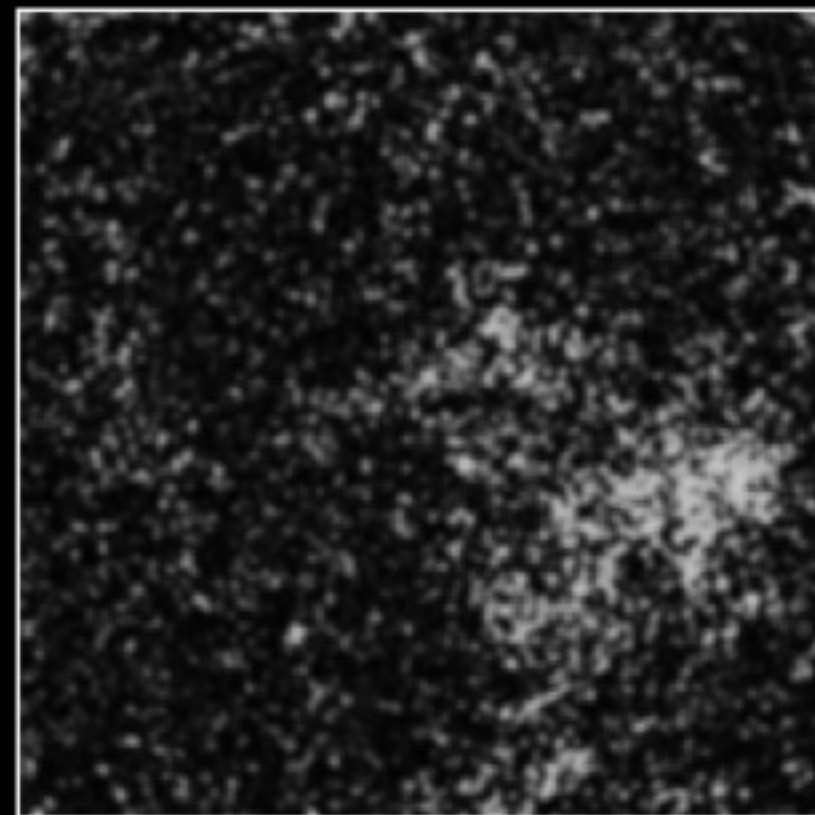
6

La Era de la Materia Oscura

5



$$t_i \approx (4.7 \times 10^{-5} - 9.8) \text{ Gyr}$$
$$T > (40000 - 4) \text{ K}$$



- La densidad de materia, Ω_M , domina.
- Exp. desacelerada: $a(t) \propto t^{2/3}$.
- Se forma estructura a gran escala.
- Se abandona el régimen lineal.
- La dinámica se vuelve compleja.
- Aparecen por primera vez:
La Vía Láctea & el Sistema Solar.

January

1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

HASTA EL PRESENTE

$$t_i > 150 \text{ Myr}$$
$$T < 60 \text{ K}$$



Reionización. La Era Estelífera

- Se forman las primeras estrellas.
 - PIII : Súpermasivas y breves.
- Quedan sólo después estrellas de:
 - PI: Jóvenes y metálicas.
 - PII: Viejas y poco metálicas.
- La radiación UV, X y γ que emiten **reioniza el medio interestelar.**
- El objeto más lejano (a $z \approx 11$).

La Era de la Materia Oscura

6.5

Las primeras galaxias

2

February

			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28				

HASTA EL PRESENTE

$$t_i > 1 \text{ Gyr}$$
$$T < 19 \text{ K}$$



Agrupamiento. La Era Galáctica

- Las primeras galaxias se agrupan en **protocúmulos** a los $t \approx 1 \text{ Gyr}$.
- Y en **cúmulos** de galaxias, empezando a los $t \approx 3 \text{ Gyr}$.
- Y en **súpercúmulos** de galaxias empezando a los $t \approx 5 \text{ Gyr}$.

Las primeras galaxias



Estructura a gran escala

Simulación Millenium (Virgo Consortium, 2005)

$$N_{part} = 2160^3 \quad L_{box} \approx 600 \text{ Mpc}$$

$$M_{part} \approx 10^9 M_{sun} \quad N_{gal} \approx 2 \times 10^7$$

$$T \approx 1 \text{ month} \quad S \approx 25 \text{ Tb.}$$



Simulación Millenium: Rotación.



Simulación Millenium: Zoom.

Formación de la Vía Láctea

March

			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

Formación del Sistema Solar

September

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

La Era de la Materia Oscura

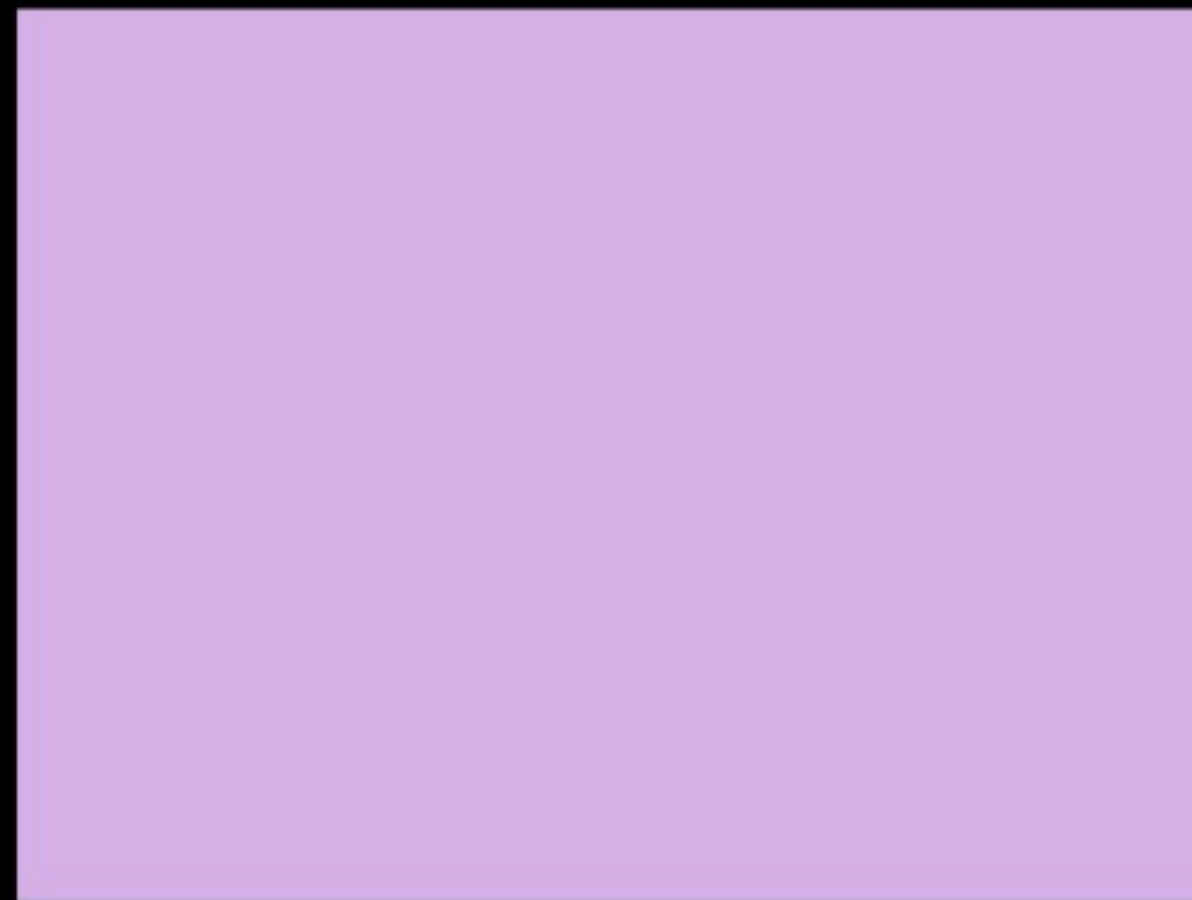
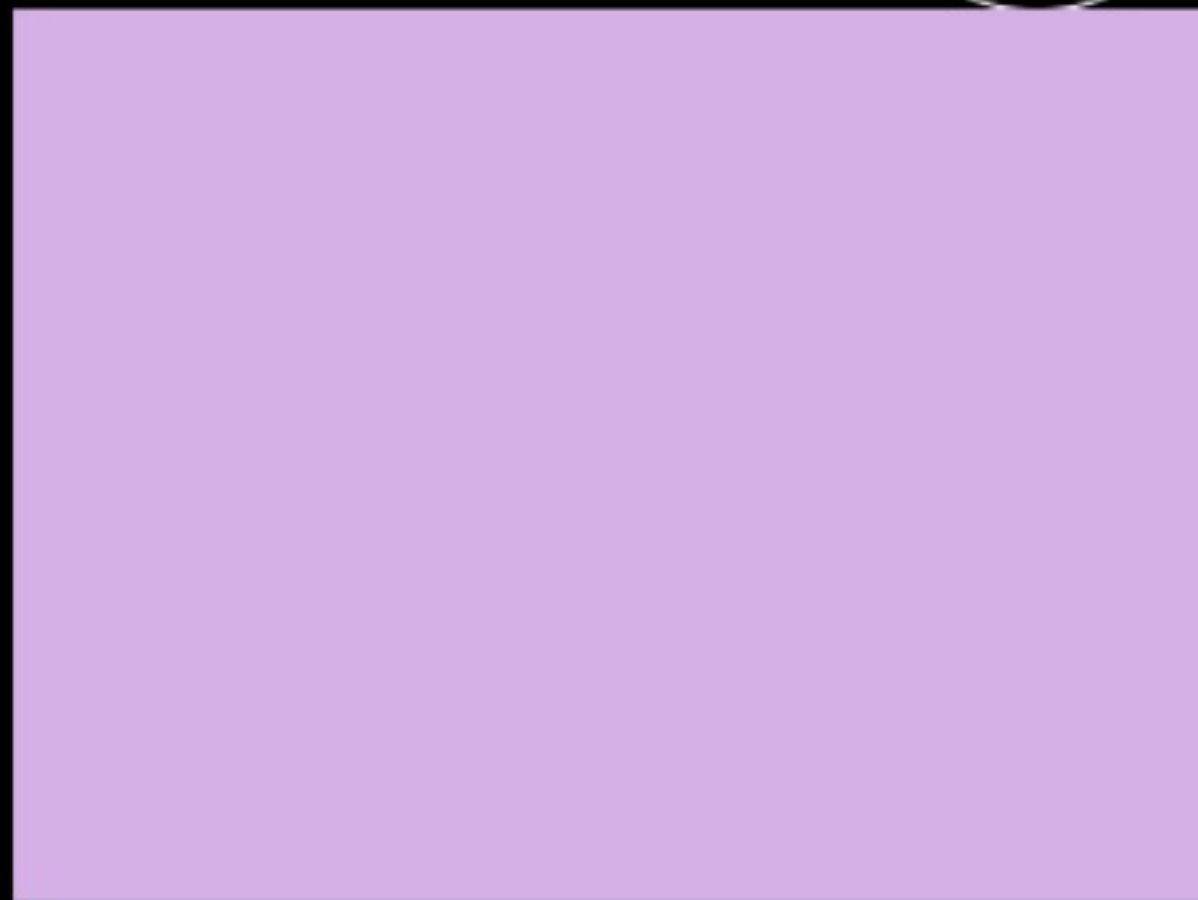
6.5

Las primeras galaxias

2



Estructura a gran escala



$z = \infty$

$t = 0$ Kyr

La Era de la Materia Oscura

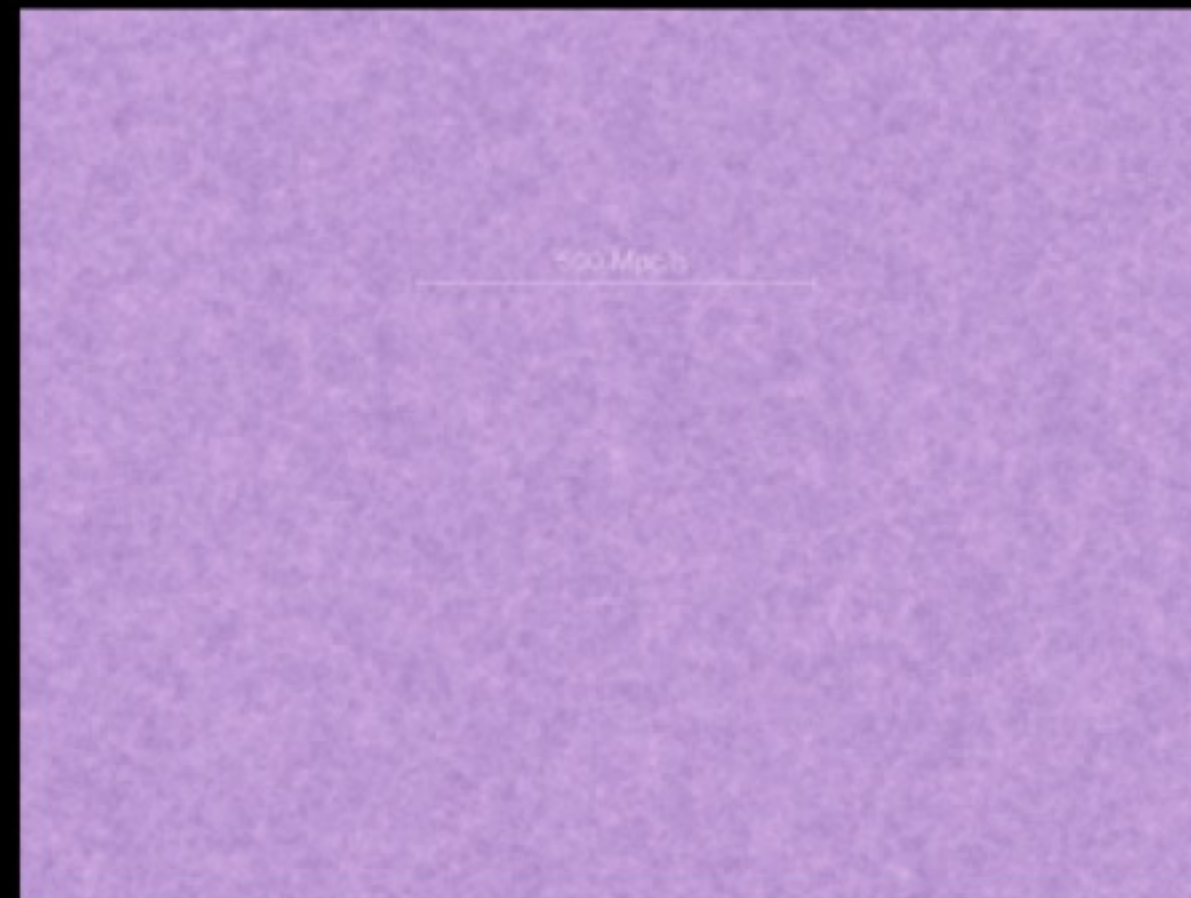
6.5

Las primeras galaxias

2



Estructura a gran escala



$z = 1040$

$t = 380 \text{ Kyr}$

La Era de la Materia Oscura

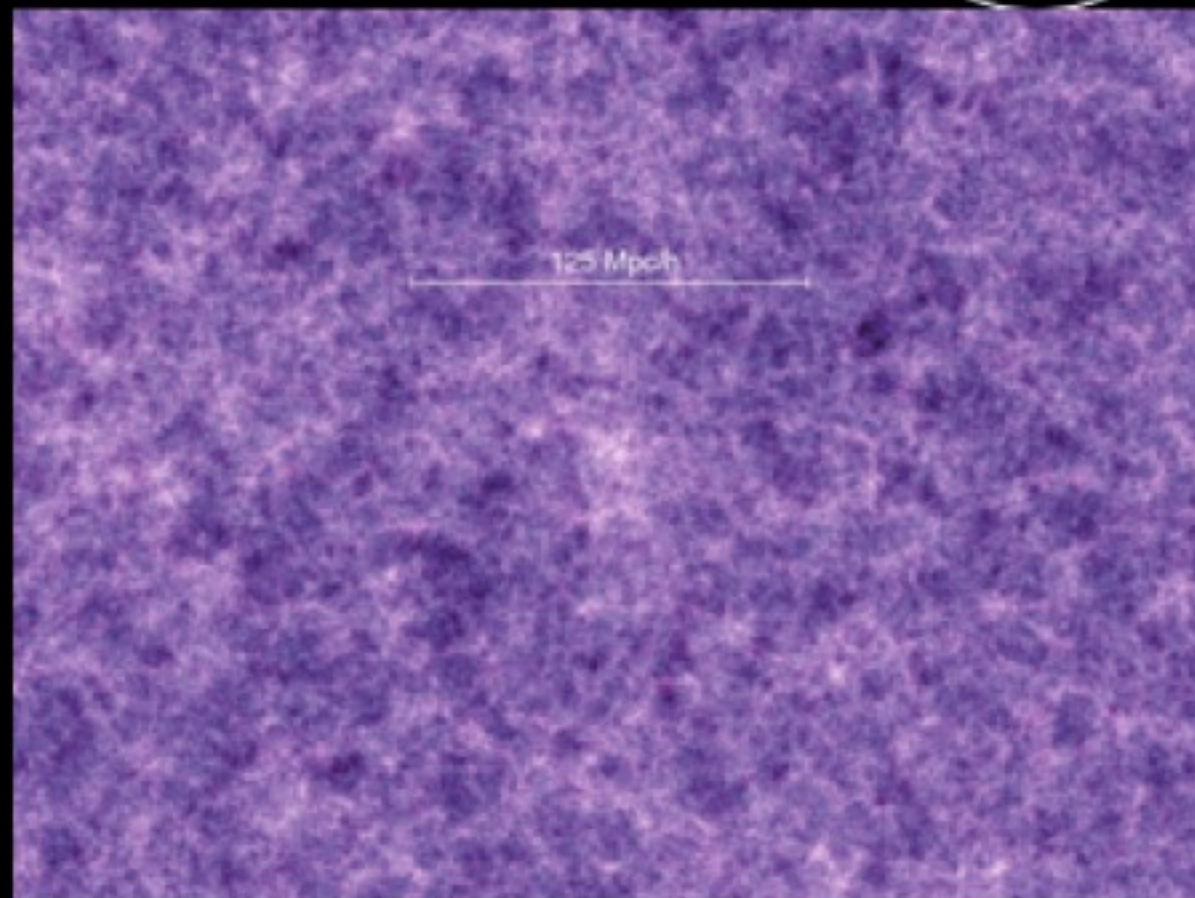
6.5

Las primeras galaxias

2



Estructura a gran escala



$z = 18.3$

$t = 0.21 \text{ Gyr}$

La Era de la Materia Oscura

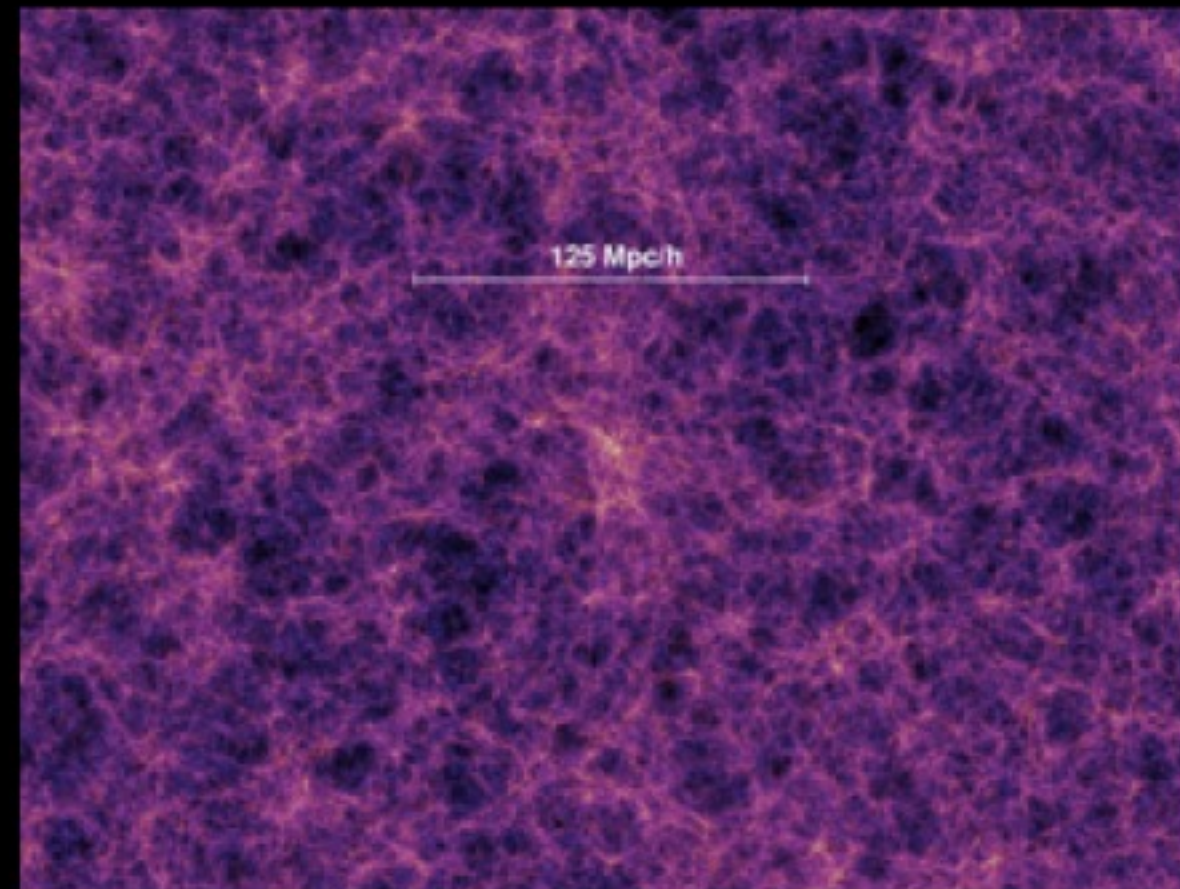
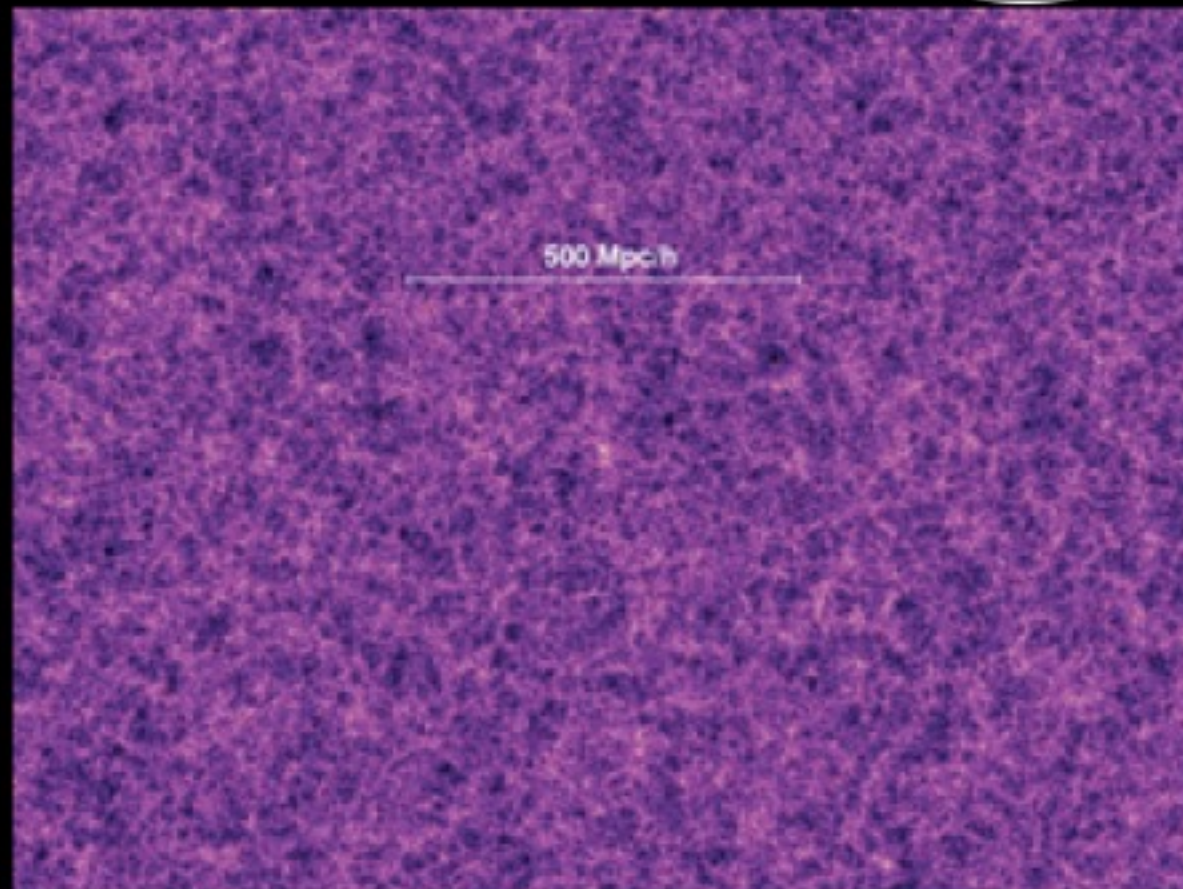
6.5

Las primeras galaxias

2



Estructura a gran escala



$z = 5.7$

$t = 1.0 \text{ Gyr}$

La Era de la Materia Oscura

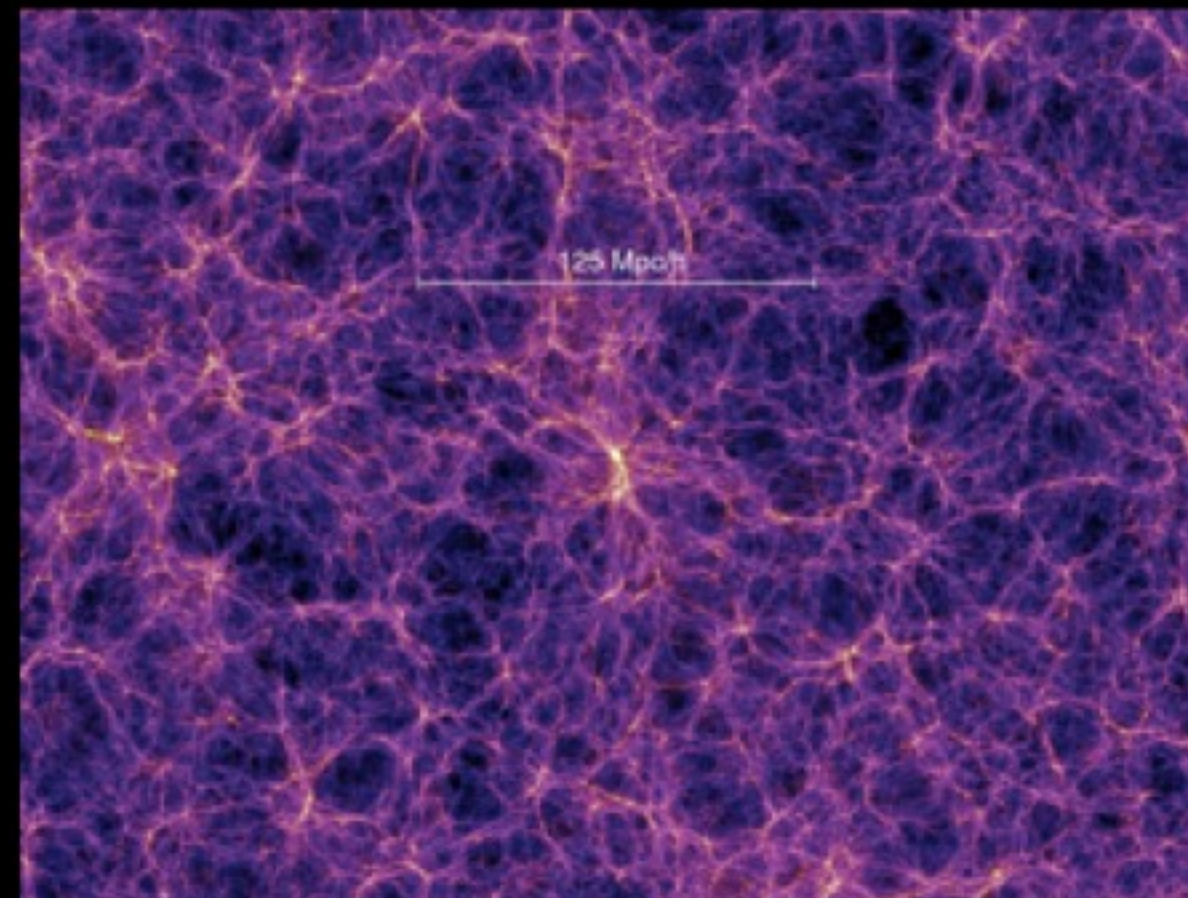
6.5

Las primeras galaxias

2



Estructura a gran escala



$z = 1.4$

$t = 4.7 \text{ Gyr}$

La Era de la Materia Oscura

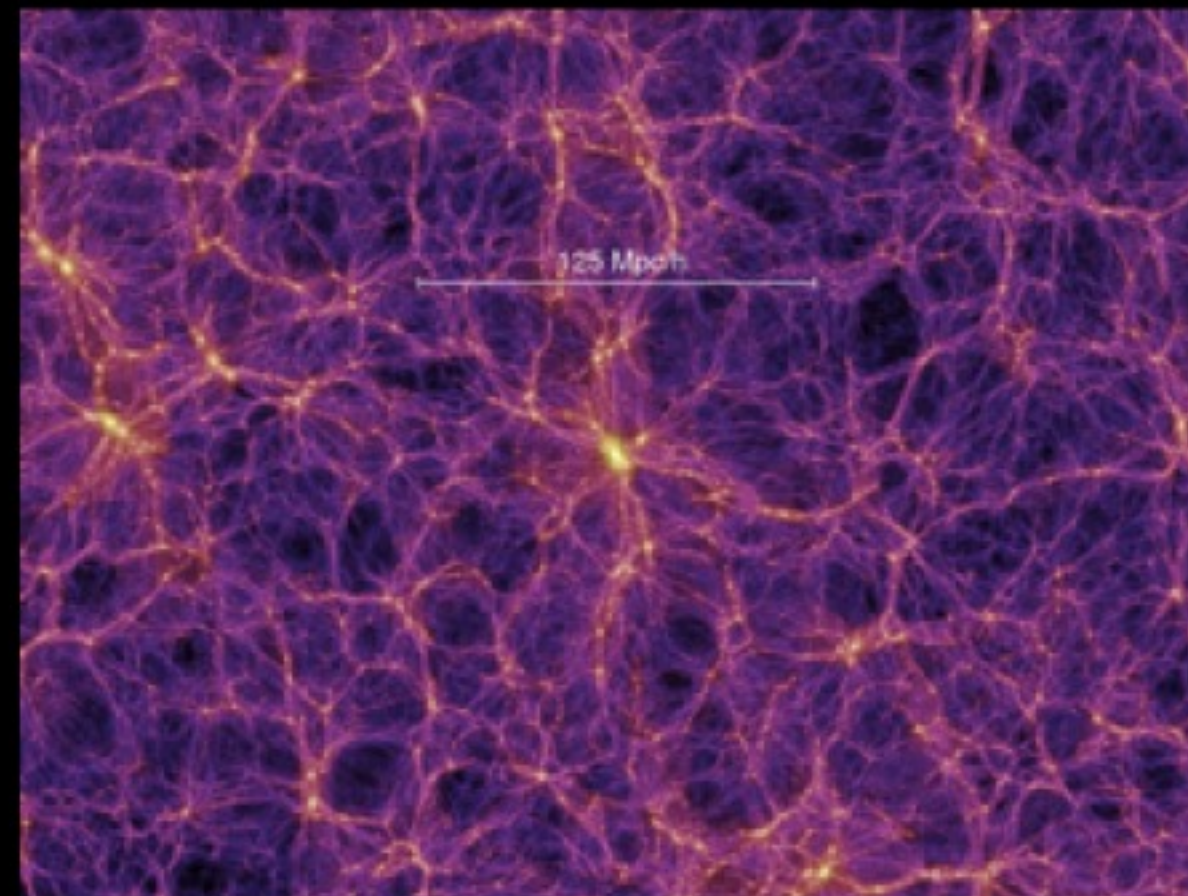
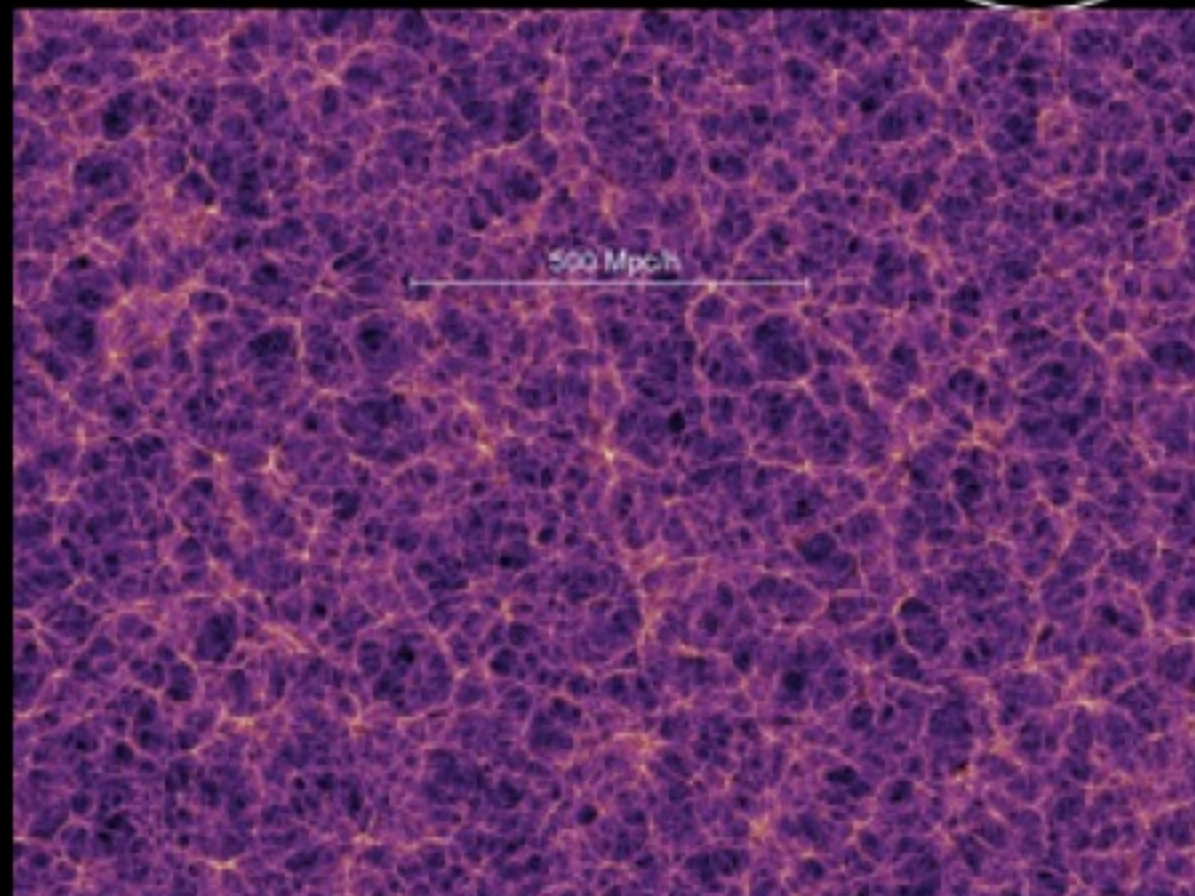
6.5

Las primeras galaxias

2



Estructura a gran escala



$z = 0.0$

$t = 13.6 \text{ Gyr}$



- La dens. de ene. osc., Ω_{Λ} , domina.
- Exp. acelerada: $a(t) \propto \exp[Ht]$.
- Por vez primera, sucede que:
 - El Universo observable se reduce.
 - Las galaxias escapan del horizonte.
 - Los cúmulos conservan su tamaño.
 - La fracción vacía del Universo crece.
 - En definitiva, **inflación redoux**.



- La dens. de ene. osc., Ω_Λ , domina.
- Exp. acelerada: $a(t) \propto \exp[Ht]$.
- Por vez primera, sucede que:
 - El Universo observable se reduce.
 - Las galaxias escapan del horizonte.
 - Los cúmulos conservan su tamaño.
 - La fracción vacía del Universo crece.
 - En definitiva, **inflación redoux**.



- La dens. de ene. osc., Ω_Λ , domina.
- Exp. acelerada: $a(t) \propto \exp[Ht]$.
- Por vez primera, sucede que:
 - El Universo observable se reduce.
 - Las galaxias escapan del horizonte.
 - Los cúmulos conservan su tamaño.
 - La fracción vacía del Universo crece.
 - En definitiva, **inflación redoux**.

September

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

Primeras células prokariotas.

September

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

Primeras células prokariotas.
Fotosíntesis.

October

1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

Primeras células prokariotas.
Fotosíntesis.
Oxigenación de la atmósfera.

November

			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30		

Primeras células prokariotas.
Fotosíntesis.
Oxigenación de la atmósfera.
Primeras células eukariotas.

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Primeras células prokariotas.
Fotosíntesis.
Oxigenación de la atmósfera.
Primeras células eukariotas.
Primeros org. multicelulares.

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Primeras células prokariotas.
Fotosíntesis.
Oxigenación de la atmósfera.
Primeras células eukariotas.
Primeros org. multicelulares.
Primeros animales.

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Fotosíntesis.
Oxigenación de la atmósfera.
Primeras células eucariotas.
Primeros org. multicelulares.
Primeros animales.
Primeros artrópodos.

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Oxygenación de la atmósfera.
Primeras células eucariotas.
Primeros org. multicelulares.
Primeros animales.
Primeros artrópodos.
Primeros peces.

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

- Primeras células eucariotas.
- Primeros org. multicelulares.
- Primeros animales.
- Primeros artrópodos.
- Primeros peces.
- Primeras plantas terrestres.**

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

- Primeros org. multicelulares.
- Primeros animales.
- Primeros artrópodos.
- Primeros peces.
- Primeras plantas terrestres.
- Primeros insectos.**

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

- Primeros animales.
- Primeros artrópodos.
- Primeros peces.
- Primeras plantas terrestres.
- Primeros insectos.
- Primeros anfibios.**

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

- Primeros artrópodos.
- Primeros peces.
- Primeras plantas terrestres.
- Primeros insectos.
- Primeros anfibios.
- Primeros reptiles.**

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

- Primeros peces.
- Primeras plantas terrestres.
- Primeros insectos.
- Primeros anfibios.
- Primeros reptiles.
- Ext. Pérmico-Triásico.**

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Primeras plantas terrestres.
Primeros insectos.
Primeros anfibios.
Primeros reptiles.
Ext. Pérmico-Triásico.
Primeros mamíferos.

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Primeros insectos.
Primeros anfibios.
Primeros reptiles.
Ext. Pérmico-Triásico.
Primeros mamíferos.
Primeras aves.

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Primeros anfibios.
Primeros reptiles.
Ext. Pérmico-Triásico.
Primeros mamíferos.
Primeras aves.
Primeras flores.

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Primeros reptiles.
Ext. Pérmico-Triásico.
Primeros mamíferos.
Primeras aves.
Primeras flores.
Ext. Cretácico–Paleogeno.

December

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Ext. Pérmico-Triásico.
Primeros mamíferos.
Primeras aves.
Primeras flores.
Ext. Cretácico–Paleogeno.
Primeros primates.



06:05:00

Primeros simios.



06:05:00
14:24:00

Primeros simios.
Primeros homínidos.



06:05:00
14:24:00
22:24:00

Primeros simios.
Primeros homínidos.
Uso de herramientas.



06:05:00

14:24:00

22:24:00

23:44:00

Primeros simios.

Primeros homínidos.

Uso de herramientas.

Domesticación del fuego.



06:05:00

14:24:00

22:24:00

23:44:00

23:52:00

Primeros simios.

Primeros homínidos.

Uso de herramientas.

Domesticación del fuego.

Primeros sapiens.



06:05:00

14:24:00

22:24:00

23:44:00

23:52:00

23:53:00

Primeros simios.

Primeros homínidos.

Uso de herramientas.

Domesticación del fuego.

Primeros sapiens.

Invención del lenguaje.



14:24:00

22:24:00

23:44:00

23:52:00

23:53:00

23:59:32

Primeros homínidos.

Uso de herramientas.

Domesticación del fuego.

Primeros sapiens.

Invención del lenguaje.

Desarrollo de la agricultura.



22:24:00

23:44:00

23:52:00

23:53:00

23:59:32

23:59:49

Uso de herramientas.

Domesticación del fuego.

Primeros sapiens.

Invención del lenguaje.

Desarrollo de la agricultura.

Invención de la escritura.



23:44:00

23:52:00

23:53:00

23:59:32

23:59:49

23:59:51

Domesticación del fuego.

Primeros sapiens.

Invención del lenguaje.

Desarrollo de la agricultura.

Invención de la escritura.

Primeras leyes.



23:52:00

23:53:00

23:59:32

23:59:49

23:59:51

23:59:53

Primeros sapiens.

Invención del lenguaje.

Desarrollo de la agricultura.

Invención de la escritura.

Primeras leyes.

Antigüedad clásica.



23:53:00

23:59:32

23:59:49

23:59:51

23:59:53

23:59:56

Invención del lenguaje.

Desarrollo de la agricultura.

Invención de la escritura.

Primeras leyes.

Antigüedad clásica.

Edad Media.



23:59:32

23:59:49

23:59:51

23:59:53

23:59:56

23:59:59

Desarrollo de la agricultura.

Invención de la escritura.

Primeras leyes.

Antigüedad clásica.

Edad Media.

Revolución científica.

La Era de la Energía Oscura

6.6

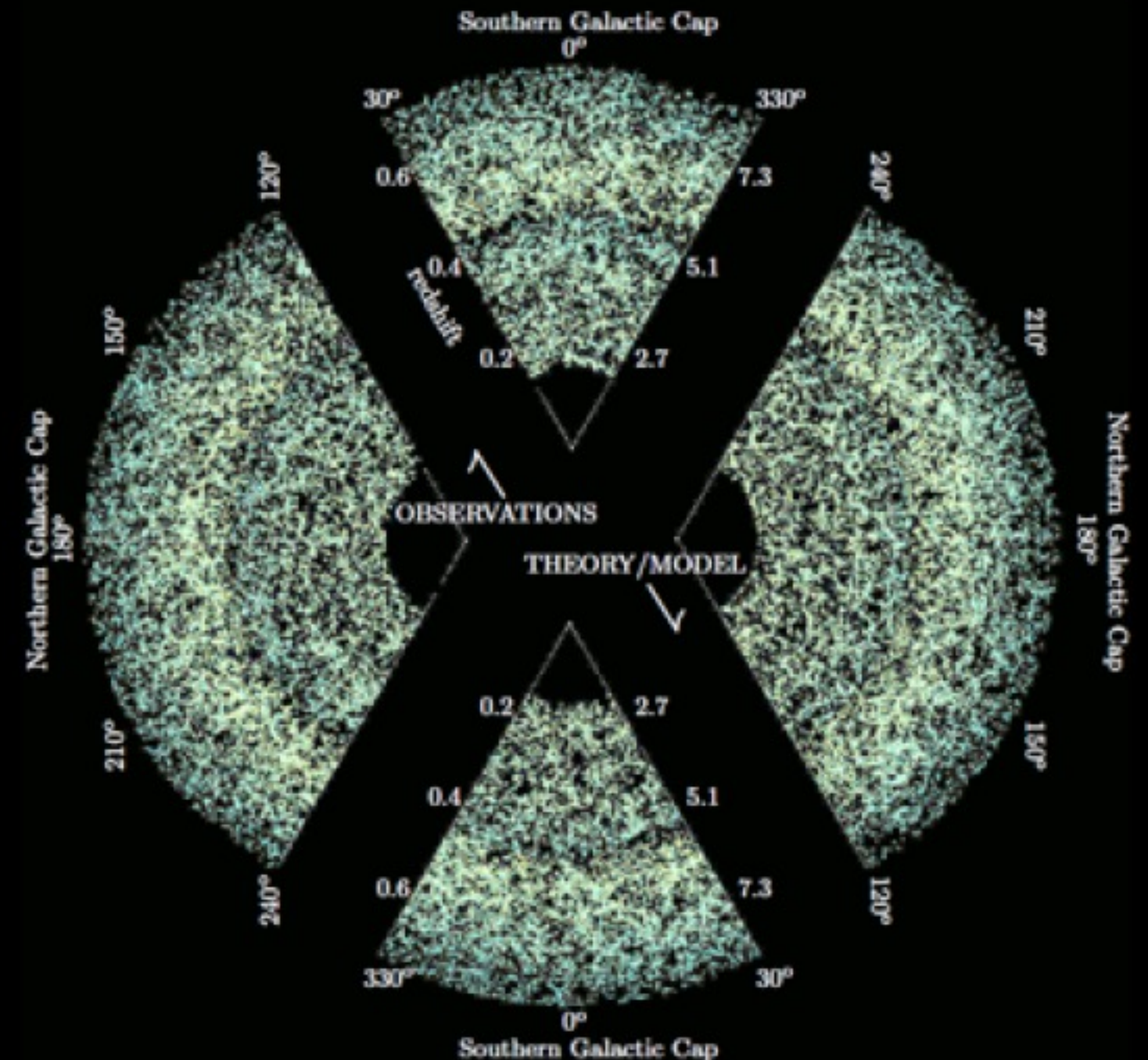
El Universo actual

2

January

1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

$$t_i = 13.8 \text{ Gyr}$$
$$T = 2.7 \text{ K}$$



7 Para saber más

- 1 Preguntas abiertas
- 2 Online: Podcasts y vídeos
- 3 Divulgación: Libros y documentales

Para saber más

7

Preguntas abiertas

1

URGENT

¿Qué es la Materia Oscura?

¿Qué es la Energía Oscura?

¿Cómo nació el Universo?

¿Existió un período de inflación?

¿Es infinito el Universo?

¿Tiene origen el Tiempo?

¿Cuál es el destino final del Universo?

Para saber más

7

Online: Podcasts y vídeos

2



- Contact
(R. Zemeckis, 1994).
- Gravity
(A. Cuarón, 2013)
- Interstellar
(C. Nolan, 2014).
- The Martian
(R. Scott, 2015).

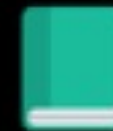


- ESO Cast (Youtube)
<https://bit.ly/2JX8Vlx> Astronomía.
- HUBBLE Cast (Youtube)
<https://bit.ly/2MK5NHq> Astronomía.
- IFT Channel (Youtube)
<https://bit.ly/2Gj4CdA> Física.
- Quantum Fracture (Youtube)
<https://bit.ly/2ntnW2c> Física.

Divulgación: Documentales y libros



- Cosmos. A personal voyage (C. Sagan, 1980). **Divulgación.**
- The elegant Universe (B. Green, 2013, 1980). **Teoría de cuerdas.**
- Into the Universe with Stephen Hawking (B. Cox, 2010). **Cosmología.**
- Wonders of the Universe (E. Reynolds, 2011). **Astronomía .**
- Particle fever (M. Levinson, 2013). **Descubrimiento del Higgs.**
- Cosmos. A spacetime Odyssey (N. deGrasse Tyson, 2014). **Divulgación.**
- The farthest (E. Reynolds, 2017). **Exploración espacial.**



- Breve historia del tiempo (S. Hawking, 1988). **Cosmología.**
- El encanto de la Física (S. L. Glashow, 1995). **Física de partículas.**
- El Universo Inflacionario (A. Guth, 1999). **Paradigma inflacionario.**
- El Universo en una cáscara de nuez (S. Hawking, 2001). **Cosmología.**
- Los tres primeros minutos (S. Weinberg, 2009). **Teoría del Big Bang.**
- Agujeros negros y tiempo curvo (K. Thorne, 2010). **Agujeros negros.**
- El Universo Elegante (B. Green, 2012). **Teoría de cuerdas.**

Bibliografía



- Modern Cosmology (Dodelson)
- Cosmology (Weinberg)
- Physical foundations of Cosmology (Mukhanov)
- The early universe (Kolb, Turner)
- Structure formation in the Universe (Padmanabhan)
- Astrophysical Formulae (Lang)



- Gravitation (Misner, Thorne, Wheeler)
- Intro. to quantum field theory (Peskin, Schroeder)
- Quantum Field Theory in a Nutshell (Zee)
- The Quantum Theory of Fields, Vol. I (Weinberg)
- The Quantum Theory of Fields, Vol. II (Weinberg)
- Quarks and leptons (Halzen, Martin)

Contacto



- 🌸 Programa ES para Prof. del CERN
- 📅 Introducción a la Cosmología
- 👤 Manuel Trashorras
- ✉️ manuel.trashorras@cern.ch
- 📍 CERN Bâtiment 4, 1-049
- 📅 L-V, 10:00-12:00 & 14:00-17:30