

# La Tierra es plana

Los misterios del universo para todos

Gianluca Calcagni



**XVIII** SEMANA  
DE LA  
CIENCIA  
Madrid 2018 (5-18 de noviembre)

16 de noviembre 2018



# Contenidos

- 1 Nuestra visión del universo
- 2 Cosmología

# Contenidos

- 1 Nuestra visión del universo
- 2 Cosmología
- 3 Gravedad cuántica

# Contenidos

- 1 Nuestra visión del universo
- 2 Cosmología
- 3 Gravedad cuántica
- 4 Construir la realidad



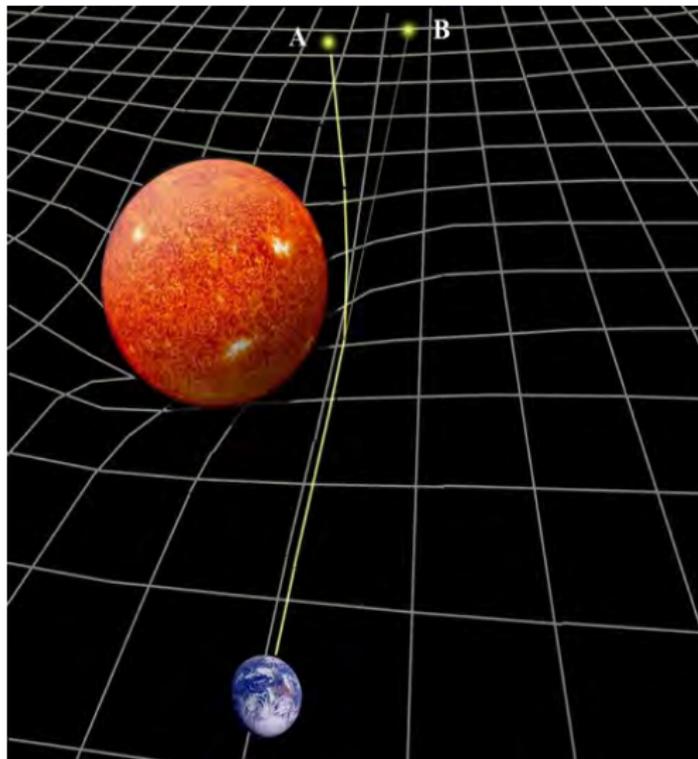
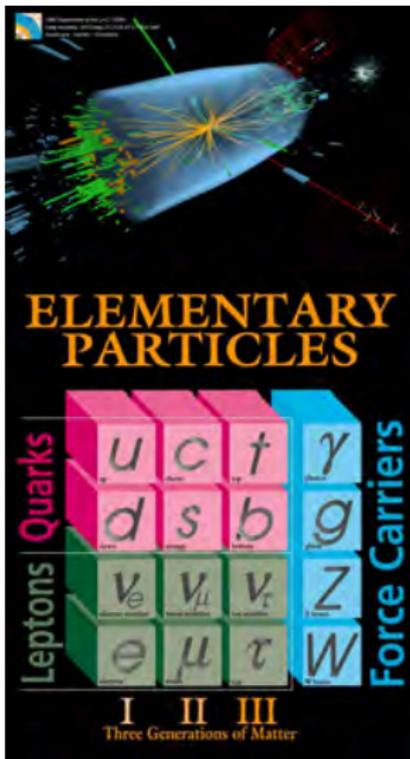
# Contenidos

- 1 Nuestra visión del universo
- 2 Cosmología
- 3 Gravedad cuántica
- 4 Construir la realidad
- 5 Gravedad cuántica (para todos)

# 01/47- Partículas elementales y gravedad

Modelo Estándar (cuántico)

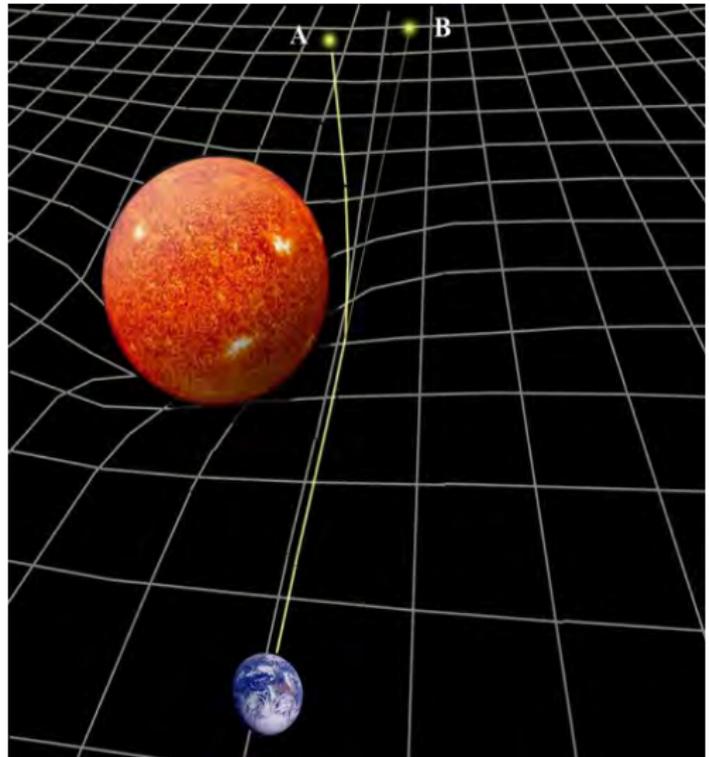
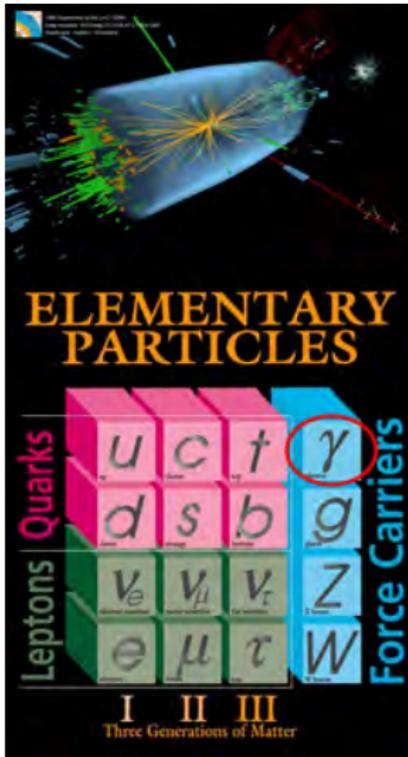
Relatividad General (clásica)



# 01/47- Partículas elementales y gravedad

Modelo Estándar (cuántico)

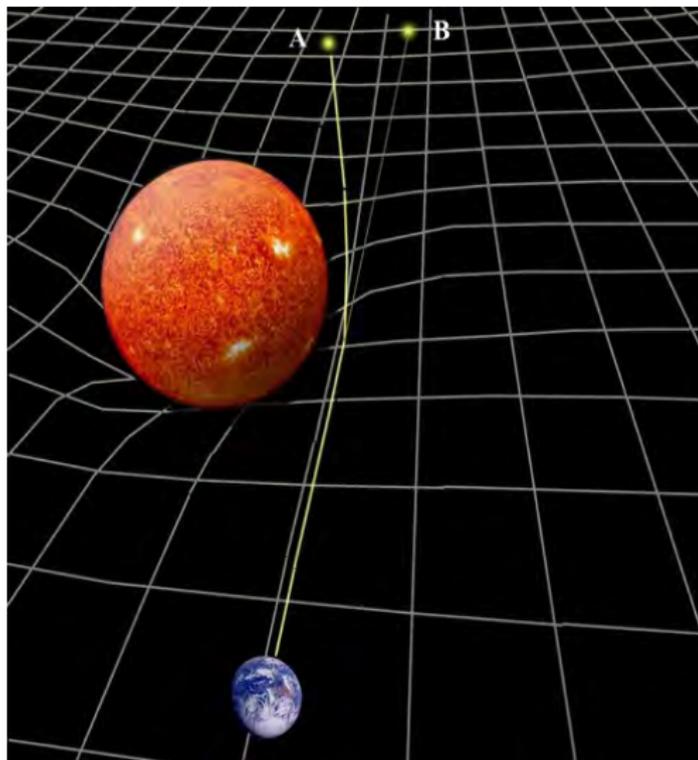
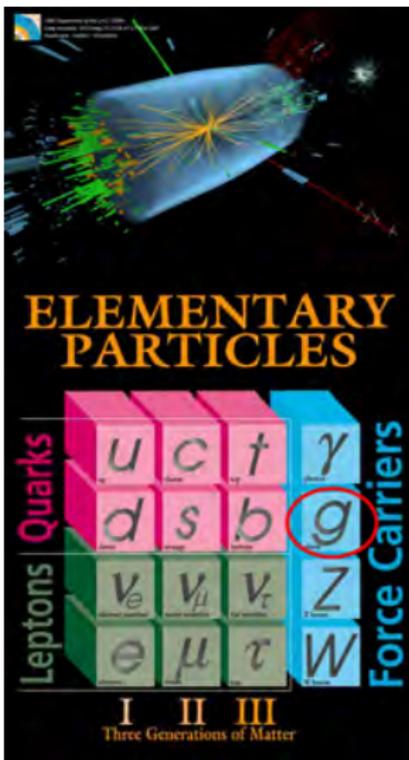
Relatividad General (clásica)



# 01/47- Partículas elementales y gravedad

Modelo Estándar (cuántico)

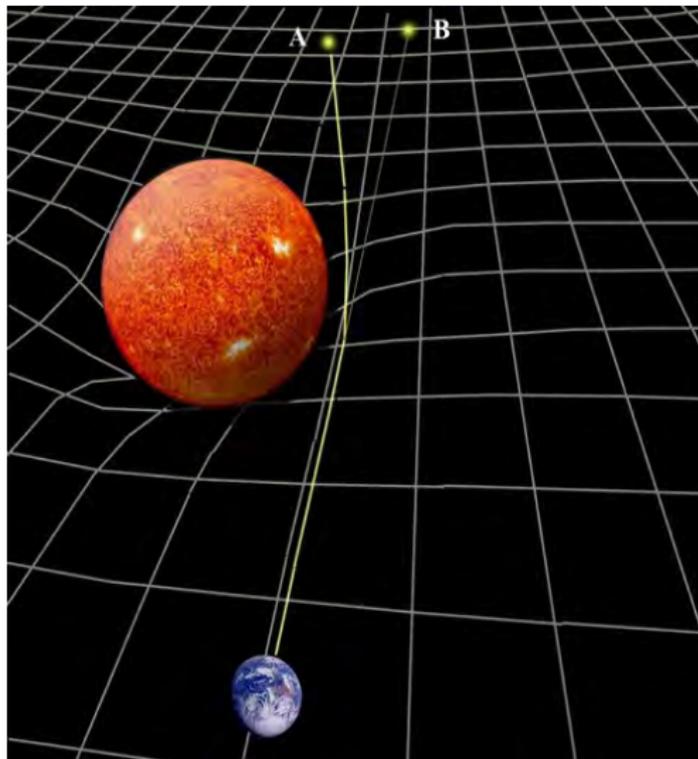
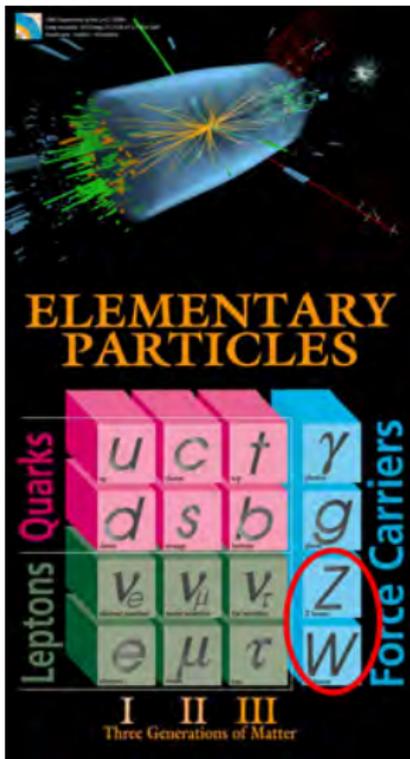
Relatividad General (clásica)



# 01/47- Partículas elementales y gravedad

Modelo Estándar (cuántico)

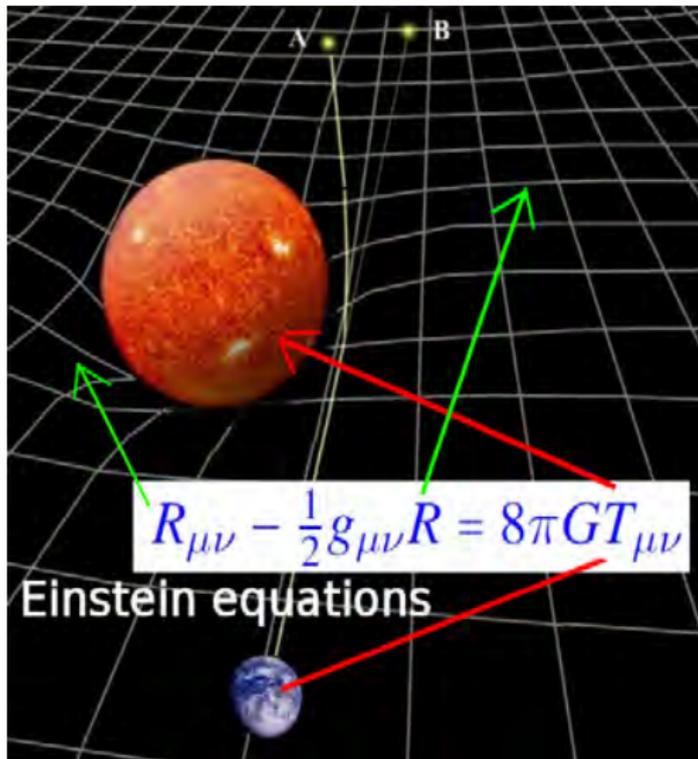
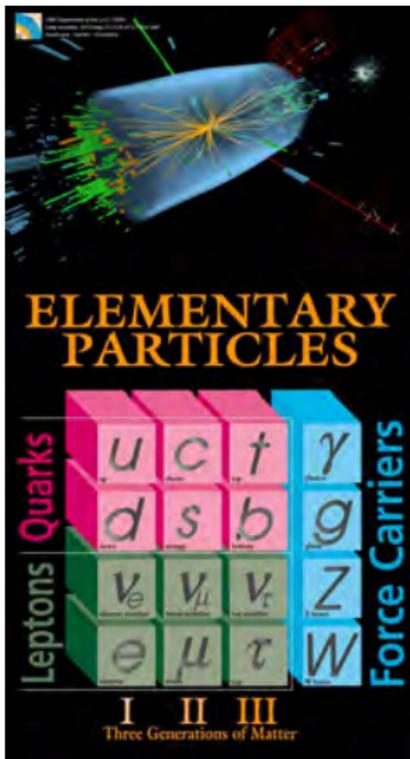
Relatividad General (clásica)



# 01/47- Partículas elementales y gravedad

Modelo Estándar (cuántico)

Relatividad General (clásica)



## 02/47– Tres problemas

Experimentos **muy precisos** han confirmado el Modelo Estándar (valor de  $\alpha_{\text{QED}}$ , vida media del muón, Higgs, ...) y la Relatividad General (invariancia de Lorentz, principio de equivalencia, estrellas, ondas gravitatorias, cosmología, ...). Pero hay **cuestiones no resueltas**:

- Problema de la **Gran Explosión**
- Problema de la **constante cosmológica** (energía oscura)
- Problema de la **gravedad cuántica**

Se pueden estudiar dentro del marco de la **cosmología**.

03/47-

## El maravilloso relato del Universo (para físicos)

$$\beta \Gamma_{\mu\nu}^{\rho\sigma}[g] := \frac{1}{2} g^{\rho\sigma} (\beta \mathcal{D}_{\mu} g_{\nu\sigma} + \beta \mathcal{D}_{\nu} g_{\mu\sigma} - \beta \mathcal{D}_{\sigma} g_{\mu\nu}), \quad \beta \mathcal{D} = v^{-\beta} \partial[v^{\beta} \cdot]$$

$$\mathcal{R}^{\rho}_{\mu\sigma\nu} := \partial_{\sigma}^{\beta} \Gamma_{\mu\nu}^{\rho} - \partial_{\nu}^{\beta} \Gamma_{\mu\sigma}^{\rho} + \beta \Gamma_{\mu\nu}^{\tau} \beta \Gamma_{\sigma\tau}^{\rho} - \beta \Gamma_{\mu\sigma}^{\tau} \beta \Gamma_{\nu\tau}^{\rho}, \quad \nabla_{\sigma} g_{\mu\nu} = W_{\sigma} g_{\mu\nu}, \quad W_{\mu} = \partial_{\mu} \Phi, \quad \Phi := \ln$$

$$S := \frac{1}{2\kappa^2} \int d^D x v \sqrt{-g} [\mathcal{R} - \omega \mathcal{D}_{\mu} v \mathcal{D}_{\nu} v - U(v)] + S_m = \frac{1}{2\kappa^2} \int d^D x e^{\frac{1}{\beta} \Phi} \sqrt{-g} \left( \mathcal{R} - \frac{9\omega}{4\beta^2} e^{\frac{2}{\beta} \Phi} \partial_{\mu} \Phi \partial^{\mu} \Phi - U \right) +$$

$$\kappa^2 \bar{T}_{\mu\nu} = \bar{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \bar{g}_{\mu\nu} (\bar{R} - e^{-\Phi} U) - \Omega \left( \partial_{\mu} \Phi \partial_{\nu} \Phi + \frac{1}{2} \bar{g}_{\mu\nu} \partial_{\sigma} \Phi \bar{\partial}^{\sigma} \Phi \right)$$

$$H^2 = \frac{\kappa^2}{3} \bar{\rho} + \frac{\Omega}{2} \frac{\dot{v}^2}{v^2} + \frac{U(v)}{6v} - \frac{\kappa}{a^2}, \quad 2\dot{H} - \frac{2\kappa}{a^2} + \kappa^2 (\bar{\rho} + \bar{P}) = -\Omega \frac{\dot{v}^2}{v^2}$$

$$a(t) = \left( 1 + \sqrt{\frac{t_{*}}{t}} \right)^{\frac{3}{8}} \exp \left\{ \frac{9}{8} \left[ H_0 \frac{t}{t_{*}} + \sqrt{\frac{t}{t_{*}}} - \frac{t}{t_{*}} \ln \left( 1 + \sqrt{\frac{t_{*}}{t}} \right) \right] \right\}$$

$$\tilde{k} = k_{*} \left[ \frac{k_{*}}{k} + \text{sgn}(k) \frac{k_{*}}{\sqrt{3}\alpha} \left| \frac{k_{*}}{k} \right|^{\alpha} F_{\omega}(\ln |k/\sqrt{3}|) \right]^{-1}, \quad P_{s,t} = \mathcal{A}_{s,t} \tilde{k}^{n-1} \sim \mathcal{A}_{s,t} \left( \frac{k}{k_{*}} \right)^{\alpha(n-1)} [F_{\omega}(\ln k)]^{1-n}$$

$$\psi = \sum_{k,\sigma} \frac{e^{ikz}}{\sqrt{2\mathcal{E}_k}} (c_{k\sigma} u_{k\sigma} + c_{-k\sigma}^{\dagger} v_{k\sigma}), \quad \mathcal{H}_{*} \propto \mathcal{H}_{\text{BCS}} = \sum_{k,\sigma} \mathcal{E}_k c_{k\sigma}^{\dagger} c_{k\sigma} - \sum_{k,k'} V_{kk'} c_{k+}^{\dagger} c_{k-}^{\dagger} c_{k'} - c_{k'} +$$

$$\phi_{\text{WZW}}(z_1, \dots, z_{\Omega}) = \left\langle \prod_{a=1}^{\Omega} \Phi_{m_a}^{j_a}(z_a) \tilde{\Phi}_{m_{\Omega+1}}^{j_{\Omega+1}}(\infty) \prod_{n=1}^N Q_n \right\rangle, \quad Q_n \equiv \oint_{C_n} \frac{dz_n}{2\pi i} \beta(z_n) e^{2i\varphi(z_n)/\sqrt{2(2-k)}} \dots$$

# 03/47- El maravilloso relato del Universo (para físicos)

$$\beta \Gamma_{\mu\nu}^{\rho} [g] := \frac{1}{2} g^{\rho\sigma} \dots$$

$$\mathcal{R}^{\rho}_{\mu\sigma\nu} := \partial_{\sigma} \beta \Gamma_{\mu}^{\rho}$$

$$S := \frac{1}{2\kappa^2} \int d^D x v \dots$$

$$\kappa^2 \bar{T}_{\mu\nu} = \bar{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \dots$$

$$H^2 = \frac{\kappa^2}{3} \bar{\rho} + \frac{\Omega}{2} \frac{\dot{v}^2}{v^2} \dots$$

$$a(t) = \left( 1 + \sqrt{\frac{t_*}{t}} \right) \dots$$

$$\tilde{k} = k_* \left[ \frac{k_*}{k} + \text{sgn}(k) \dots \right]$$

$$\psi = \sum_{k,\sigma} \frac{e^{ikz}}{\sqrt{2\mathcal{E}_k}} (c_k \dots)$$

$$\phi_{WZW}(z_1, \dots, z_{\Omega})$$



$$\sigma g_{\mu\nu}, \quad W_{\mu} = \partial_{\mu} \Phi, \quad \Phi := \ln \left( \frac{1}{\beta} - \frac{9\omega}{4\beta^2} e^{\frac{2}{\beta} \Phi} \partial_{\mu} \Phi \partial^{\mu} \Phi - U \right) + \dots$$

$$\dots)^{\alpha(n-1)} [F_{\omega}(\ln k)]^{1-n} + c_k^{\dagger} - c_{k'} - c_{k'+} \dots \varphi(z_n)/\sqrt{2(2-k)} \dots$$

# 04/47- A partir de la realidad ...

¿CÓMO ES EL MUNDO?



04/47- ... creamos representaciones de ella

¿CÓMO CREEMOS QUE ES EL MUNDO?

The diagram consists of several hand-drawn elements:

- Chemical Structure:** On the left is a chemical structure of a chlorophenylisoindolinone derivative, with a chlorine atom (Cl) on a benzene ring fused to an isoindolinone ring system.
- Equation:** Next to the chemical structure is the equation  $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$ .
- Person:** A simple drawing of a person with a surprised expression, looking towards the right.
- Photon:** A wavy line representing a photon with an arrow pointing down labeled  $e^-$  and an arrow pointing right labeled  $h\nu$ .
- Person:** A second drawing of a person looking at the photon.
- Equation:** Below the photon is the equation  $H^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_m + \rho_r)$ .
- Person:** A third drawing of a person looking at the equation with a question mark above their head.

## 05/47– Primera aproximación

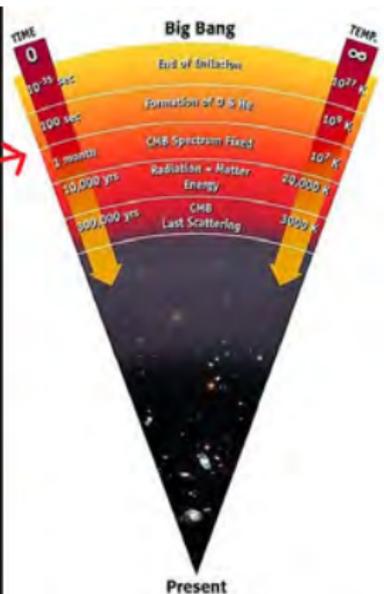
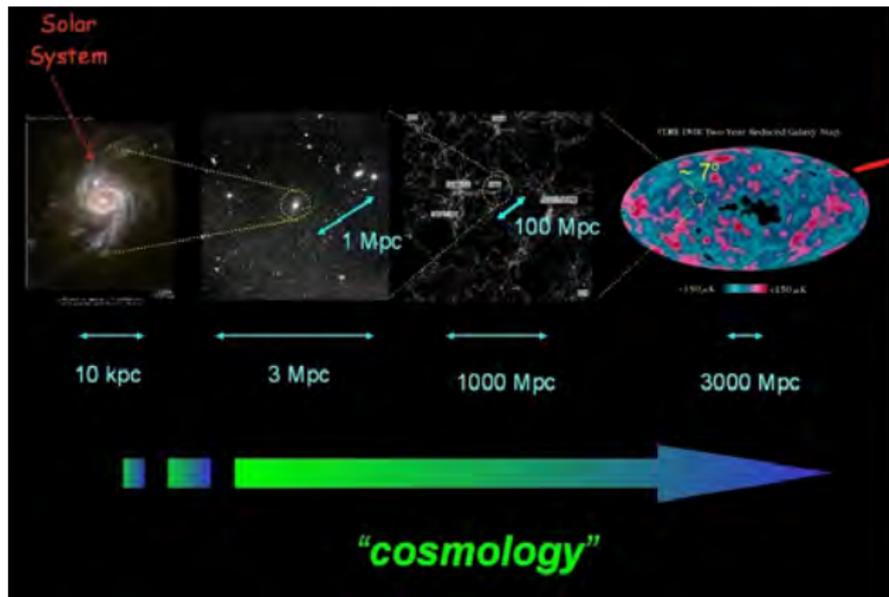
**Divulgación “clásica”:** descripción de los conceptos básicos usando términos sencillos y muchas ilustraciones.

# Contenidos

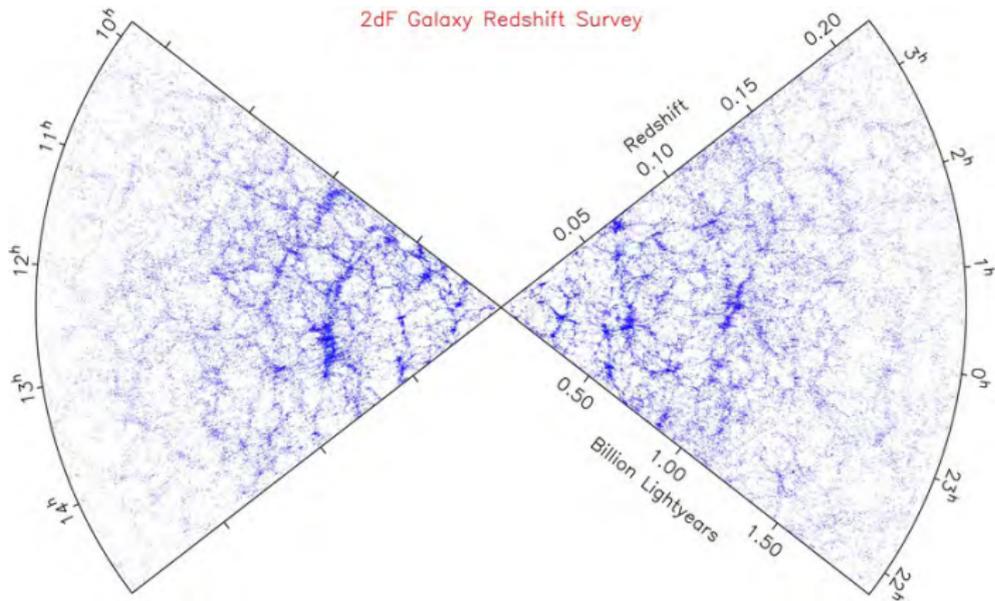
- 1 Nuestra visión del universo
- 2 Cosmología**
- 3 Gravedad cuántica
- 4 Construir la realidad
- 5 Gravedad cuántica (para todos)

# 06/47- Cosmología

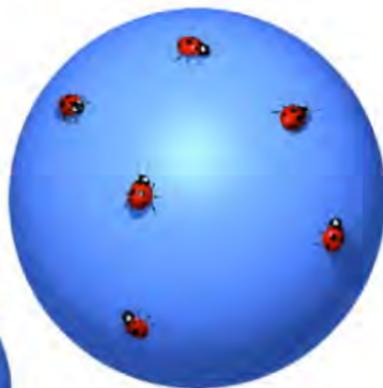
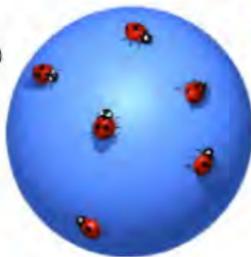
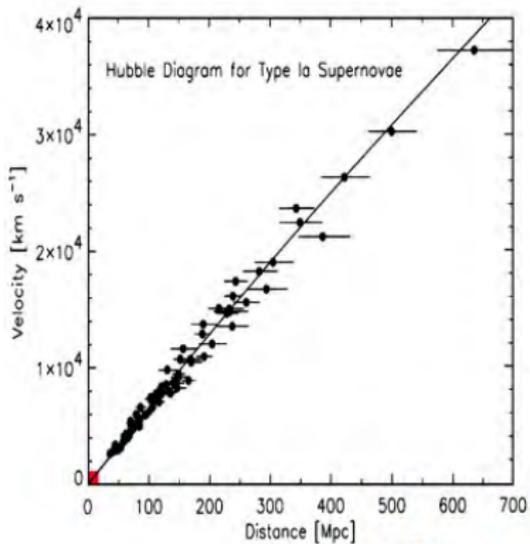
La luz se propaga con velocidad **finita**: ¡miramos hacia el pasado!



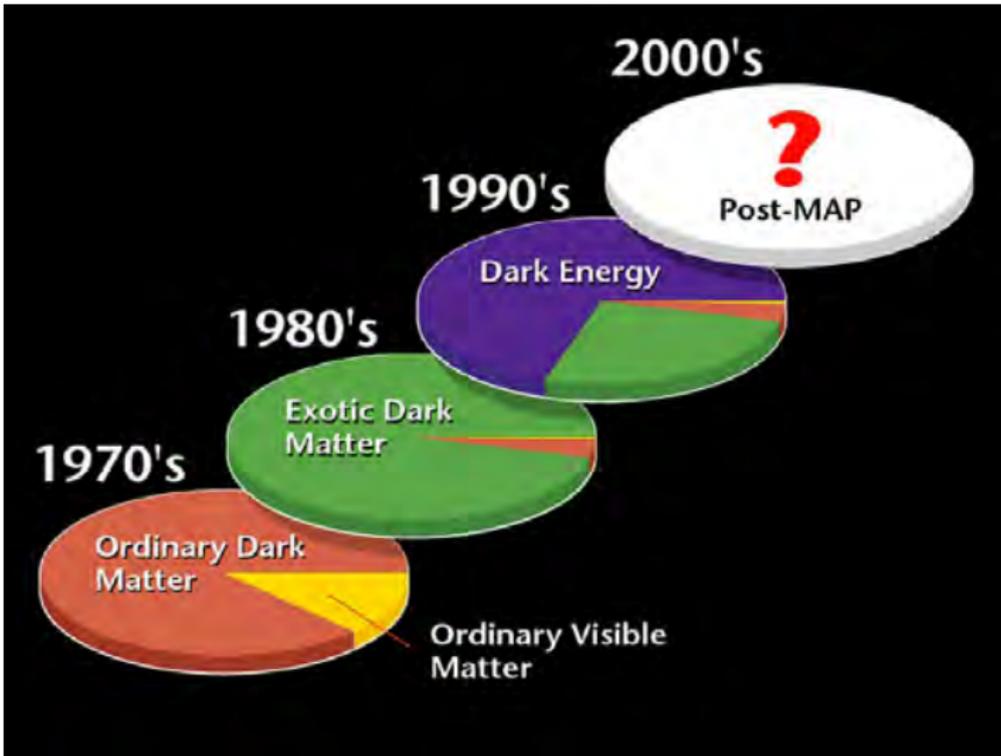
# 07/47- Distribución de galaxias



# 08/47- Expansión cósmica: ley de Hubble



# 09/47- Composición del Universo



10/47-

# Radiación cósmica de fondo (CMB)

1965



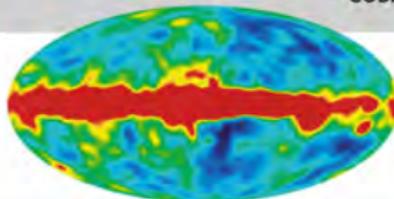
Penzias and  
Wilson



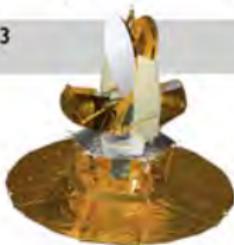
1992



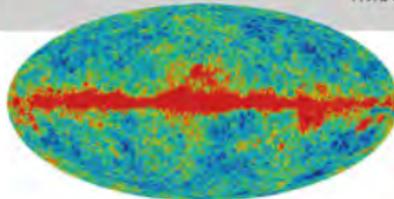
COBE



2003

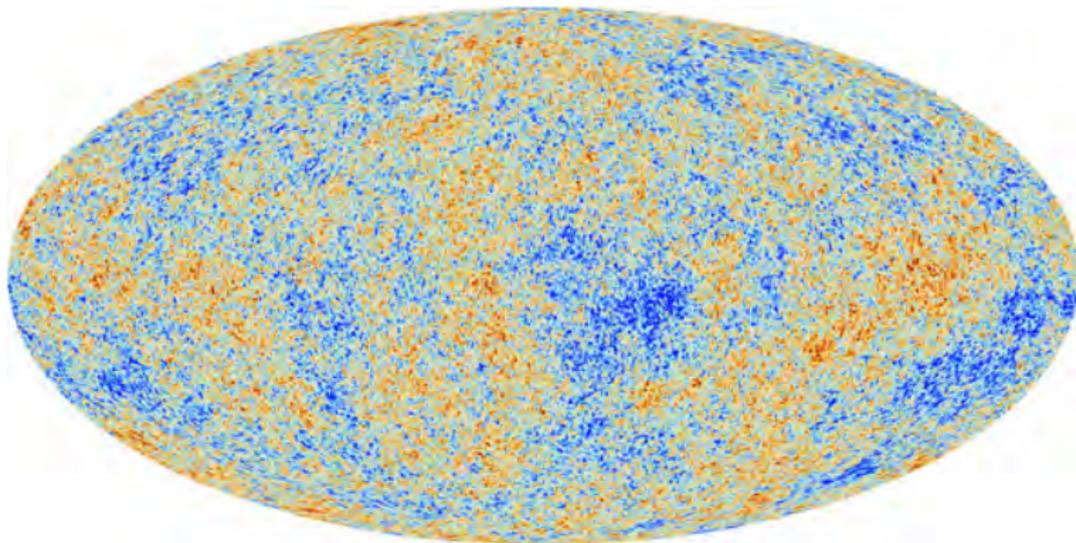


WMAP

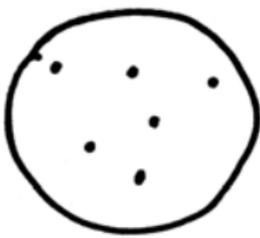


# 10/47- Radiación cósmica de fondo (CMB)

$T \sim 2.73$  K, fluctuaciones de temperatura  $\delta T/T \sim 10^{-5}$  creadas a  $t = 380000$  años



# 11/47- Atrás en el tiempo hacia la Gran Explosión



# 11/47- Atrás en el tiempo hacia la Gran Explosión



# 11/47- Atrás en el tiempo hacia la Gran Explosión



# Atrás en el tiempo hacia la Gran Explosión



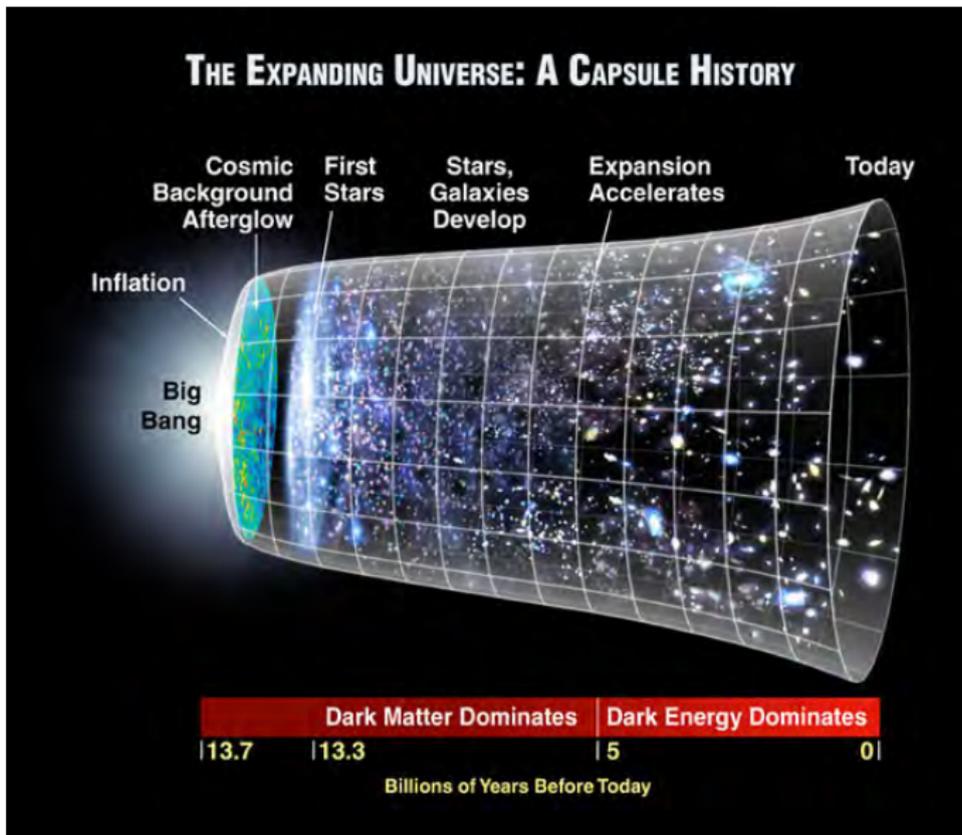
# 11/47- Atrás en el tiempo hacia la Gran Explosión



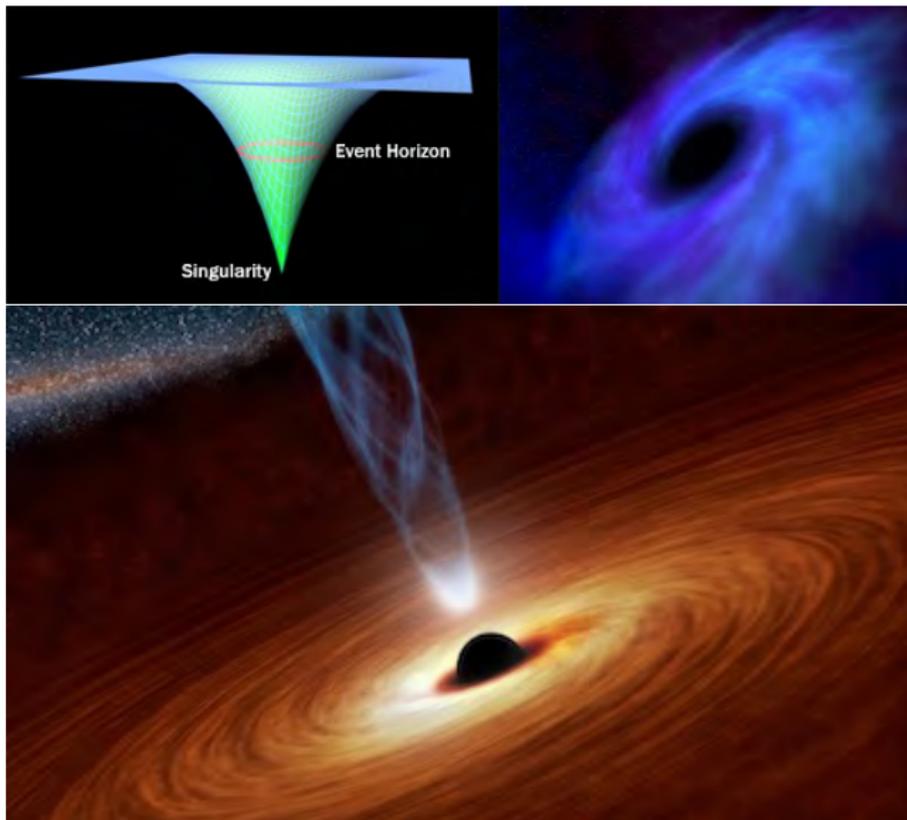


# 11/47- Atrás en el tiempo hacia la Gran Explosión

# 12/47- Singularidad cósmica



# 13/47- Singularidades en agujeros negros

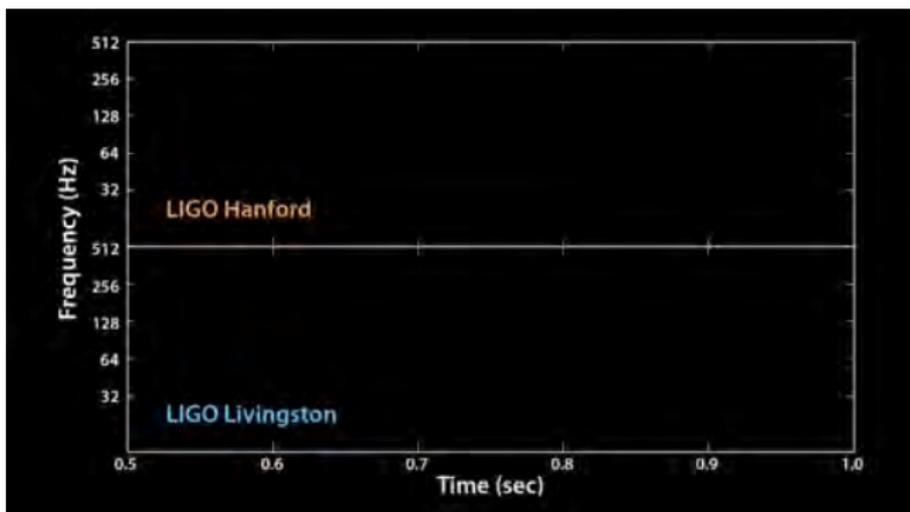


# 13/47- Singularidades en agujeros negros



# 14/47– Descubrimiento de los agujeros negros: la voz de la gravedad

Abbott et al., 2016

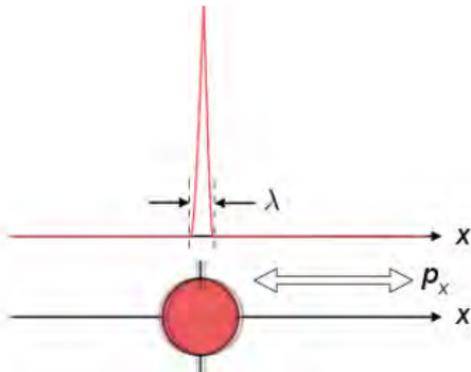
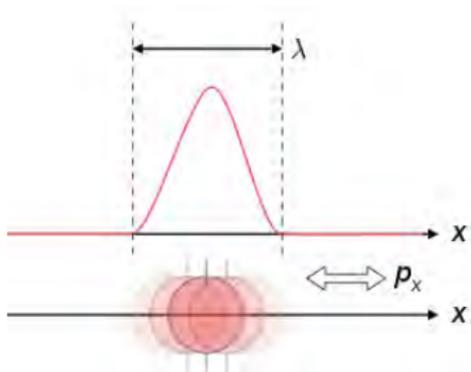


# Ondas gravitacionales con LISA

# Contenidos

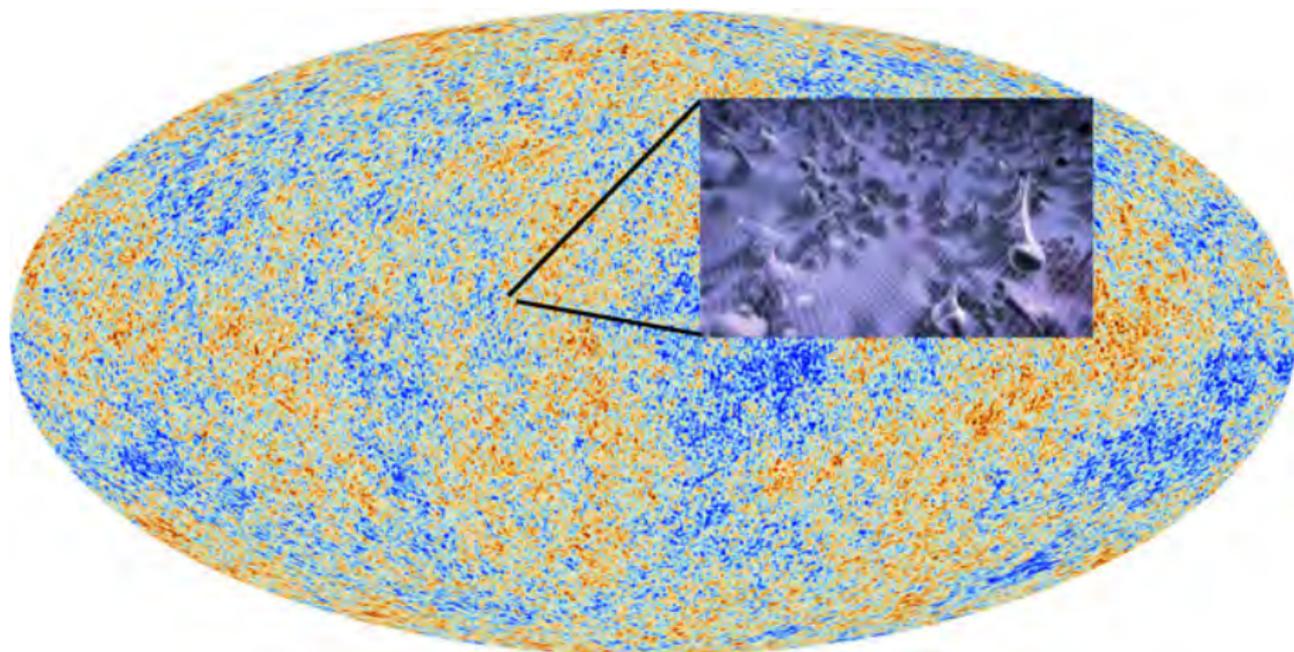
- 1 Nuestra visión del universo
- 2 Cosmología
- 3 Gravedad cuántica**
- 4 Construir la realidad
- 5 Gravedad cuántica (para todos)

# 16/47- Fluctuaciones cuánticas



## 17/47- Perspectiva cosmológica

Fluctuaciones cuánticas infladas a escalas cosmológicas.  
*Coincidentia oppositorum*: una ventana en la microfísica.



# 17/47- Perspectiva cosmológica

Área donde la física de partículas y la gravedad se encuentran



## 18/47- Una visión fragmentada

- ¿Es posible **unificar** las fuerzas cuánticas con la gravedad?
- ¿Podría una **gravedad cuántica** o una **teoría del todo** explicar lo observado y aliviar los problemas de la Gran Explosión y de  $\Lambda$ ?



- **Difícil** cuantizar la gravedad como las otras fuerzas.
- Hay **muchas teorías** pero **muy formales** y con **poco contacto** con las observaciones.
- **¿Podemos verificar la gravedad cuántica? ¿Cuál es su huella? ¿Qué teoría?**

## 20/47– Gravedades cuánticas

- Cosmología cuántica canónica (1982+).
- Gravedad/cosmología cuántica de lazos (2000+).
- Espumas de espín (2009).
- Teoría de campos de grupos (1992,2000+).
- Teoría de cuerdas (1989+).
- Triangulaciones dinámicas causales (2002+).
- Gravedad no-local (2005+).
- Espaciotiempos multifractales (2011+).
- Seguridad asintótica (1979,1998+).
- Conjuntos causales (1987+).
- Gravedad emergente unimodular (2006+).

# Características universales

Muchas teorías diferentes, pero **algo tienen en común:**

## 21/47- Características universales

Muchas teorías diferentes, pero **algo tienen en común**:

- 1 **Borrosidad** (*fuzziness*): incertidumbre intrínseca en medidas de tiempos y distancias.

Muchas teorías diferentes, pero **algo tienen en común**:

- 1 **Borrosidad** (*fuzziness*): incertidumbre intrínseca en medidas de tiempos y distancias.
- 2 **Flujo dimensional**: cambio de la dimensión del espaciotiempo con la escala de observación.

## 21/47- Características universales

Muchas teorías diferentes, pero **algo tienen en común**:

- 1 **Borrosidad** (*fuzziness*): incertidumbre intrínseca en medidas de tiempos y distancias.
- 2 **Flujo dimensional**: cambio de la dimensión del espaciotiempo con la escala de observación.



# Contenidos

- 1 Nuestra visión del universo
- 2 Cosmología
- 3 Gravedad cuántica
- 4 Construir la realidad**
- 5 Gravedad cuántica (para todos)

- **Enfoque temático:** aprendizaje de conocimientos como un extracto de las ideas que representan el estado maduro de la disciplina. Centra la atención en **aspectos avanzados** del concepto.

## Dos enfoques para aprender

- **Enfoque temático:** aprendizaje de conocimientos como un extracto de las ideas que representan el estado maduro de la disciplina. Centra la atención en **aspectos avanzados** del concepto.
- **Enfoque cognitivo o constructivista:** se centra en las exigencias cognitivas que plantea el aprendizaje de los conceptos. Deja que el sujeto pase por una serie de “crisis” cognitivas y **revisiones intermedias** del concepto.

# 23/47- Ejemplo: la Tierra



# 24/47- Enfoque temático: características de la Tierra

1 Es redonda.



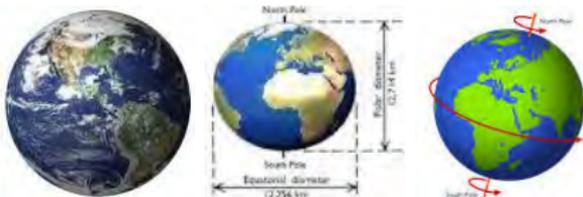
# 24/47- Enfoque temático: características de la Tierra

- 1 Es redonda.
- 2 Es enorme: su diámetro mide ~ 12600 km.



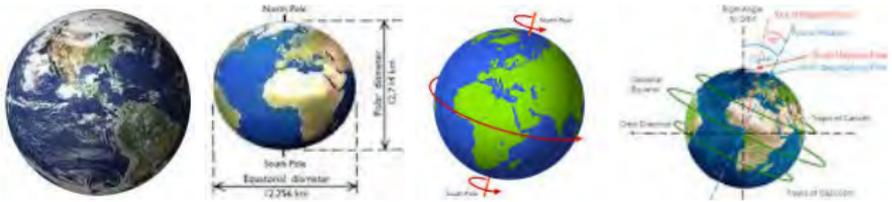
# 24/47- Enfoque temático: características de la Tierra

- 1 Es redonda.
- 2 Es enorme: su diámetro mide ~ 12600 km.
- 3 Gira alrededor de su eje (aparición del día y la noche).



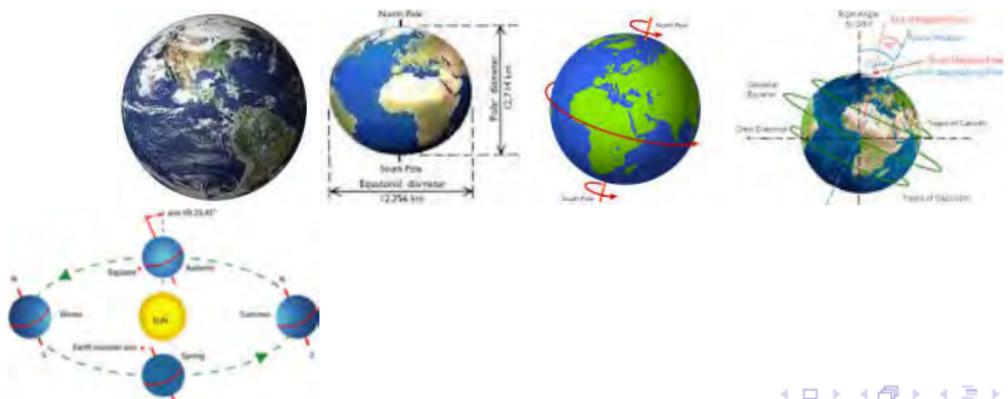
# 24/47- Enfoque temático: características de la Tierra

- 1 Es redonda.
- 2 Es enorme: su diámetro mide ~ 12600 km.
- 3 Gira alrededor de su eje (aparición del día y la noche).
- 4 Su eje está inclinado (estaciones).



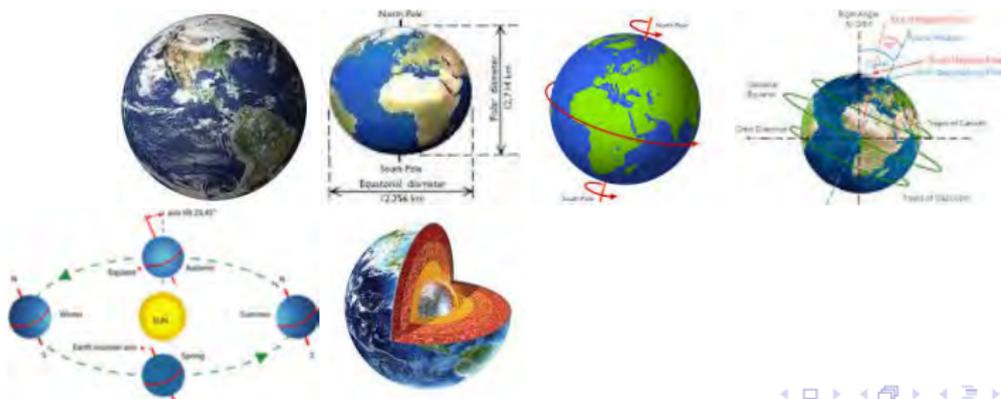
# 24/47- Enfoque temático: características de la Tierra

- 1 Es redonda.
- 2 Es enorme: su diámetro mide ~ 12600 km.
- 3 Gira alrededor de su eje (aparición del día y la noche).
- 4 Su eje está inclinado (estaciones).
- 5 Gira alrededor del Sol y forma parte del sistema solar.



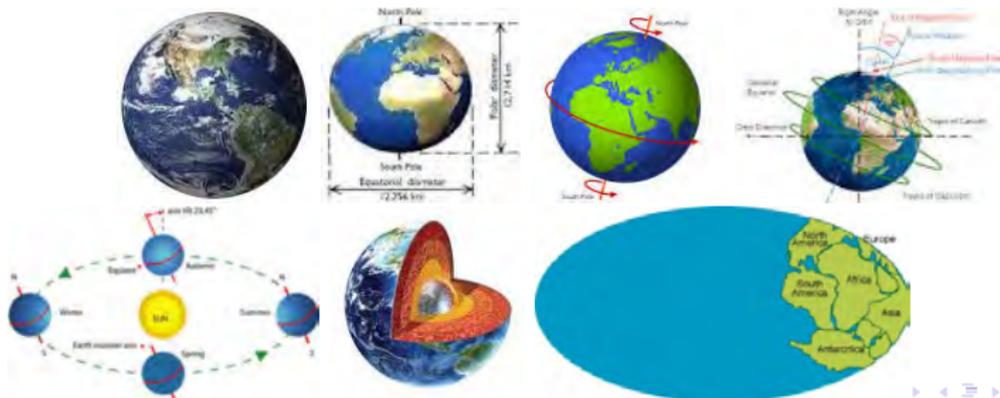
# 24/47- Enfoque temático: características de la Tierra

- 1 Es redonda.
- 2 Es enorme: su diámetro mide ~ 12600 km.
- 3 Gira alrededor de su eje (aparición del día y la noche).
- 4 Su eje está inclinado (estaciones).
- 5 Gira alrededor del Sol y forma parte del sistema solar.
- 6 Tiene un núcleo fundido y una corteza exterior fría y sólida.



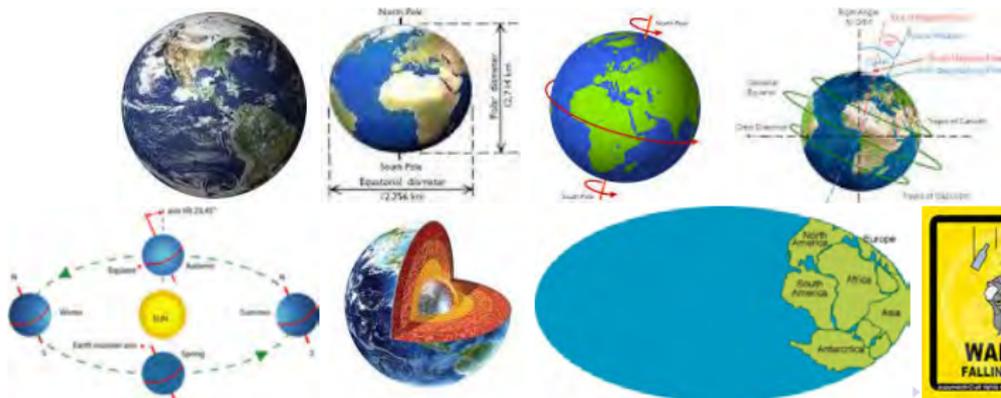
# 24/47- Enfoque temático: características de la Tierra

- 1 Es redonda.
- 2 Es enorme: su diámetro mide ~ 12600 km.
- 3 Gira alrededor de su eje (aparición del día y la noche).
- 4 Su eje está inclinado (estaciones).
- 5 Gira alrededor del Sol y forma parte del sistema solar.
- 6 Tiene un núcleo fundido y una corteza exterior fría y sólida.
- 7 La mayor parte de su superficie está cubierta por océanos.



# 24/47- Enfoque temático: características de la Tierra

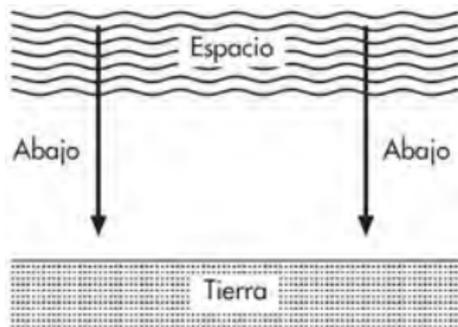
- 1 Es redonda.
- 2 Es enorme: su diámetro mide ~ 12600 km.
- 3 Gira alrededor de su eje (aparición del día y la noche).
- 4 Su eje está inclinado (estaciones).
- 5 Gira alrededor del Sol y forma parte del sistema solar.
- 6 Tiene un núcleo fundido y una corteza exterior fría y sólida.
- 7 La mayor parte de su superficie está cubierta por océanos.
- 8 Ejerce una fuerza gravitatoria (los objetos caen).



# 25/47- ¿Para un niño la Tierra es esférica?

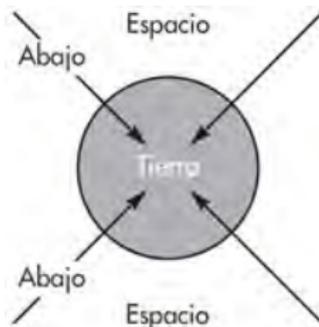


## 25/47- ¿Para un niño la Tierra es esférica?



### Concepción “primitiva” (~ 8 años)

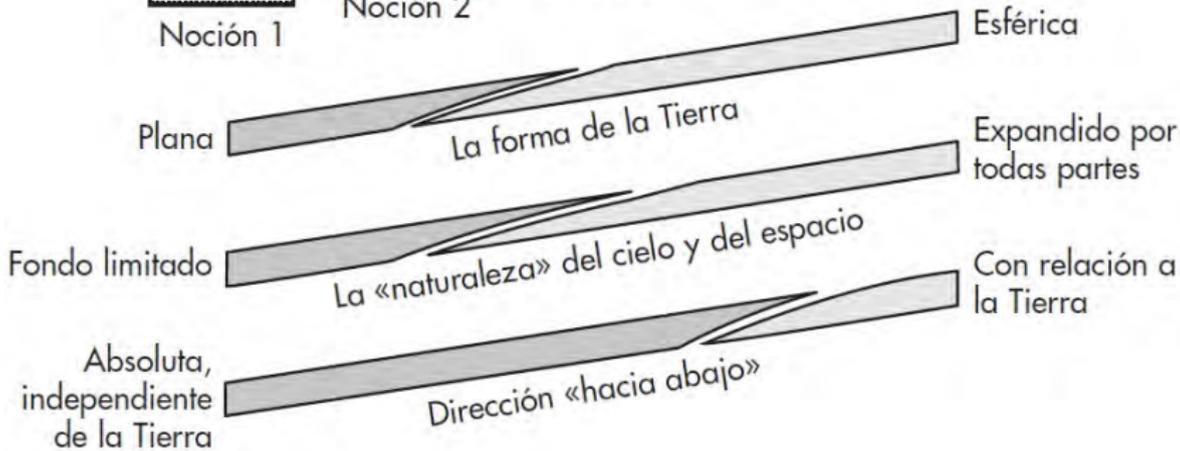
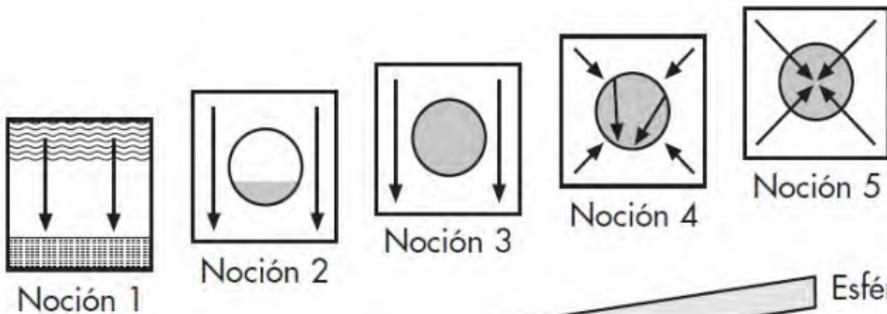
- Tierra plana
- Tierra limitadora, firmamento horizontal
- Dirección de caída (arriba-abajo) absoluta



### Concepción “científica” (~ 14 años)

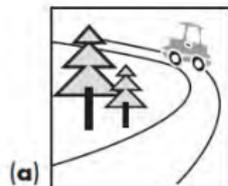
- Tierra esférica
- Espacio infinito
- Dirección de caída (arriba-abajo) radial

# 26/47- De la Tierra plana a la "científica"



# Noción 1

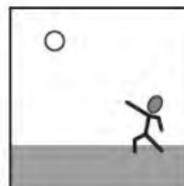
El niño cree que la Tierra en la que vivimos es plana y...



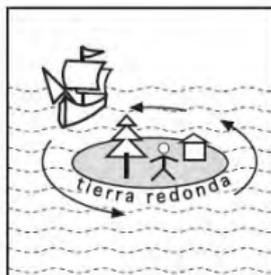
(a) ... la redondez de la Tierra es la de las curvas de la carretera



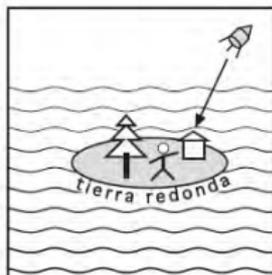
(b) ... la redondez de la Tierra es la de las formas de las montañas



(c) ... la esfera representa algún otro planeta del cielo

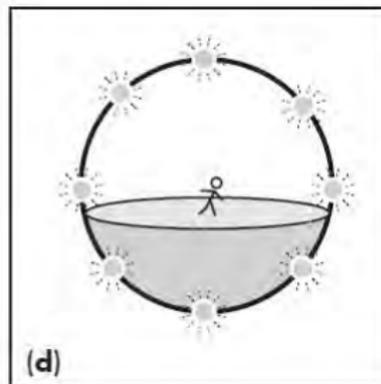
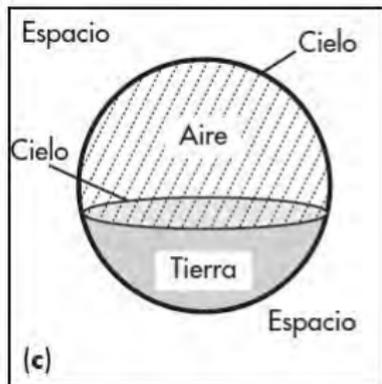
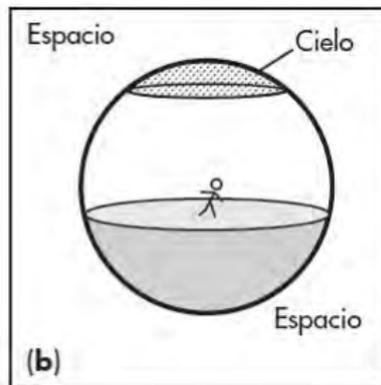
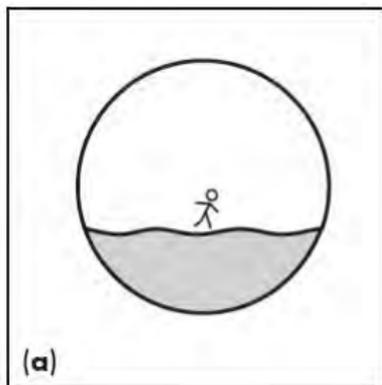


(d) ... está rodeada por el océano. Esto permitió a Colón dar la vuelta al mundo

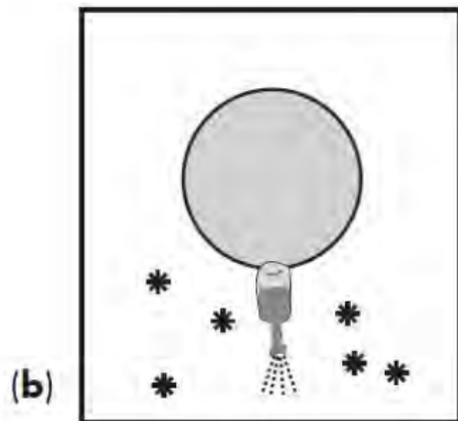
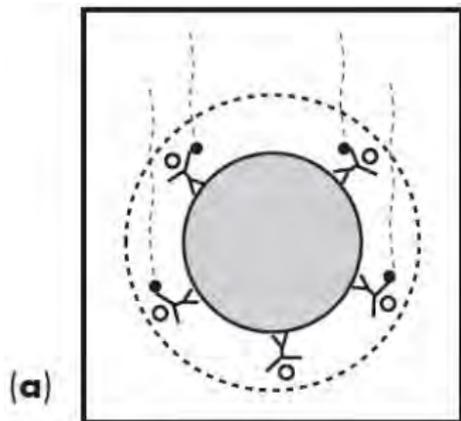


(e) ... está rodeada por el océano. La forma redonda de esta Tierra plana se puede ver en las fotografías tomadas desde el espacio

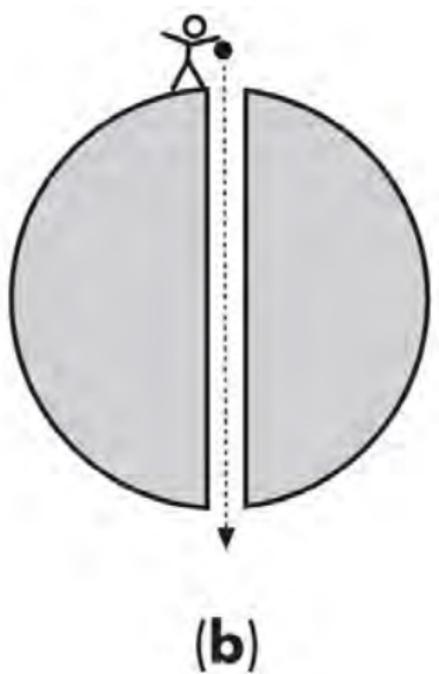
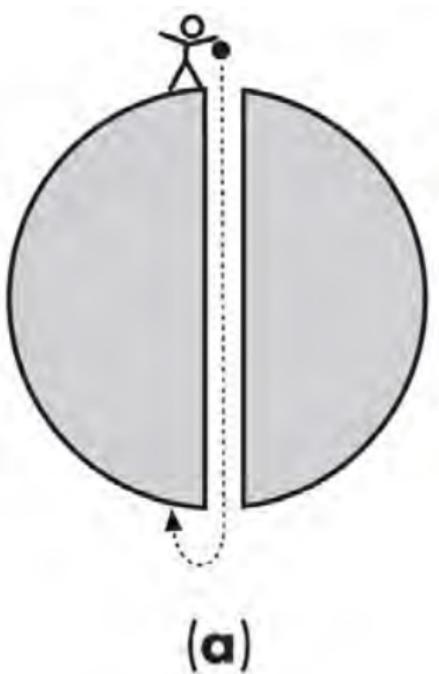
# Noción 2



# Noción 3



# Noción 4





# Constructivismo

## Jean Piaget (1896–1980)



- 1 Todos los niños pasan por estas etapas intermedias en este orden, cuestionando la validez de la etapa anterior gracias a nuevas preguntas u observaciones.

- 1 Todos los niños pasan por estas etapas intermedias en este orden, cuestionando la validez de la etapa anterior gracias a nuevas preguntas u observaciones.
- 2 La edad puede variar pero las etapas se ven en todas las culturas.

- 1 Todos los niños pasan por estas etapas intermedias en este orden, cuestionando la validez de la etapa anterior gracias a nuevas preguntas u observaciones.
- 2 La edad puede variar pero las etapas se ven en todas las culturas.
- 3 **¿Por qué?** Al principio, interpretan la Tierra según su propia perspectiva. Luego, logran imaginarla como se vería desde otros puntos de vista.

- 1 Todos los niños pasan por estas etapas intermedias en este orden, cuestionando la validez de la etapa anterior gracias a nuevas preguntas u observaciones.
- 2 La edad puede variar pero las etapas se ven en todas las culturas.
- 3 **¿Por qué?** Al principio, interpretan la Tierra según su propia perspectiva. Luego, logran imaginarla como se vería desde otros puntos de vista.

**Construimos** la realidad a partir de la experiencia y de los **conceptos previos**.

## 28/47– Volvemos a la física . . .

### ¿Para qué nos sirve?

Podemos retomar los temas iniciales de física y **acercarnos** a ellos **gradualmente por etapas**, ¡incluso erróneas!

## 28/47– Volvemos a la física . . .

## ¿Para qué nos sirve?

Podemos retomar los temas iniciales de física y **acercarnos** a ellos **gradualmente por etapas**, ¡incluso erróneas! Aquí, por falta de tiempo, lo haremos solo para algunos conceptos más relacionados con la gravedad cuántica: el **flujo dimensional** y la **borrosidad** del espaciotiempo.

# Contenidos

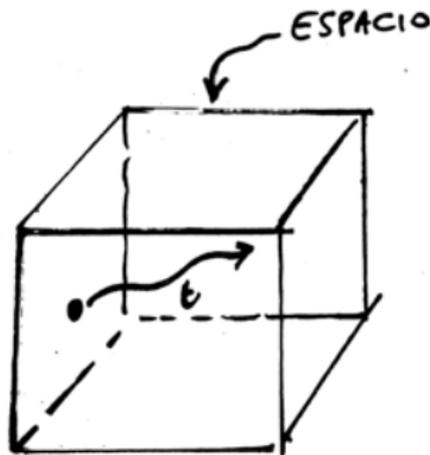
- 1 Nuestra visión del universo
- 2 Cosmología
- 3 Gravedad cuántica
- 4 Construir la realidad
- 5 Gravedad cuántica (para todos)**

## 29/47– Borrosidad (*fuzziness*)

Incertidumbre intrínseca en medidas de tiempos y distancias a **escalas microscópicas**.

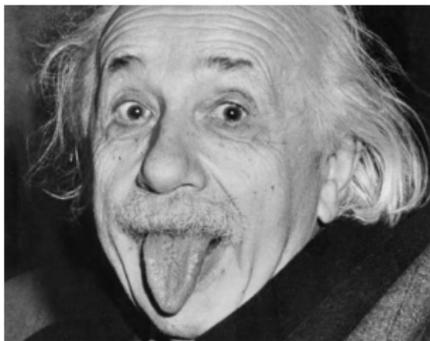
# 30/47- ¿Qué es el espaciotiempo?

Newton: es el lugar y tiempo “dónde” y “cuándo” se sitúan los objetos y ocurren los eventos.



# 30/47- ¿Qué es el espaciotiempo?

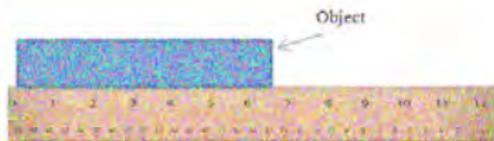
Einstein: es el “cómo” se mueven los objetos, es **gravedad**, es **geometría**. ¡El lugar y tiempo son ellos mismos eventos!







# 32/47– Medir distancias y tiempos con incertidumbres: ¿efecto de ruido?















## 34/47- ¿Eso es todo?

**No** vemos los contornos difuminados. Falta todavía la información sobre las **escalas** a las cuales el espaciotiempo es borroso.



## 34/47- ¿Eso es todo?

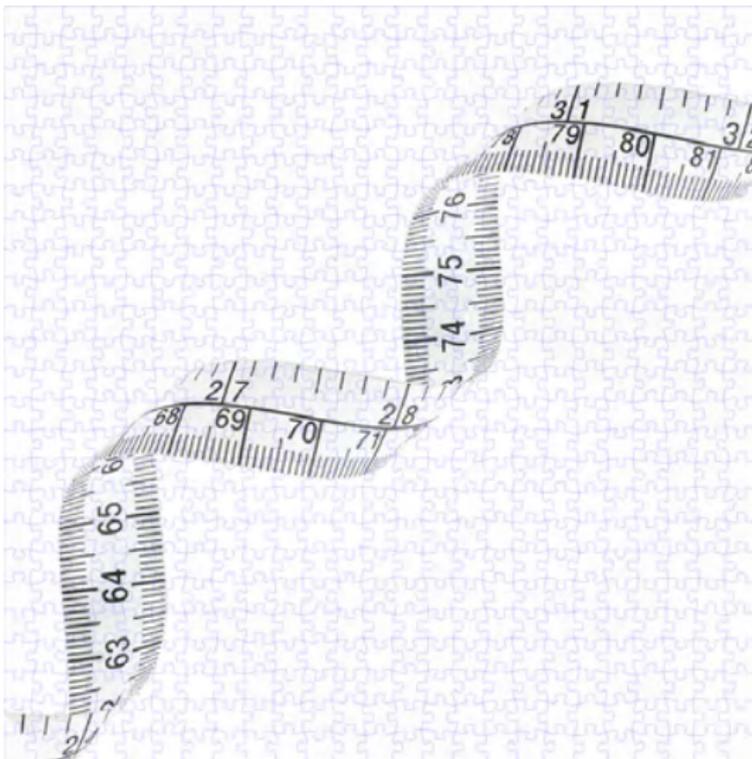
**No** vemos los contornos difuminados. Falta todavía la información sobre las **escalas** a las cuales el espaciotiempo es borroso.





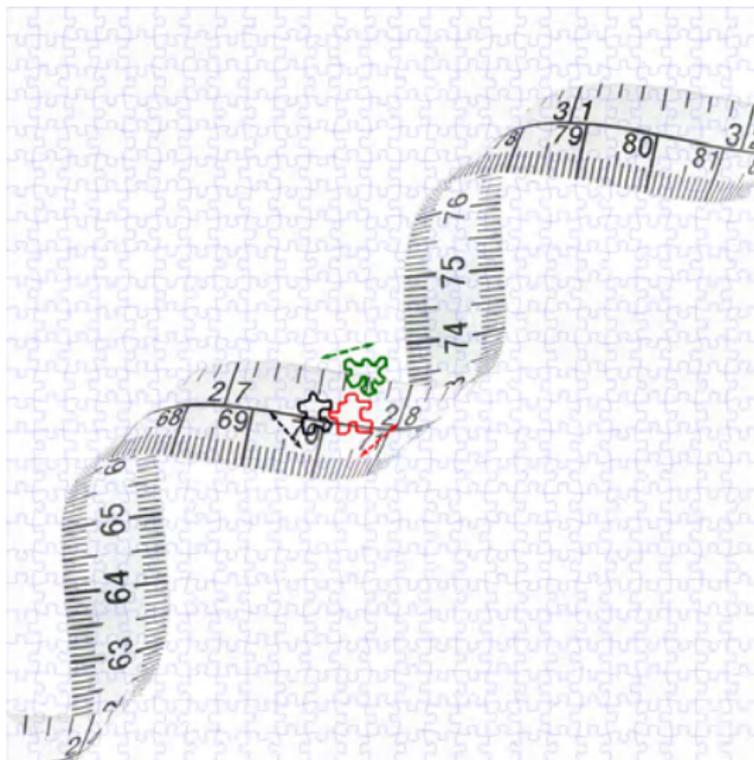
# 35/47- ¿A qué es debida la borrosidad?

Cuantos de espaciotiempos en “vibración” continua



# 35/47- ¿A qué es debida la borrosidad?

Cuantos de espaciotiempos en “vibración” continua

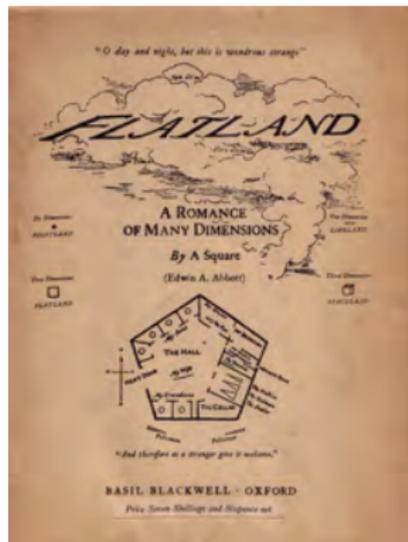




Dimensión **topológica** (del griego “lugar” y “estudio”): el **número de direcciones** mínimo para describir la extensión y el movimiento de los objetos.

## 36/47- ¿Qué es la dimensión del espacio?

Dimensión **topológica** (del griego “lugar” y “estudio”): el **número de direcciones** mínimo para describir la extensión y el movimiento de los objetos.



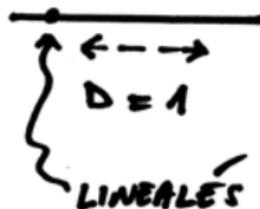
# 36/47- ¿Qué es la dimensión del espacio?

Dimensión **topológica** (del griego “lugar” y “estudio”): el **número de direcciones** mínimo para describir la extensión y el movimiento de los objetos.

PUNTO LANDIA



LINEALANDIA

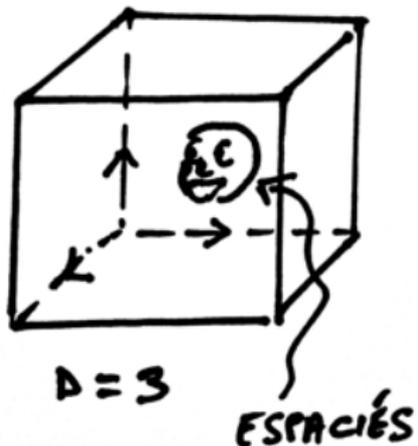


PLANILANDIA



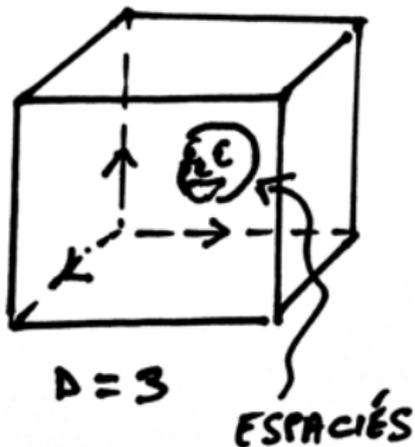
# 37/47- ¿Qué es la dimensión del espaciotiempo?

ESPACIOLANDIA

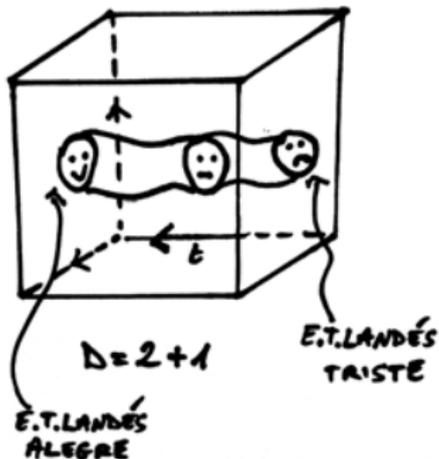


# 37/47- ¿Qué es la dimensión del espaciotiempo?

ESPAZIOLANDIA



ESPAZIOTIEMPOLANDIA

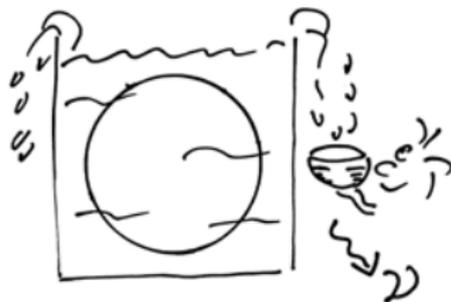


# 38/47- Dimensión de Hausdorff $d_H$

Es cómo escala el volumen de una bola respecto a su radio:

$$\mathcal{V}(R) \sim R^{d_H}.$$

- 1 Medimos el radio.



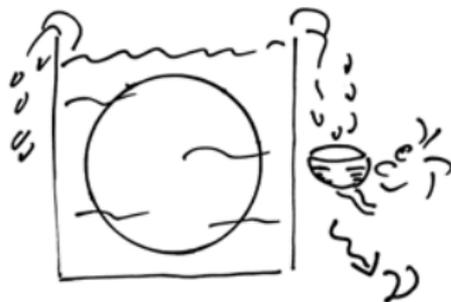
$$R^{d_H} \sim \mathcal{V}$$

# 38/47- Dimensión de Hausdorff $d_H$

Es cómo escala el volumen de una bola respecto a su radio:

$$\mathcal{V}(R) \sim R^{d_H}.$$

- 1 Medimos el radio.
- 2 Medimos el volumen.



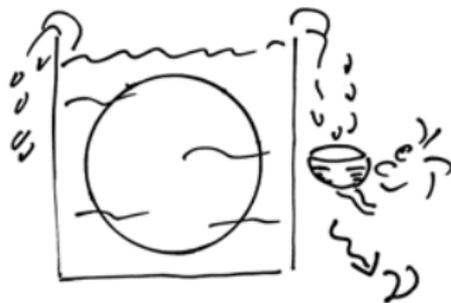
$$R^{d_H} \sim \mathcal{V}$$

38/47- Dimensión de Hausdorff  $d_H$ 

Es cómo escala el volumen de una bola respecto a su radio:

$$\mathcal{V}(R) \sim R^{d_H}.$$

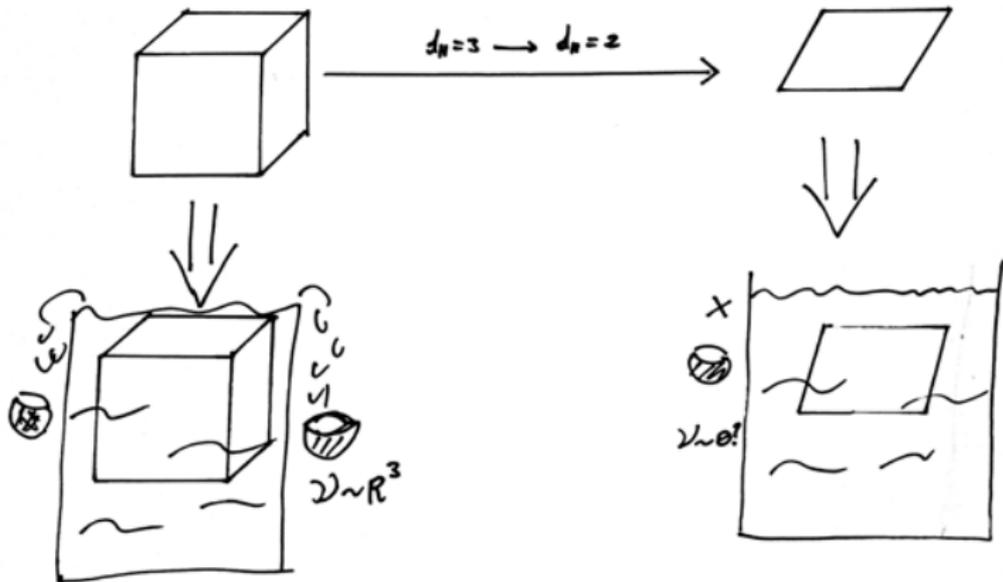
- 1 Medimos el radio.
- 2 Medimos el volumen.
- 3 Calculamos  $d_H$ .



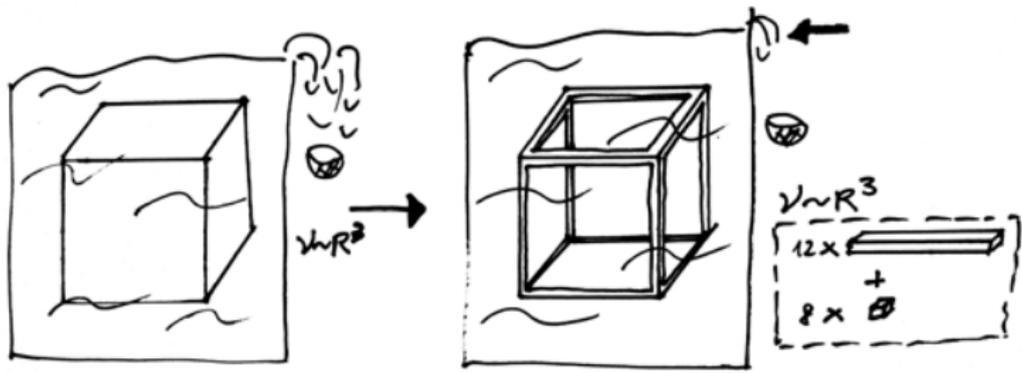
$$R^{d_H} \sim \mathcal{V}$$



# 40/47- Flujo dimensional: ¿aplastando cubos?

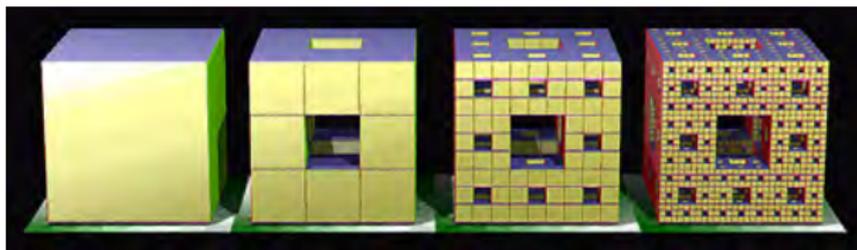


# 41/47- Flujo dimensional: ¿excavando cubos?



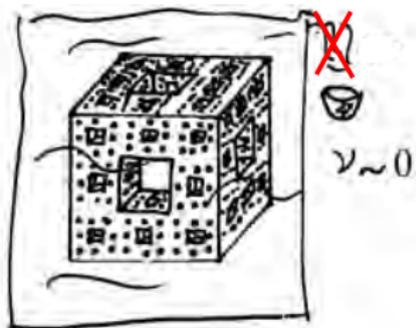
# 42/47- Flujo dimensional: ¿materia fractal?

Esponja de Menger:



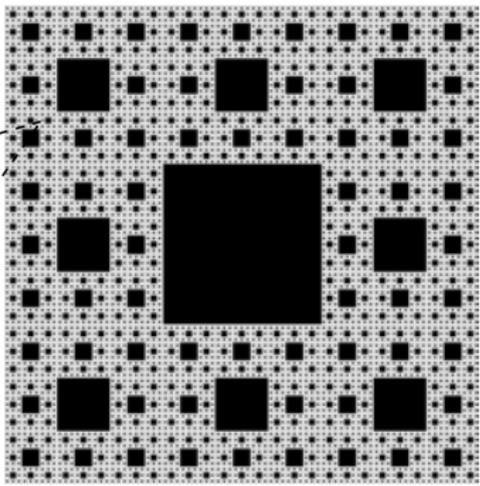
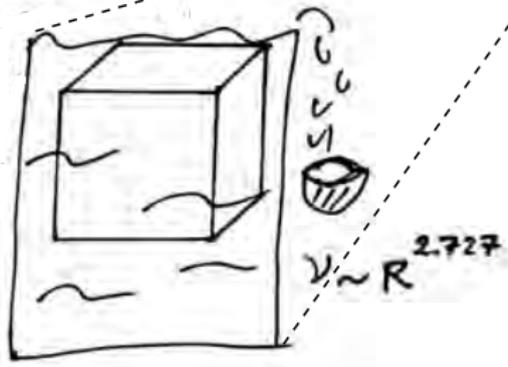


# 43/47- Flujo dimensional: ¿materia fractal?



44/47-

# Flujo dimensional: ¿espaciotiempo fractal!



## 45/47- ¿Eso es todo?

- **No** medimos cubos fractales. Falta todavía la información sobre las **escalas** a las cuales el espaciotiempo es fractal.

- **No** medimos cubos fractales. Falta todavía la información sobre las **escalas** a las cuales el espaciotiempo es fractal.
- **Multi-fractales**: geometría fractal con cierta dimensión a ciertas escalas, pero “lisa” a escalas grandes.

## 46/47– ¿A qué es debida la fractalidad del espaciotiempo?

¡Buena pregunta! Parece que es generada exactamente por el mismo mecanismo de la borrosidad.

## 47/47- Para terminar

- La gravedad cuántica es una clase de propuestas del funcionamiento del mundo físico a escalas microscópicas.

- La gravedad cuántica es una clase de propuestas del funcionamiento del mundo físico a escalas microscópicas.
- Para entenderla, hay que **modificar** nuestro concepto de la geometría y de la realidad de formas a veces **muy radicales**.

- La gravedad cuántica es una clase de propuestas del funcionamiento del mundo físico a escalas microscópicas.
- Para entenderla, hay que **modificar** nuestro concepto de la geometría y de la realidad de formas a veces **muy radicales**.
- Todavía no se han observado sus huellas, aunque podrían estar a nuestro alcance en un **futuro próximo**.

- La gravedad cuántica es una clase de propuestas del funcionamiento del mundo físico a escalas microscópicas.
- Para entenderla, hay que **modificar** nuestro concepto de la geometría y de la realidad de formas a veces **muy radicales**.
- Todavía no se han observado sus huellas, aunque podrían estar a nuestro alcance en un **futuro próximo**.
- Para entender el mundo necesitamos pasar a través de errores, callejones sin salidas y **representaciones inadecuadas** de la realidad (fenoménica o mental). Estos pasos intermedios son parte de la labor no solo divulgativa, sino también científica, y ocurren en la misma mente del investigador y del ser humano en general.

CONTINUARÁ...

