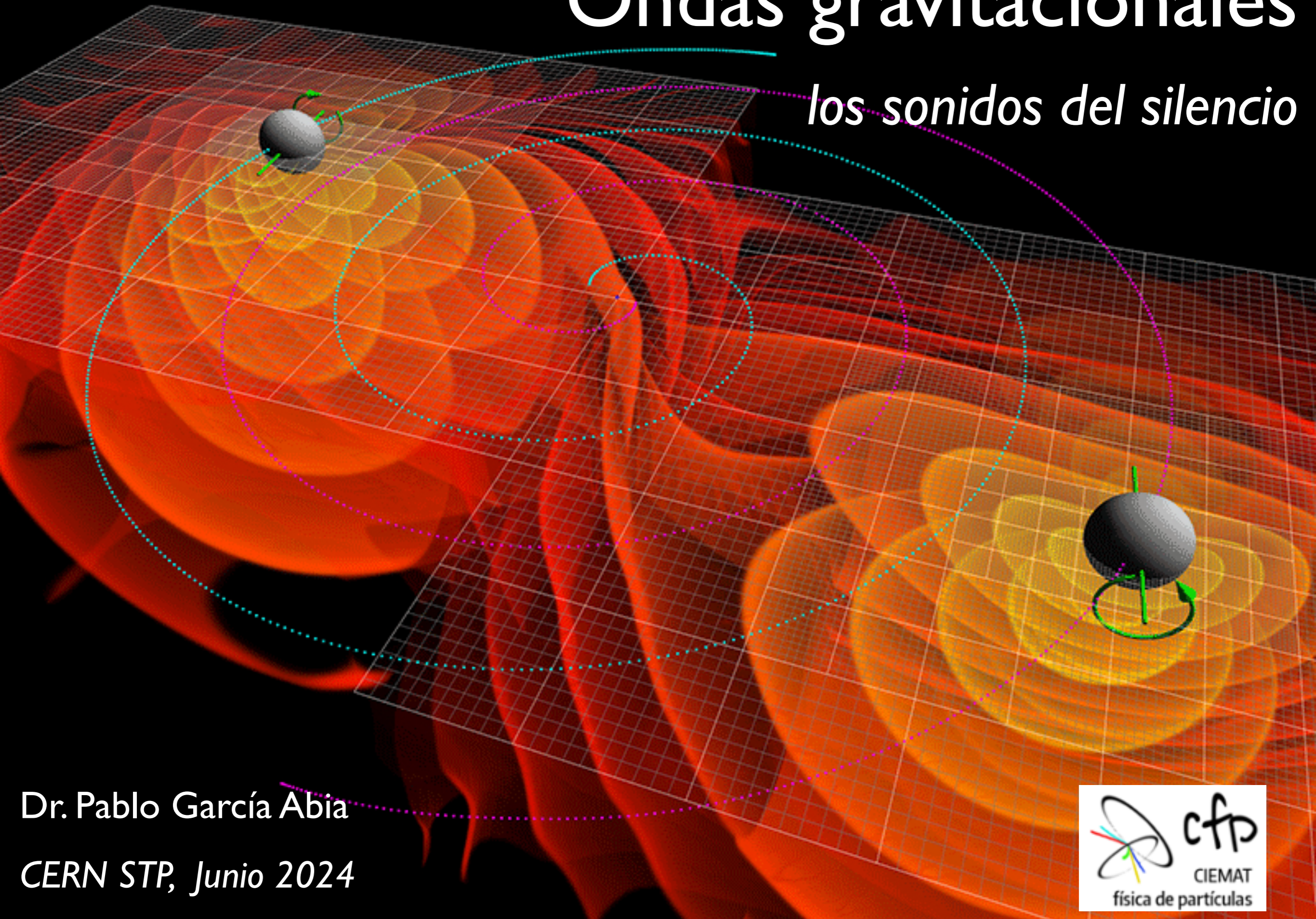


Ondas gravitacionales

los sonidos del silencio



Dr. Pablo García Abia

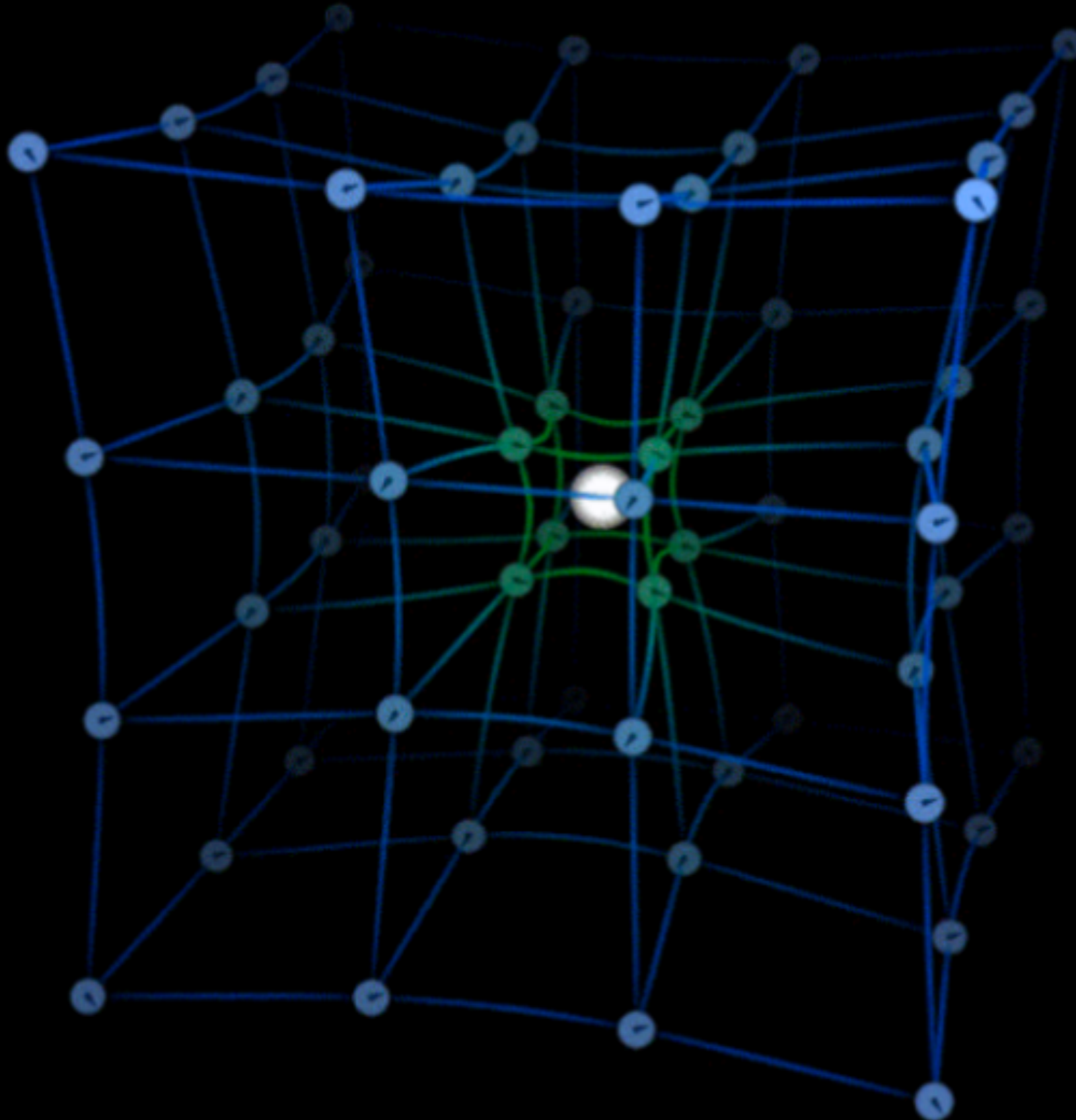
CERN STP, Junio 2024



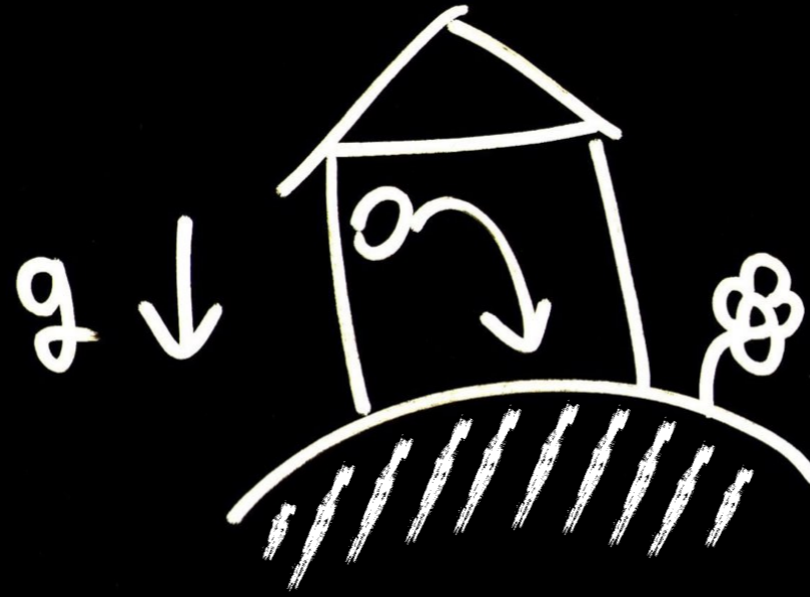


1ª imagen de campo profundo del JWST: SMACS J0723.3–7327 (Volans), 2022

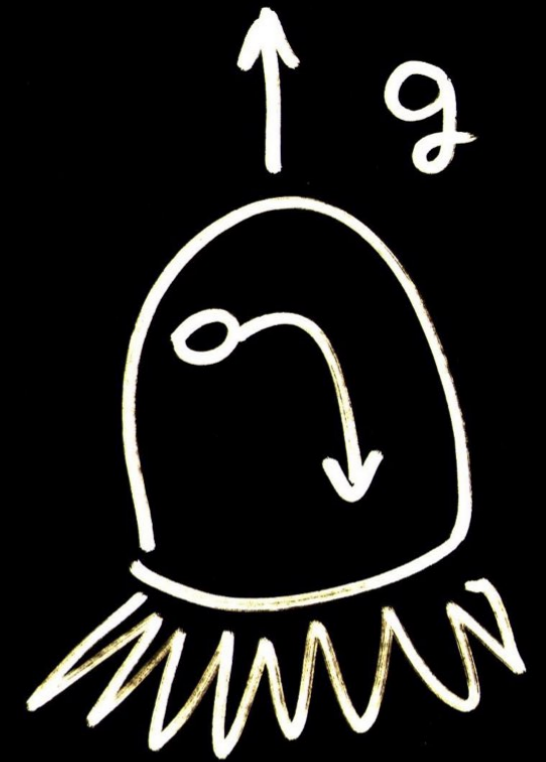
Evolución del Universo: espacio y tiempo



RG



$T_{\mu\nu}$



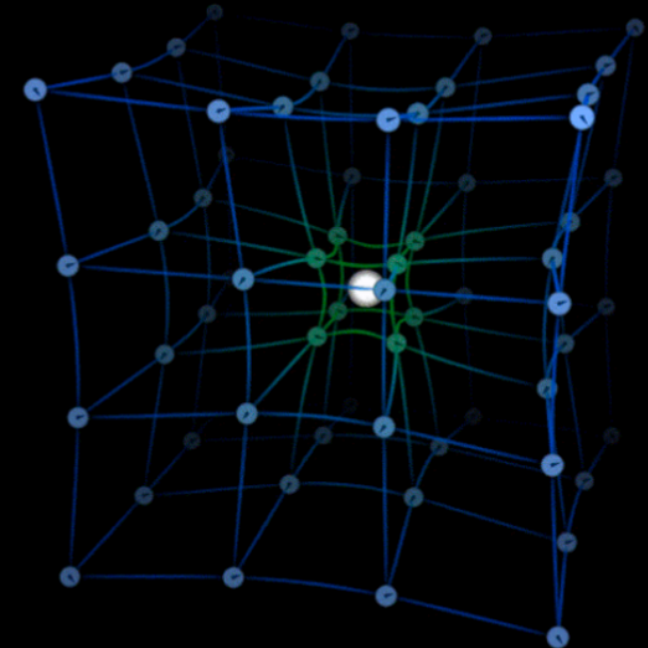
$G_{\mu\nu}$

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

10^{-43}



Predicción de la RG:
obligatoriamente el Universo se **expande** o se **contrae**,
dependiendo de la cantidad de
materia y energía que contiene.

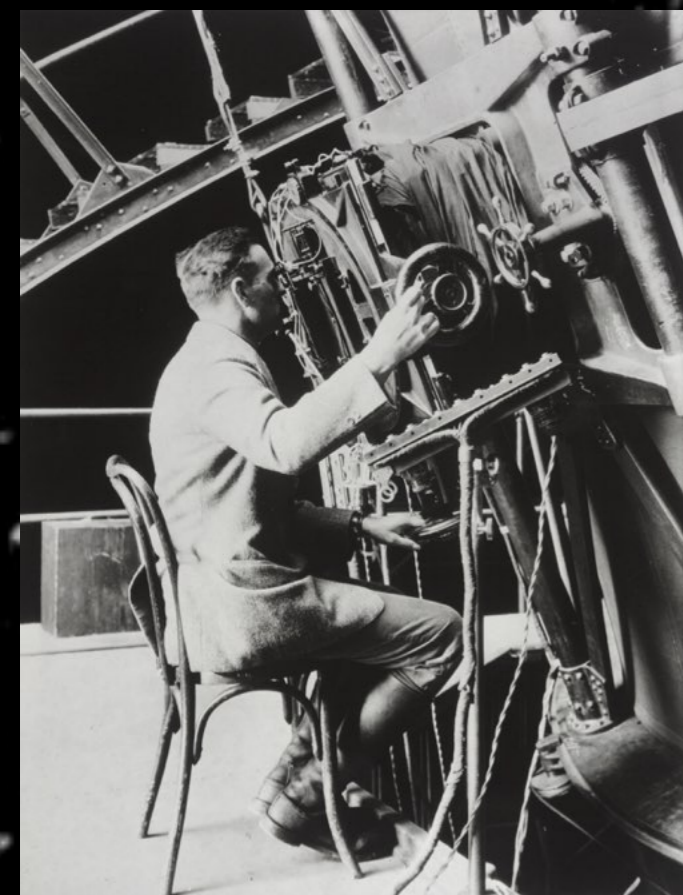
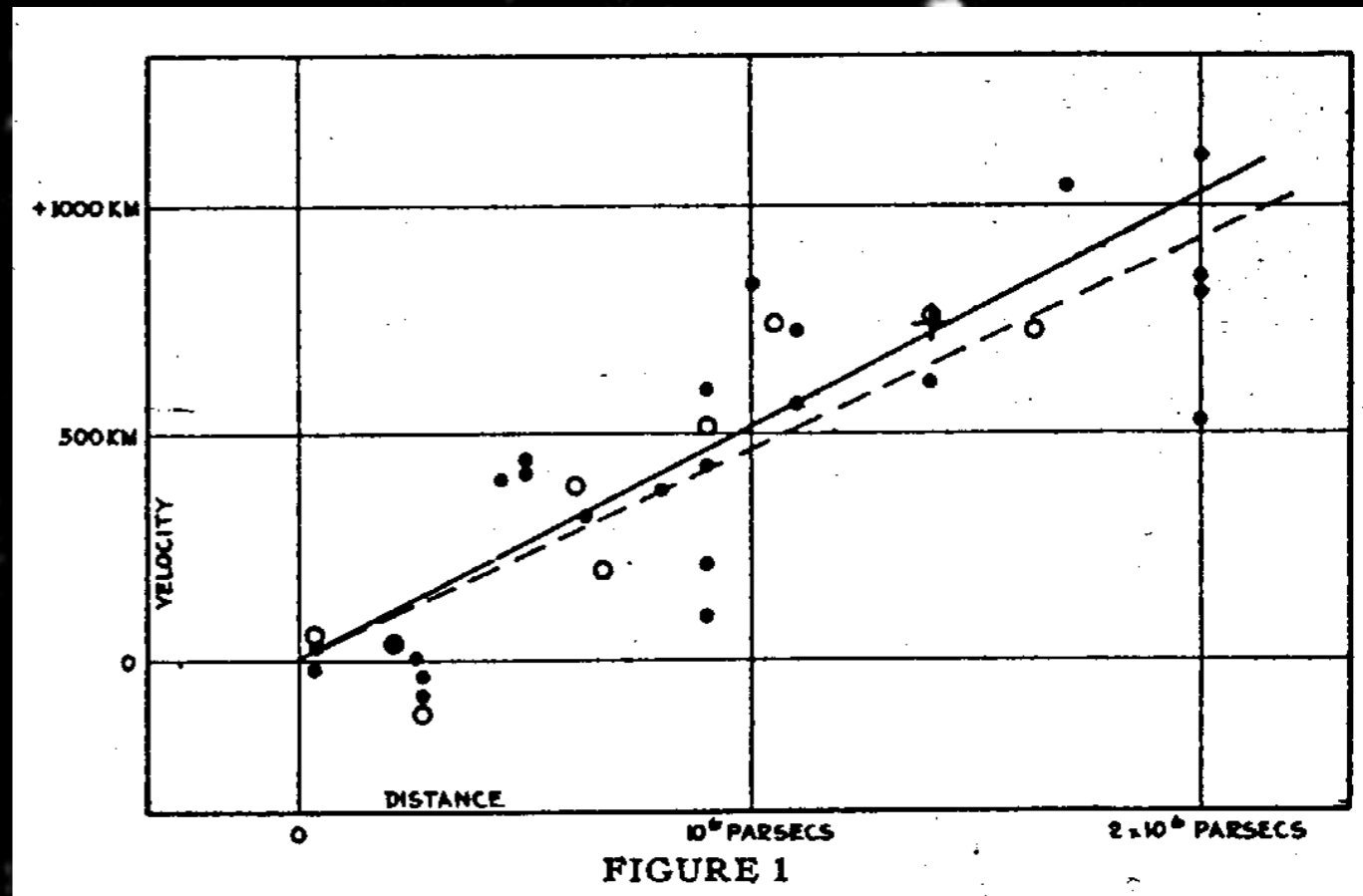


1929: el universo se expande



Lemaître
Slipher
Hubble

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

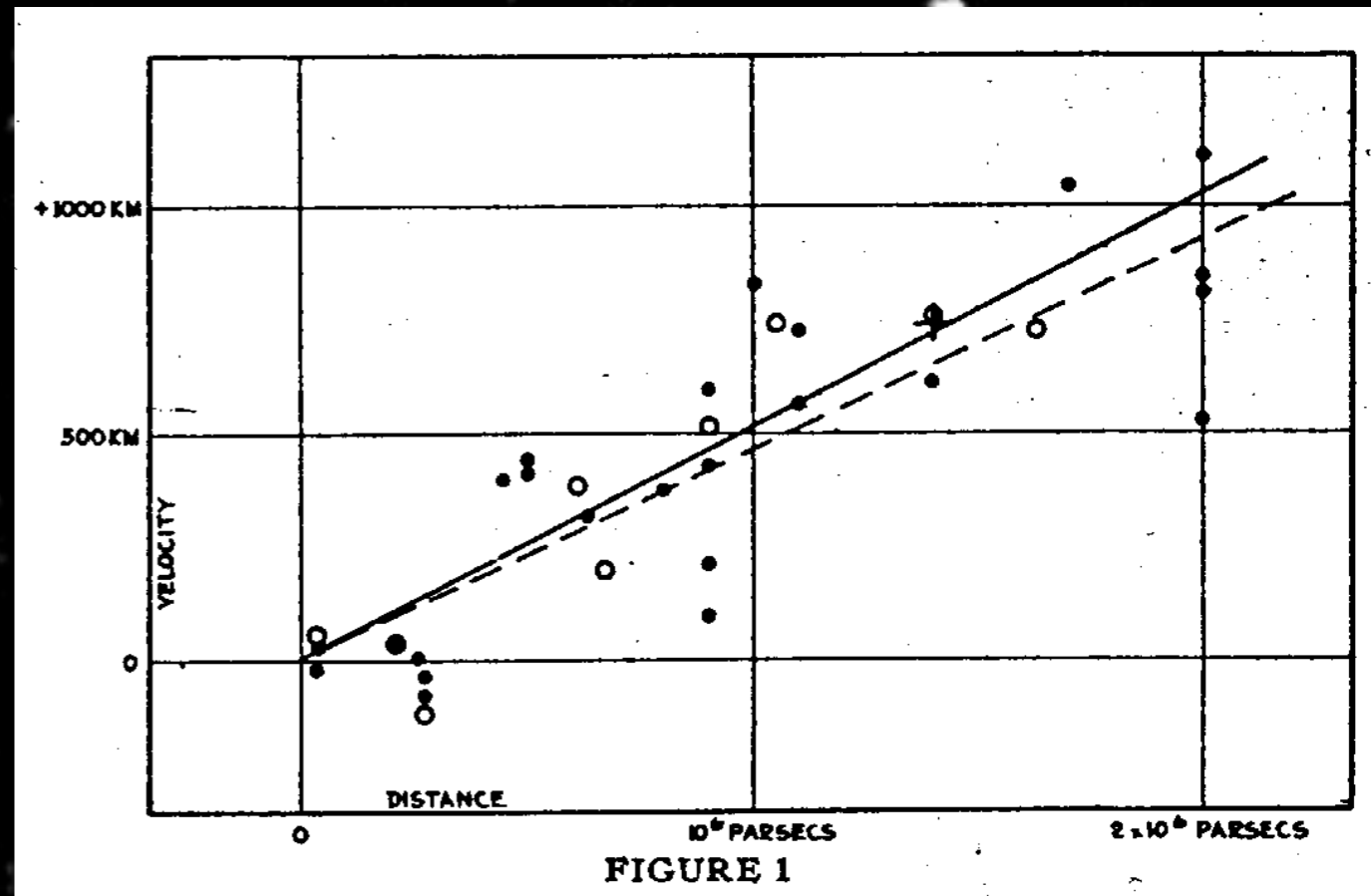


1929: el universo se expande

RG


Lemaître
Slipher
Hubble

Parámetro de Hubble
 $1/H_0 \approx 1.4 \times 10^{10}$ años



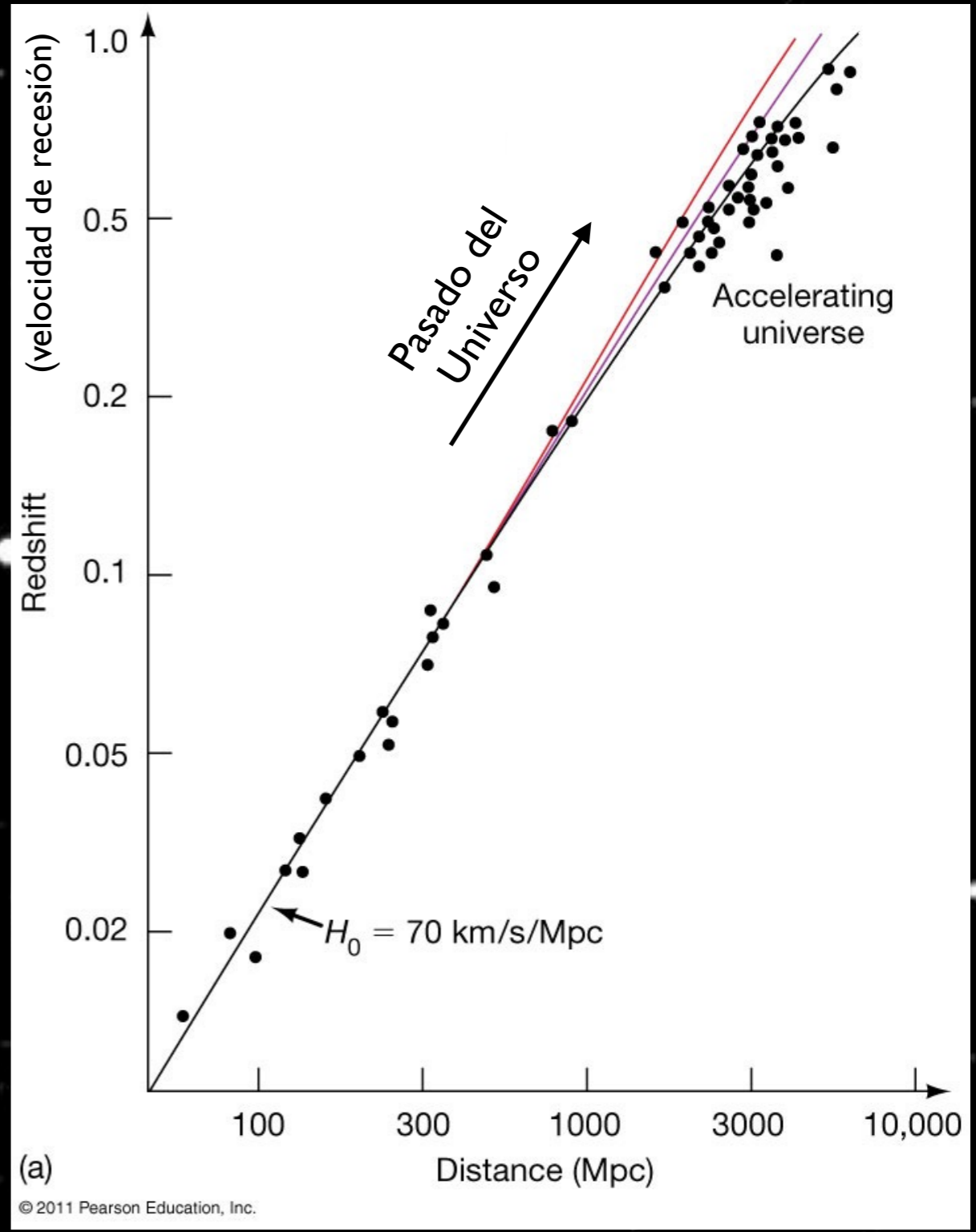
1929: el universo se expande

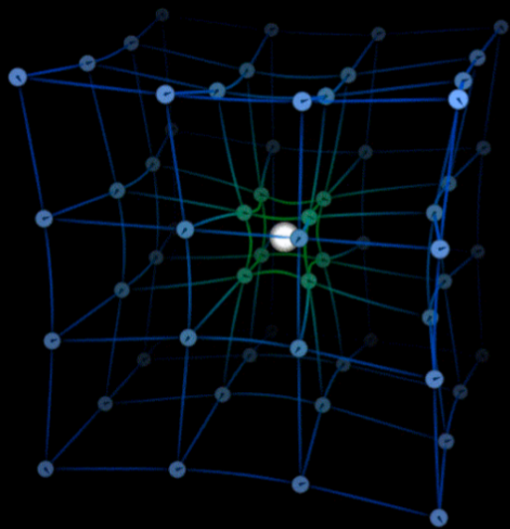
1998: la expansión del universo es acelerada

2011: Perlmutter, Schmidt, Riess

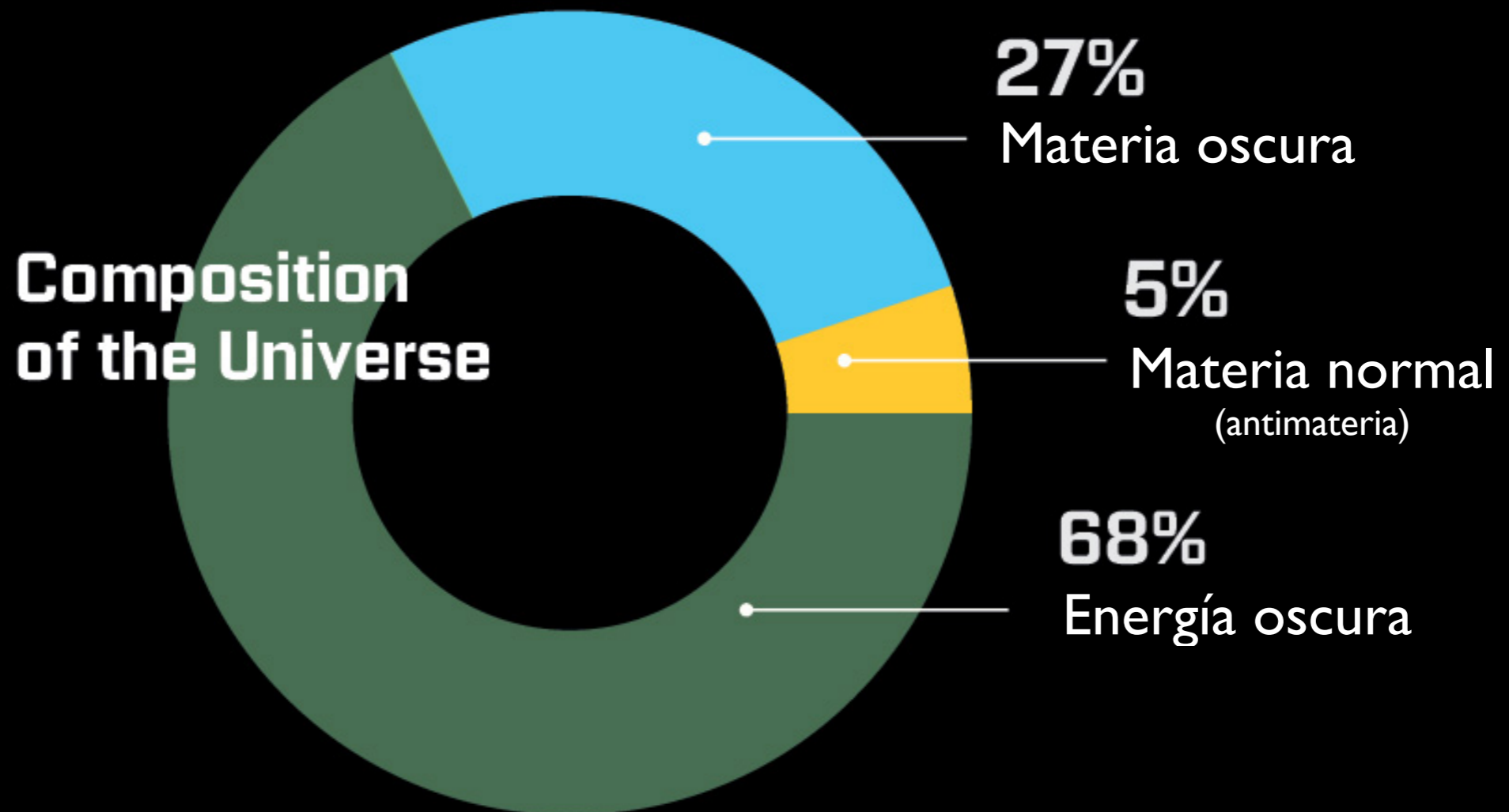


Lemaître
Slipher
Hubble





Cuando interpretamos este ritmo de expansión (H_0) en la RG obtenemos la cantidad de **materia** y **energía** del Universo.



El **95%** del contenido del universo es de **naturaleza desconocida**.

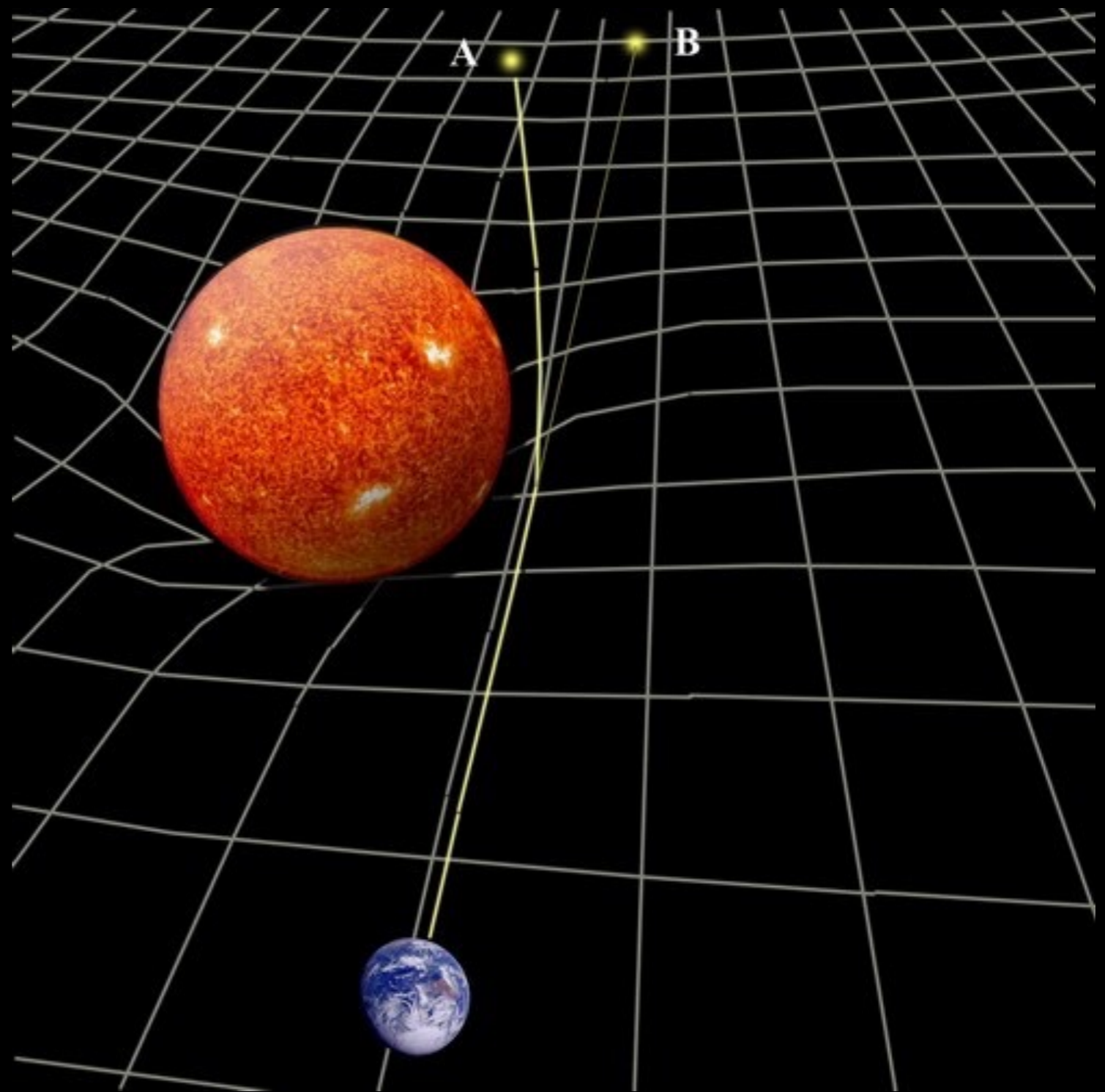
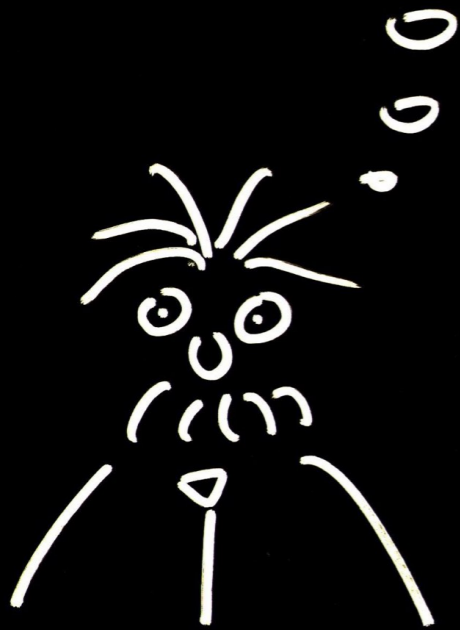
Energía y materia oscuras: dos de los principales retos de la física fundamental.

RG



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

10^{-43}



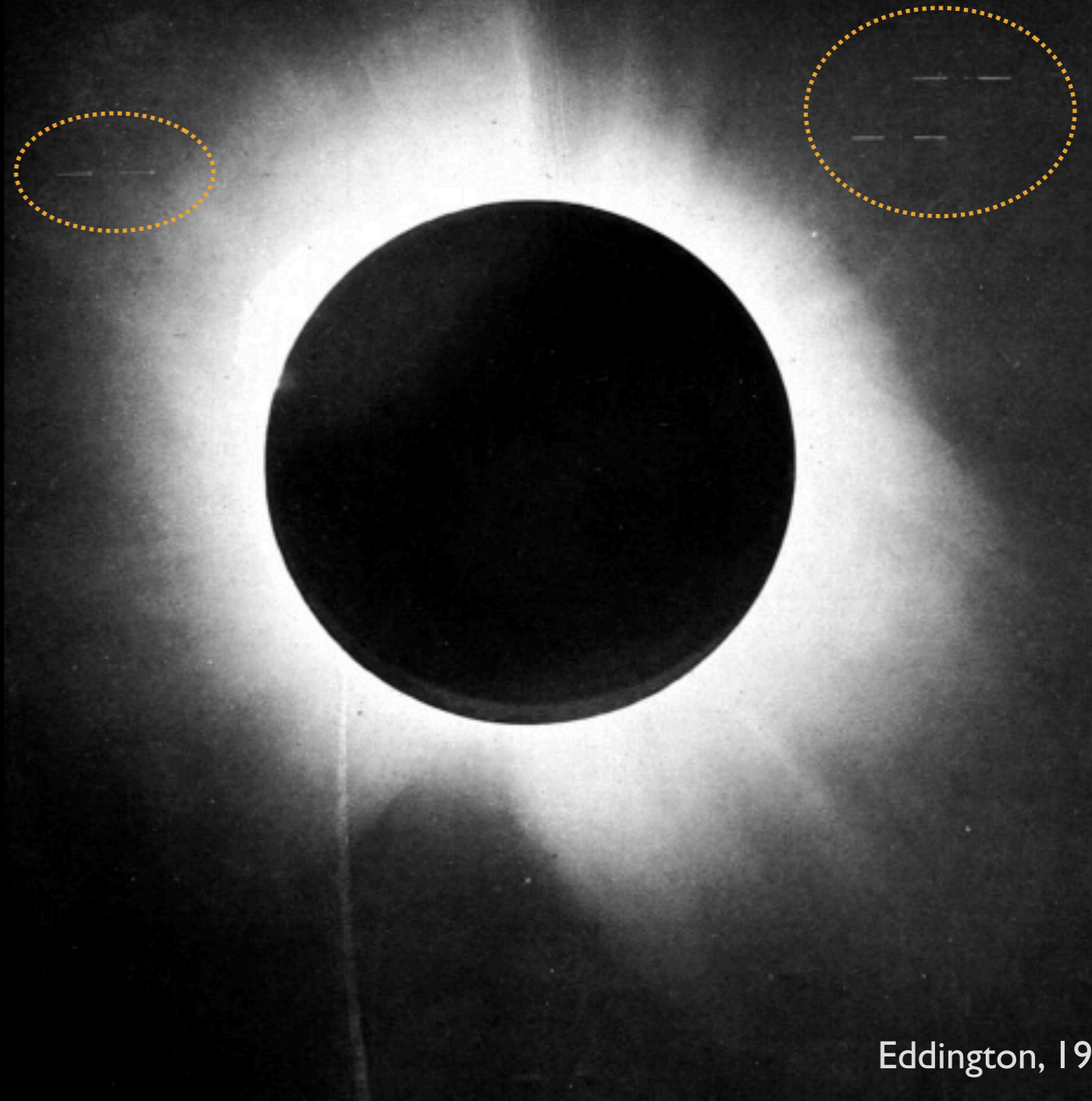
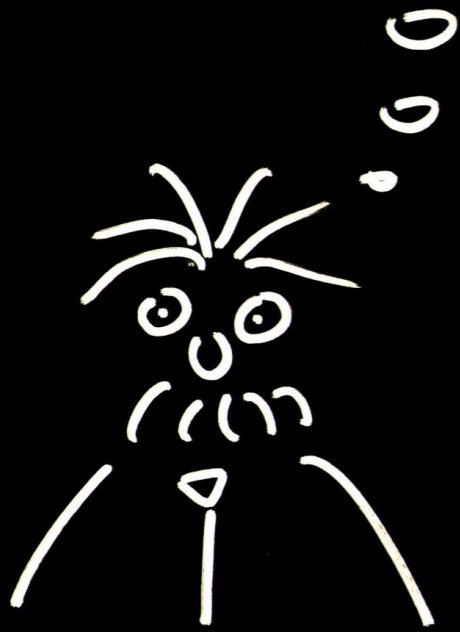
La trayectoria de la luz en un espacio curvo **no es rectilínea** (geodésicas).

RG



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

10^{-43}



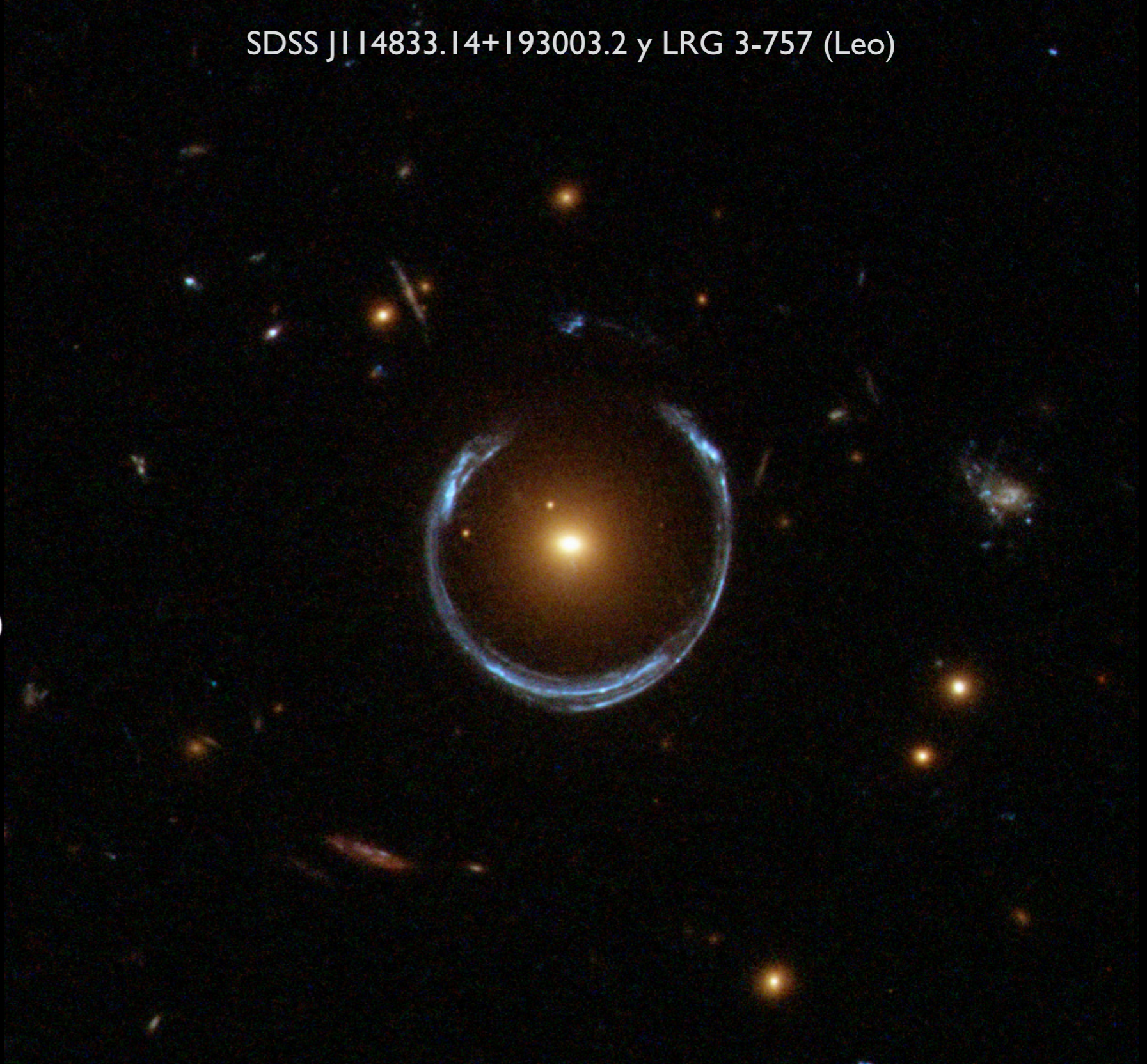
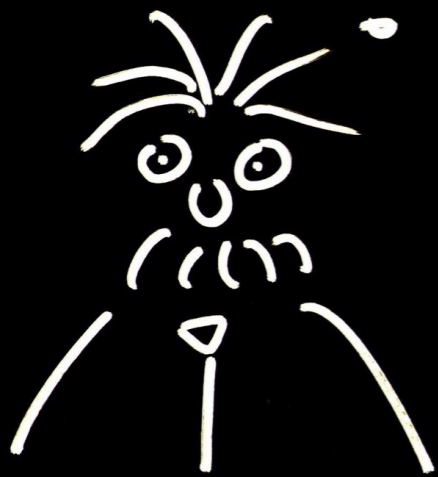
La trayectoria de la luz en un espacio curvo **no es rectilínea (geodésicas)**.

RG



$$G_{\text{super}} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\text{super}}$$

10^{-43}



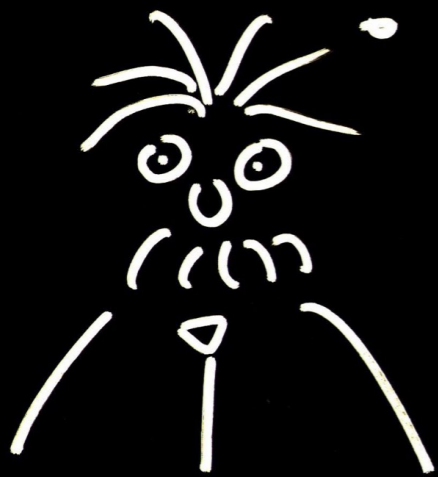
Las **lentes gravitacionales** evidencian la **curvatura del espacio-tiempo** en las proximidades de objetos súper masivos.

RG



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

10^{-43}



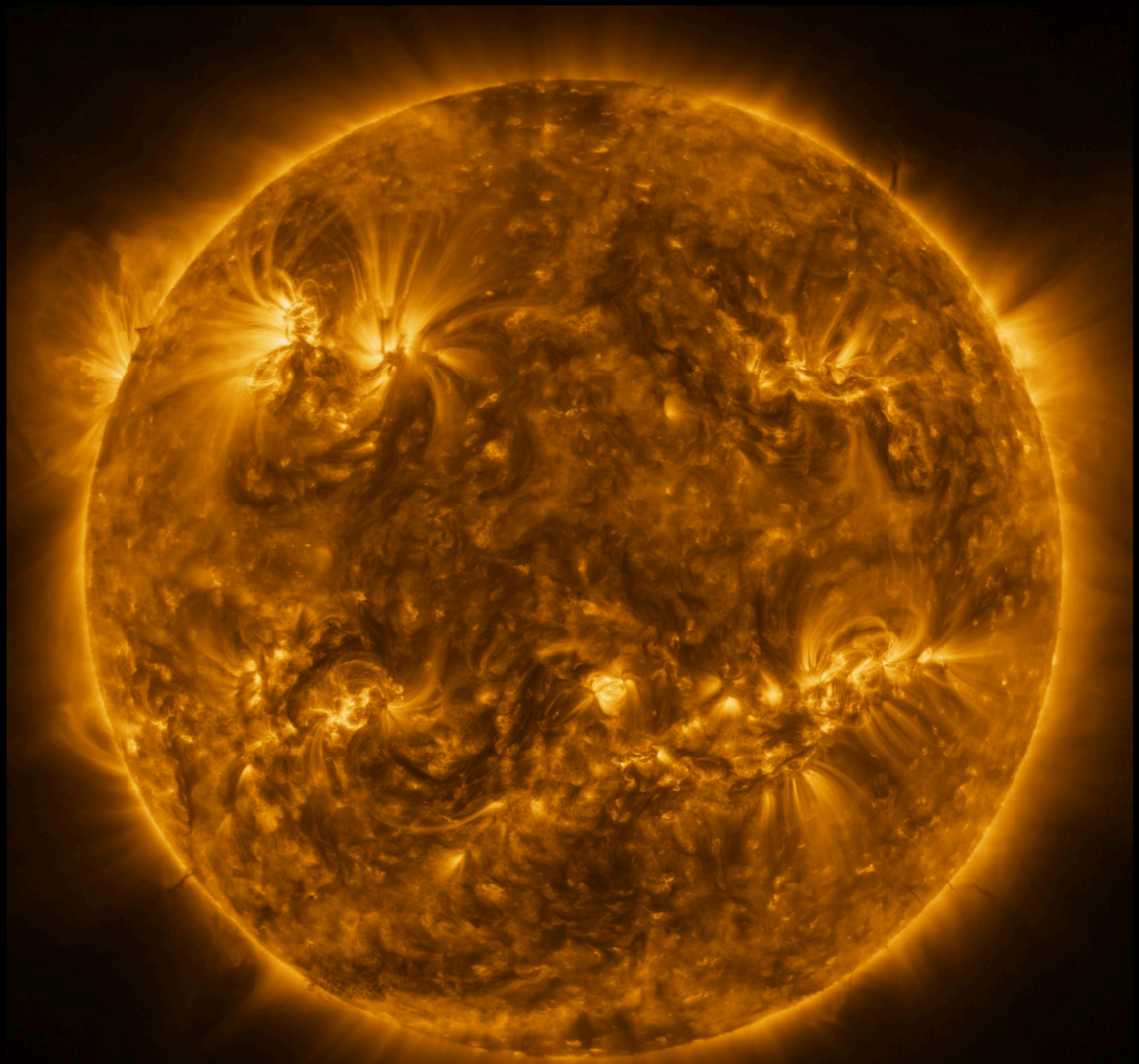
Las **lentes gravitacionales** evidencian la **curvatura del espacio-tiempo** en las proximidades de objetos súper masivos.

¿Qué son los agujeros negros?

Un **agujero negro** (RG) es una **región del espacio-tiempo** en la que la gravedad es tan fuerte que nada, ni siquiera la luz, tiene energía suficiente para escapar de él. Pueden ser de origen **estelar** (supernovas) o **cosmológico** (primordiales, PBH).

Los **agujeros negros estelares** se producen por colapso gravitacional de estrellas masivas.

Masa entre **5** y **100** M_{\odot} .

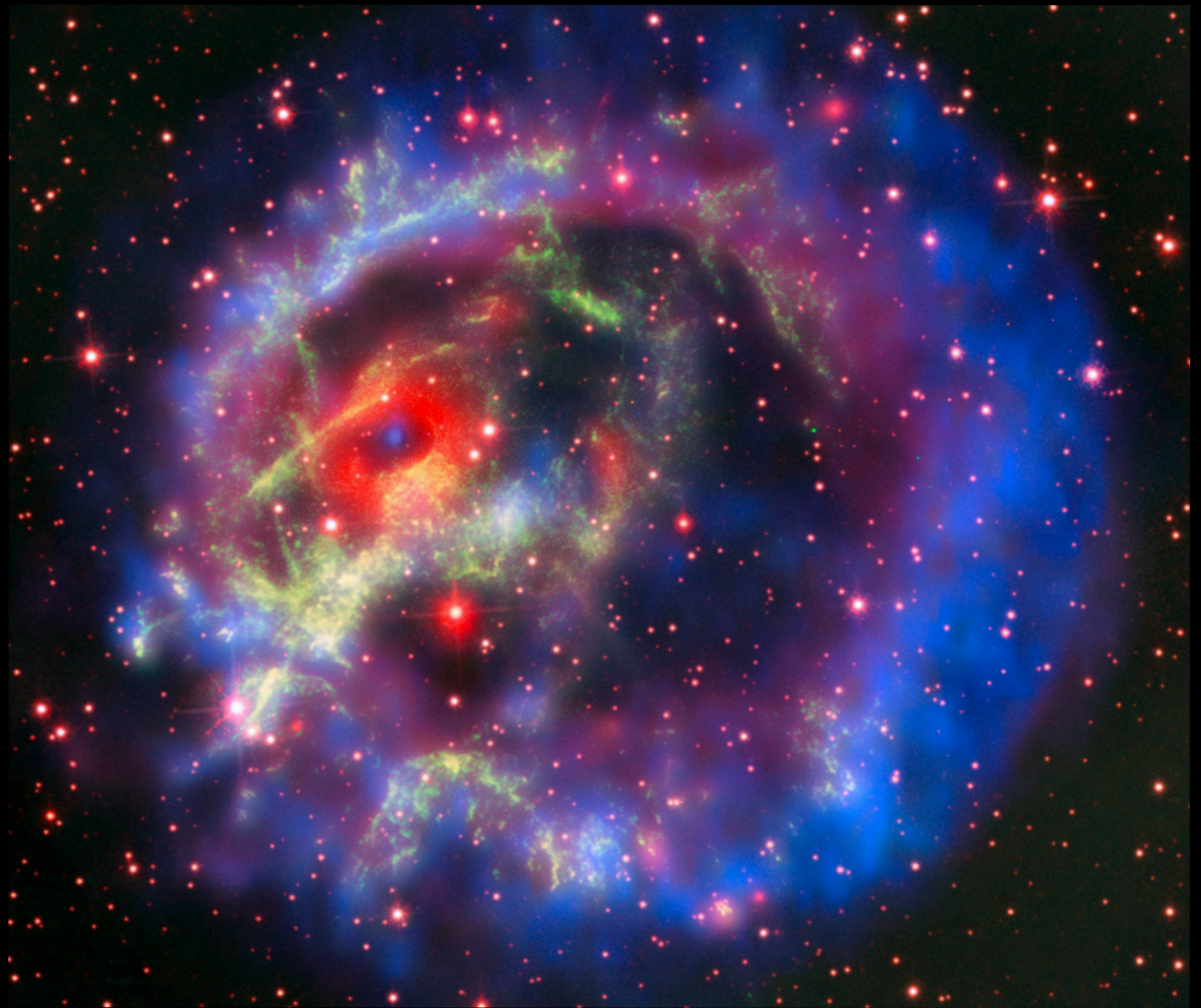


¿Qué son los agujeros negros?

Un **agujero negro** (RG) es una **región del espacio-tiempo** en la que la gravedad es tan fuerte que nada, ni siquiera la luz, tiene energía suficiente para escapar de él. Pueden ser de origen **estelar** (supernovas) o **cosmológico** (primordiales, PBH).

Los **agujeros negros estelares** se producen por colapso gravitacional de estrellas masivas.

Masa entre **5** y **100** M_{\odot} .



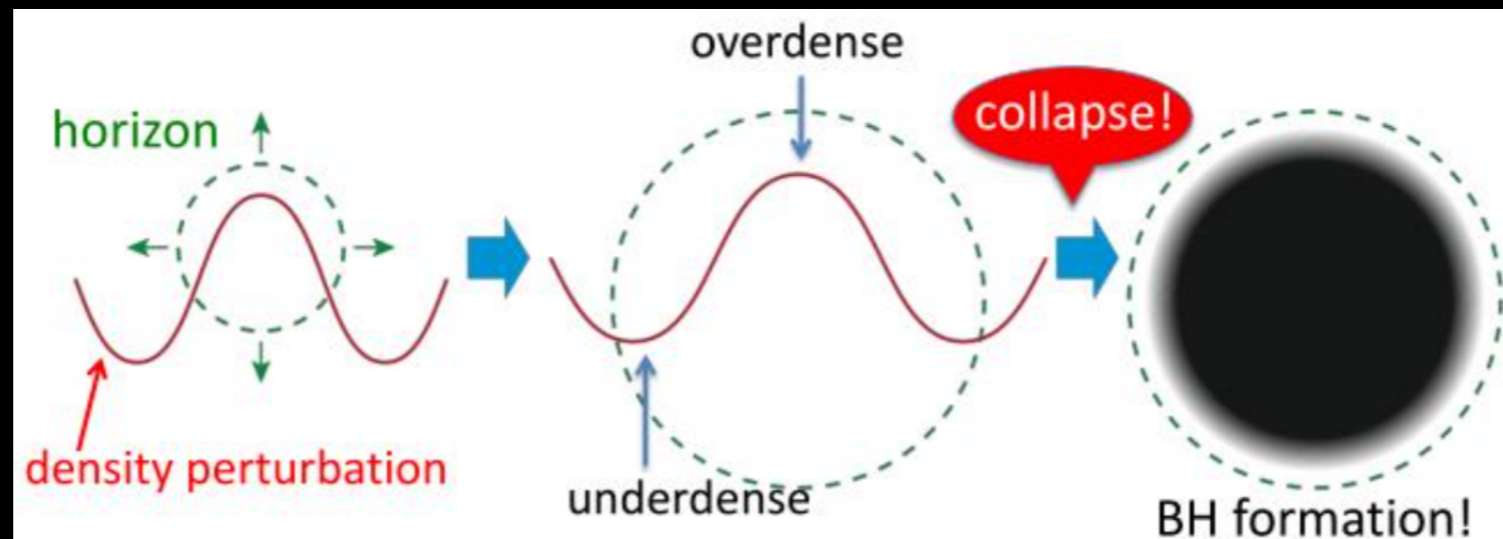
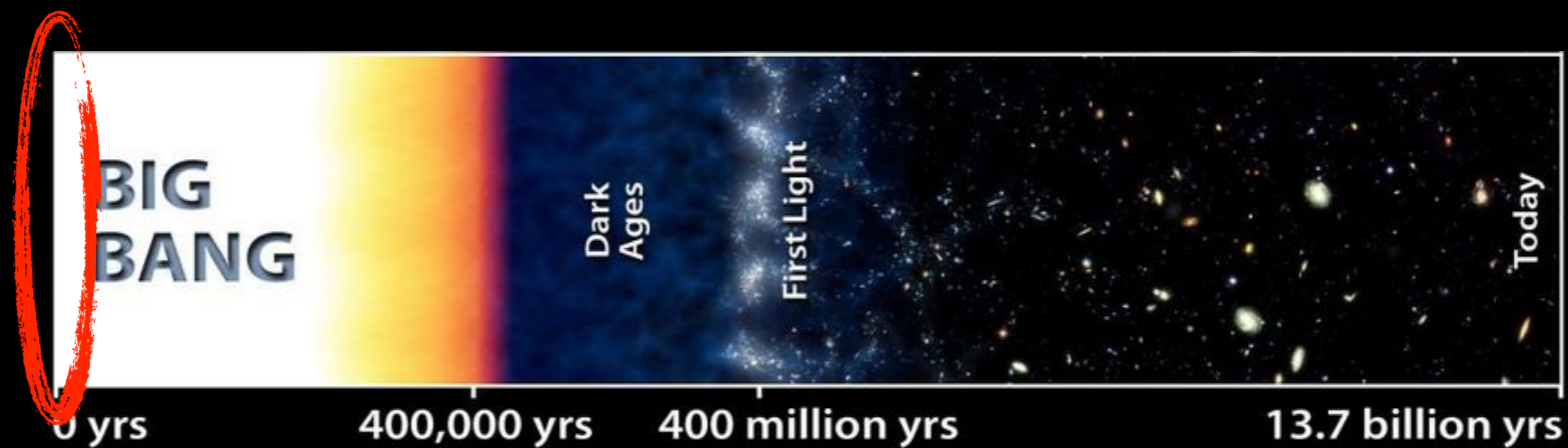
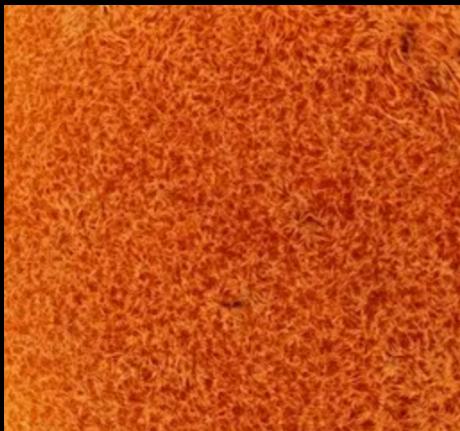
SN I E 0102.2-7219 (SMC)

¿Qué son los agujeros negros primordiales?

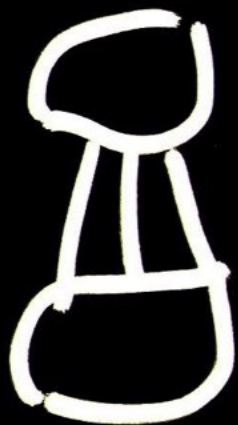
Los **agujeros negros primordiales** (**hipotéticos**) son de origen cosmológico (previos a las primeras estrellas).

Se pudieron formar en grandes cantidades en los orígenes del Universo ($t < 1\text{ s}$) a partir de fluctuaciones de energía de la **sopa primordial**, en un amplio rango de masas.

Si existen, podrían ser la **materia oscura del Universo** (toda o parte).

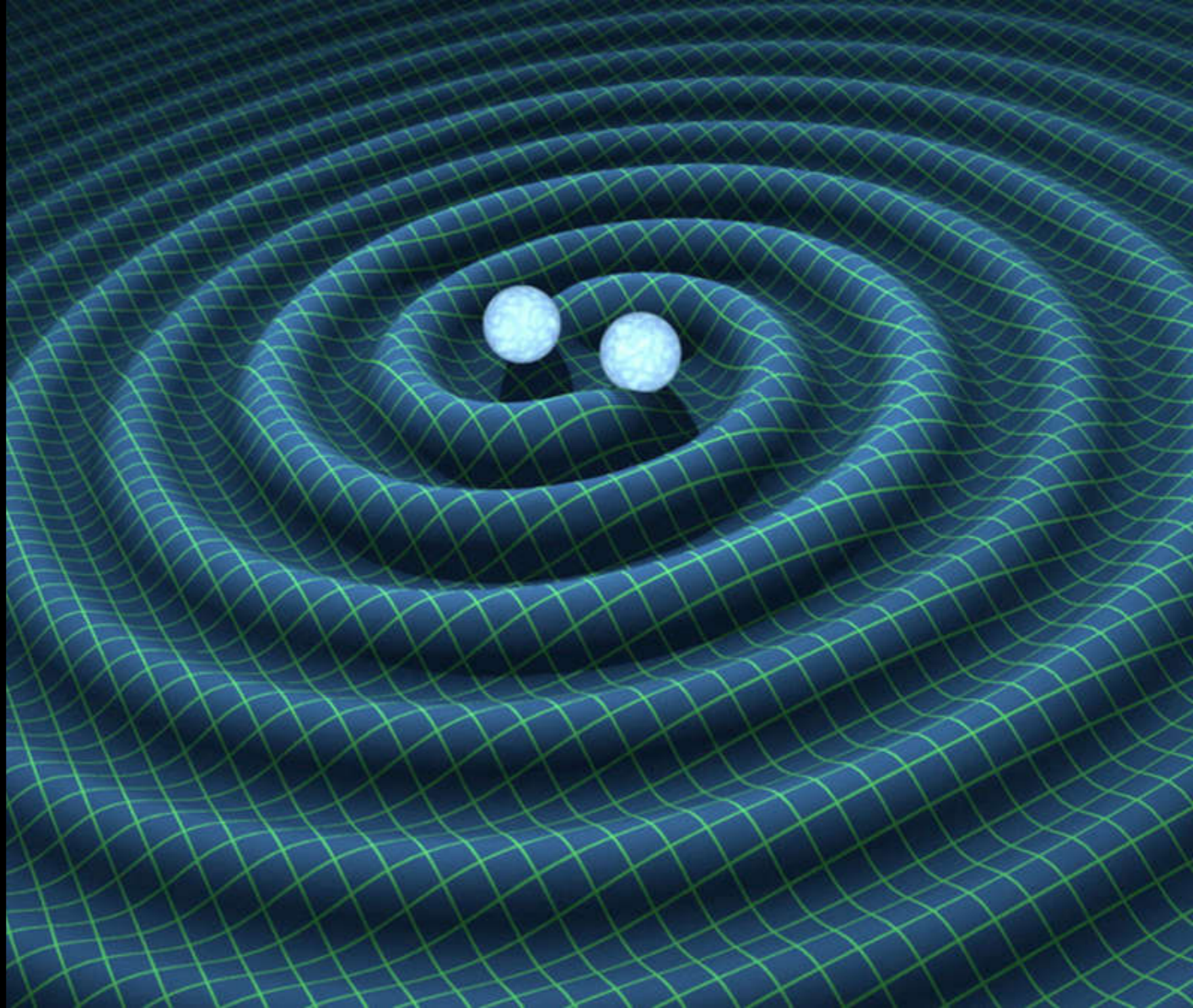
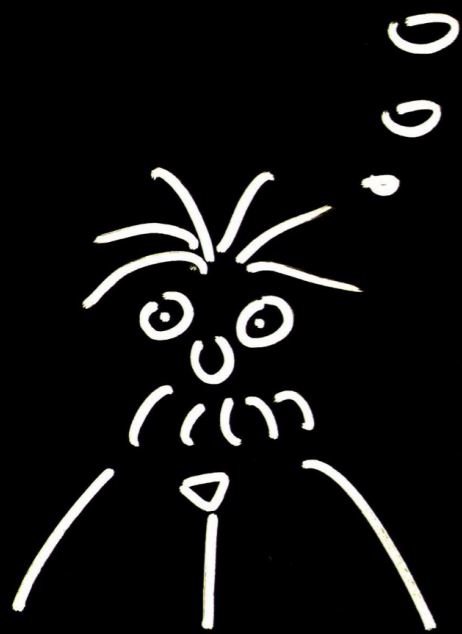


RG



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

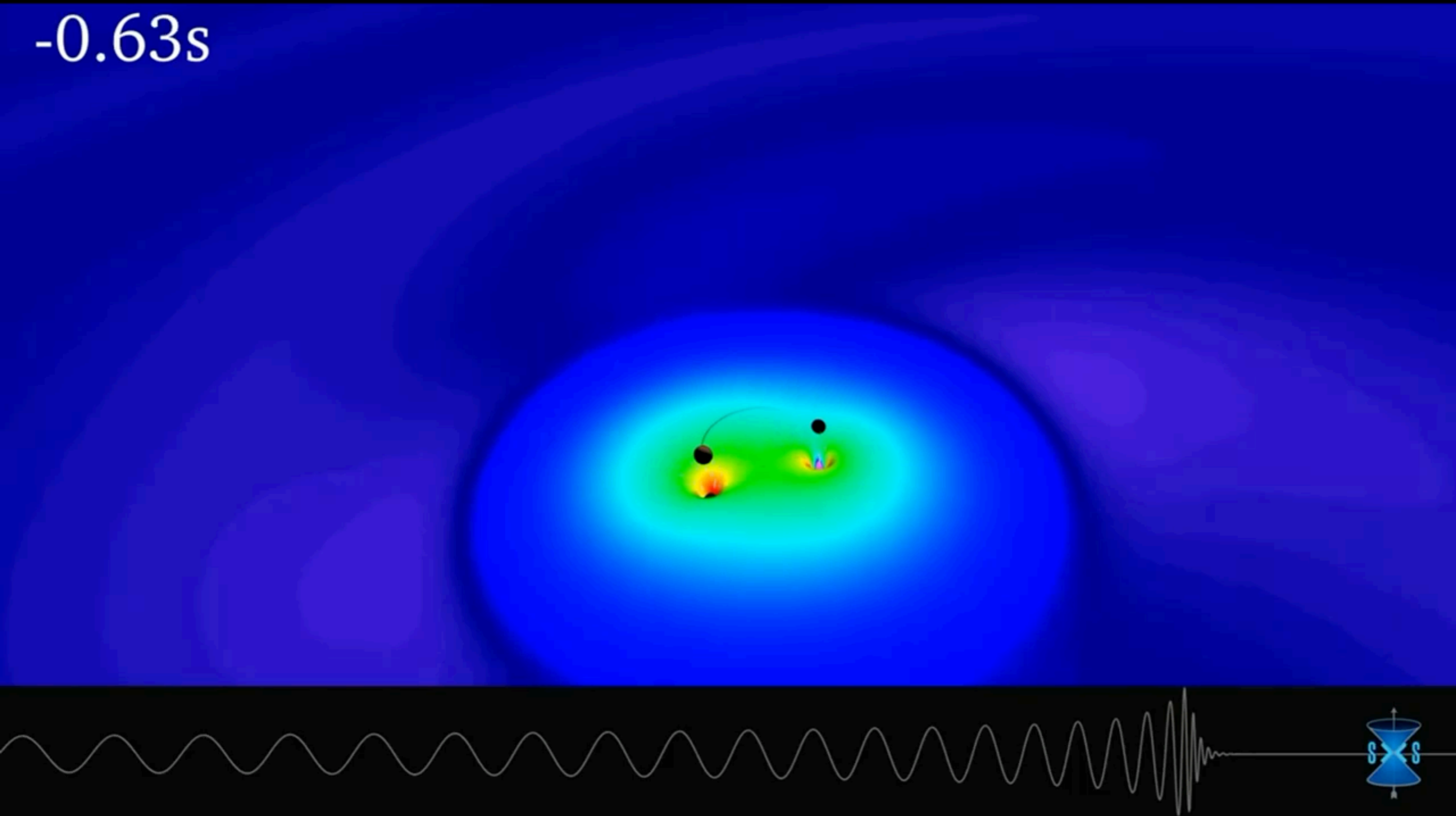
10^{-43}



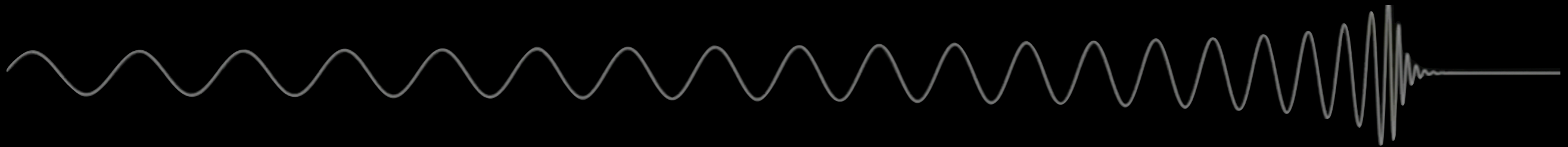
La RG predice la deformación dinámica del espacio-tiempo: **ondas gravitacionales**

Emisión de ondas gravitacionales en la fusión de dos agujeros negros

-0.63s

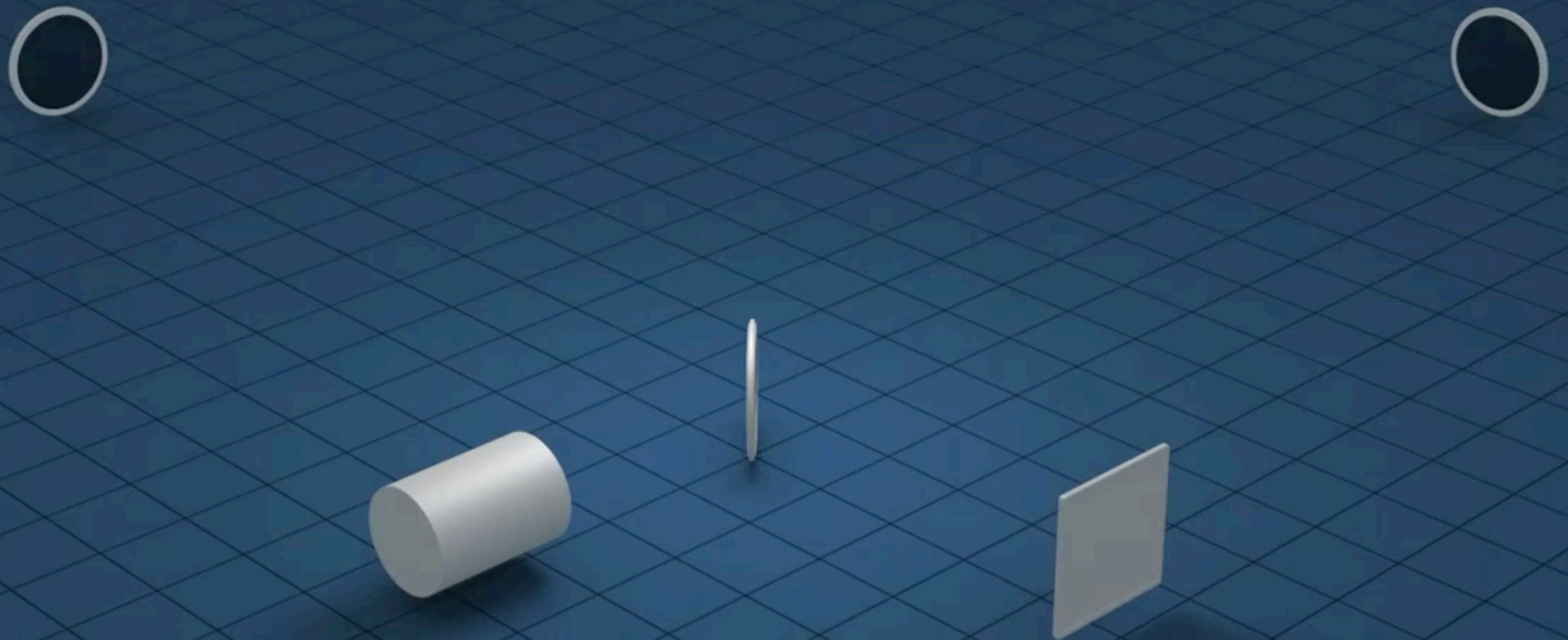


Emisión de ondas gravitacionales en la fusión de dos agujeros negros

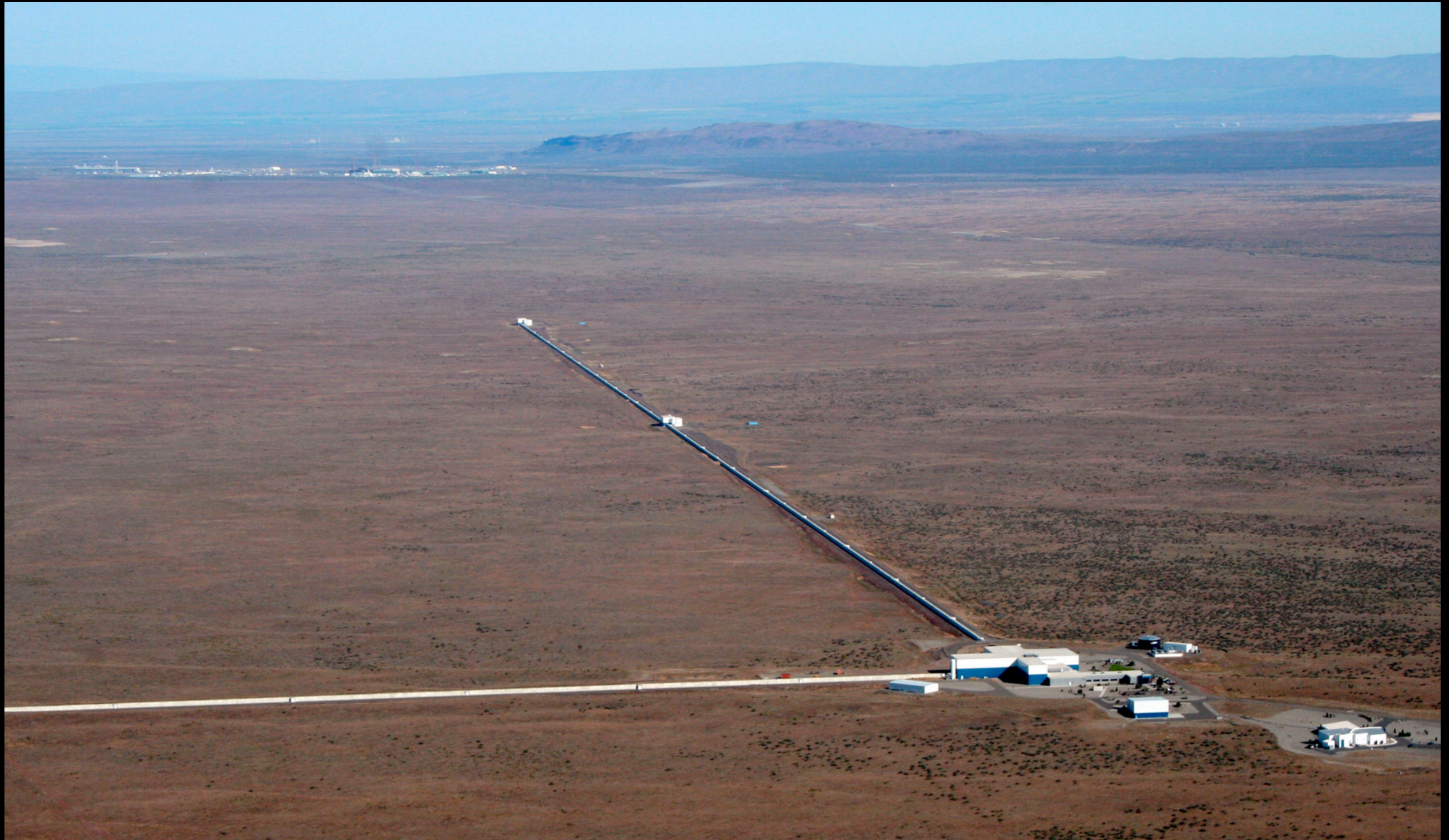


La evolución temporal de la amplitud y la frecuencia de la onda gravitacional nos dan información sobre las masas de los agujeros negros y la distancia.

Detección de ondas gravitacionales: interferómetro láser

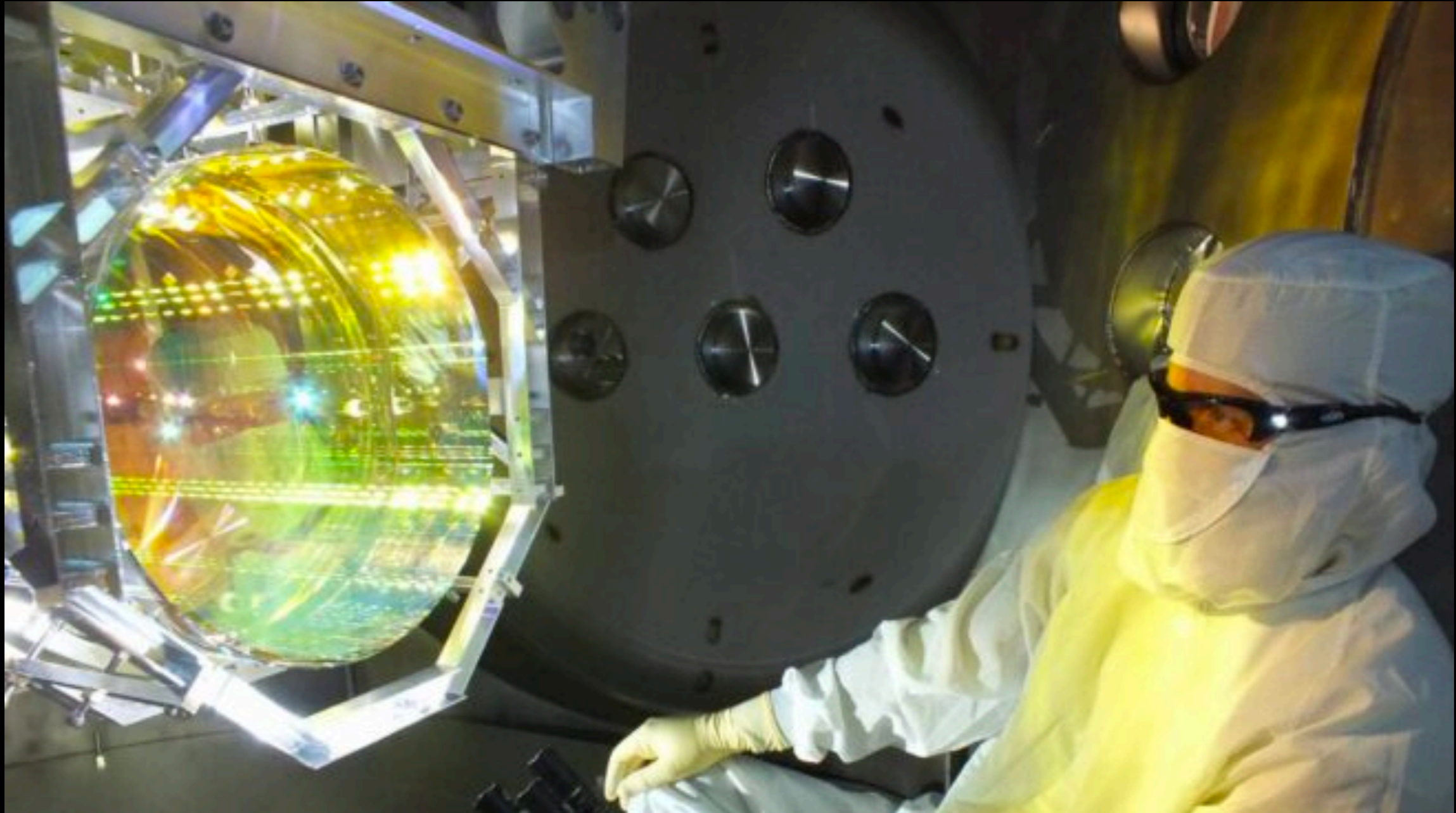


LIGO: 2 detectores en EEUU



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

LIGO: 2 detectores en EEUU



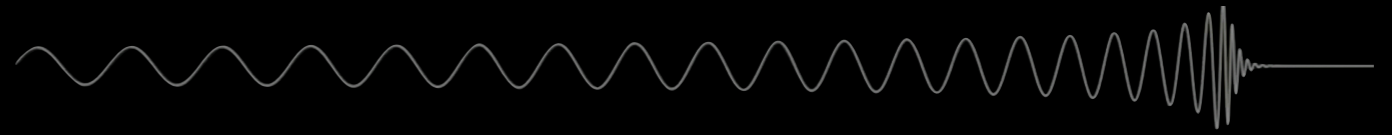
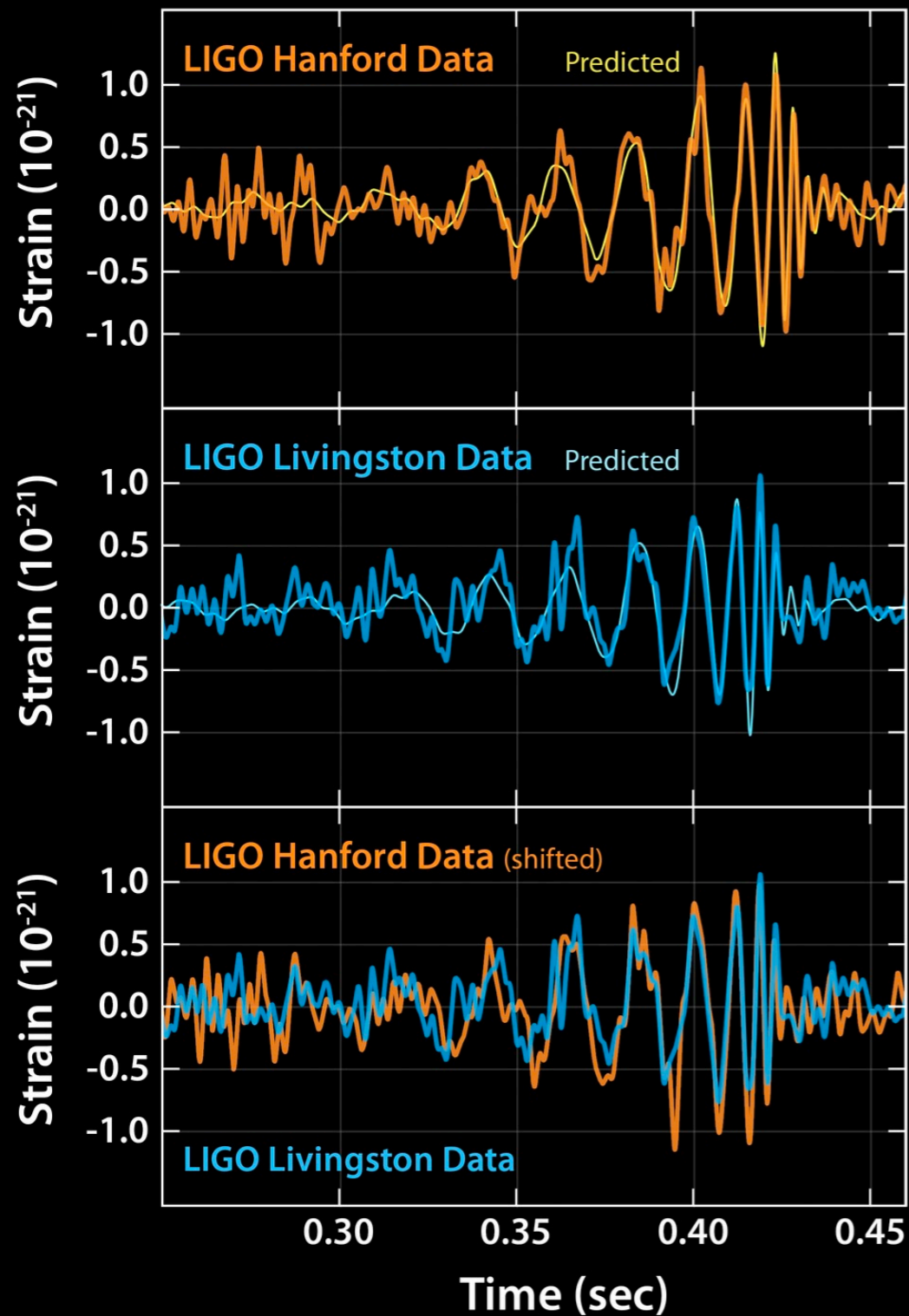
Uno de los espejos de LIGO

Virgo: detector en EGO (Pisa)



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

GW150914: la primera detección



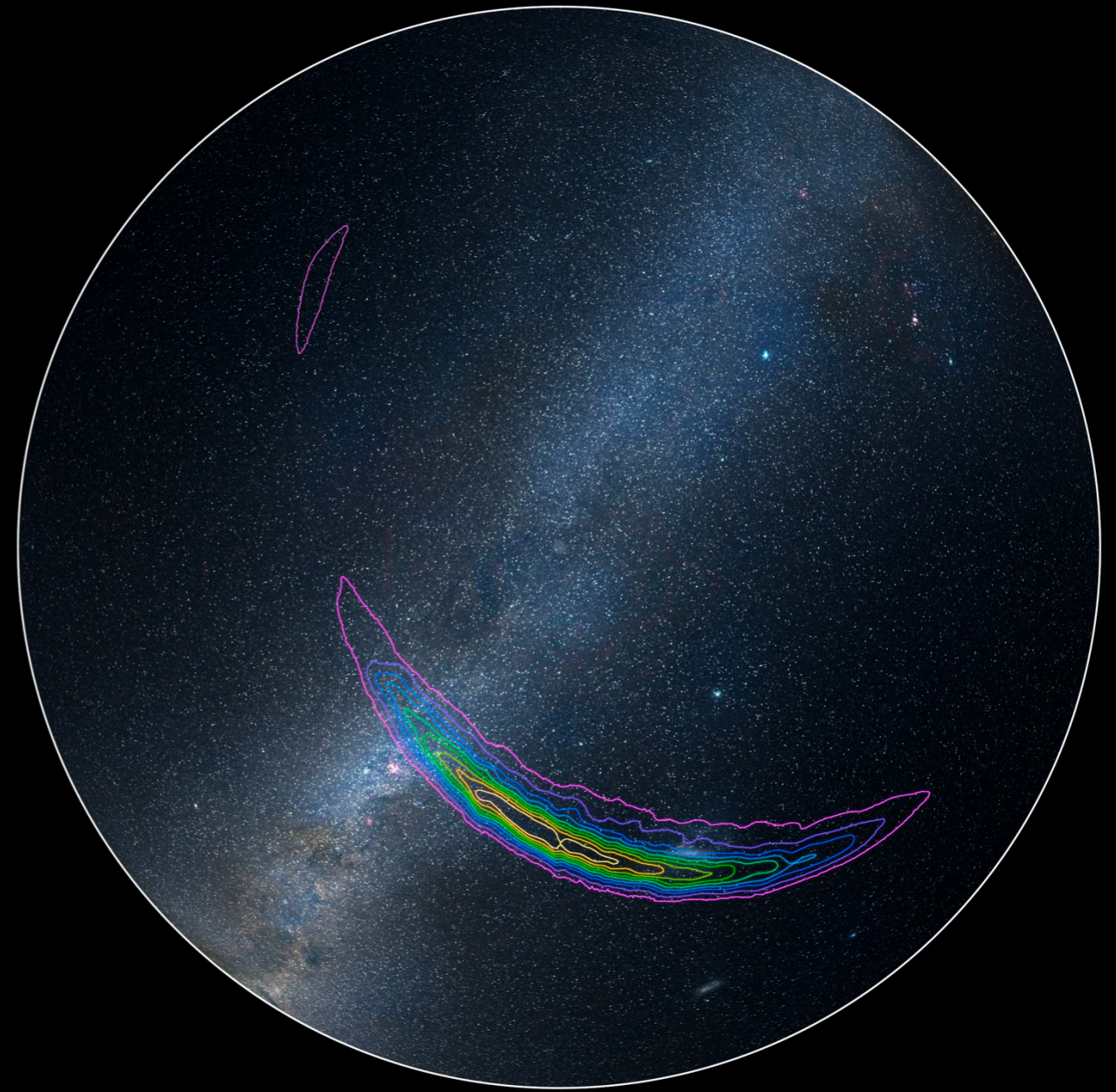
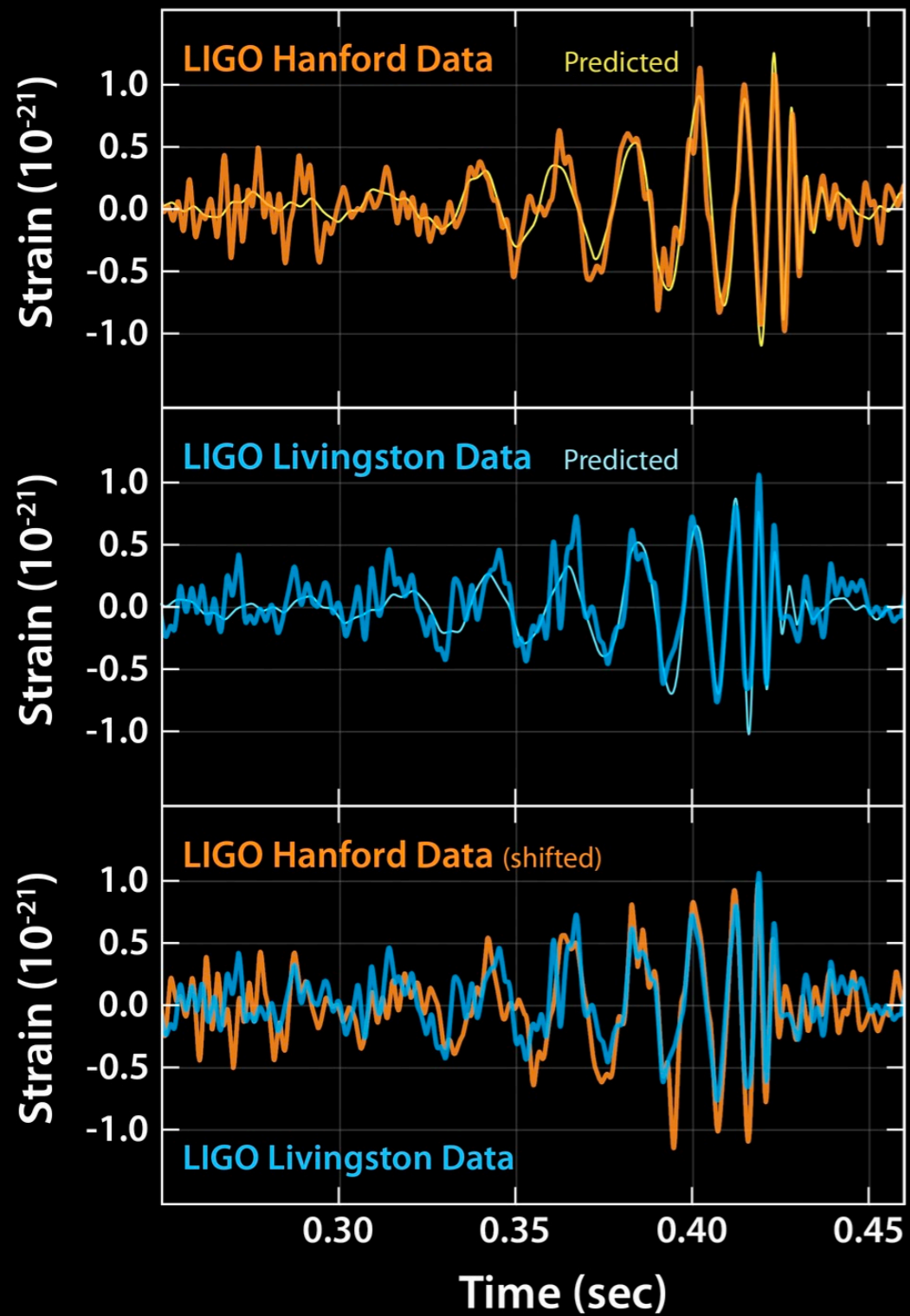
Fusión de dos agujeros negros.

Masas: 36 y 31 M_{\odot} .

Energía liberada: 4 M_{\odot} .

Distancia: 1400 millones años-luz.

GW150914: la primera detección

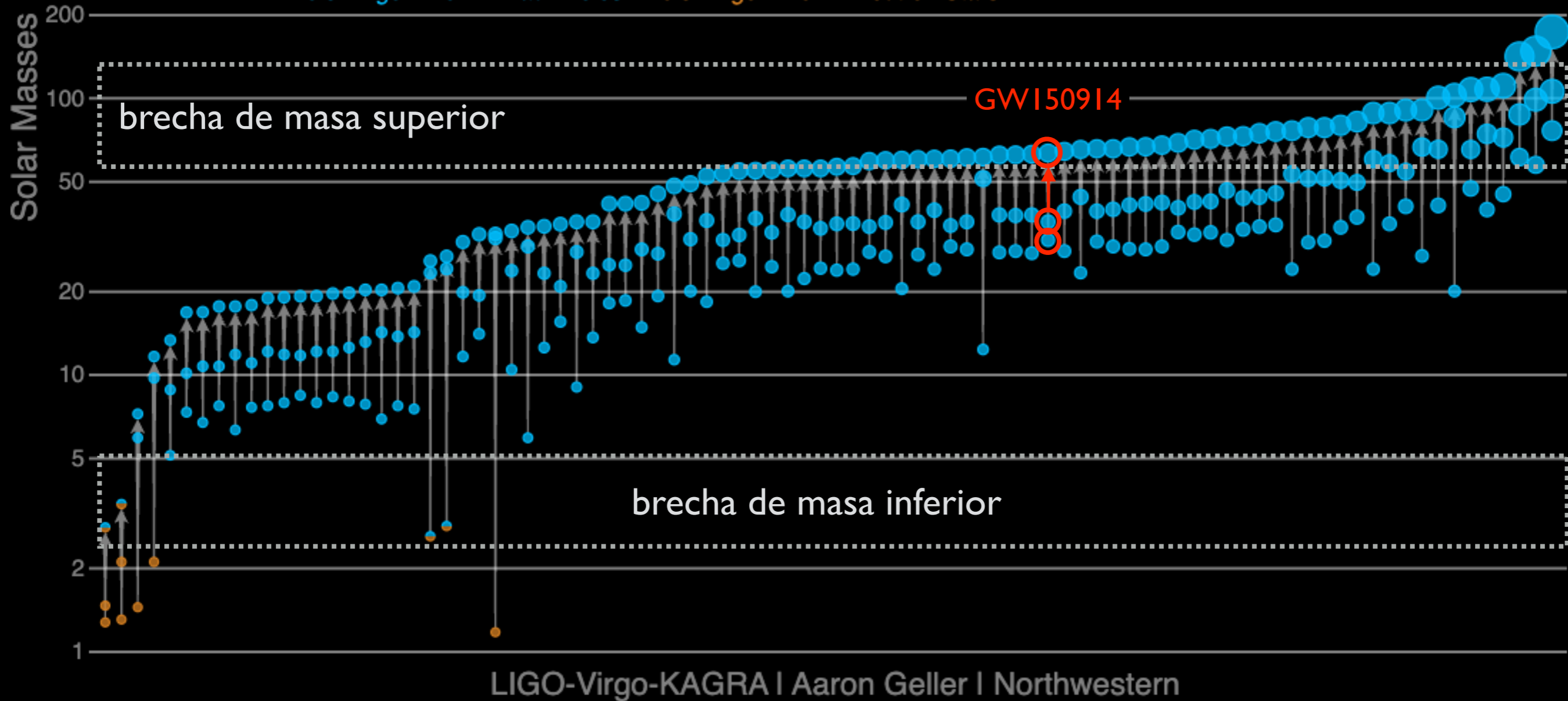


2017: Weiss, Barish, Thorne



Masses in the Stellar Graveyard

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

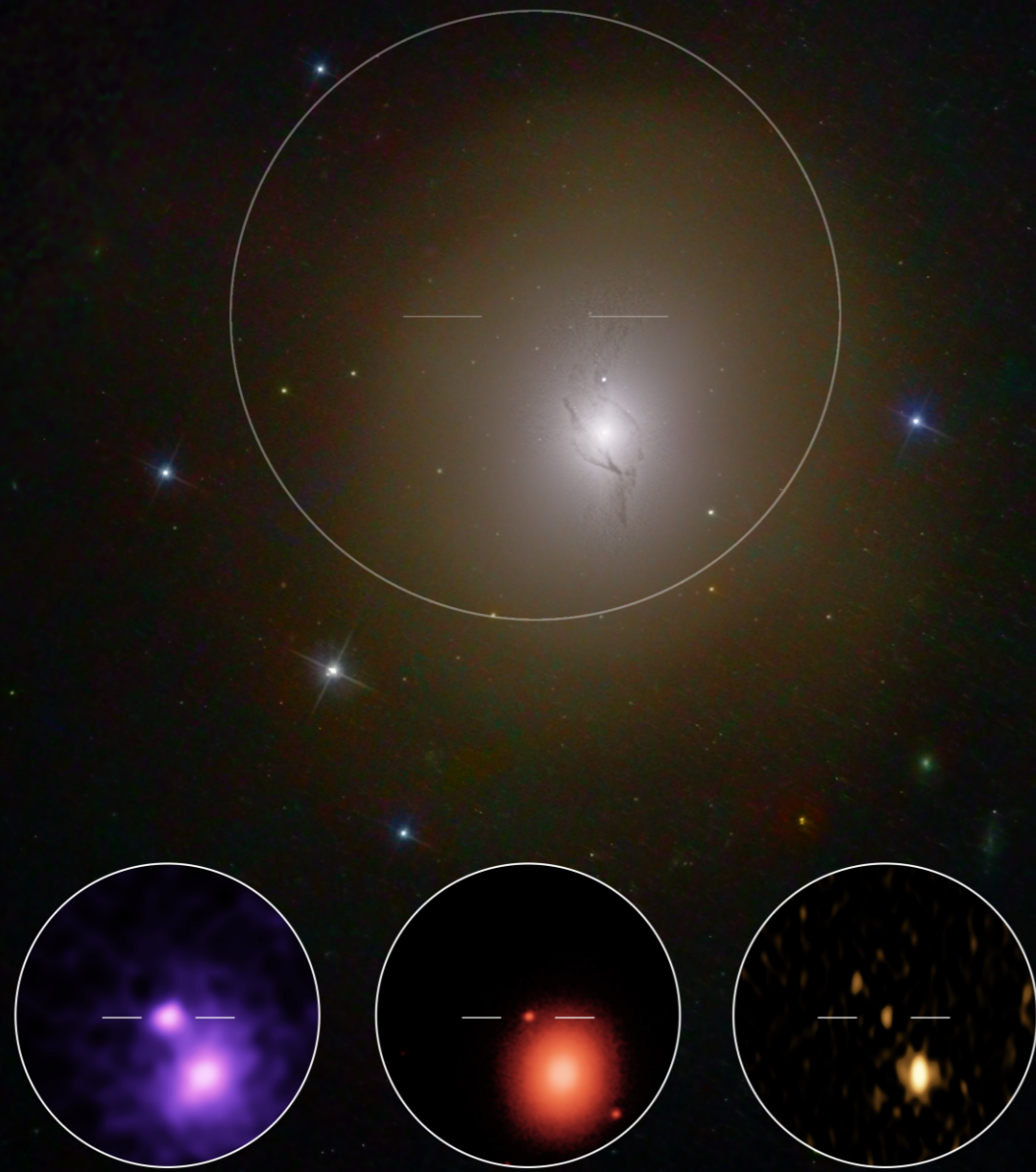


Si algunos de estos son **agujeros negros primordiales** podrían explicar (parte de) la **materia oscura** del Universo.

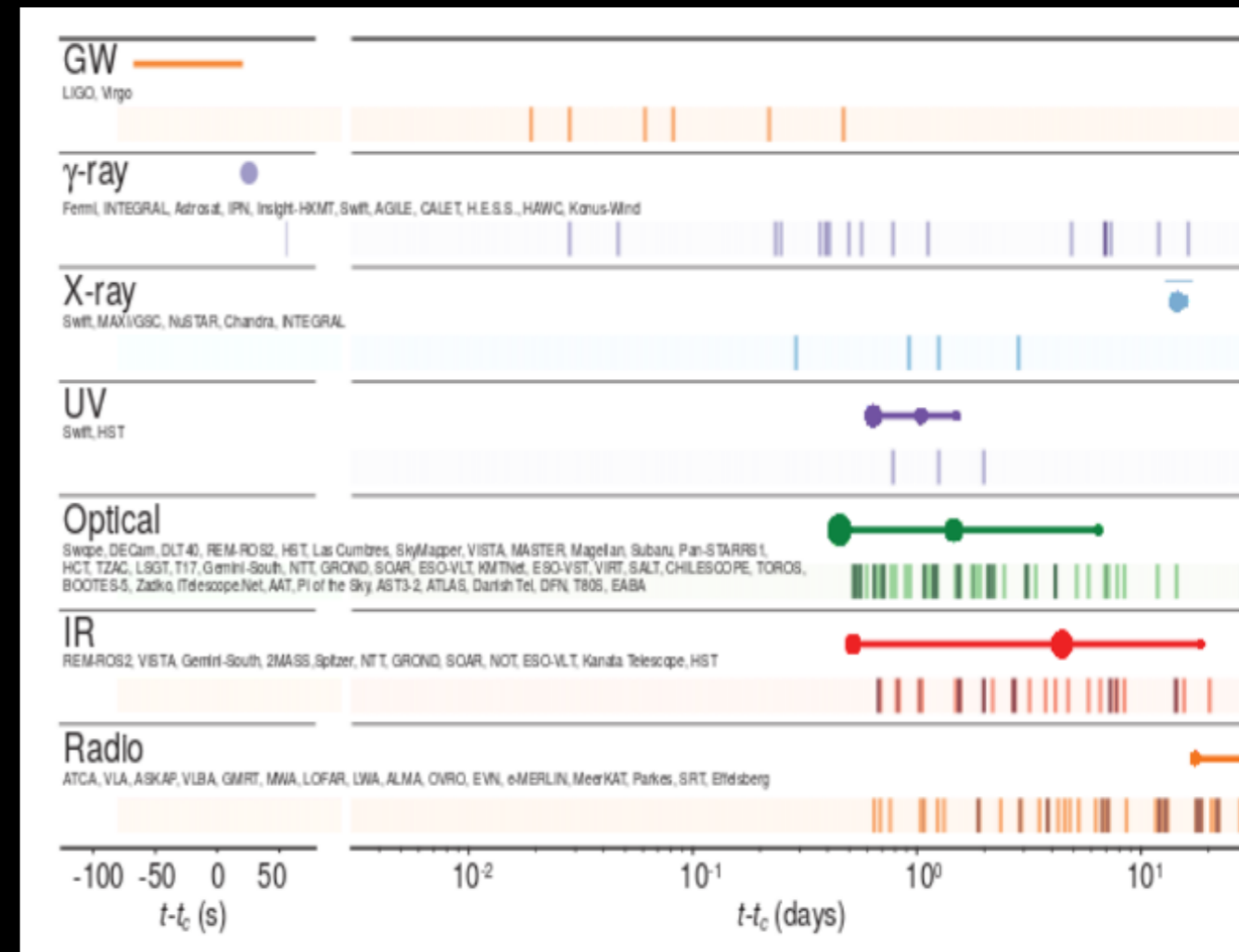
GW170817: 1ª observación de la fusión de dos estrellas de neutrones

Observación en todas las bandas del espectro electromagnético:

Astrofísica de multi-mensajeros.



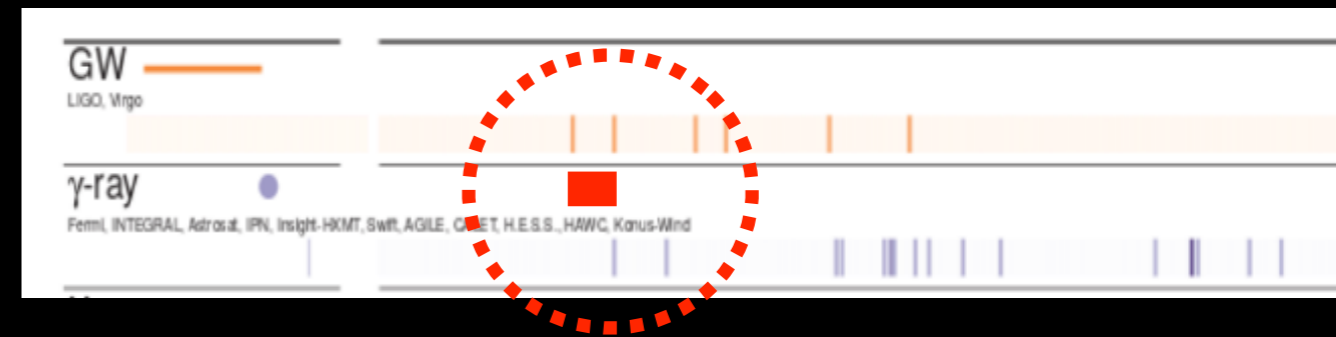
NGC 4993 (Hidra)



GW170817: 1ª observación de la fusión de dos estrellas de neutrones

Observación en todas las bandas del espectro electromagnético:

Astrofísica de multi-mensajeros.



2 s en 130 M ly

La diferencia relativa entre la velocidad de las **GW** y $c \approx 10^{-15}$



UV

IR

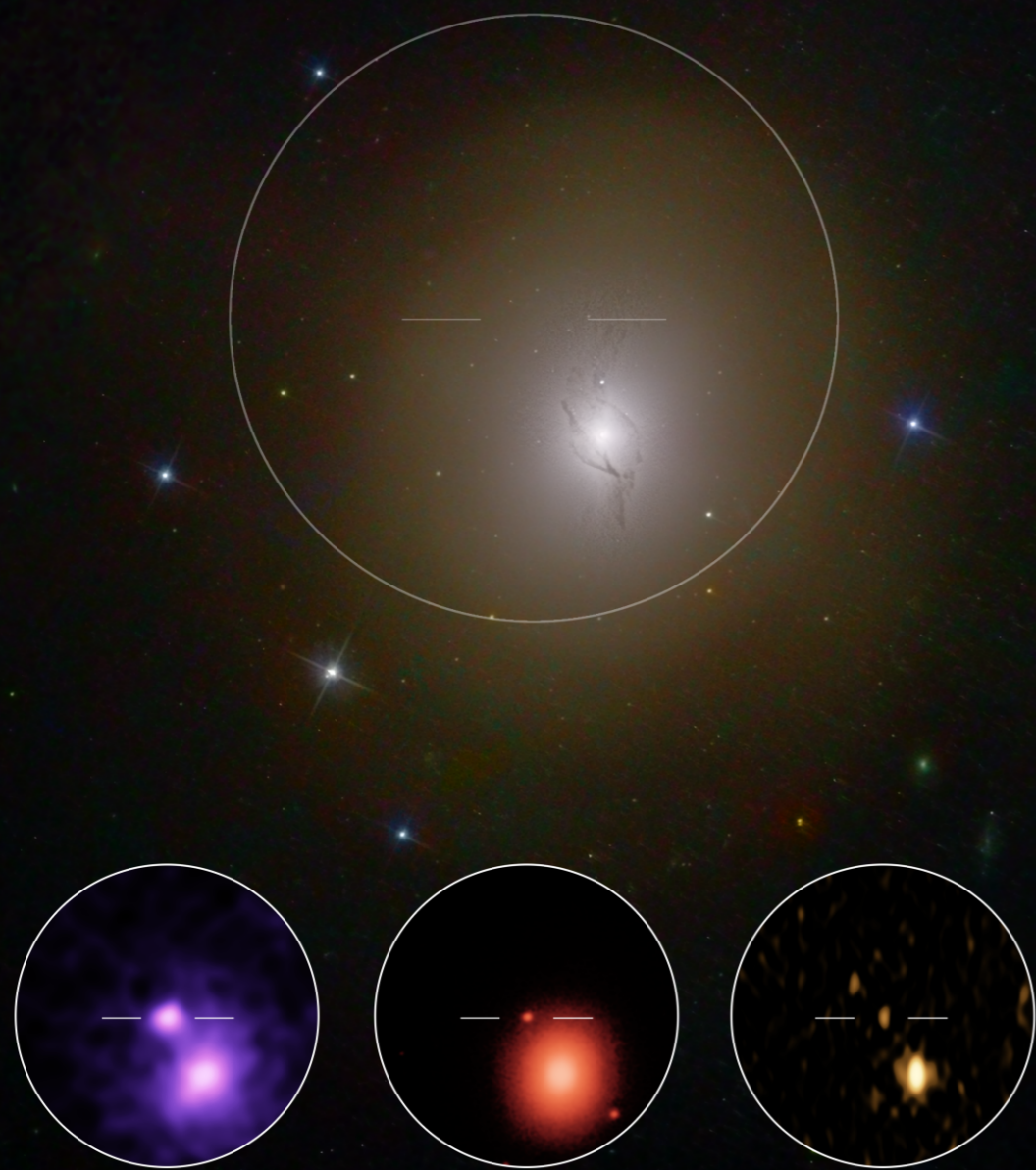
Radio

NGC 4993 (Hidra)

GW170817: 1ª observación de la fusión de dos estrellas de neutrones

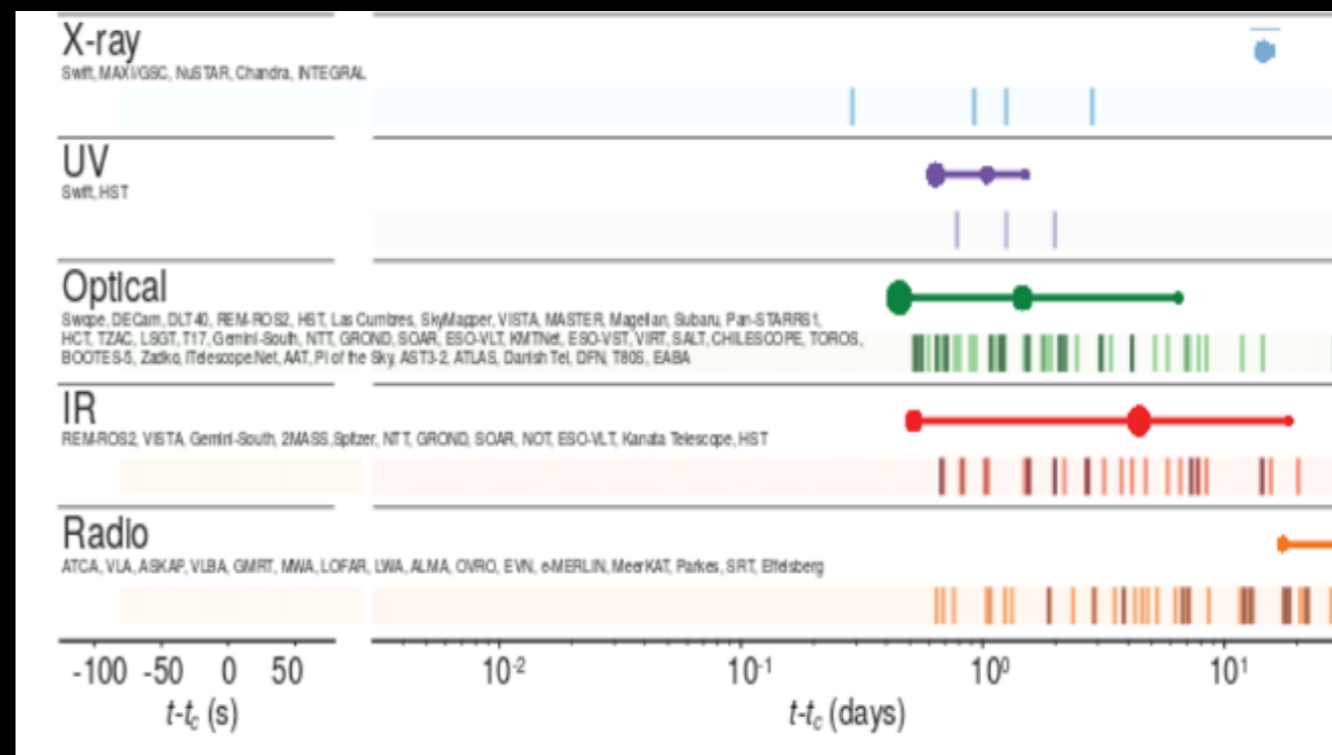
Observación en todas las bandas del espectro electromagnético:

Astrofísica de multi-mensajeros.



UV IR Radio

NGC 4993 (Hidra)



GW170817: 1ª observación de la fusión de dos estrellas de neutrones

Observación en todas las bandas del espectro electromagnético:

Astrofísica de multi-mensajeros.

Element Origins

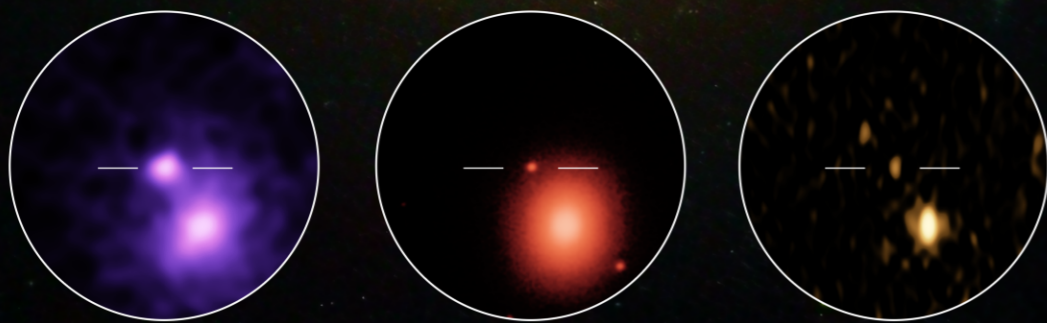
1 H																	2 He																	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																	
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn																
87 Fr	88 Ra																																	
																		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
																		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U													

Merging Neutron Stars
Dying Low Mass Stars

Exploding Massive Stars
Exploding White Dwarfs

Big Bang
Cosmic Ray Fission

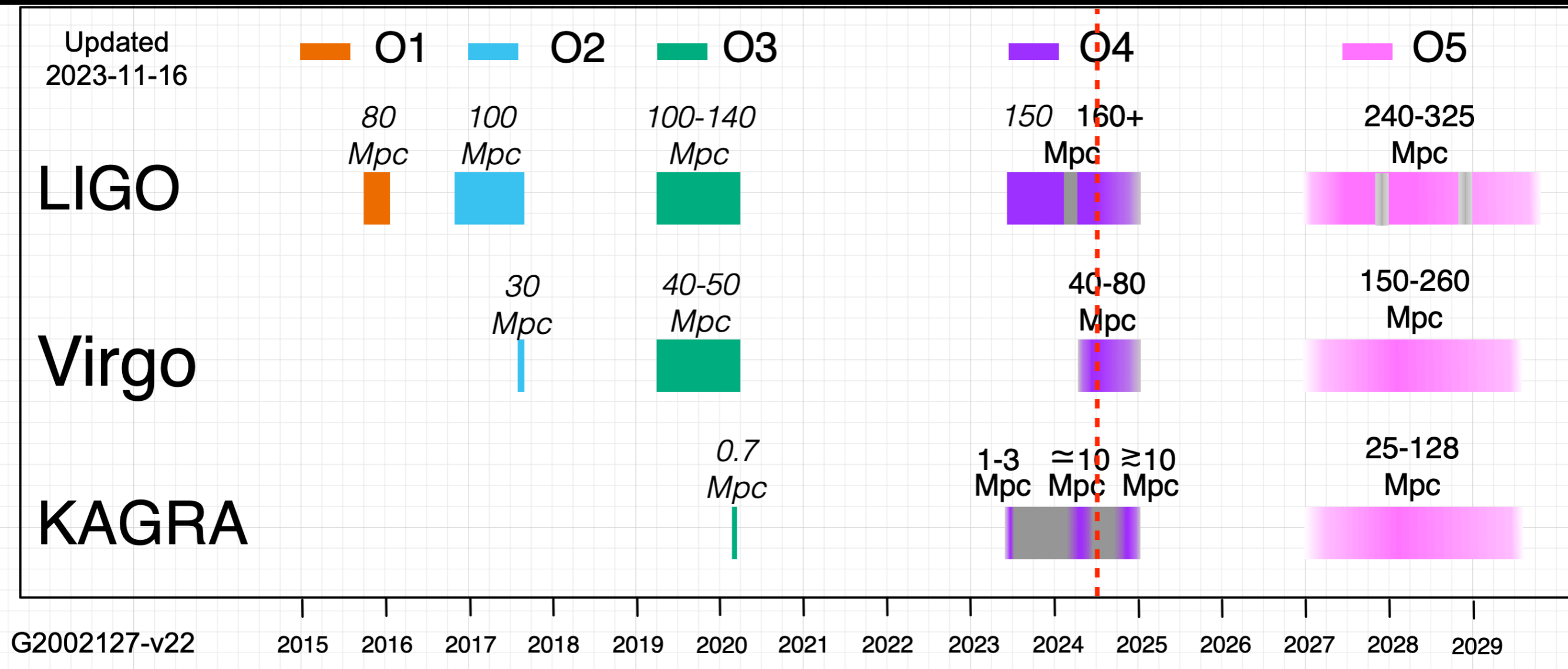
Based on graphic created by



UV IR Radio

NGC 4993 (Hidra)

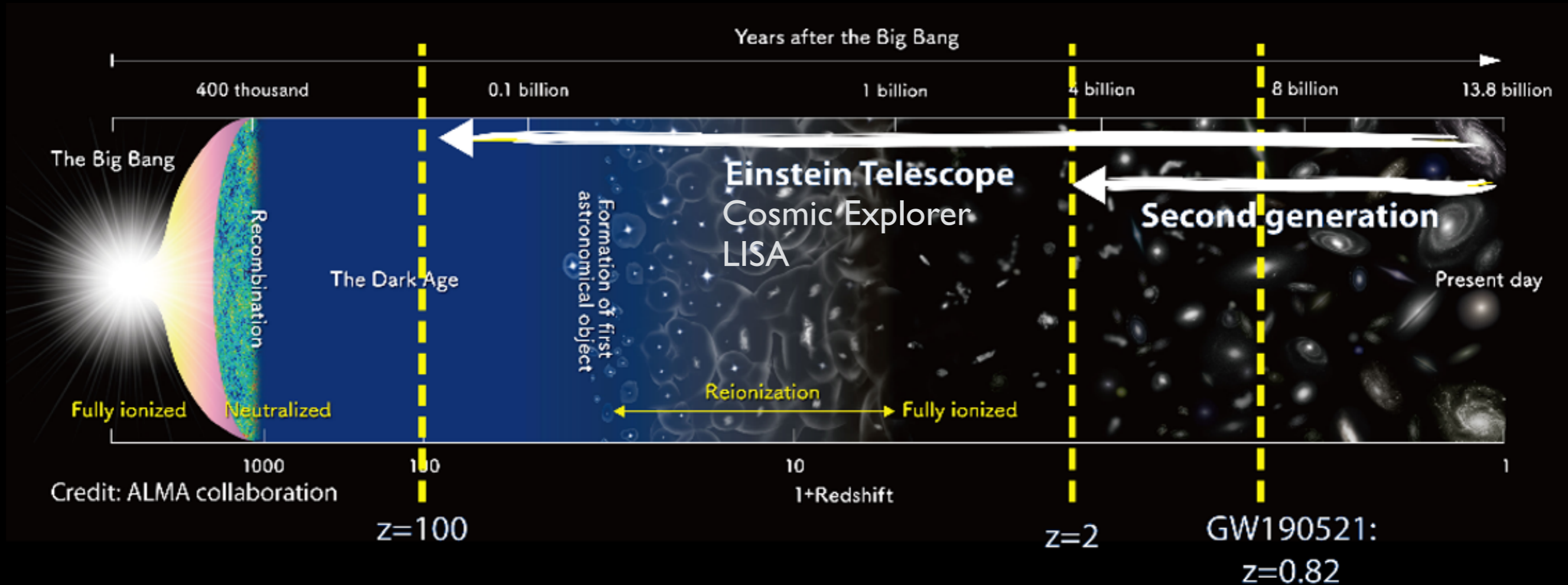
Calendario de observación de ondas gravitacionales



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**.

El futuro de la detección de ondas gravitacionales

Horizonte para la detección de agujeros negros binarios



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

¿Qué hemos aprendido?

El Universo lleva **14.000 millones de años** expandiéndose y cada vez lo hace más rápido.

El 95% del contenido del Universo es de naturaleza desconocida (**energía oscura y materia oscura**).

El ser humano es capaz de conseguir cosas increíbles y medir las **perturbaciones del espacio-tiempo** es la más increíble de todas.

En adelante, podremos observar el Universo no solo con nuestros ojos, sino también escuchando **los sonidos del silencio**.

Fin

pablo.garcia@ciemat.es

