

# EL LADO OSCURO DEL UNIVERSO

Pablo García Abia (CIEMAT)

29 de junio de 2023



**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas





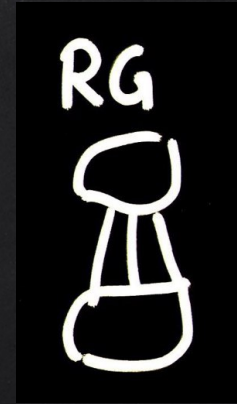
**1ª imagen de campo  
profundo del JWST  
julio 2022**



# SITUACIÓN ACTUAL DE LA FÍSICA FUNDAMENTAL



$\Delta E, \Delta x \approx 10^{40}$



## Mecánica cuántica relativista:

física de partículas

Modelo Estándar

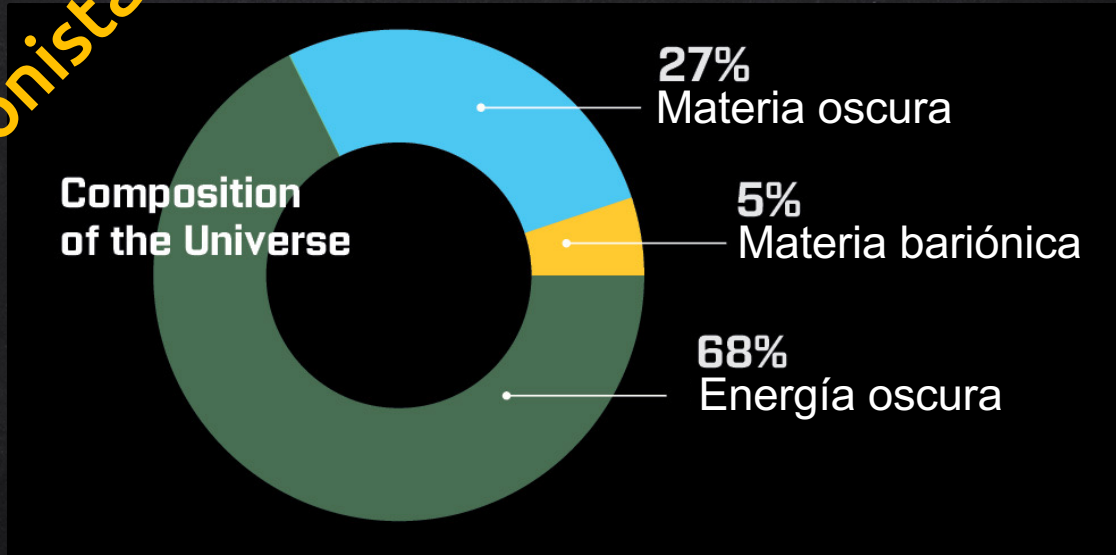
## Relatividad General:

física del espacio-tiempo

Modelo Estándar Cosmológico

# SITUACIÓN ACTUAL DE LA FÍSICA FUNDAMENTAL

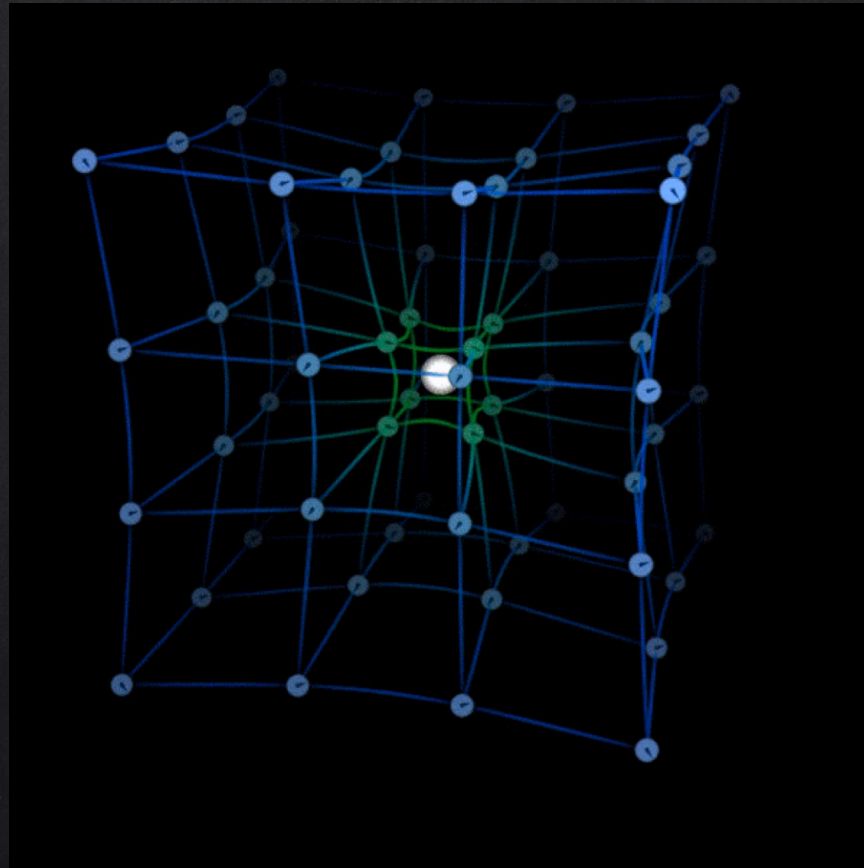
**Visión reduccionista**



- X 95% del Universo es de naturaleza desconocida
- X Expansión acelerada del Universo: naturaleza de la energía oscura (RG)
- X Contenido del universo: naturaleza de la materia oscura (MC, RG)



# EVOLUCIÓN DEL UNIVERSO: ESPACIO Y TIEMPO

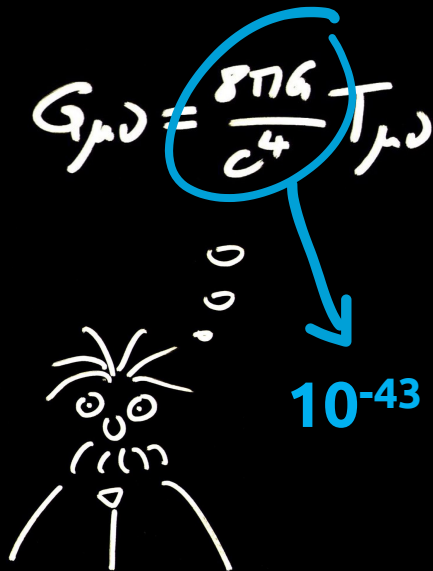


# RELATIVIDAD GENERAL

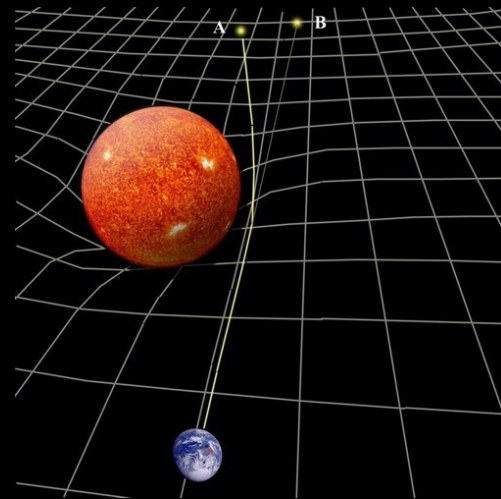
RG  


## X Principio de Equivalencia

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



$10^{-43}$





# ECUACIONES DE EINSTEIN

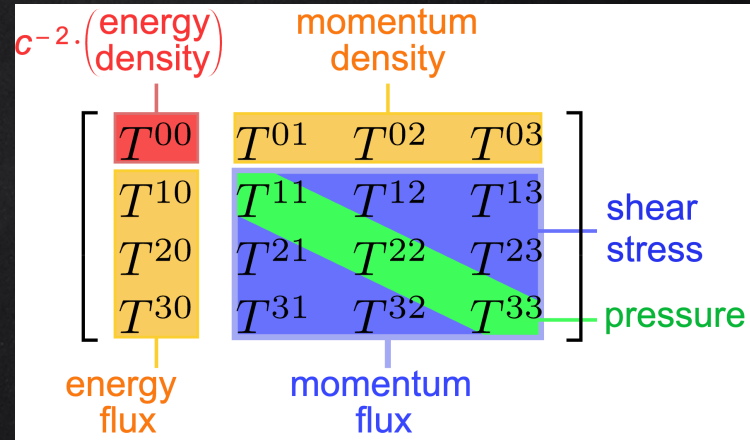
Equivalencia entre la curvatura del espacio-tiempo y la distribución de materia-energía:

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$\Lambda$  es la **constante cosmológica**.

Una partícula en **caída libre** describe una trayectoria **geodésica**:

es la “recta” del espacio curvo



# EL MODELO ESTÁNDAR COSMOLÓGICO: $\Lambda$ CDM

Solución de la ecuaciones de Einstein:

$$\dot{\rho} = -3 \left( \frac{\dot{a}}{a} \right) \left( \rho + \frac{p}{c^2} \right)$$

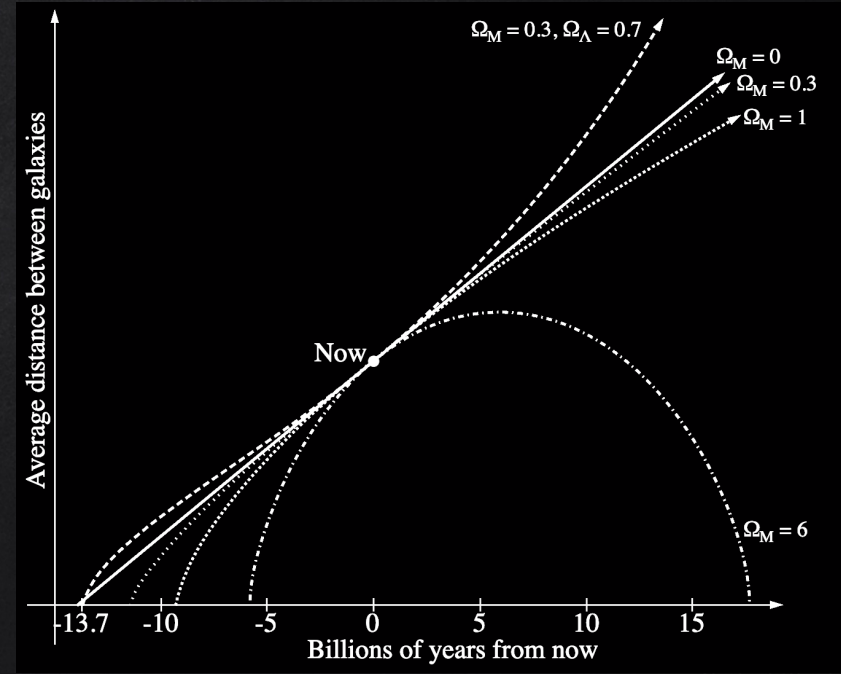
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

Parámetro  
de Hubble

$$H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$$

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \Omega_{0,R} a^{-4} + \Omega_{0,M} a^{-3} + \Omega_{0,k} a^{-2} + \Omega_{0,\Lambda}$$

$\Omega_0$  = densidades de radiación, materia, curvatura espacial y del vacío hoy ( $a = 1$ ).

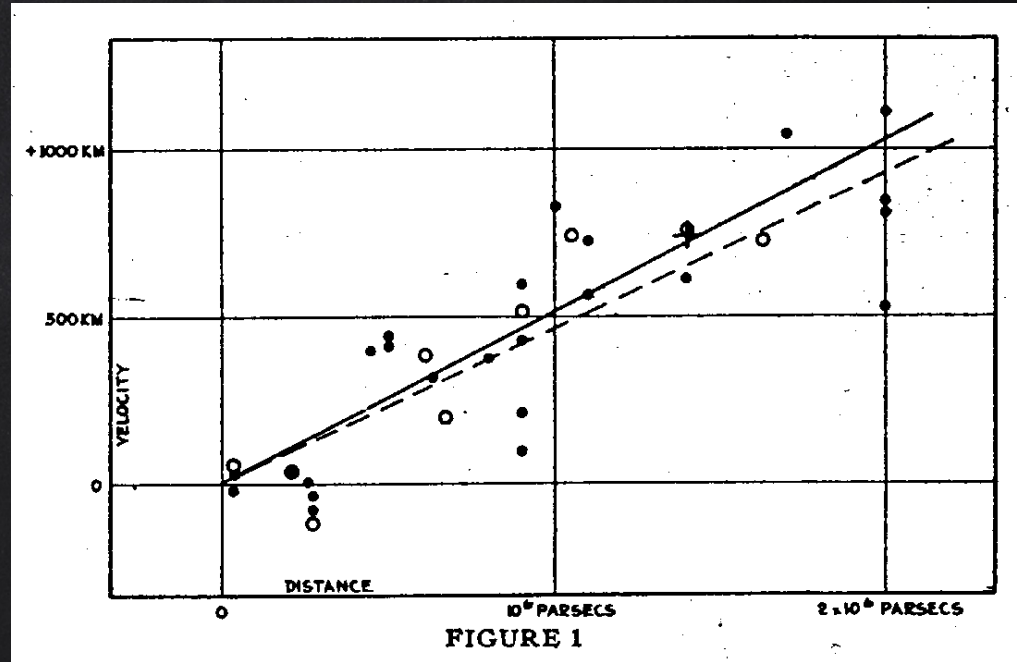
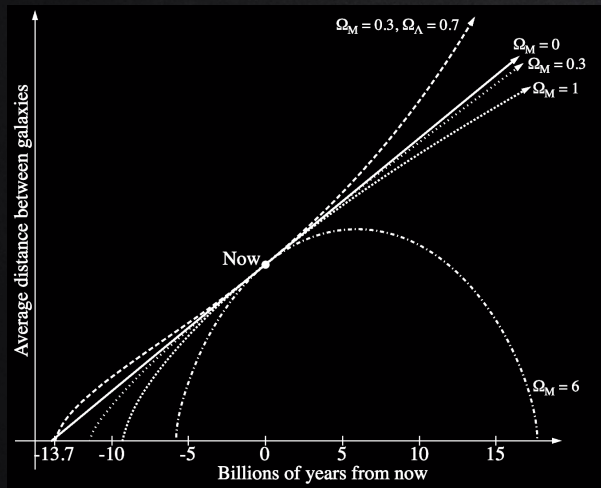




# MEDIDA DEL PARÁMETRO DE HUBBLE

**Parámetro de Hubble:**  $H_0 \approx 70 \text{ (km/s)/Mpc}$  (\*)

$$1/H_0 \approx 1.4 \times 10^{10} \text{ años}$$

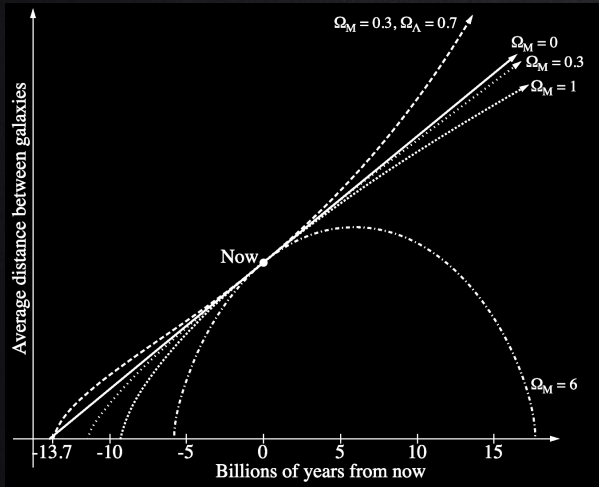


(\*) 1 pársec (pc) = 3.3 años-luz =  $3 \times 10^{16} \text{ m}$

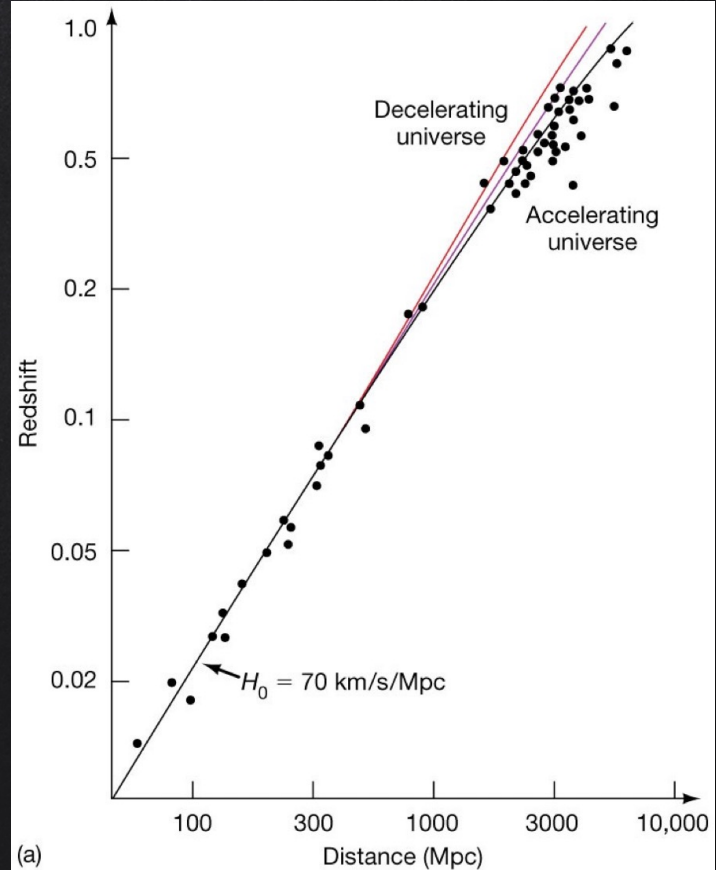
# MEDIDA DEL PARÁMETRO DE HUBBLE

**Parámetro de Hubble:**  $H_0 \approx 70 \text{ (km/s)/Mpc}$  (\*)

$$1/H_0 \approx 1.4 \times 10^{10} \text{ años}$$



(\*) 1 pársec (pc) = 3.3 años-luz =  $3 \times 10^{16} \text{ m}$

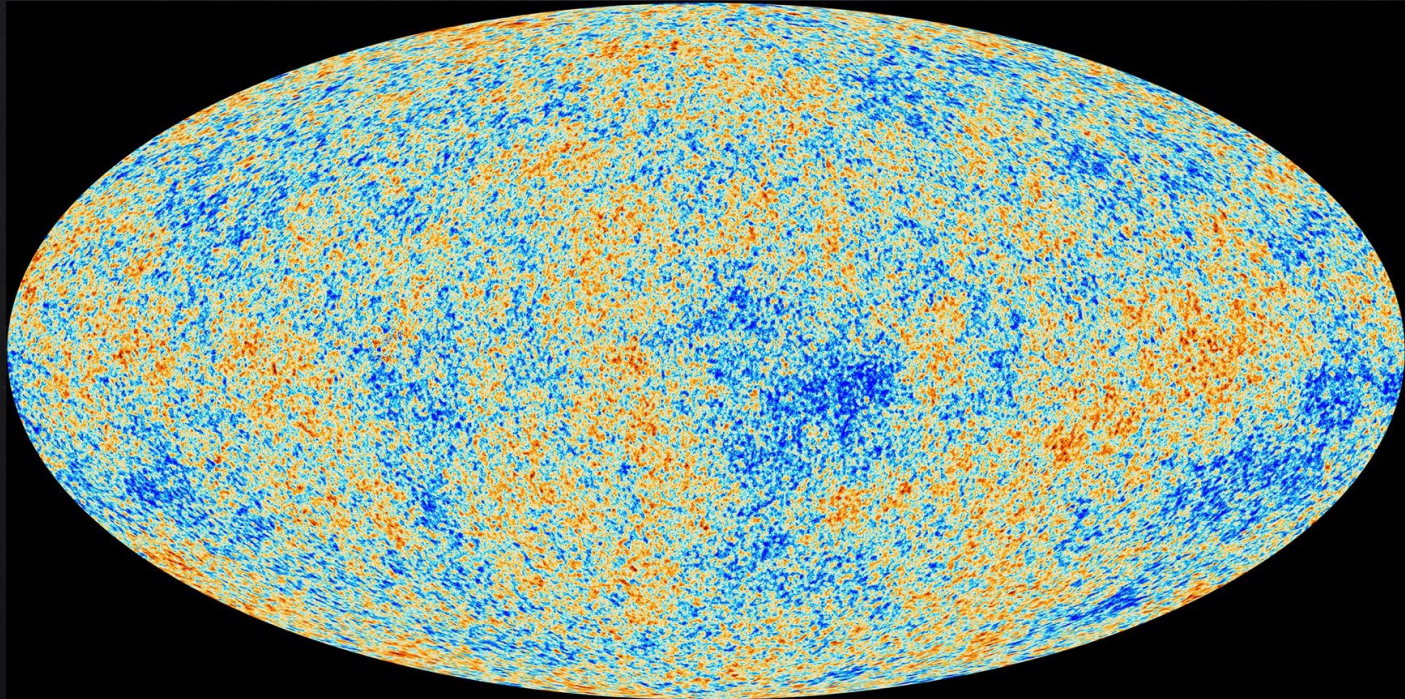


(a)



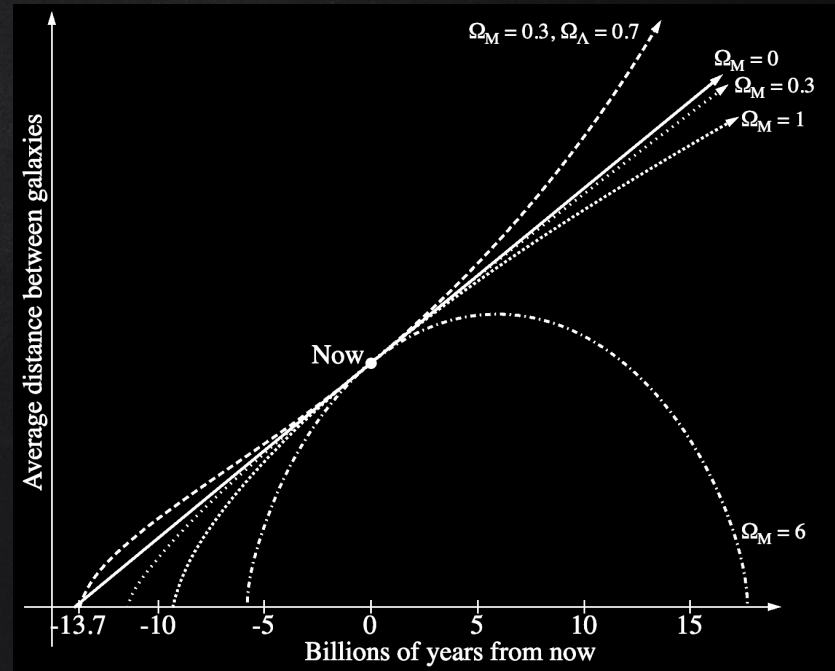
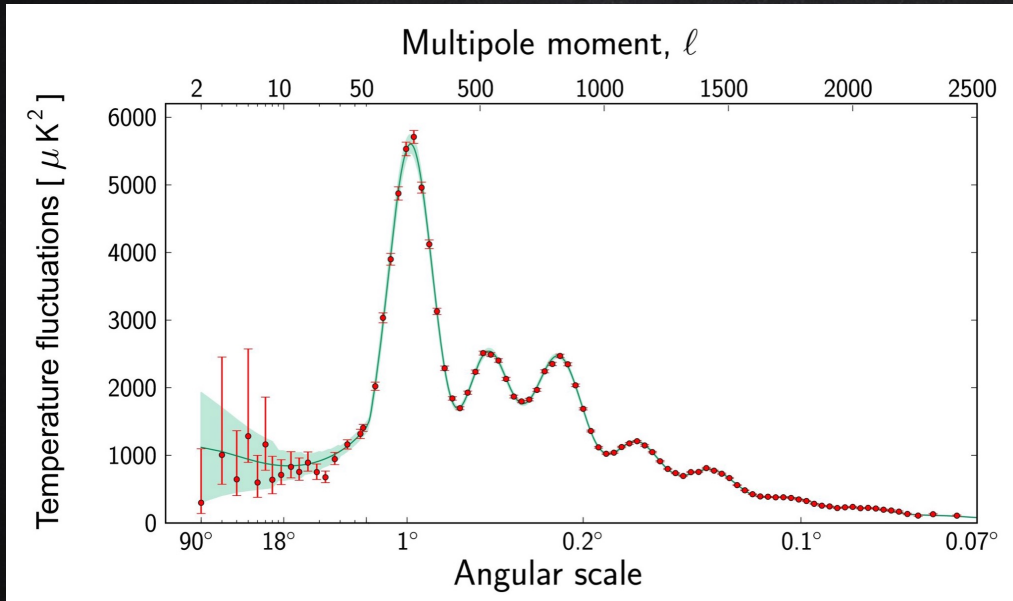
# FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS: CMB

Temperatura de la **radiación** cuando  $t = 384\,000$  años:  $T_{\text{CMB}} \approx 3000 \text{ K} \rightarrow T_{\text{hoy}} = 2.7 \text{ K}$



# FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS: CMB

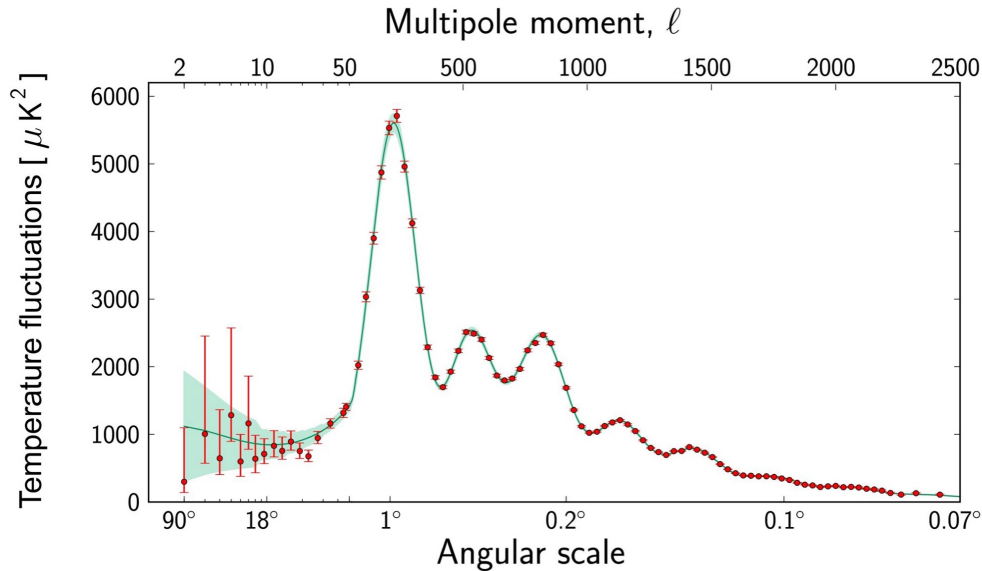
Distribución de temperaturas (**estructuras**) → **parámetros cosmológicos**





# FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS: CMB

Distribución de temperaturas (**estructuras**) → **parámetros cosmológicos**



Edad del universo		$13.799 \pm 0.021 \times 10^9$ años
Constante de Hubble	$H_0$	$67.74 \pm 0.46$ km/s/Mpc
Densidad materia bariónica	$\Omega_b$	$0.0486 \pm 0.0010$
Densidad materia oscura	$\Omega_c$	$0.2589 \pm 0.0057$
Densidad materia	$\Omega_m$	$0.3089 \pm 0.0062$
Densidad energía oscura	$\Omega_\Lambda$	$0.6911 \pm 0.0062$



# EL MODELO ESTÁNDAR COSMOLÓGICO: $\Lambda$ CDM

Es el modelo más simple que proporciona una explicación razonablemente buena de las siguientes propiedades del cosmos:

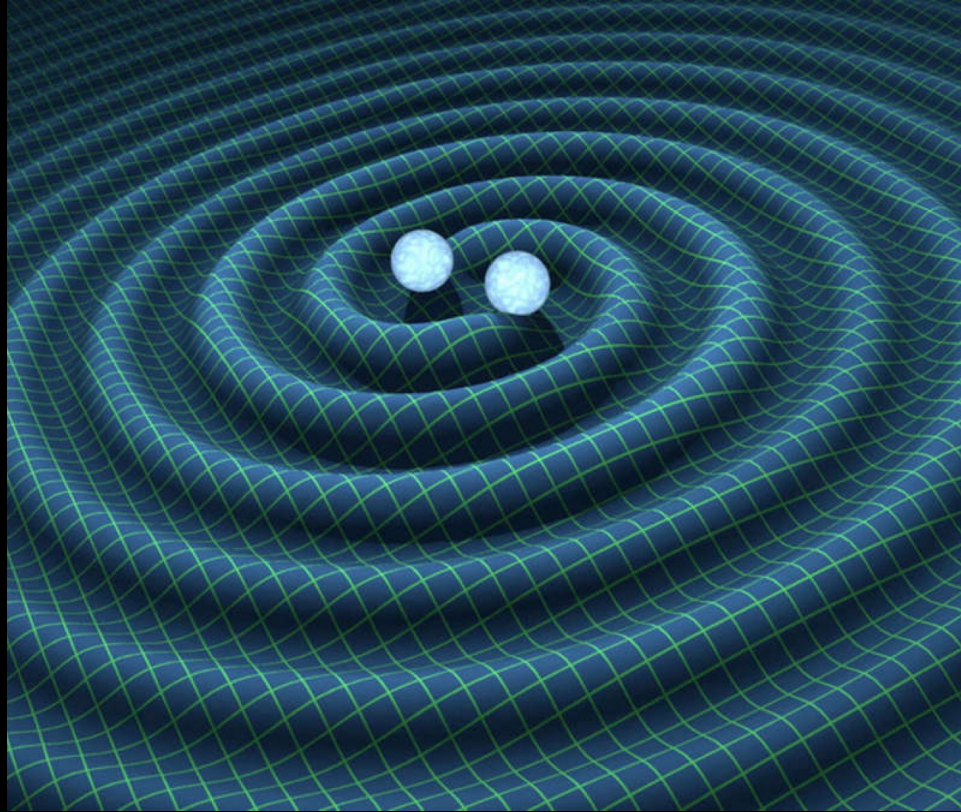
- X existencia y estructura del fondo cósmico de microondas (CMB),
- X estructura a gran escala en la distribución de las galaxias,
- X abundancia observada de hidrógeno (incluido el deuterio), helio y litio,
- X expansión acelerada del universo observada en la luz de las galaxias lejanas y las supernovas.

RG



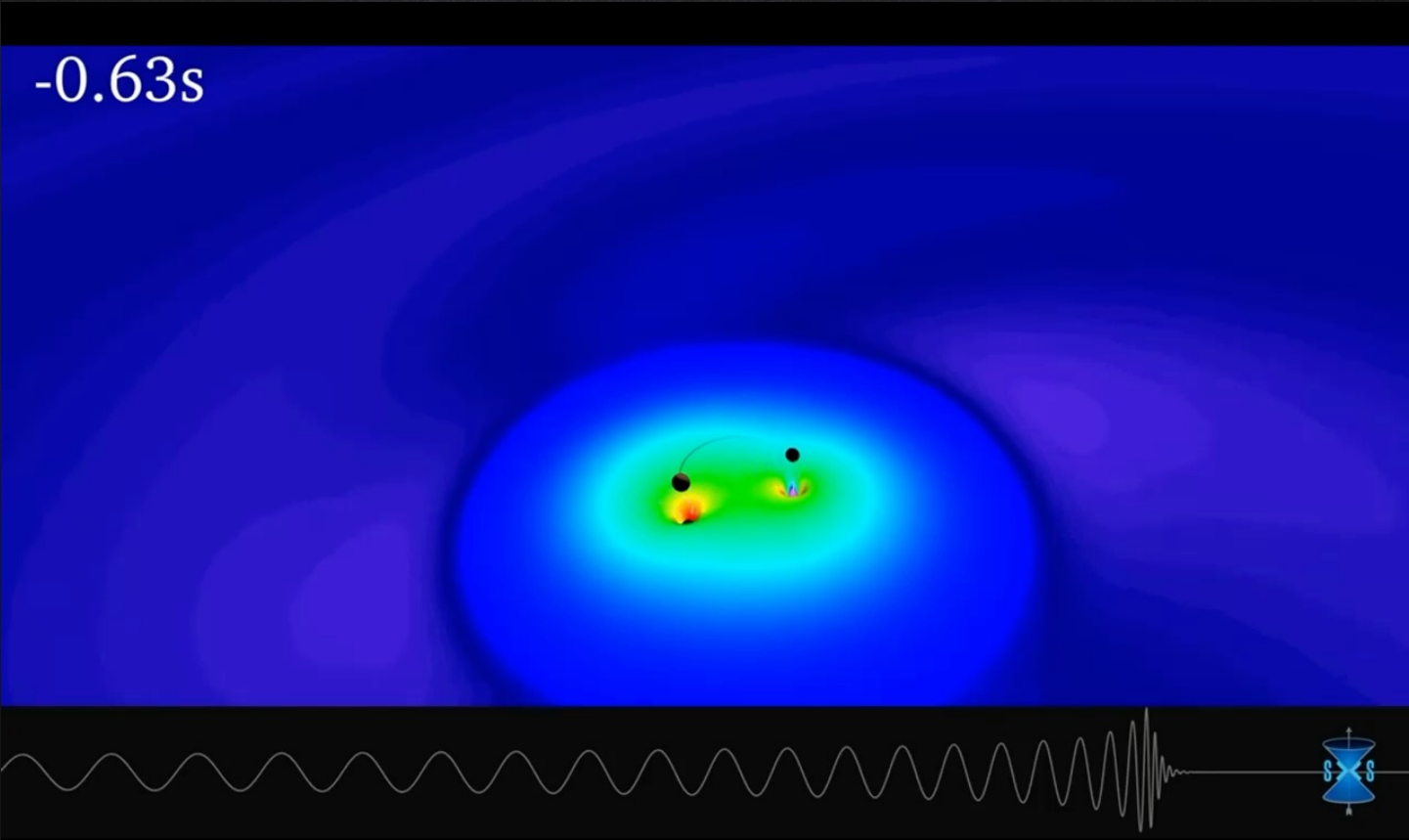
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$10^{-43}$



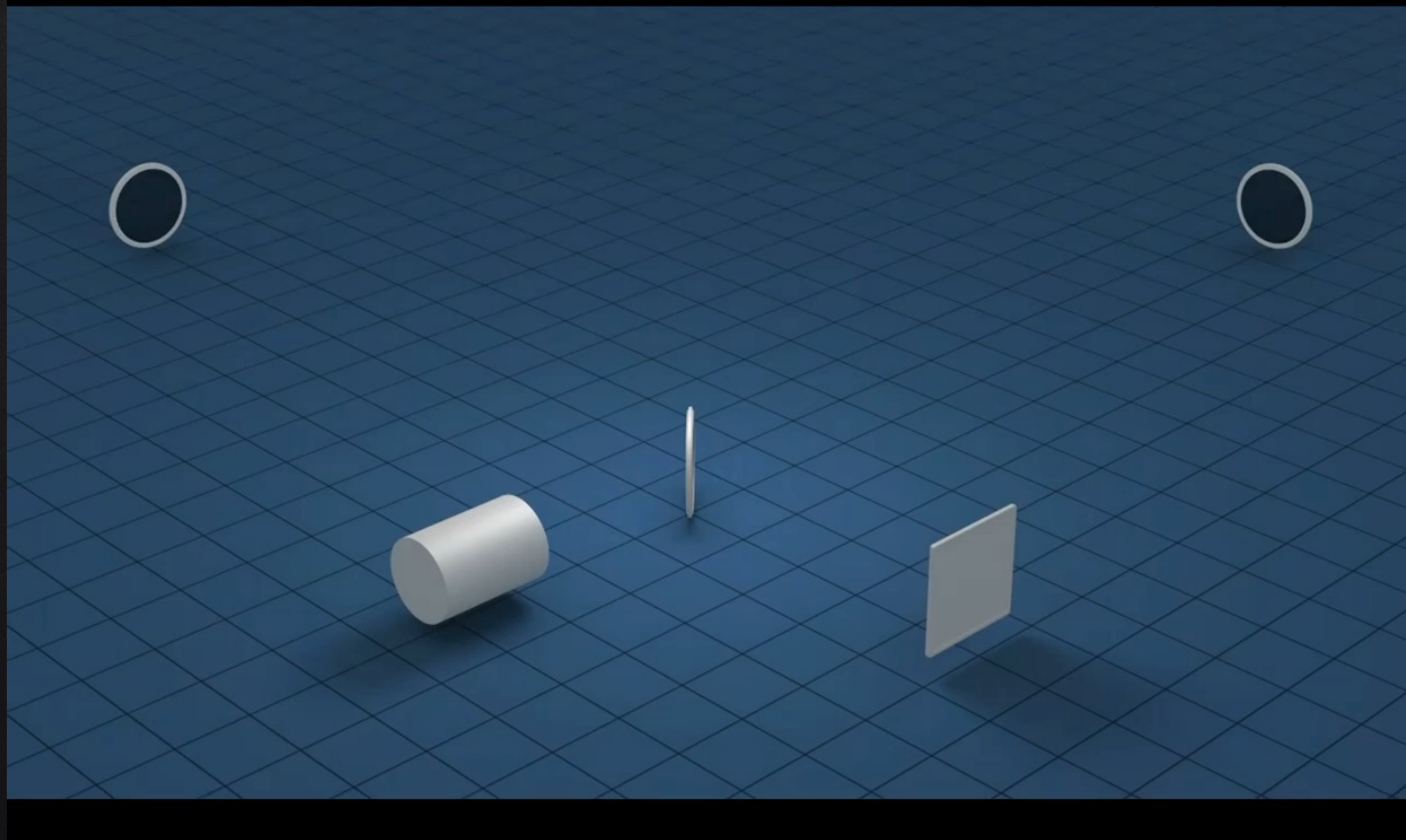
La deformación del espacio-tiempo es dinámica: **ondas gravitacionales**

# EMISIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES EN LA FUSIÓN DE DOS AGUJEROS NEGROS

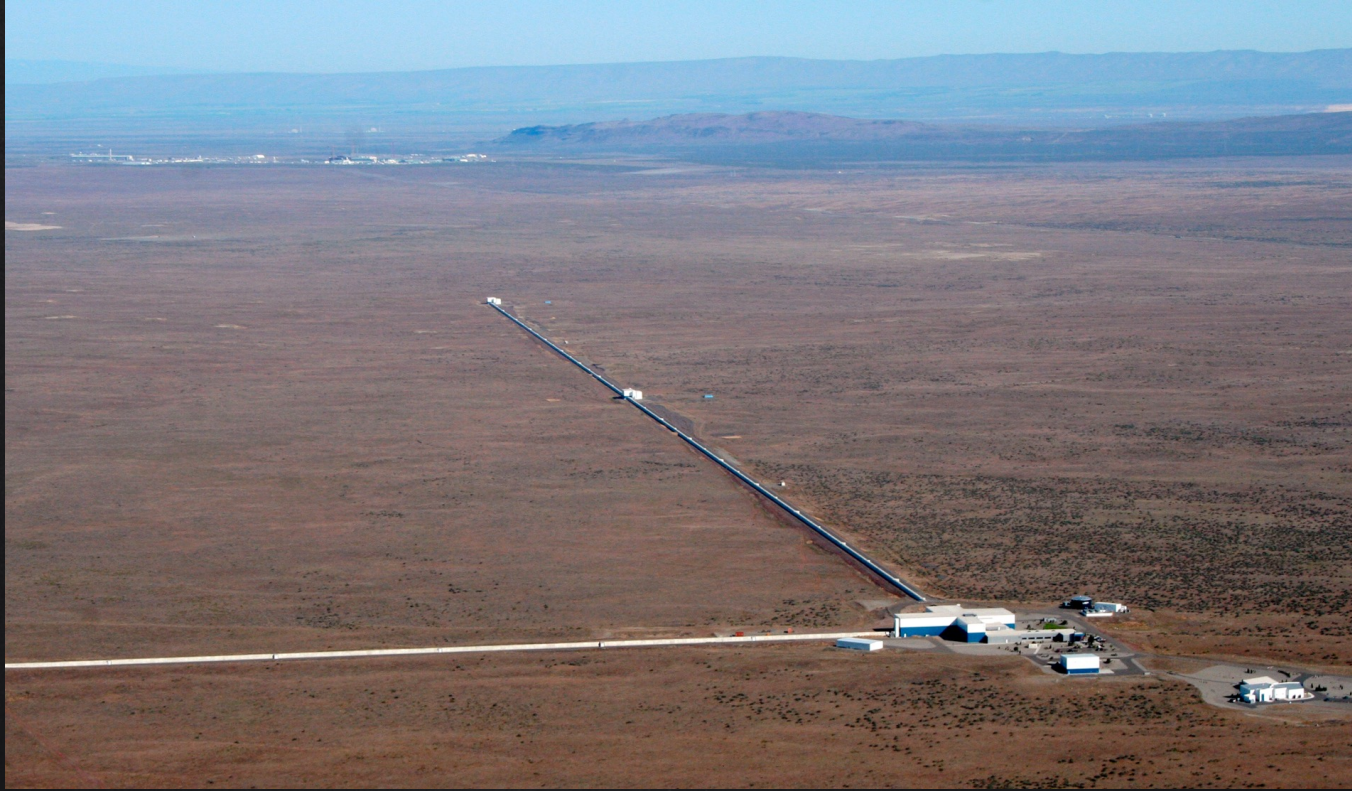




## DETECCIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES: INTERFERÓMETRO LÁSER



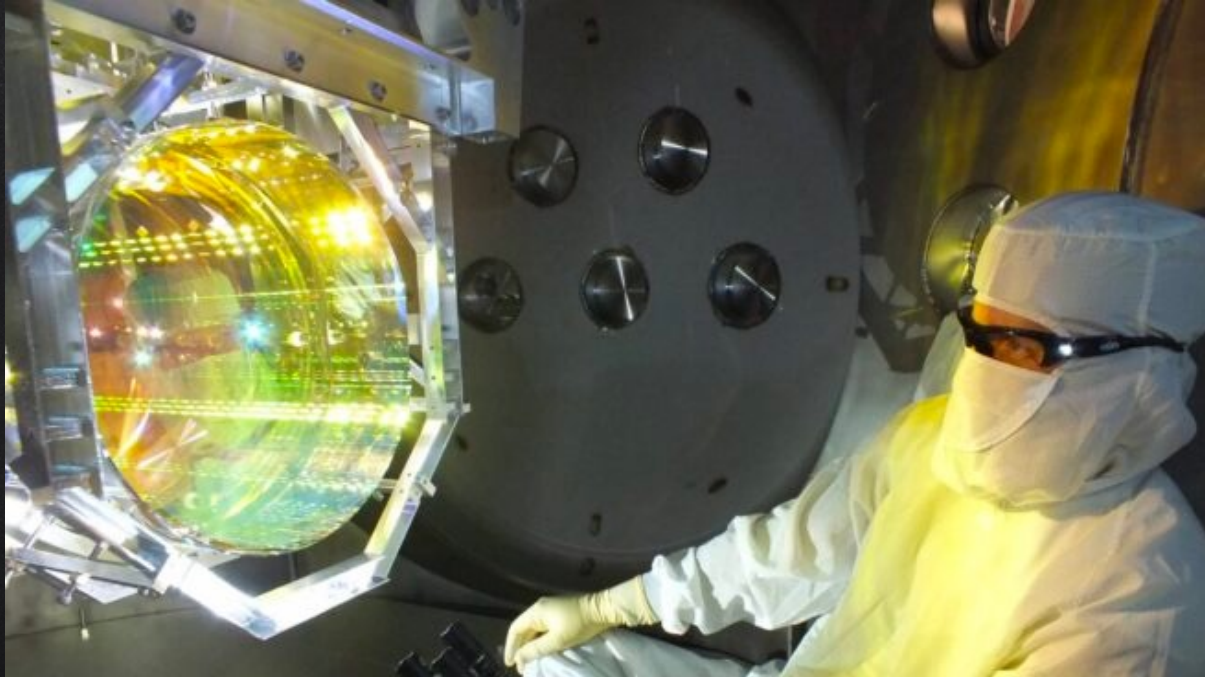
# LIGO: 2 DETECTORES EN EE.UU.



**Hanford** (Washington) y **Livingston** (Luisiana), a 3000 km de distancia



# LIGO: 2 DETECTORES EN EE.UU.



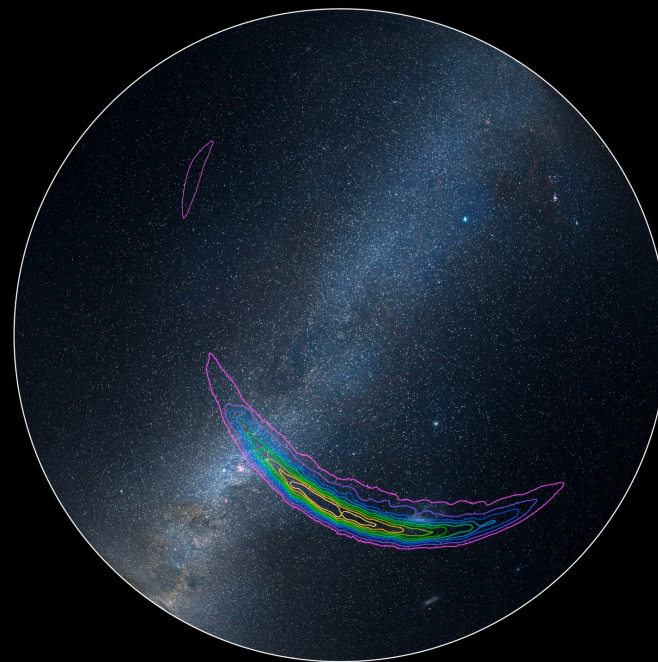
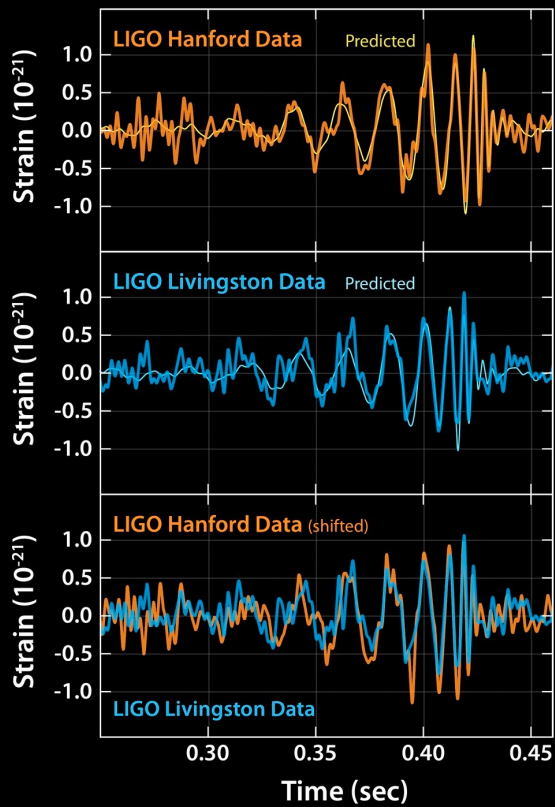
Uno de los espejos de LIGO



# VIRGO: DETECTOR EN EGO (PISA)



El **CIEMAT** es miembro de Virgo desde julio de 2022

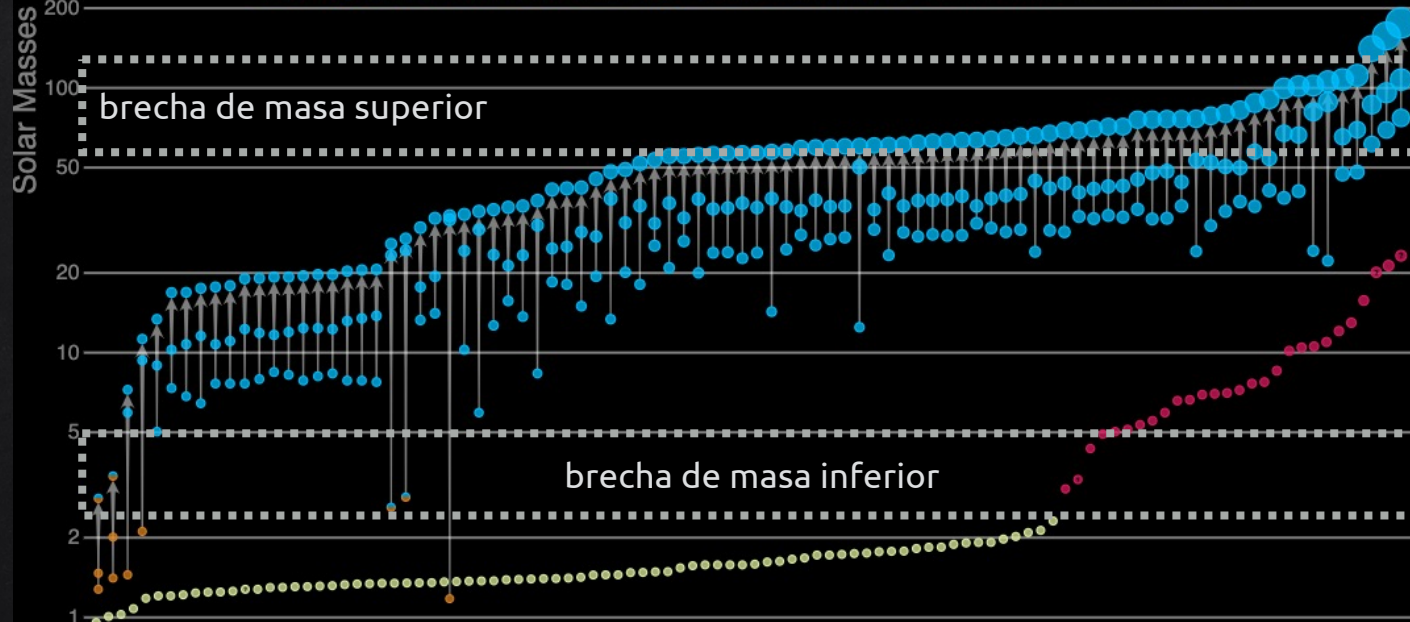


2017: Weiss, Barish, Thorne



# Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars

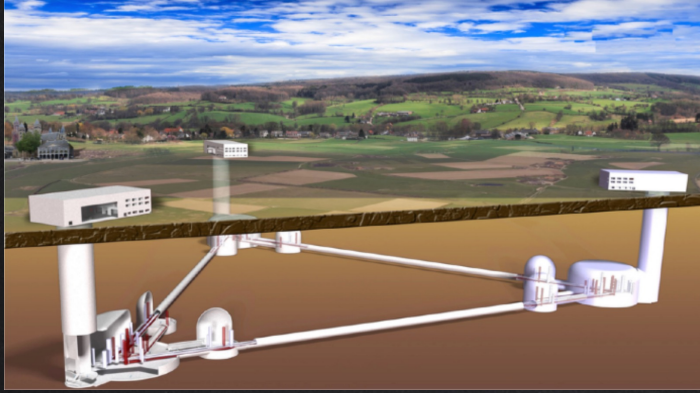


LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

Si estos son **agujeros negros primordiales** (creados en el Big Bang) podrían explicar parte de la **materia oscura** del Universo



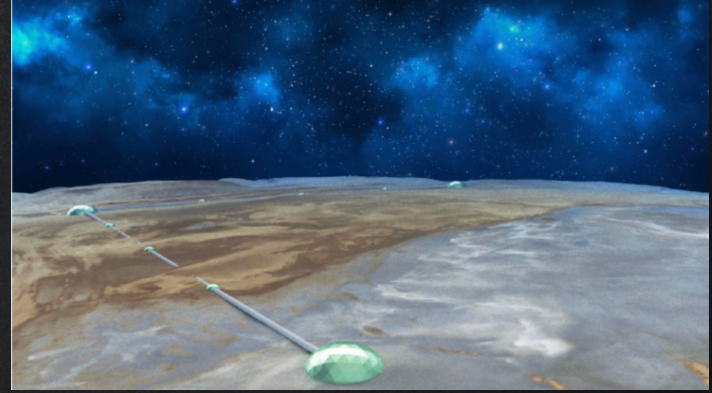
# LA SIGUIENTE GENERACIÓN: EINSTEIN TELESCOPE Y COSMIC EXPLORER



## Einstein Telescope:

6 interferómetros subterráneos en forma de V, formados por los lados de 10 km de un triángulo equilátero.

<http://www.et-gw.eu>

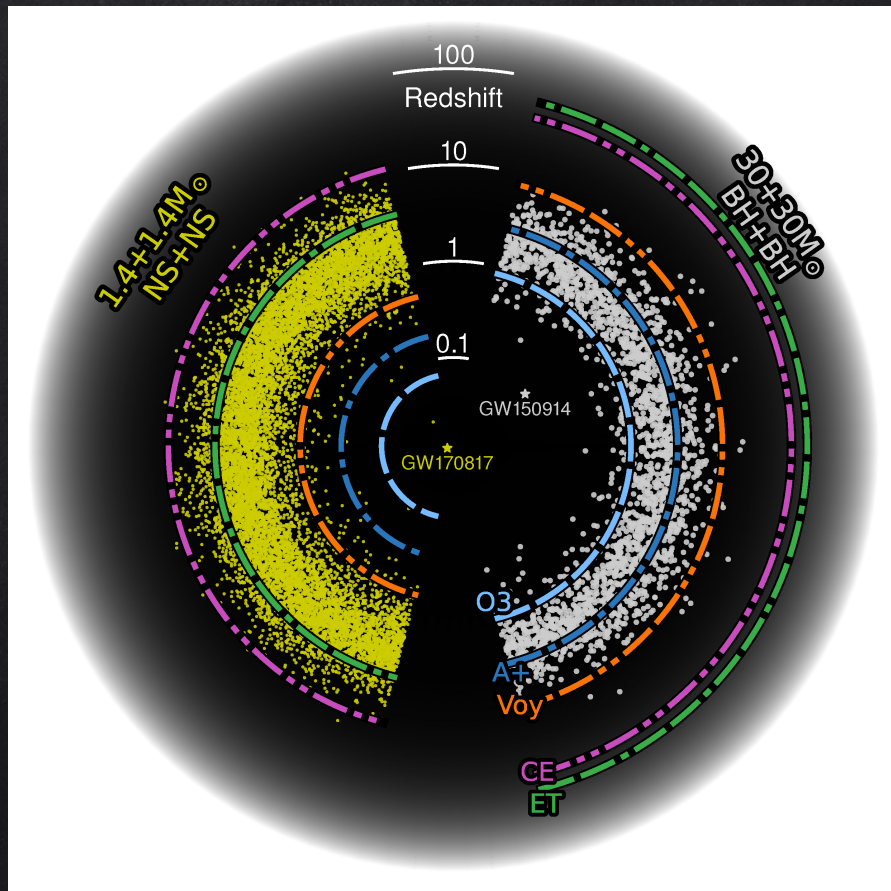


## Cosmic Explorer:

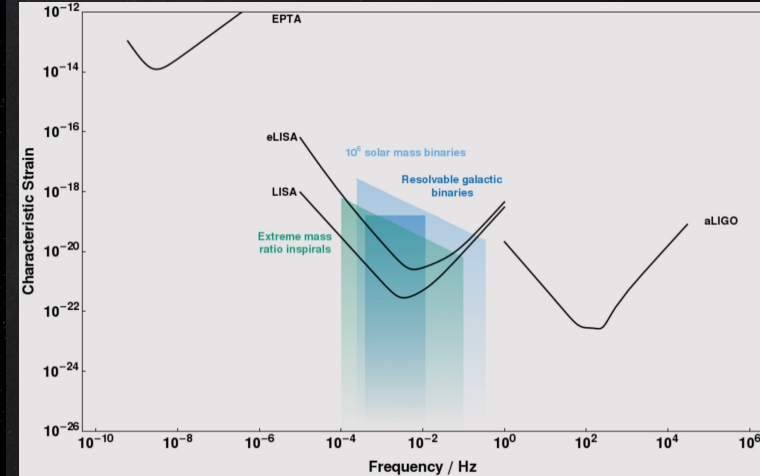
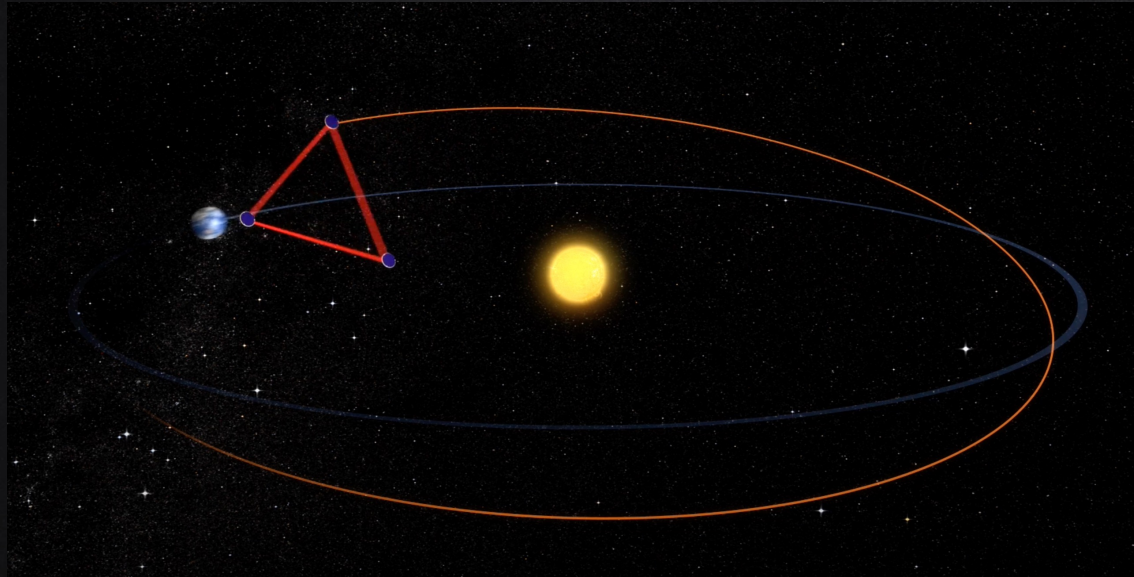
interferómetro en forma de L, sobre el suelo, con brazos de 40 km.

<https://dcc.cosmicexplorer.org/P2100003/public>

# LA SIGUIENTE GENERACIÓN: EINSTEIN TELESCOPE Y COSMIC EXPLORER



# LISA: LASER INTERFEROMETER SPACE ANTENNA (ESA)



**LISA:** 3 naves espaciales cilíndricas (1.8 m x 0.48 m), orbitando a 5 millones de km entre sí, formando un triángulo equilátero, situadas en la órbita terrestre a 50 millones de km detrás de la Tierra.



# PROBLEMAS ABIERTOS DE LA FÍSICA FUNDAMENTAL

- X Naturaleza de la energía oscura: ¿  $\Lambda$  ?
- X Naturaleza de la materia oscura: ¿ partículas, agujeros negros primordiales ?
- X Violación de CP:  $10^{-10}$
- X Naturaleza de los neutrinos
- X Jerarquía de masas:  $m_\nu$  vs.  $m_t \rightarrow 10^{11}$
- X Estabilidad cuántica de  $m_H$
- X Estabilidad del vacío cuántico: H
- X Inflación cosmológica
- X Formulación cuántica de la gravedad