

EL LADO OSCURO DEL UNIVERSO

Pablo García Abia

Julio 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

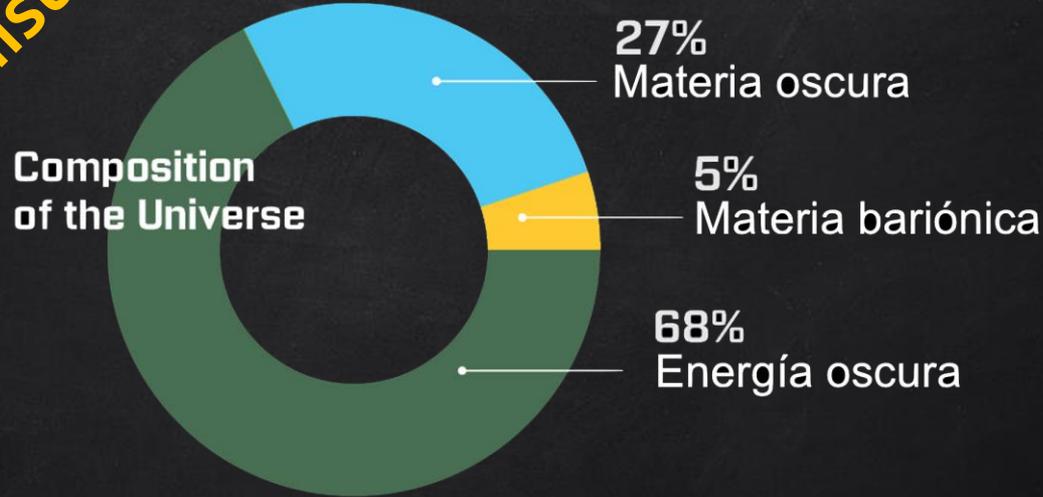
Relatividad General:

física del espacio-tiempo

Modelo Estándar Cosmológico

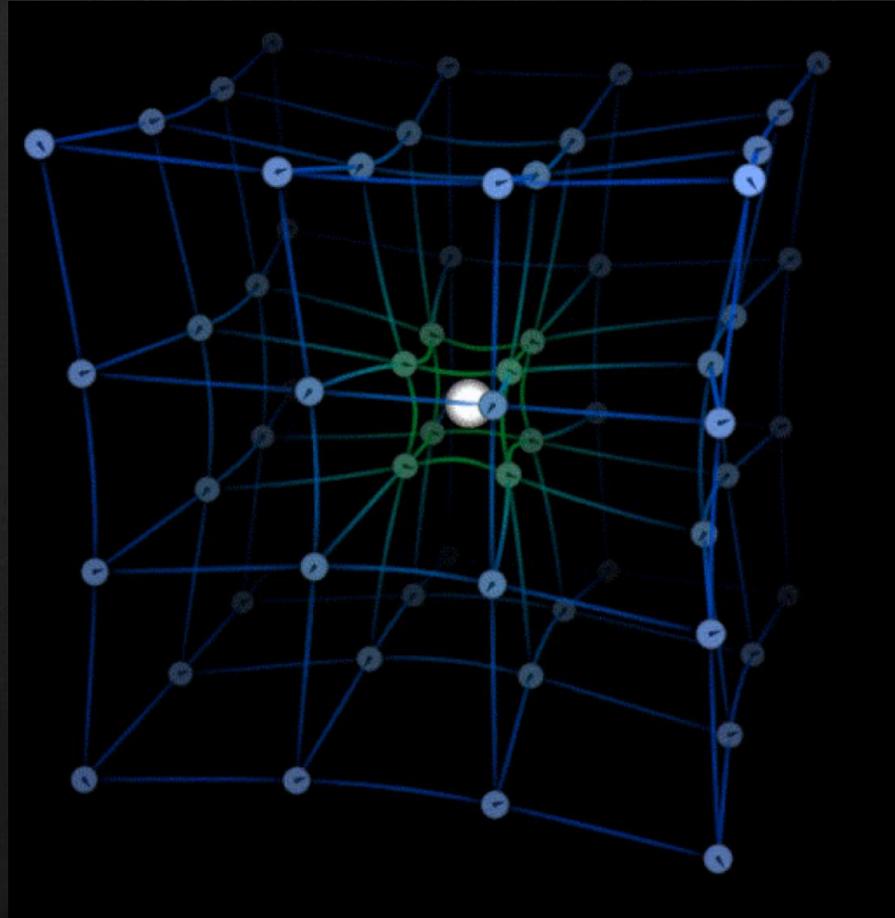
SITUACIÓN ACTUAL DE LA FÍSICA FUNDAMENTAL

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)

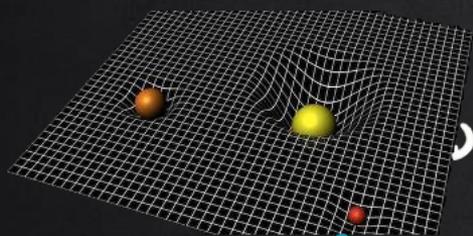
EVOLUCIÓN DEL UNIVERSO: ESPACIO Y TIEMPO



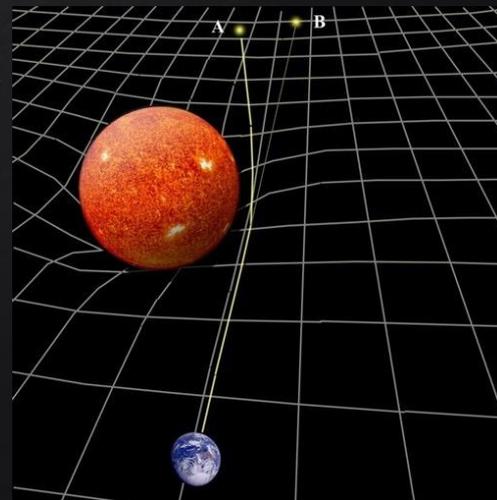
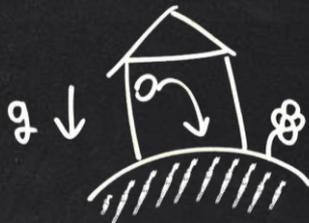
RELATIVIDAD GENERAL

RG

X Principio de Equivalencia



10^{-43}



ECUACIONES DE EINSTEIN

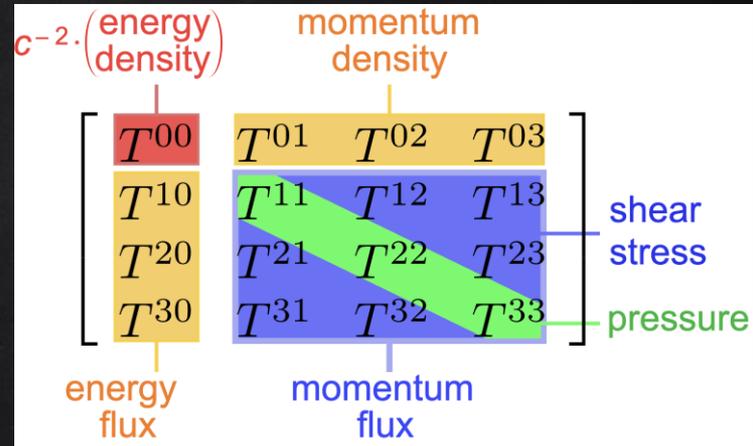
Equivalencia entre la curvatura del espacio-tiempo y la distribución de materia-energía:

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

Λ es la **constante cosmológica**.

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

es la "recta" del espacio curvo



EL MODELO ESTÁNDAR COSMOLÓGICO: Λ CDM

Solución de la ecuaciones de Einstein:

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

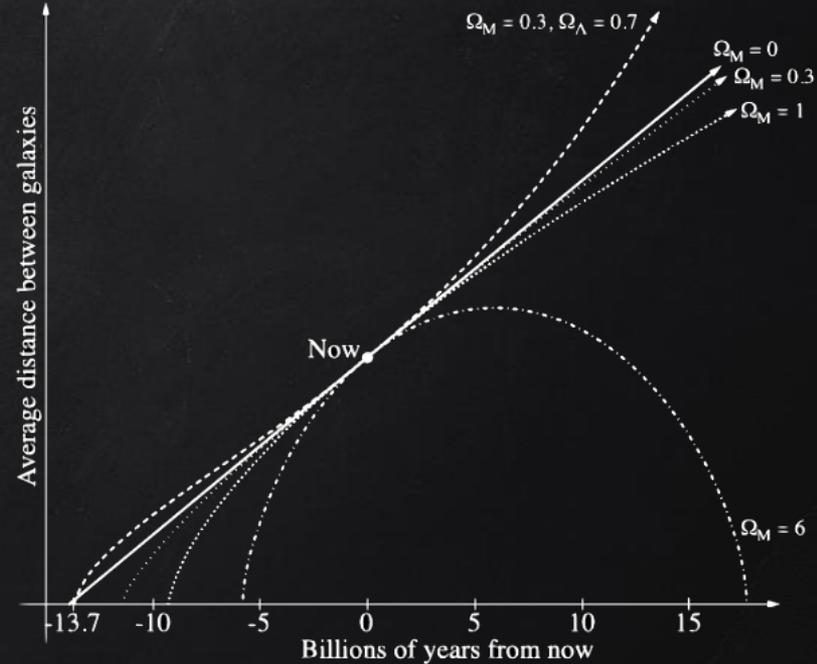
Parámetro
de Hubble

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

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

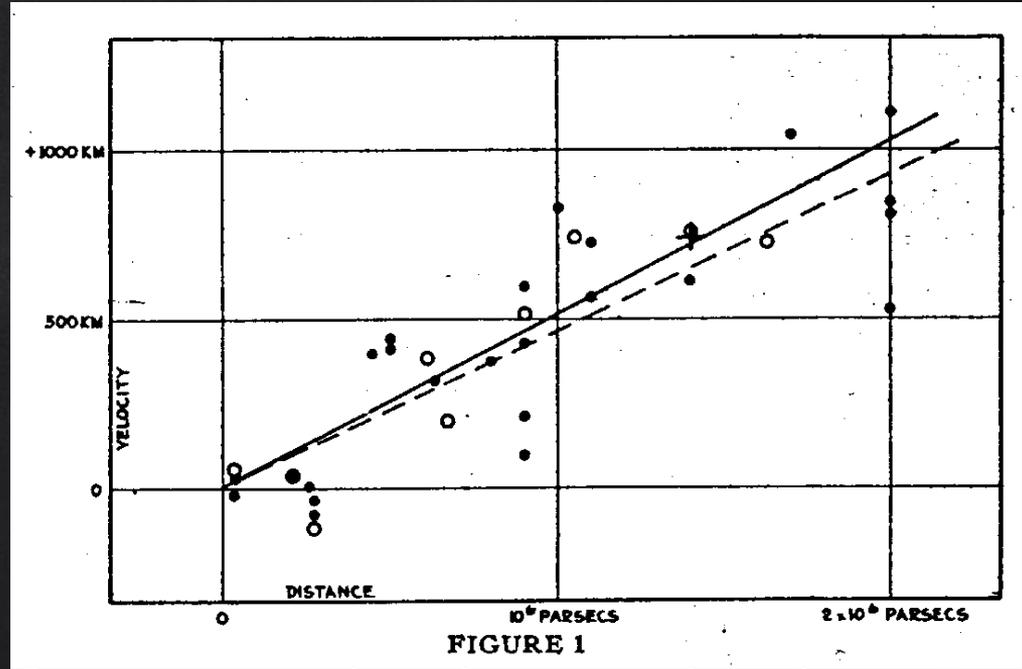
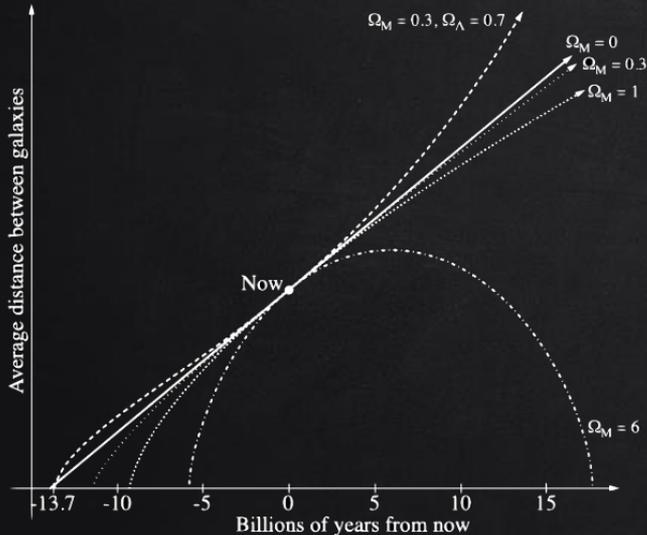
$$\frac{H^2}{H_0^2} = \Omega_{0,R} a^{-4} + \Omega_{0,M} a^{-3} + \Omega_{0,k} a^{-2} + \Omega_{0,\Lambda}$$

Ω_0 = densidades de radiación, materia, curvatura espacial y del vacío hoy ($a = 1$).



MEDIDA DEL PARÁMETRO DE HUBBLE

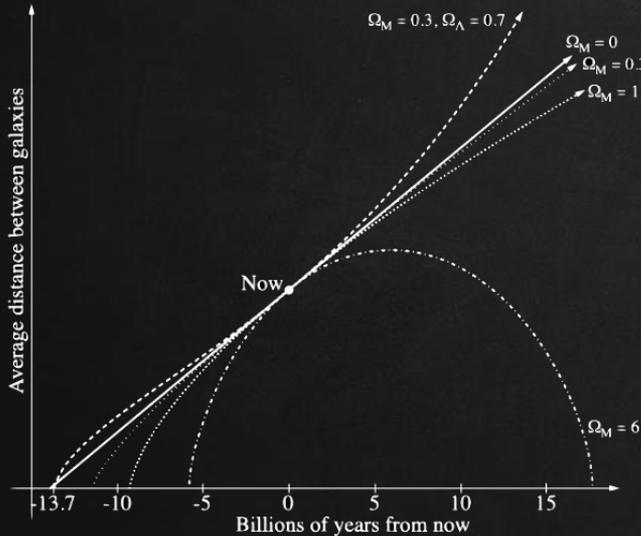
Parámetro de Hubble: $H_0 \approx 70 \text{ (km/s)/Mpc}$ (*)
 $1/H_0 \approx 1.4 \times 10^{10}$ años



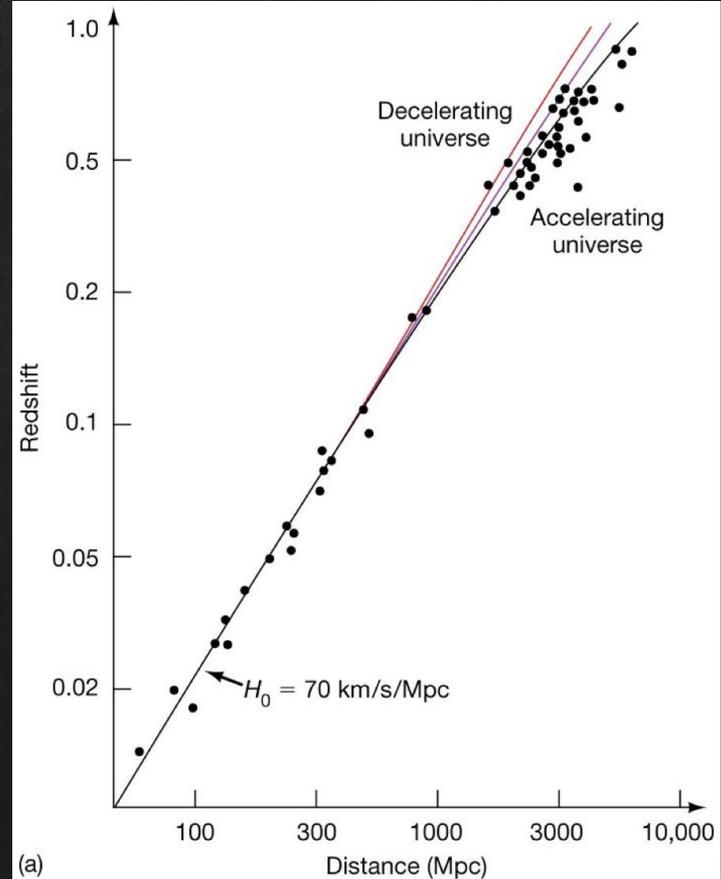
(*) 1 pársec (pc) = 3.3 años-luz = 3×10^{16} m

MEDIDA DEL PARÁMETRO DE HUBBLE

Parámetro de Hubble: $H_0 \approx 70 \text{ (km/s)/Mpc}$ (*)
 $1/H_0 \approx 1.4 \times 10^{10}$ años



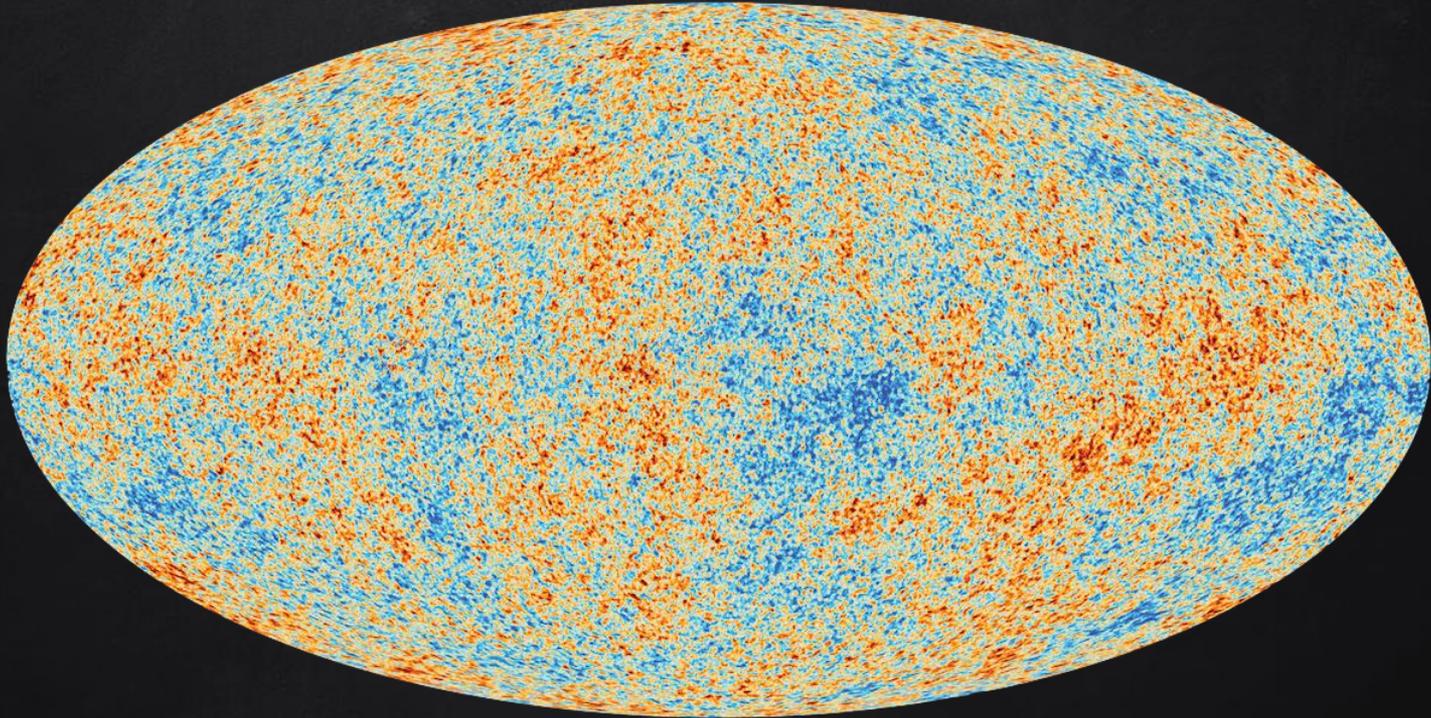
(*) 1 pársec (pc) = 3.3 años-luz = 3×10^{16} m



(a)

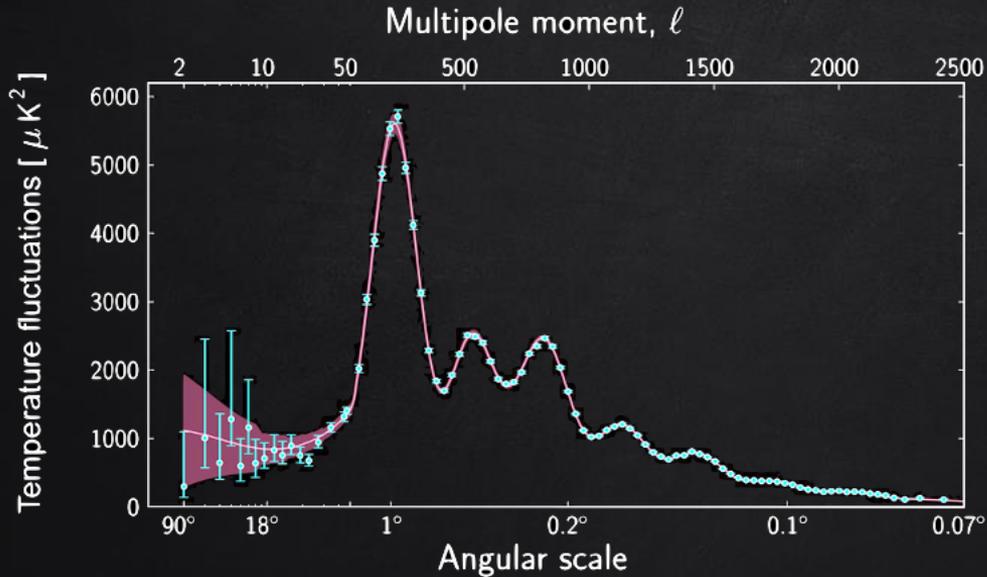
FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS: CMB

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



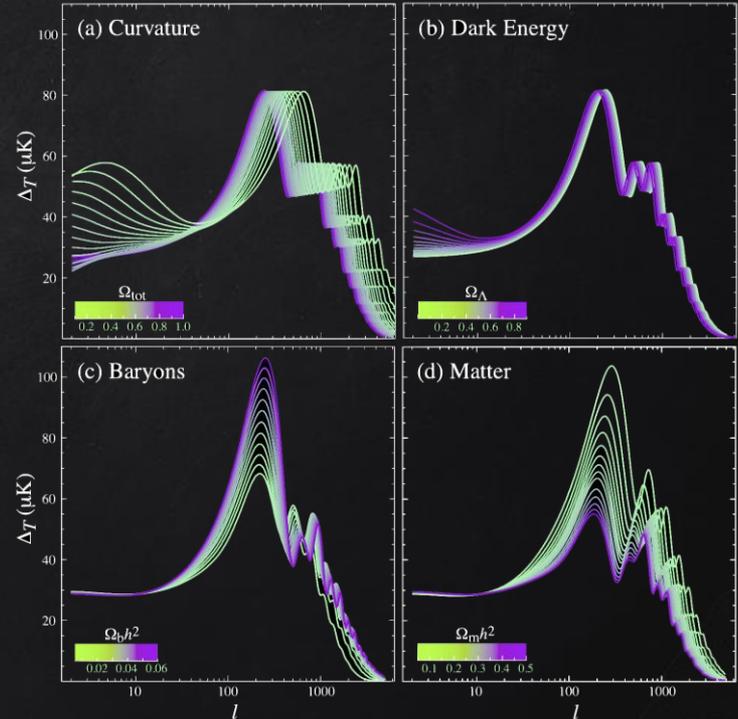
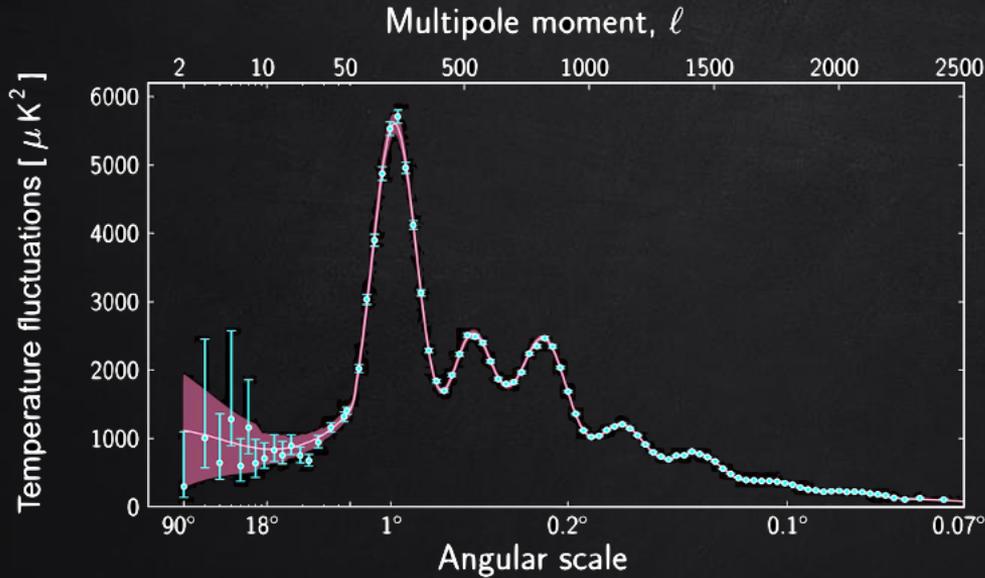
FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS: CMB

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



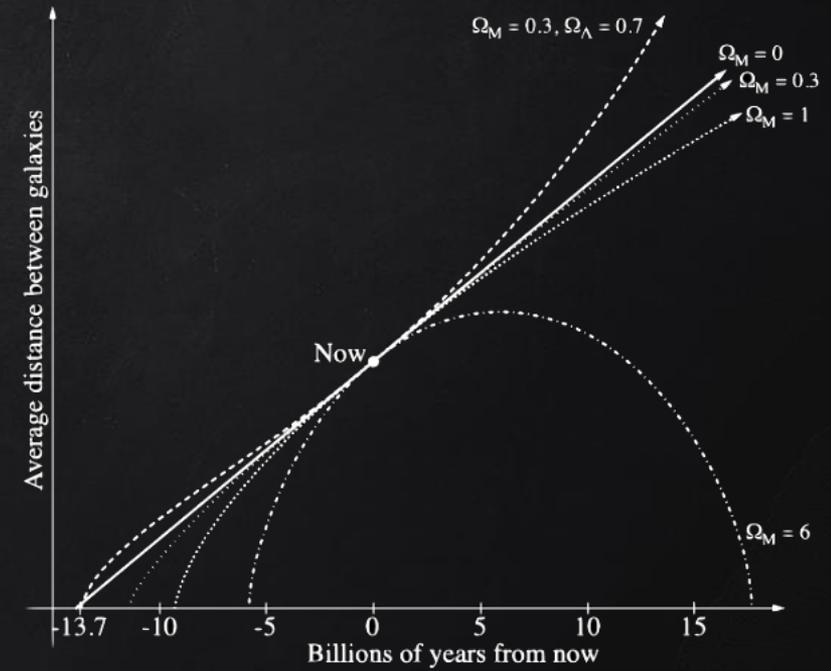
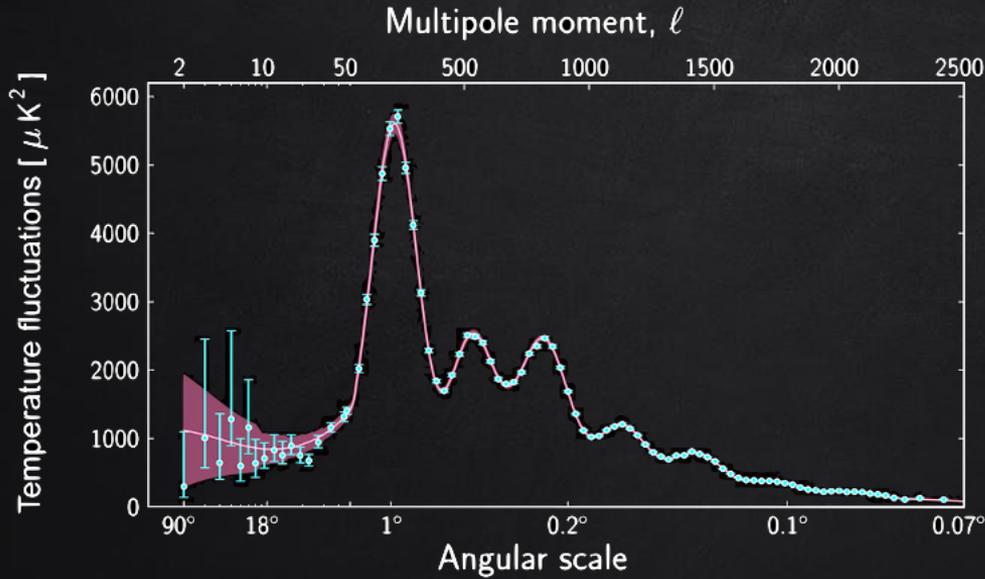
FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS: CMB

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



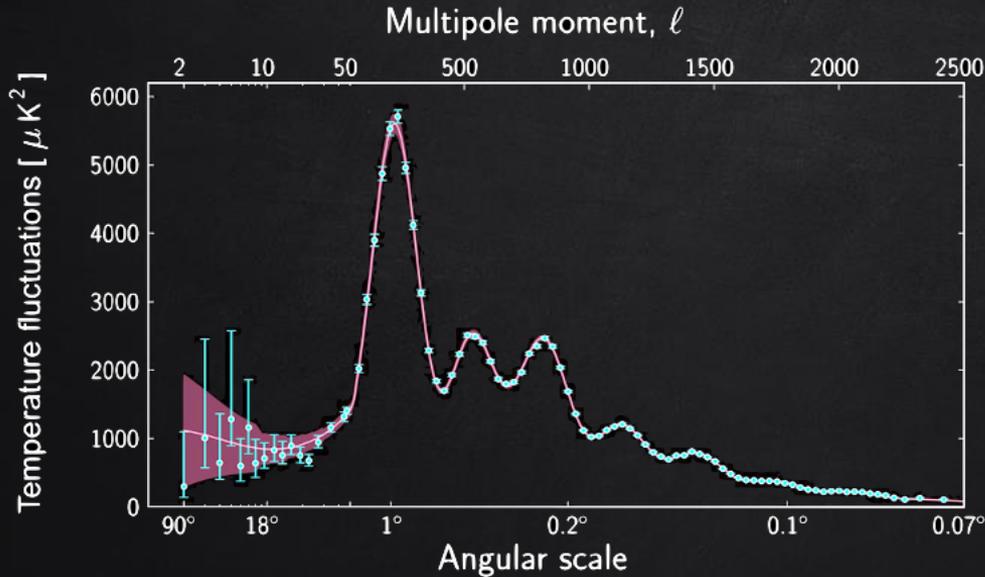
FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS: CMB

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



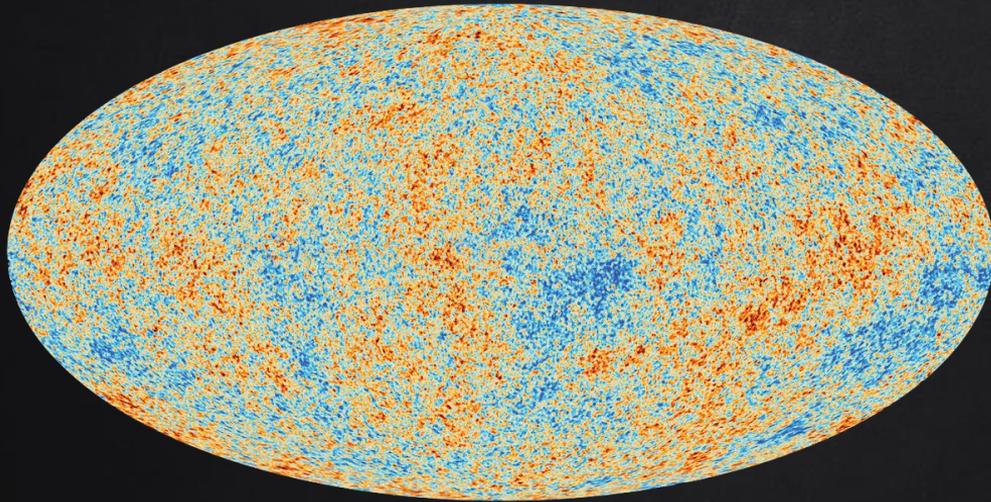
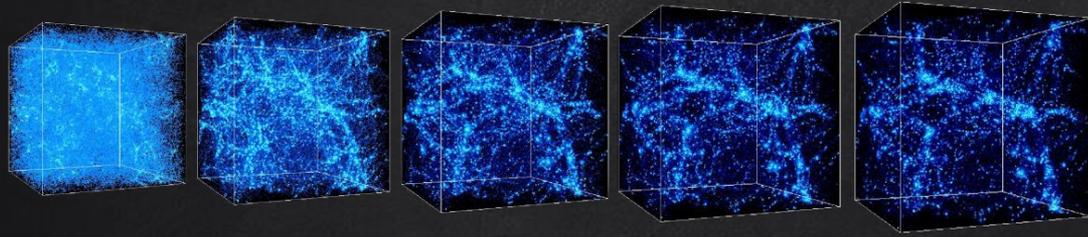
FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS: CMB

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

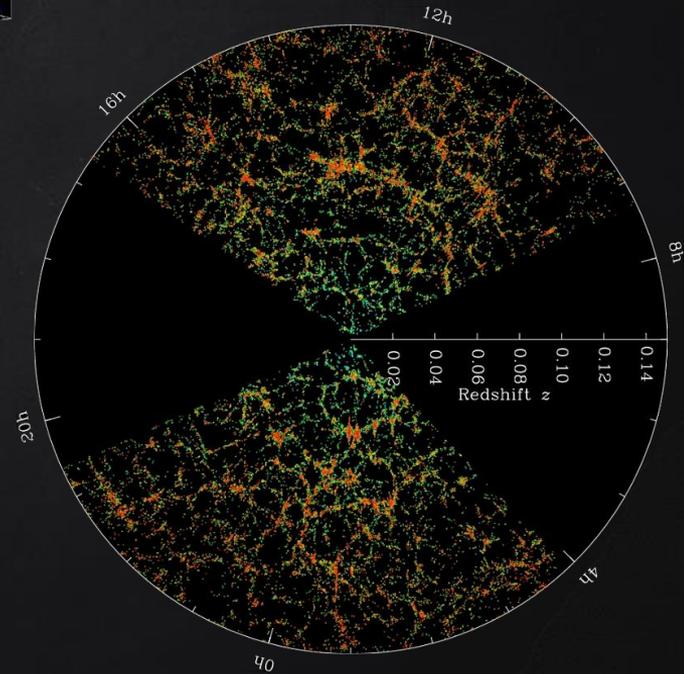


Edad del universo		$13.799 \pm 0.021 \times 10^9$ años
Constante de Hubble	H_0	67.74 ± 0.46 km/s/Mpc
Densidad materia bariónica	Ω_b	0.0486 ± 0.0010
Densidad materia oscura	Ω_c	0.2589 ± 0.0057
Densidad materia	Ω_m	0.3089 ± 0.0062
Densidad energía oscura	Ω_Λ	0.6911 ± 0.0062

ESTRUCTURA A GRAN ESCALA DEL UNIVERSO



t
↓



EL MODELO ESTÁNDAR COSMOLÓGICO: Λ 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.

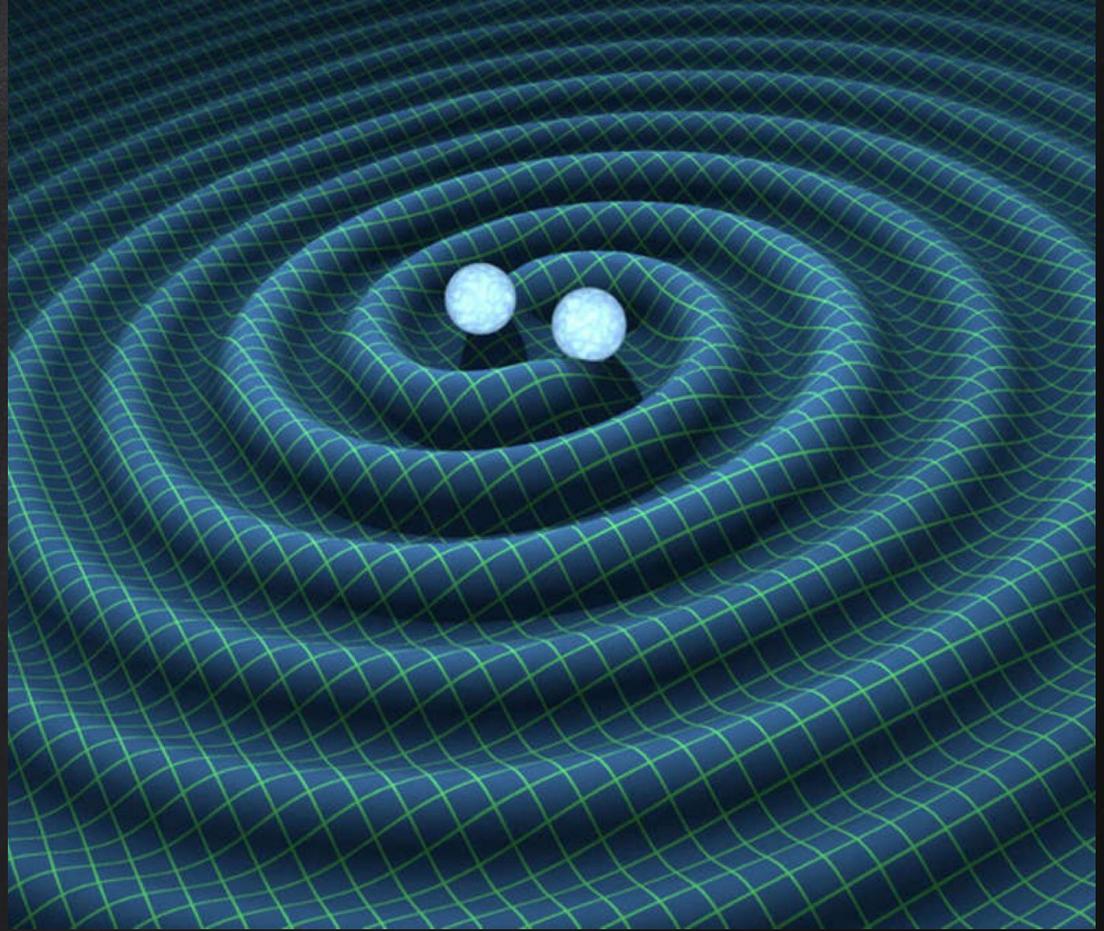
RG



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



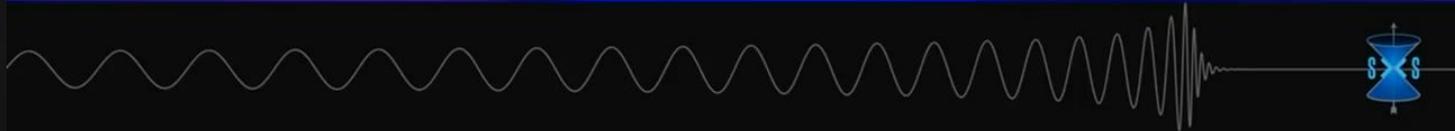
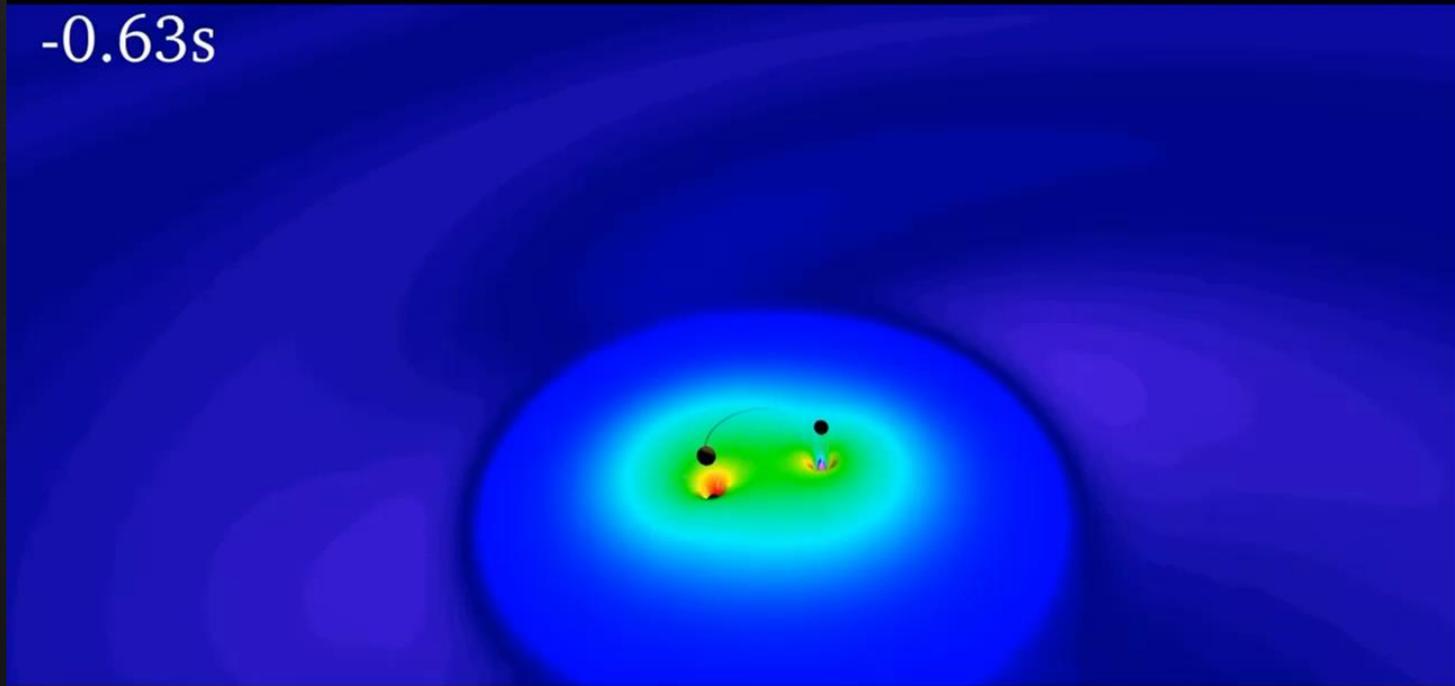
10^{-43}



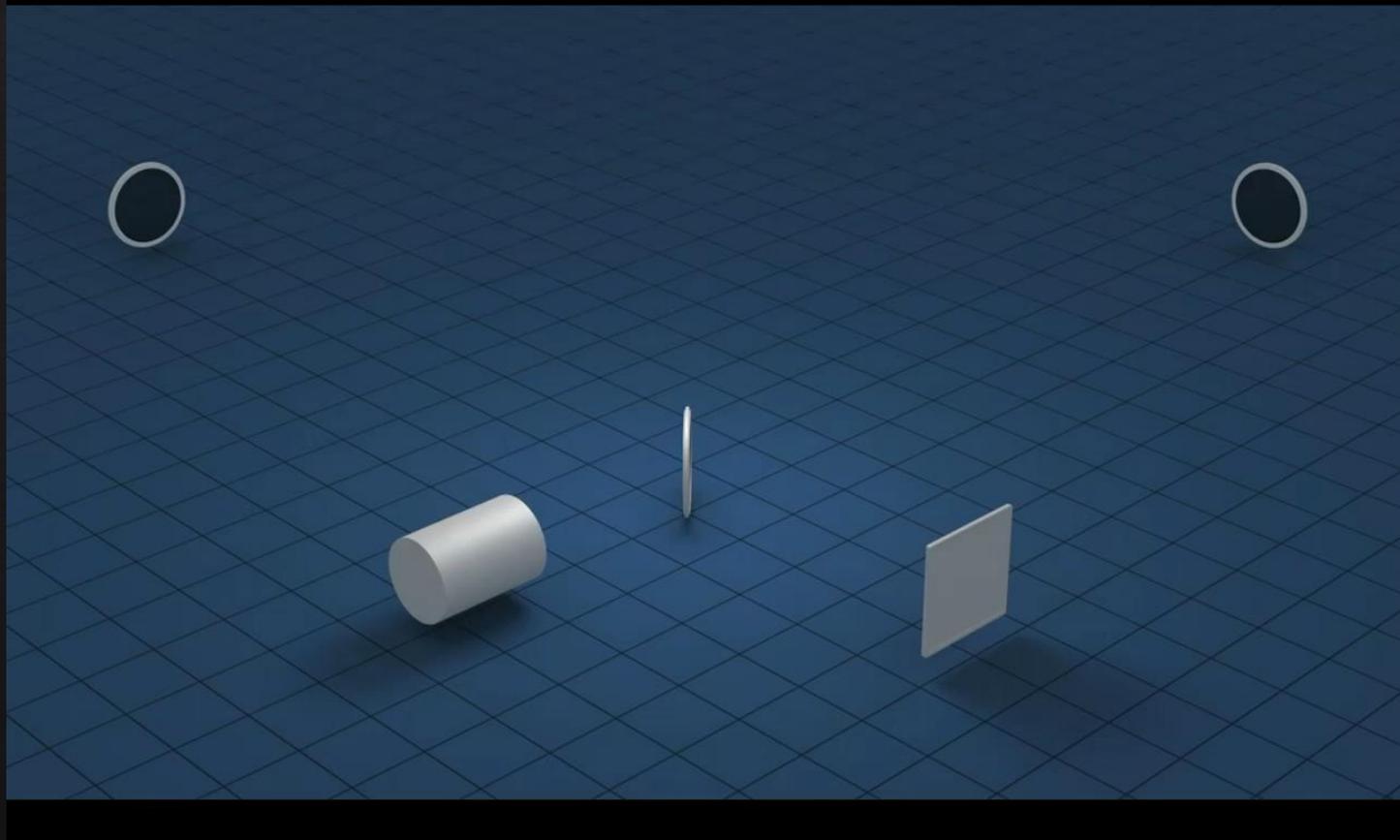
La deformación del espacio-tiempo es dinámica: ondas gravitacionales

EMISIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES EN LA FUSIÓN DE DOS AGUJEROS NEGROS

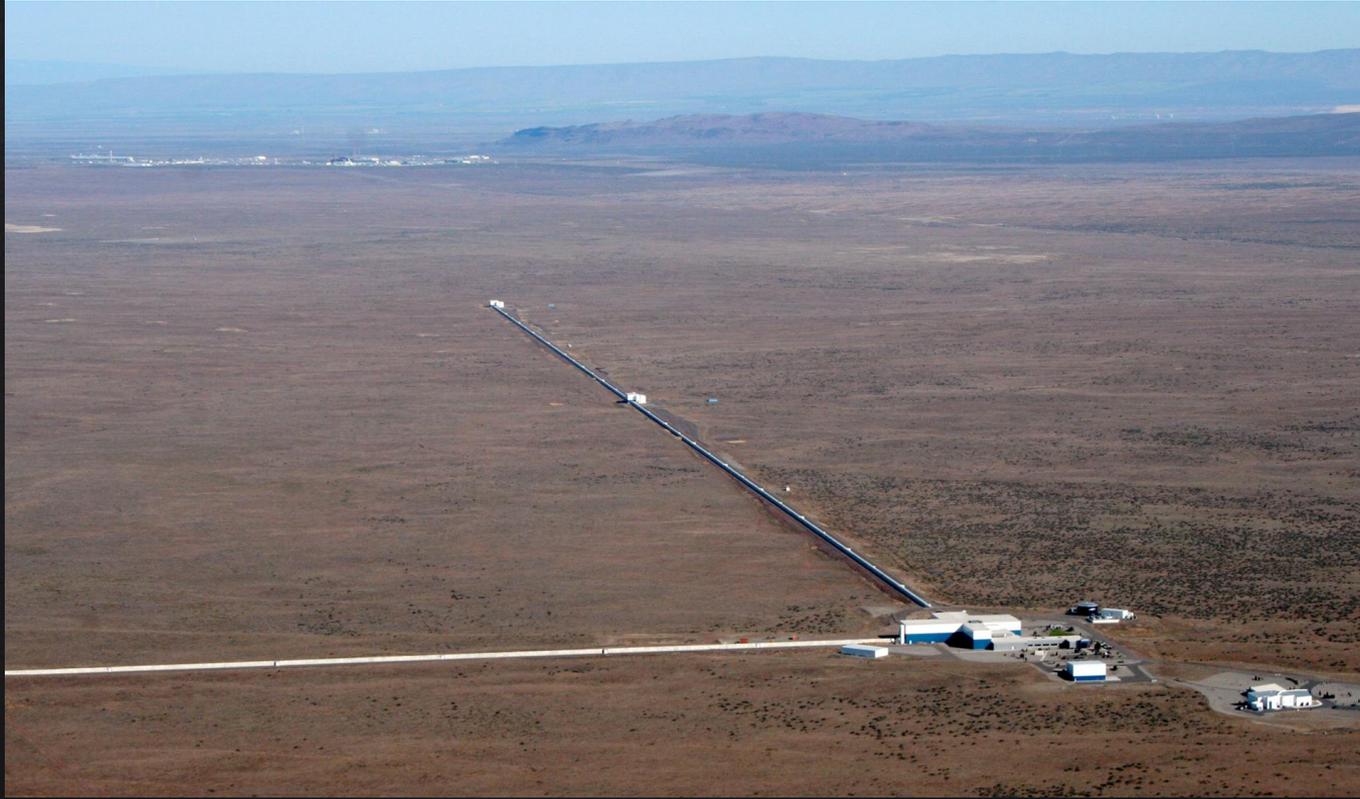
-0.63s



DETECCIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES: INTERFERÓMETRO LÁSER



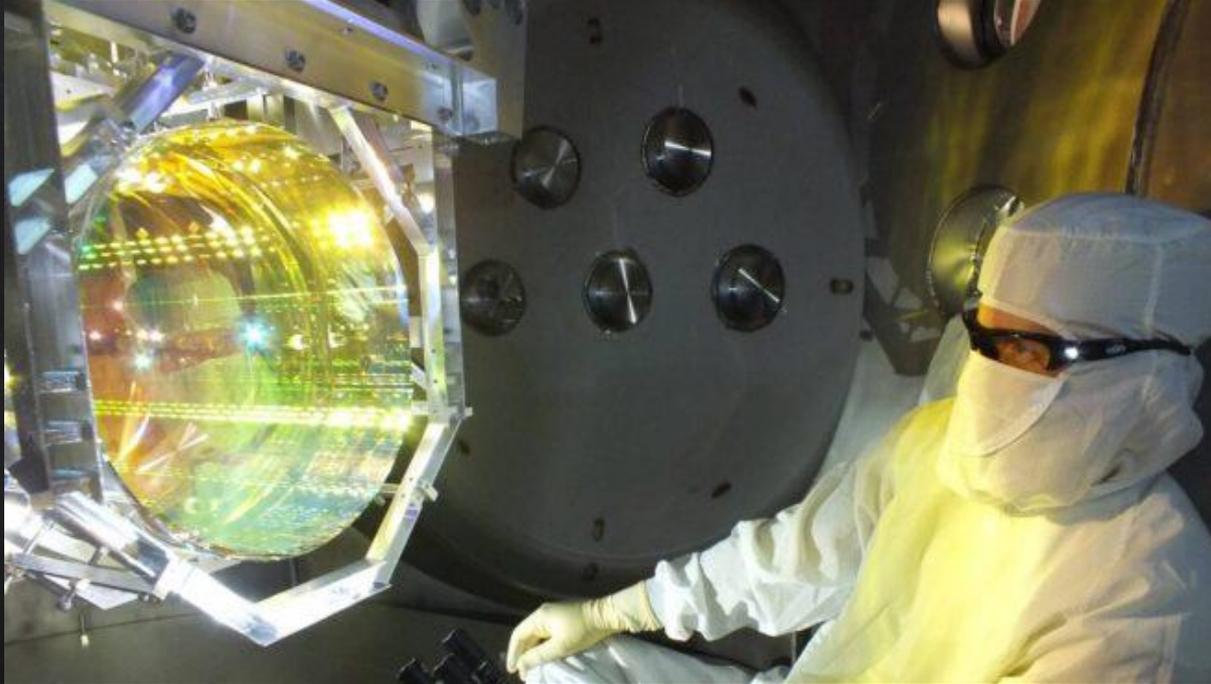
LIGO: 2 DETECTORES EN EE.UU.



RE 33

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)

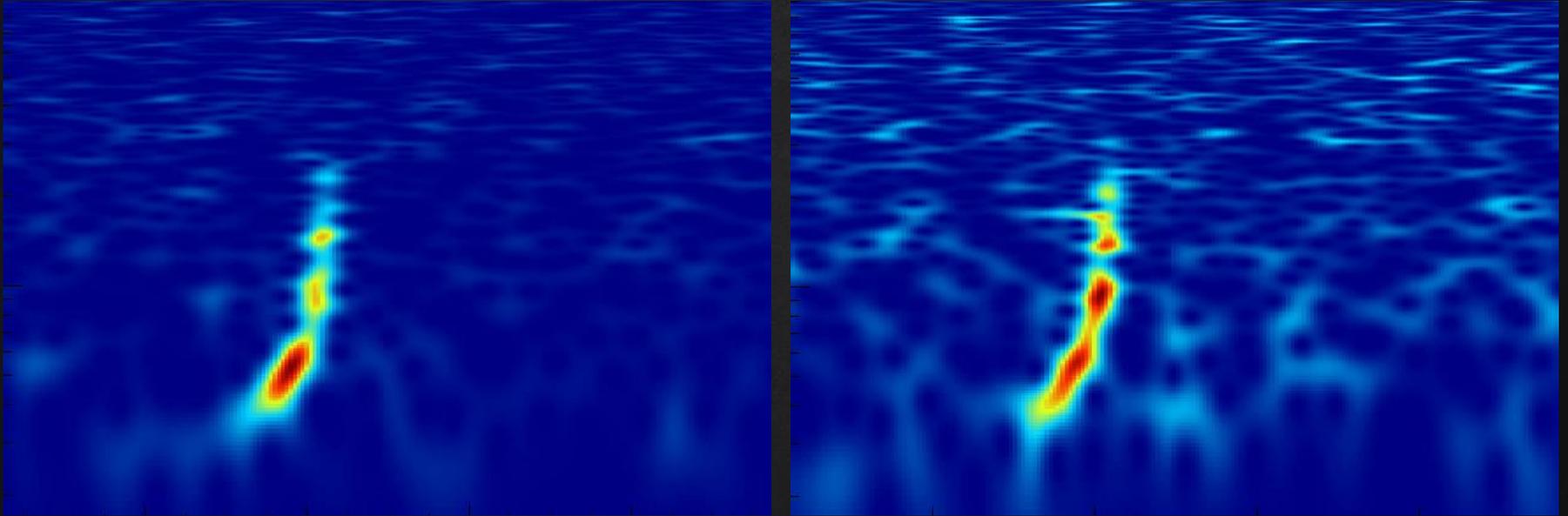


RE 28

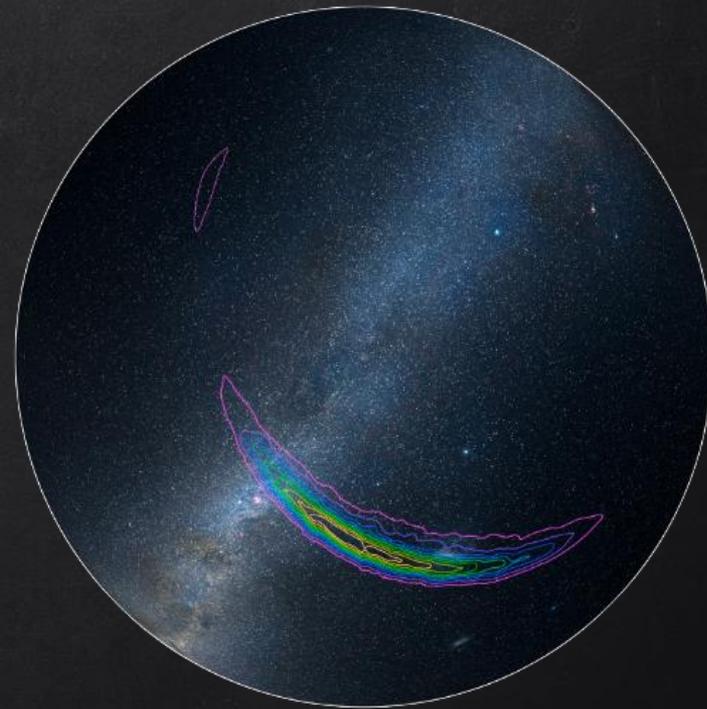
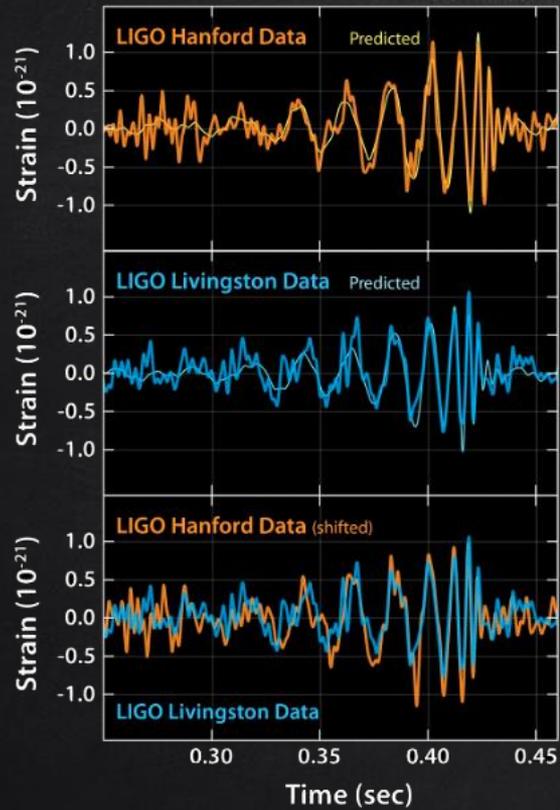
El **CIEMAT** es miembro de Virgo desde julio de 2022

GW150914

LA PRIMERA DETECCIÓN



Mapas de frecuencia temporal: datos de **Hanford** (izquierda) y **Livingston** (derecha)

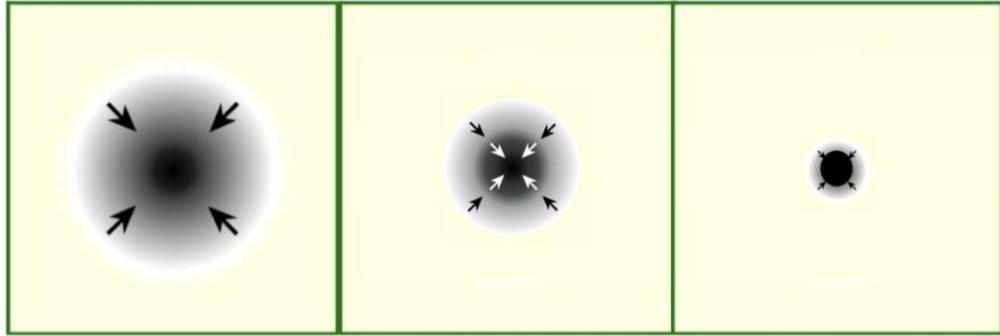
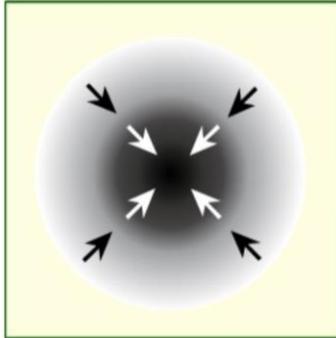


2017: Weiss, Barish, Thorne

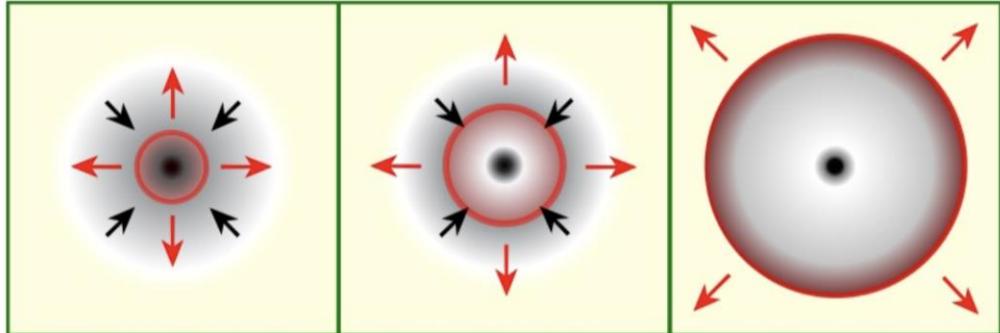


FORMACIÓN DE AGUJEROS NEGROS

Gravity wins



Radiation wins

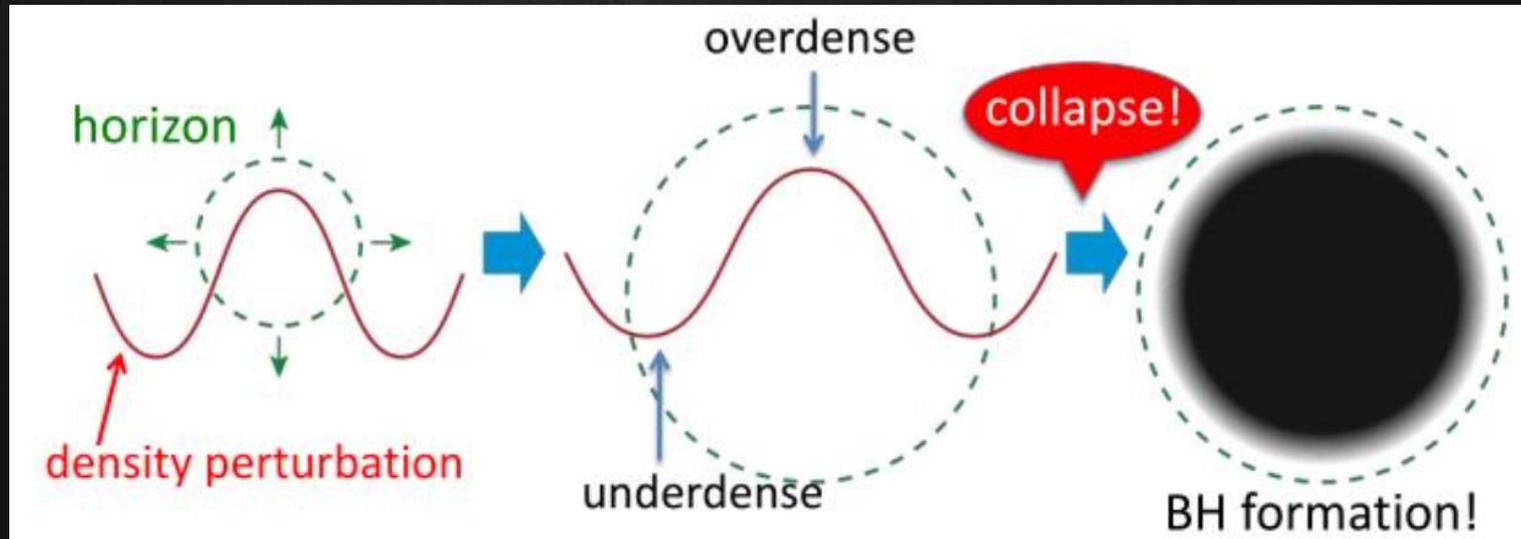


AGUJEROS NEGROS PRIMORDIALES (PBH)

Agujeros negros **hipotéticos** que se formaron poco después del Big Bang ($t < 1 \text{ s}$).

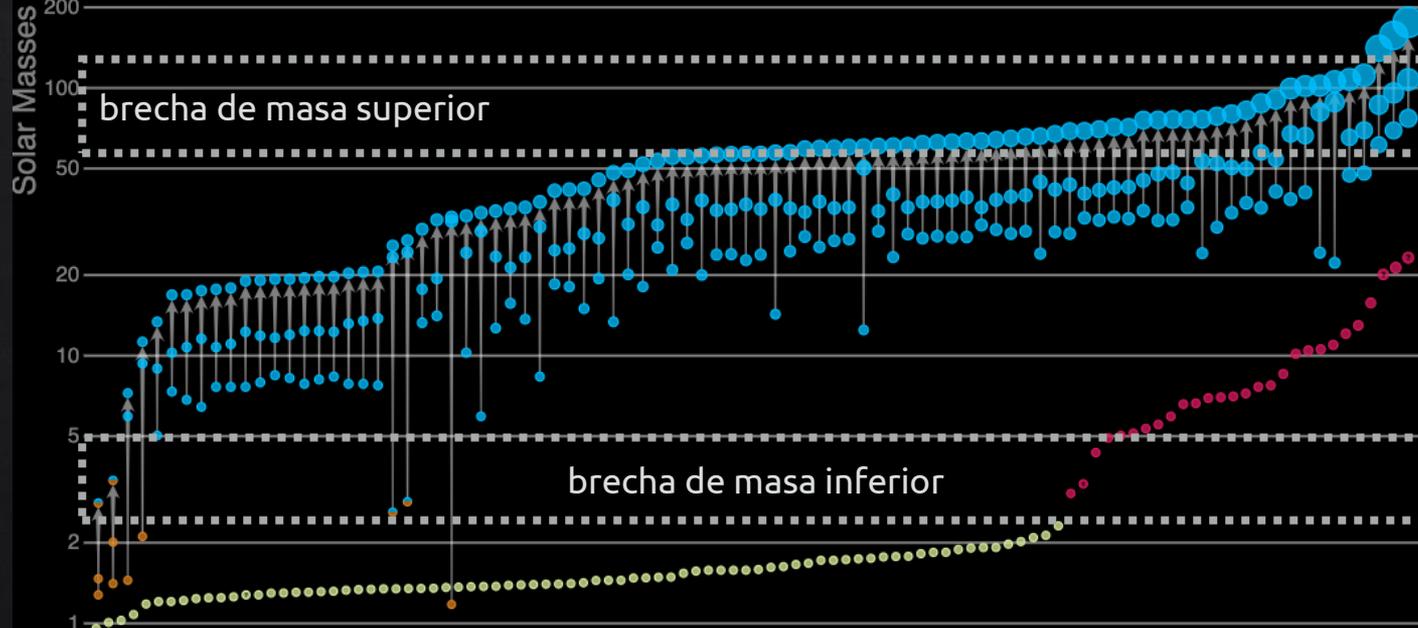
En la era **inflacionaria** y en el universo primitivo **dominado por la radiación**, bolsas extremadamente densas de materia subatómica podrían haberse empaquetado estrechamente hasta el punto del colapso gravitatorio, creando agujeros negros primordiales.

Dado que la creación de agujeros negros primordiales sería anterior a las primeras estrellas, no se limitan al estrecho rango de masas de los agujeros negros estelares.



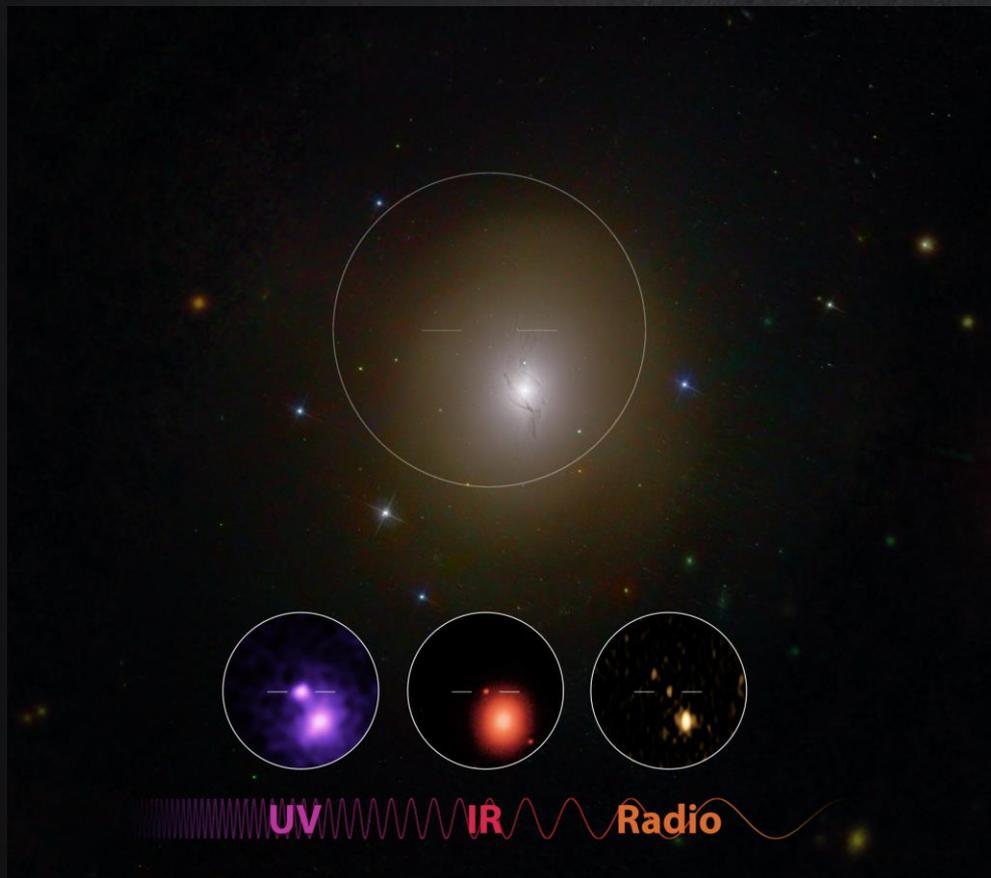
Masses in the Stellar Graveyard

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



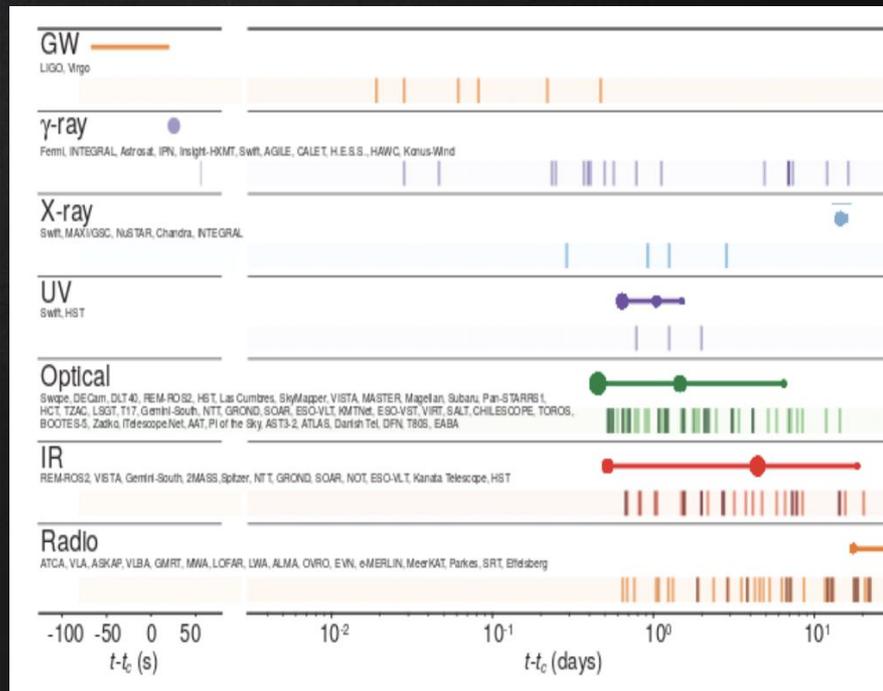
Si estos son **agujeros negros primordiales** (creados en el Big Bang) podrían explicar parte de la **materia oscura** del Universo

GW170817: 1ª OBSERVACIÓN DE LA FUSIÓN DE 2 ESTRELLAS DE NEUTRONES



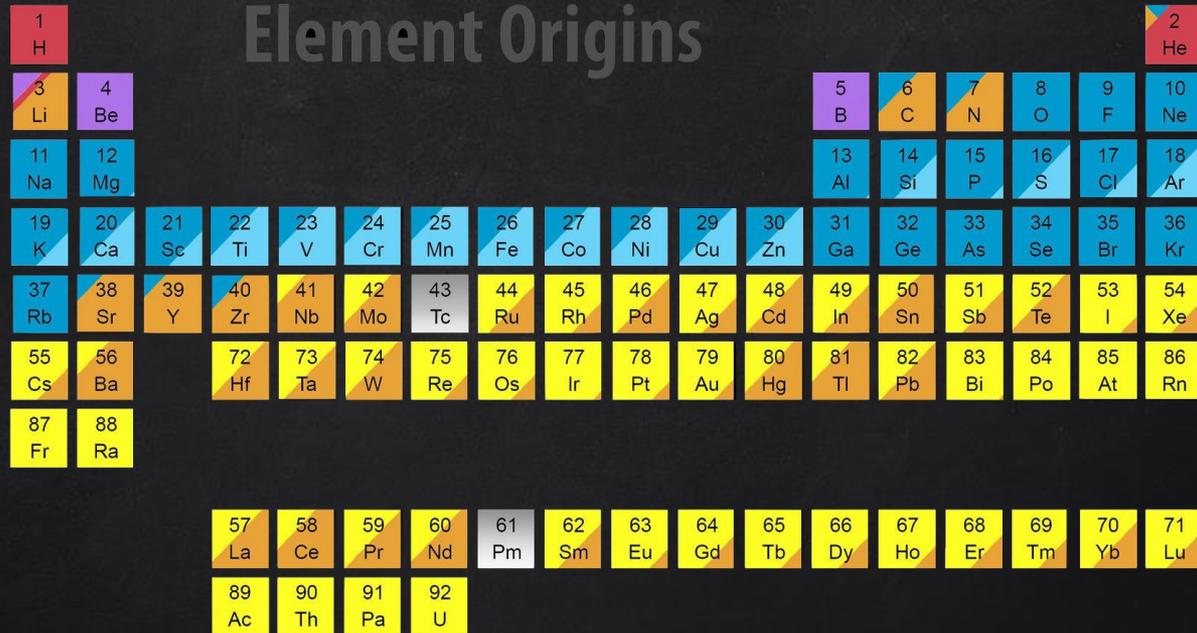
Observación en todas las bandas del espectro electromagnético:

Astrofísica de multi-mensajeros.



GW170817

ORIGEN DE LOS ELEMENTOS PESADOS



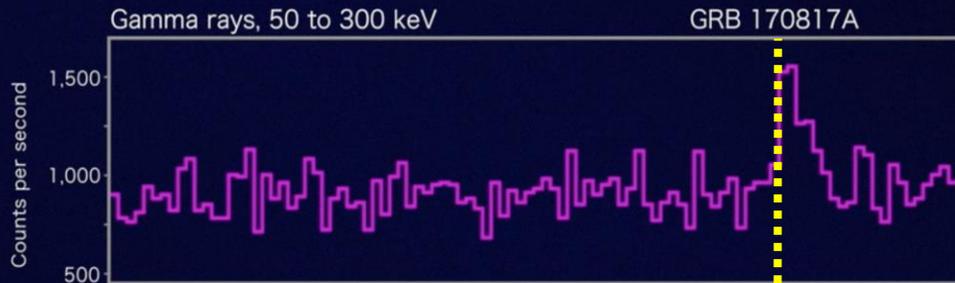
Merging Neutron Stars
Dying Low Mass Stars

Exploding Massive Stars
Exploding White Dwarfs

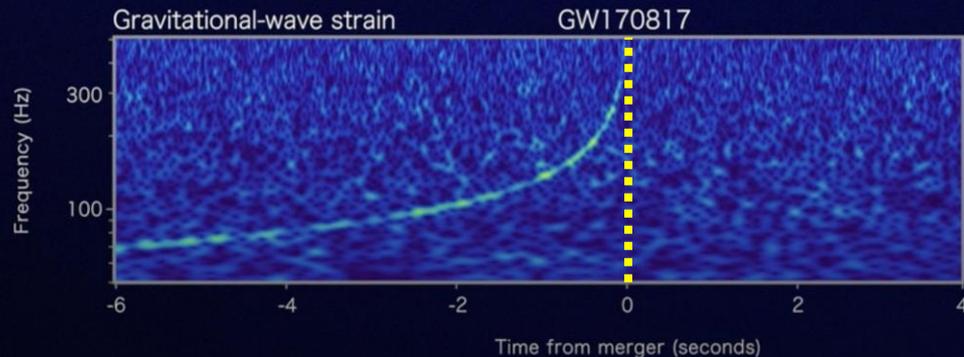
Big Bang
Cosmic Ray Fission

VELOCIDAD DE LAS ONDAS GRAVITACIONALES

Fermi

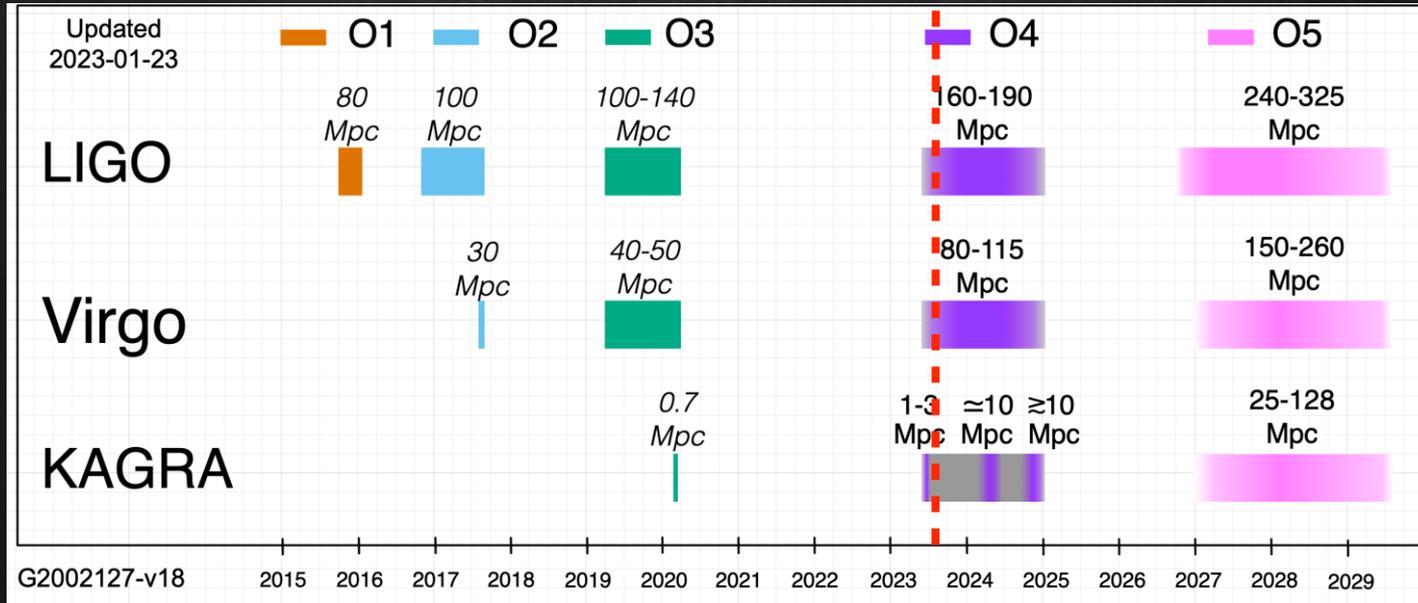


LIGO



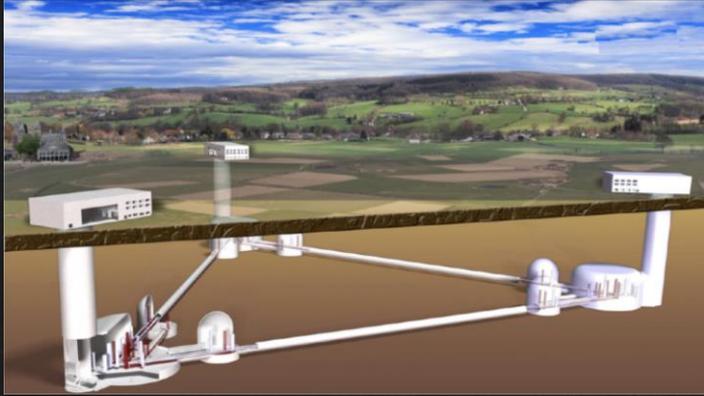
La diferencia entre V_{GW} y V_{EM} se acota entre -3×10^{-15} y 7×10^{-16} veces c .

CALENDARIO DE OBSERVACIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES



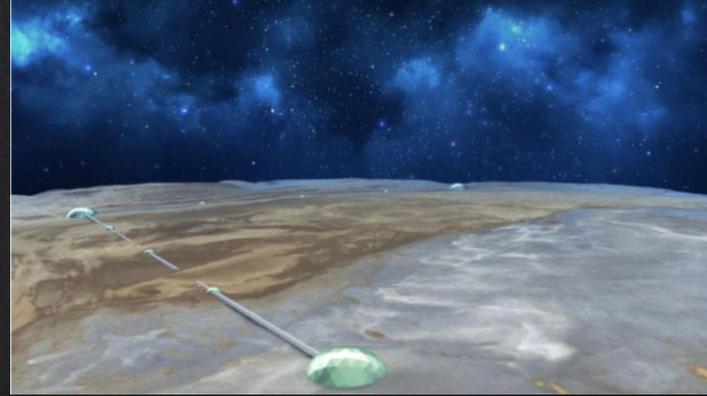
El calendario se divide en fases de observación y periodos de inactividad para la construcción y puesta en servicio. En esta figura se indica el intervalo de BNS (estrella binaria de neutrones) para cada **run de observación**.

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.

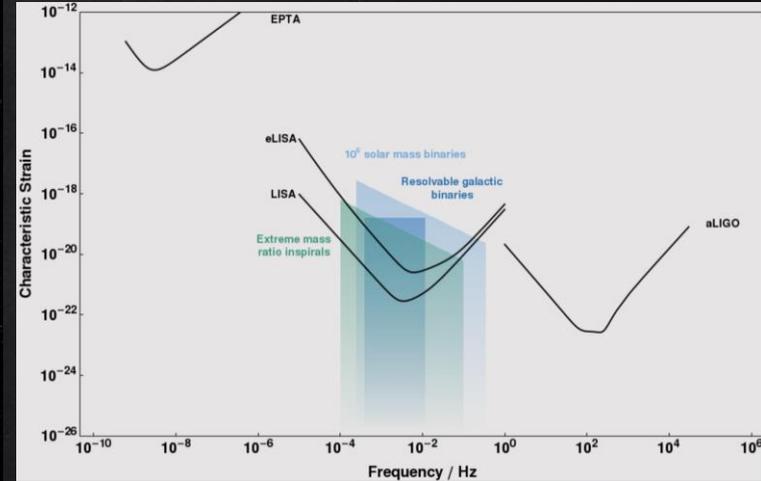
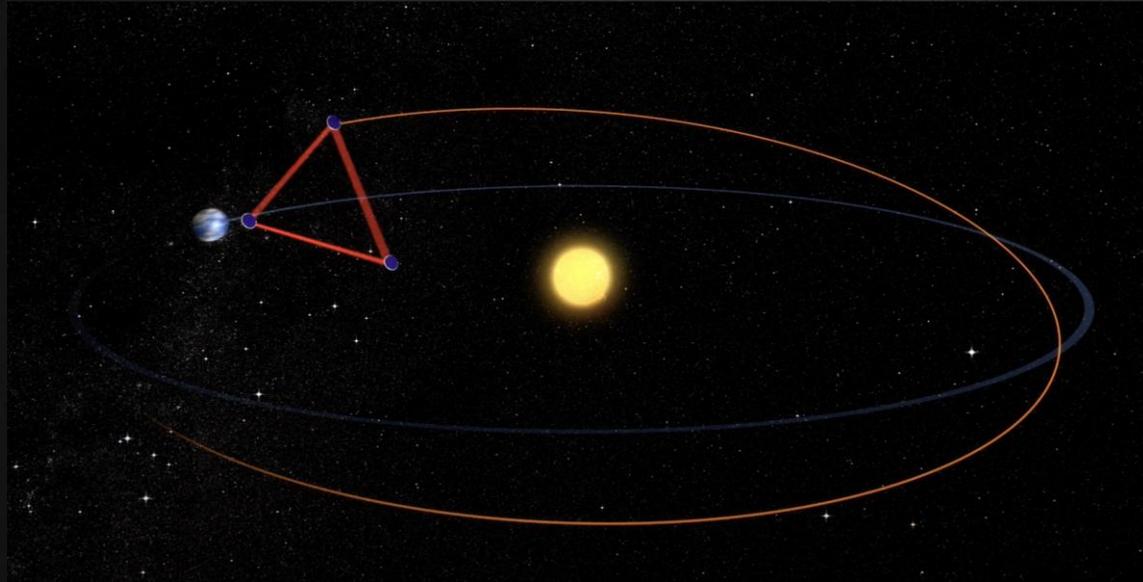
<http://www.et-gw.eu>



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

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

LISA: LASER INTERFEROMETER SPACE ANTENNA (ESA)

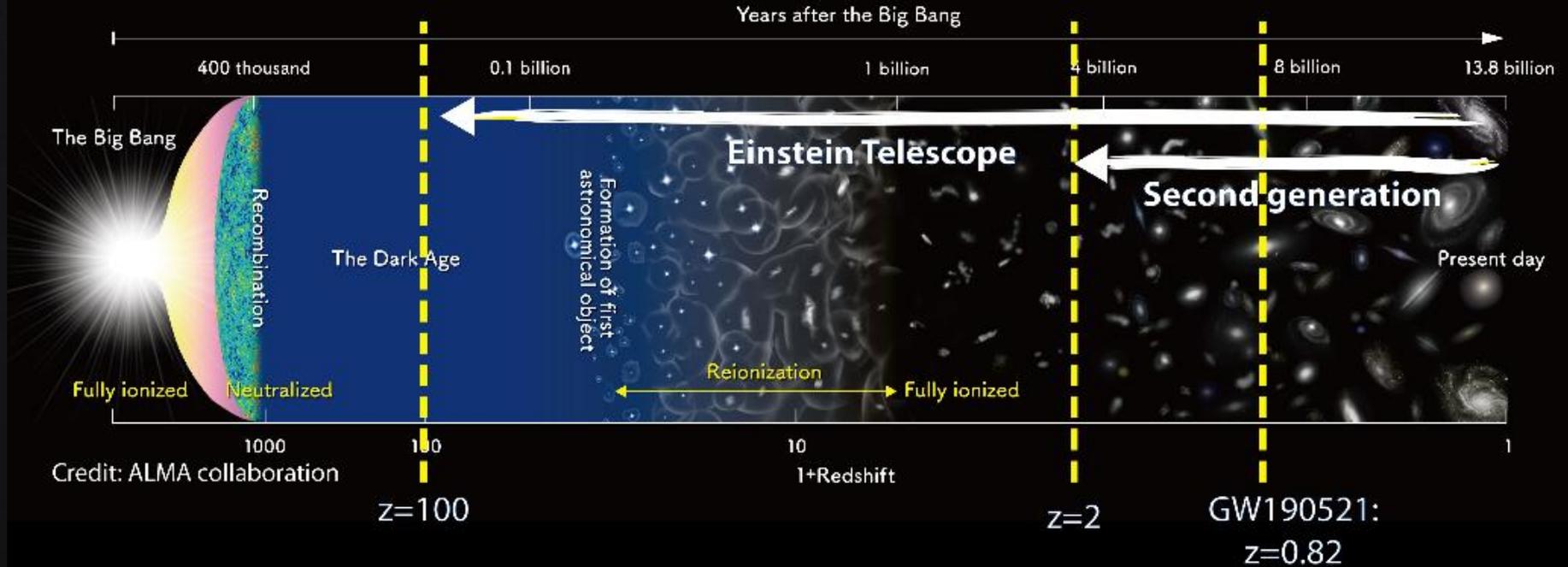


LISA: 3 naves espaciales cilíndricas (1.8 m x 0.48 m), orbitando a 5 millones de km entre sí, formando un triángulo equilátero, situadas en la órbita terrestre a 50 millones de km detrás de la Tierra.



ET PERMITIRÁ EXPLORAR EL UNIVERSO TEMPRANO

Horizonte de detección para agujeros negros binarios



Con el Einstein Telescope seremos capaces de profundizar en los **tiempos oscuros** y hacer **cosmología** con ondas gravitacionales.

CONCLUSIONES

X Física fundamental y tests de RG:

- Naturaleza de la gravedad y objetos compactos
- Agujeros negros y naturaleza de la materia oscura

X Astrofísica de objetos compactos:

- Agujeros negros binarios
- Estrellas de neutrones y Supernovas
- Astrofísica de multi-mensajeros

X Cosmología:

- Fondos estocásticos
- Parámetros cosmológicos



Fin

pablo.garcia@ciemat.es

