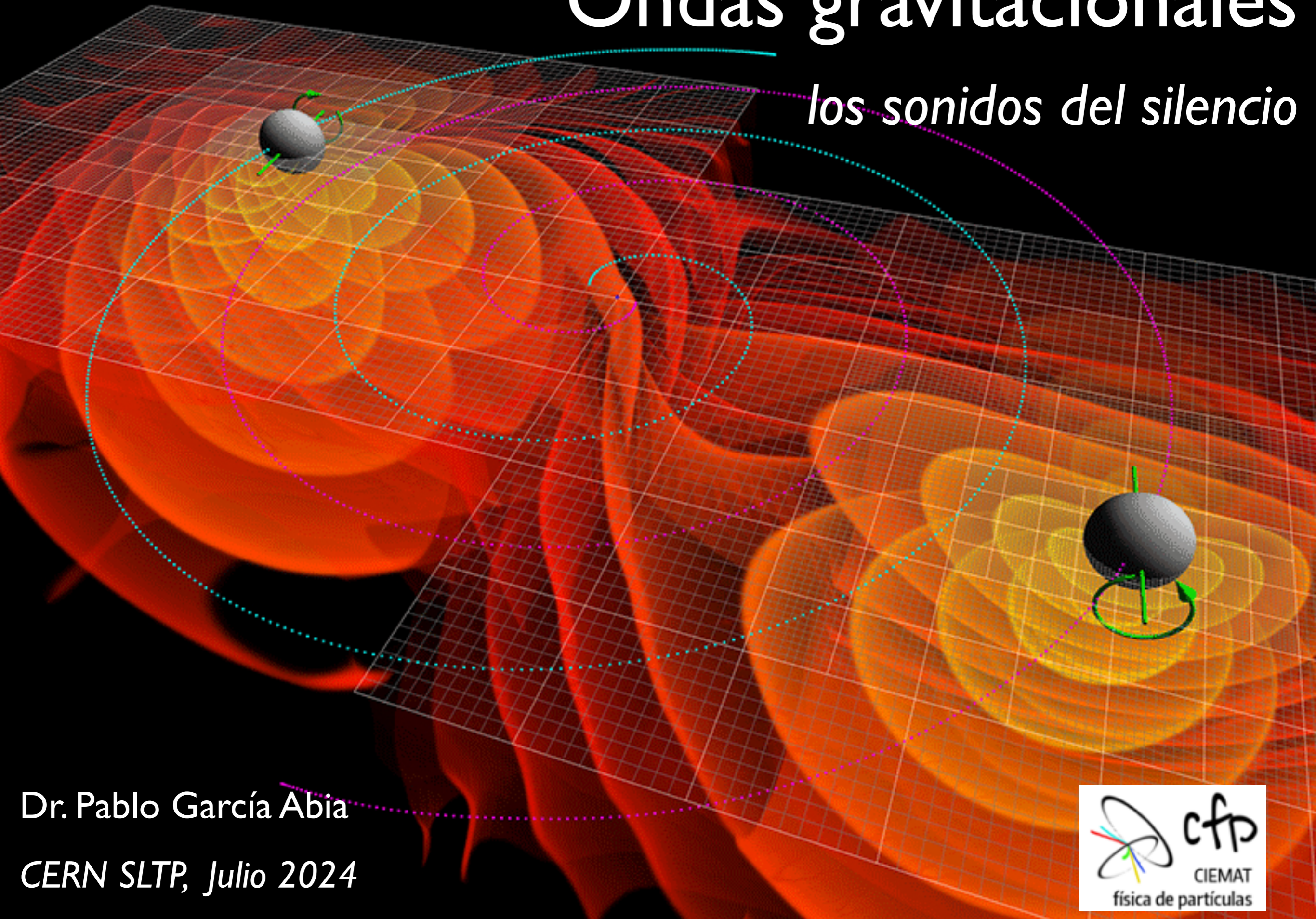


# Ondas gravitacionales

*los sonidos del silencio*

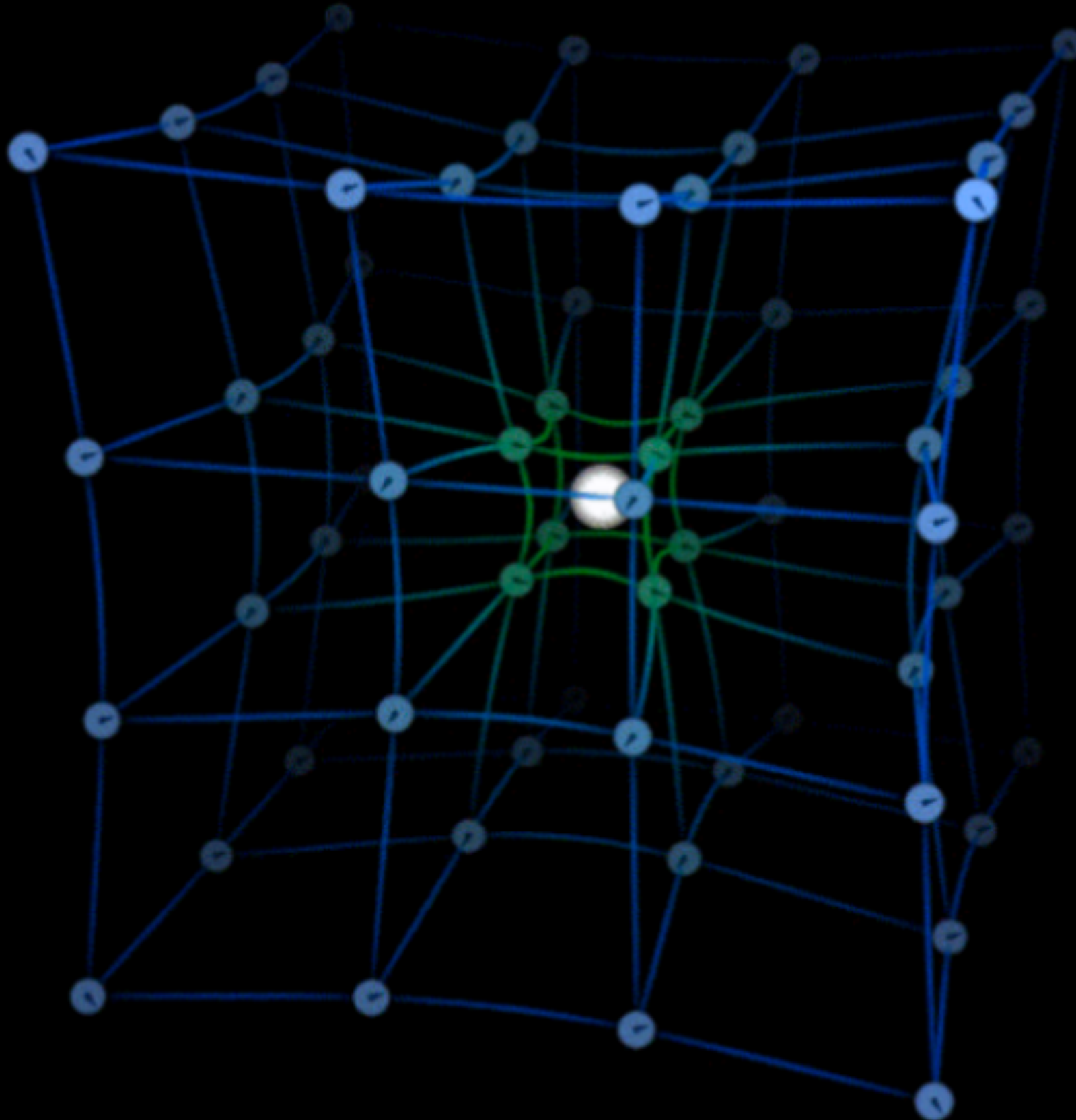


Dr. Pablo García Abia

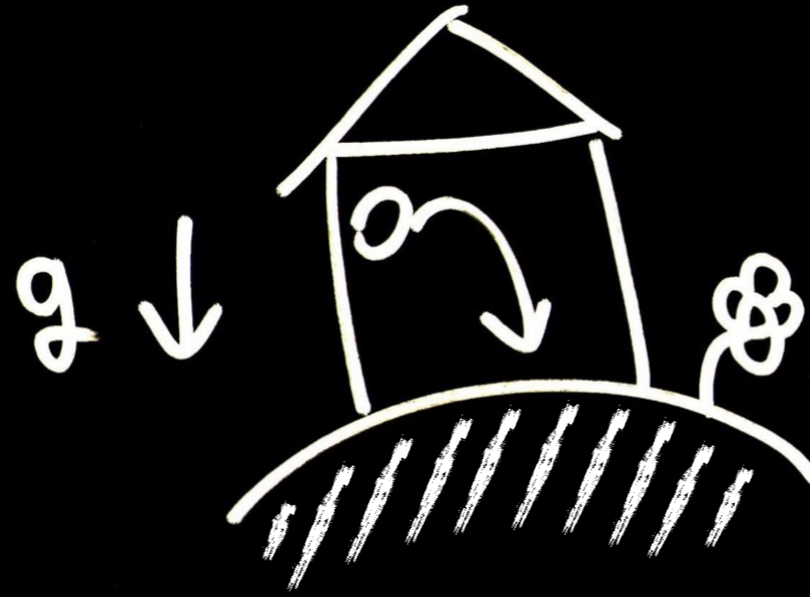
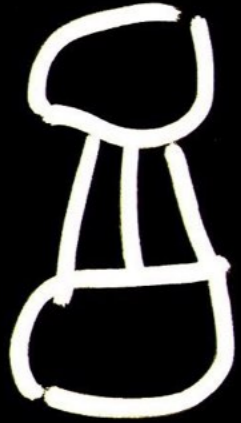
*CERN SLTP, Julio 2024*



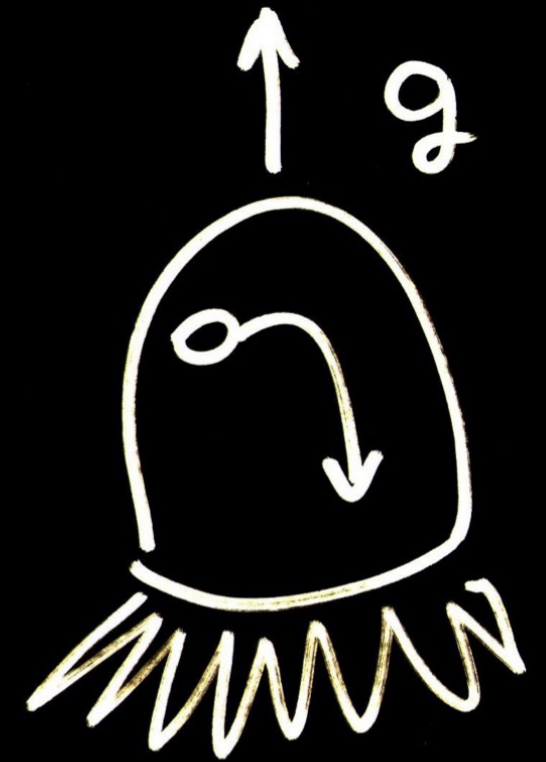
# Evolución del Universo: espacio y tiempo



RG



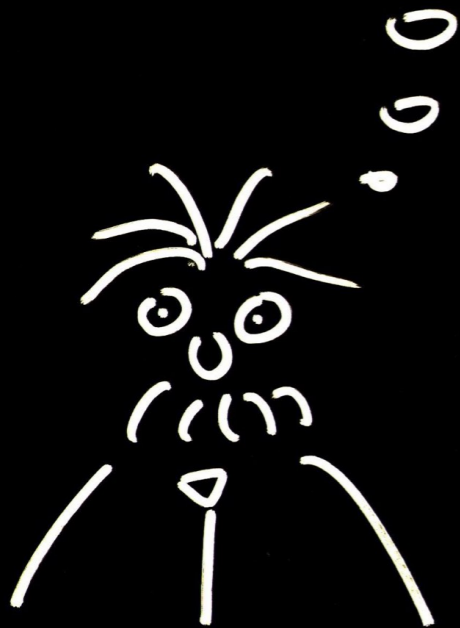
$T_{\mu\nu}$



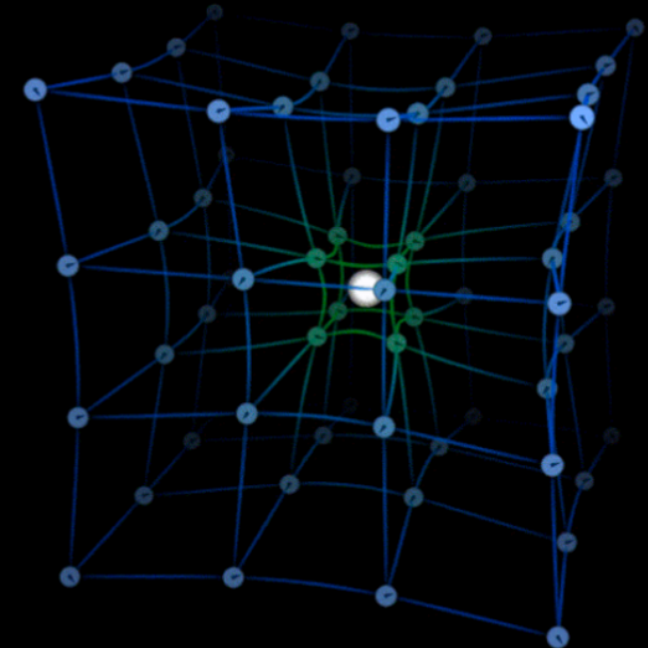
$G_{\mu\nu}$

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

$10^{-43}$



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

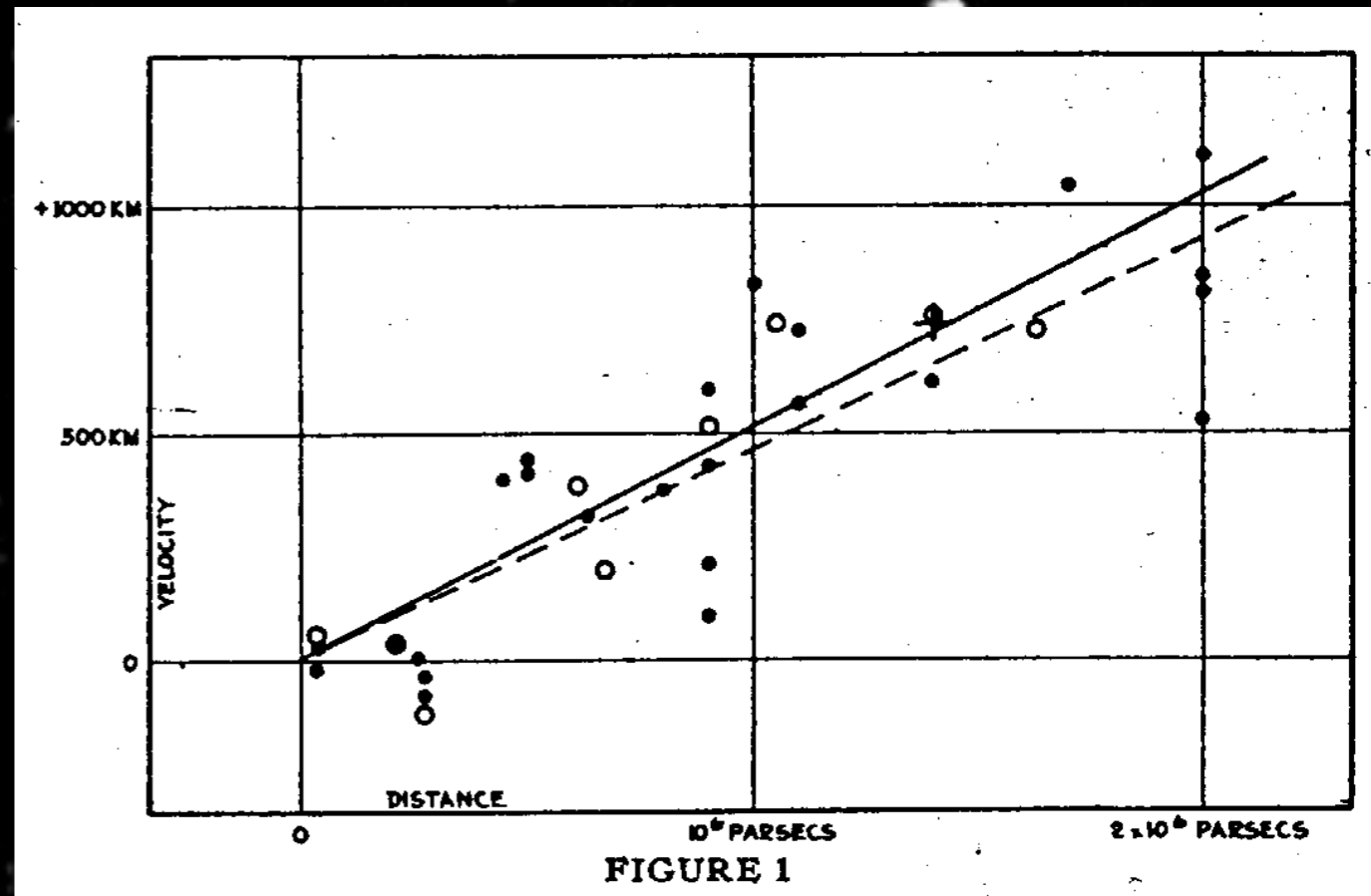


1929: el universo se expande



Lemaître  
Slipher  
Hubble

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

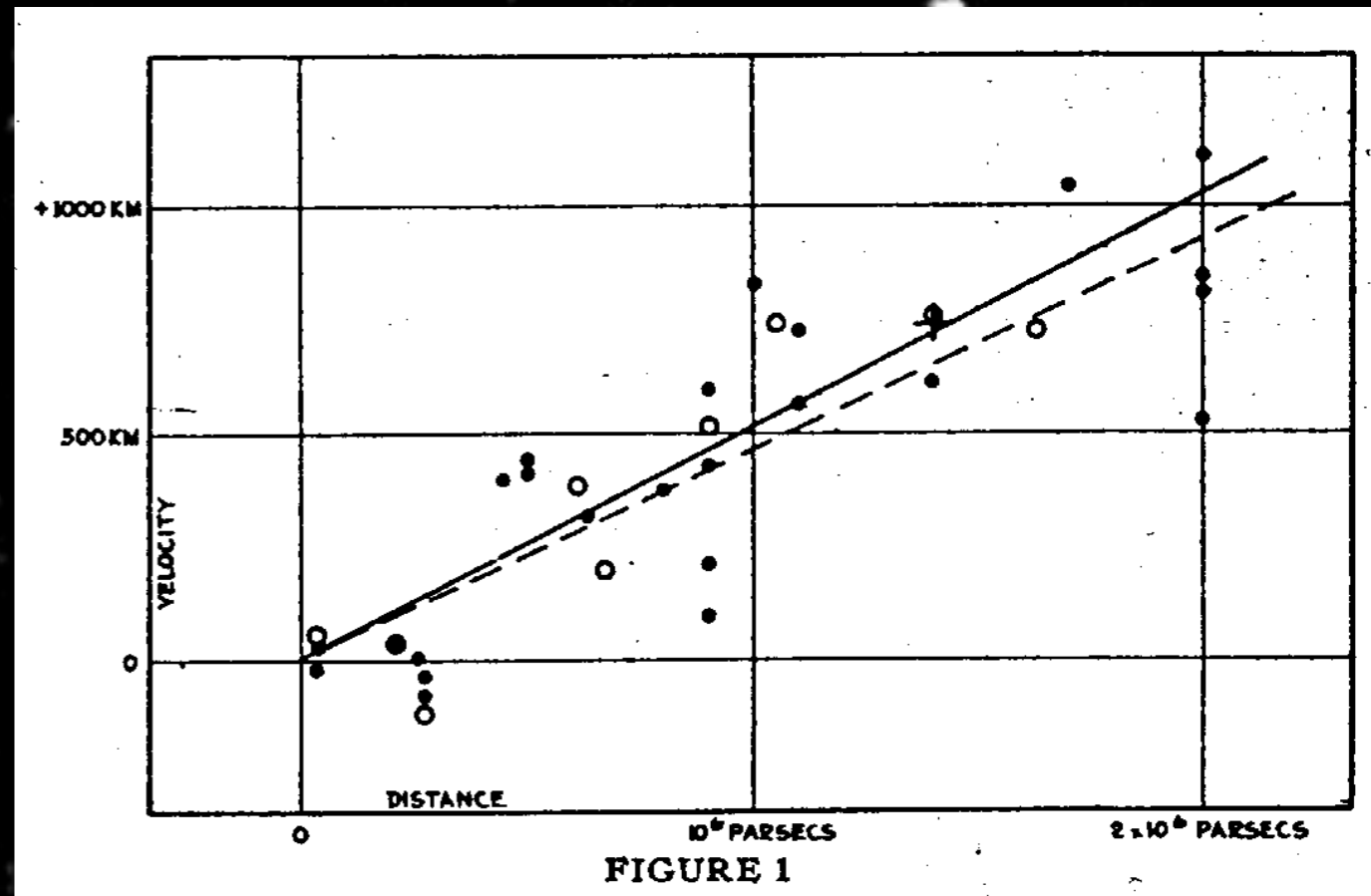


1929: el universo se expande

RG  


Lemaître  
Slipher  
Hubble

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



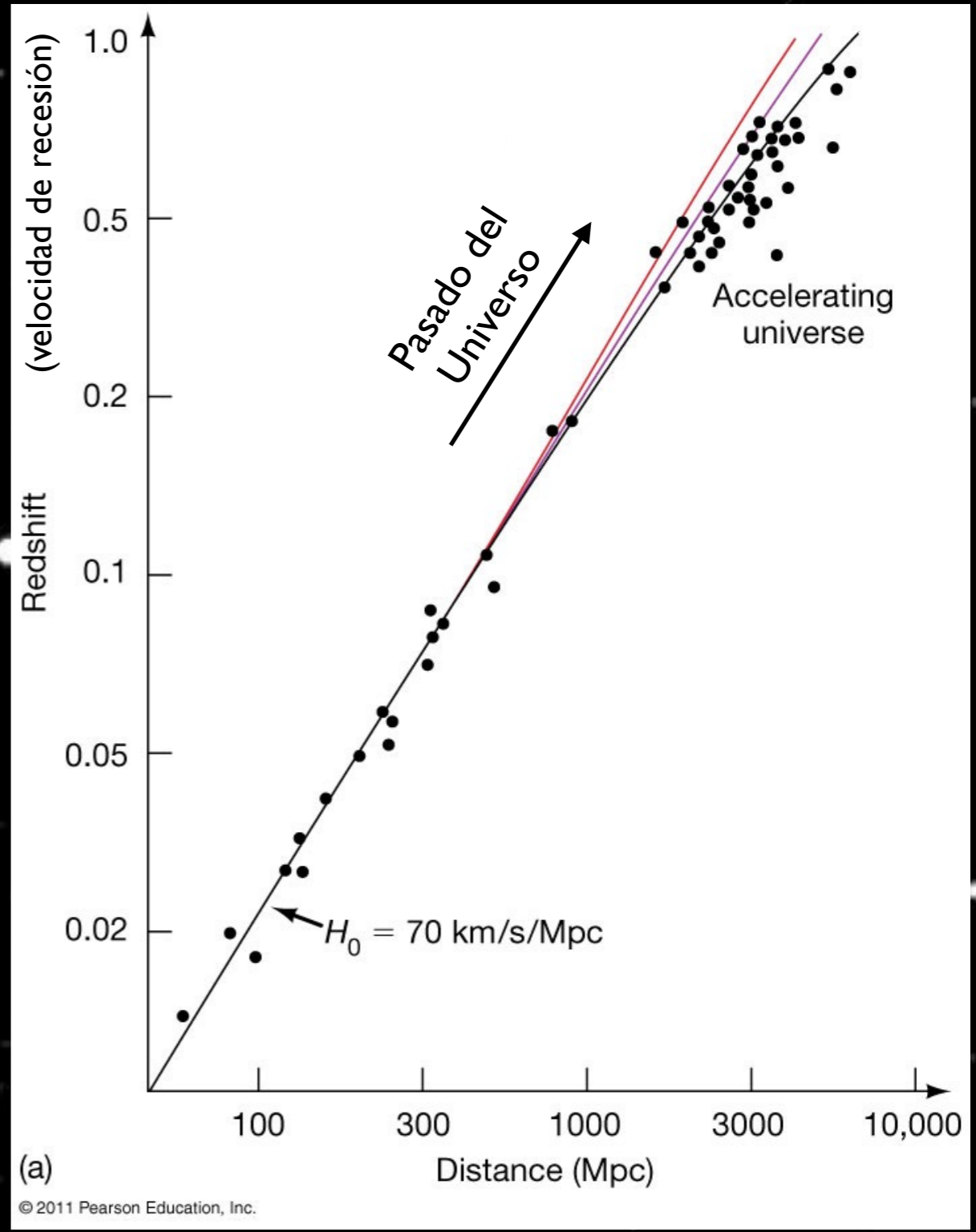
1929: el universo se expande

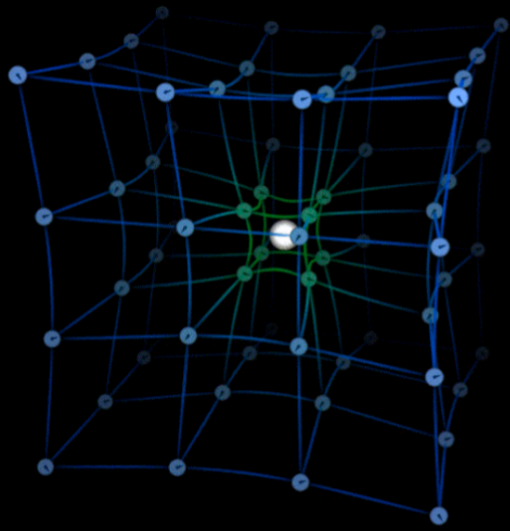
1998: la expansión del universo es acelerada

2011: Perlmutter, Schmidt, Riess

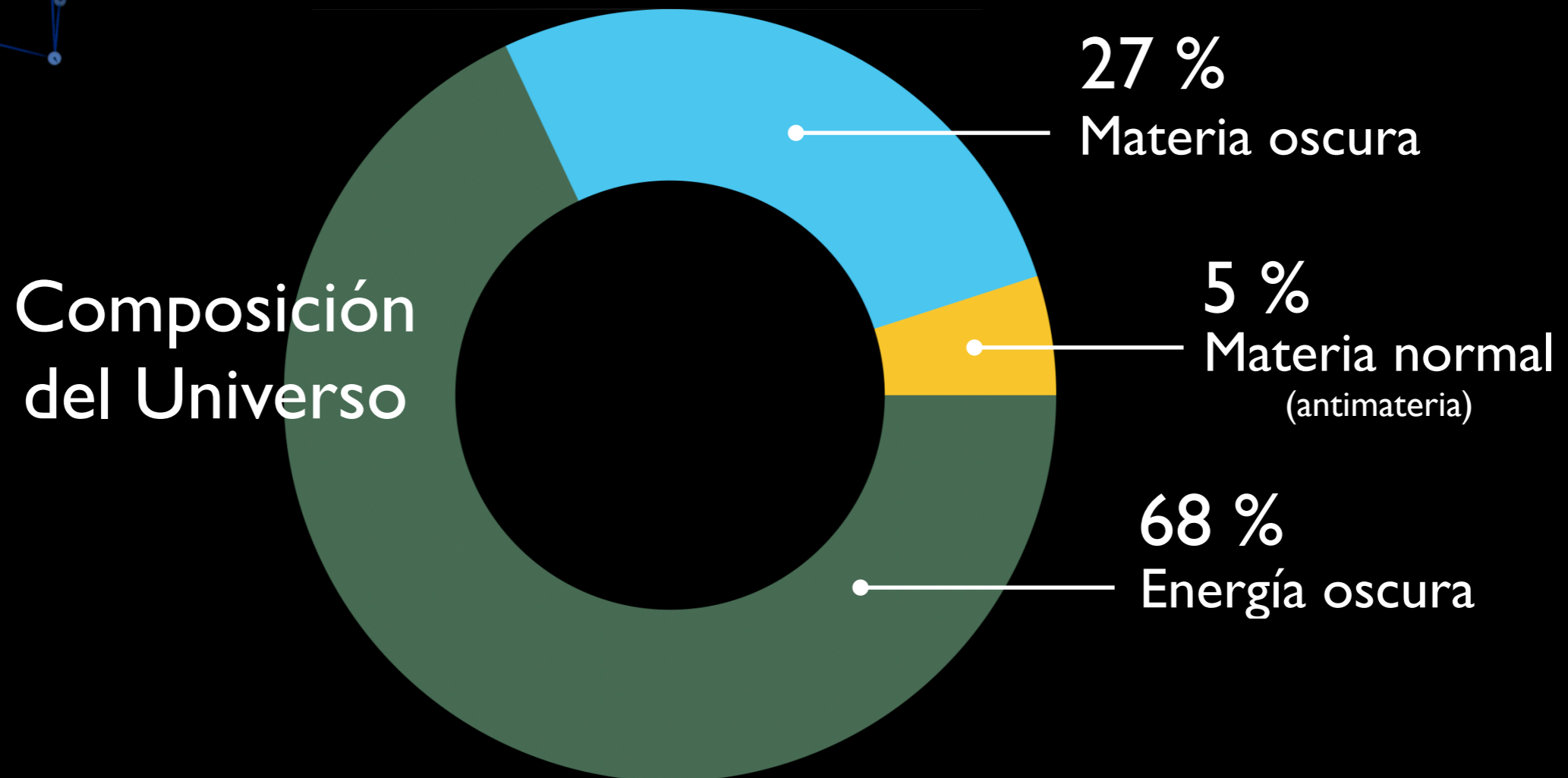


Lemaître  
Slipher  
Hubble





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**.

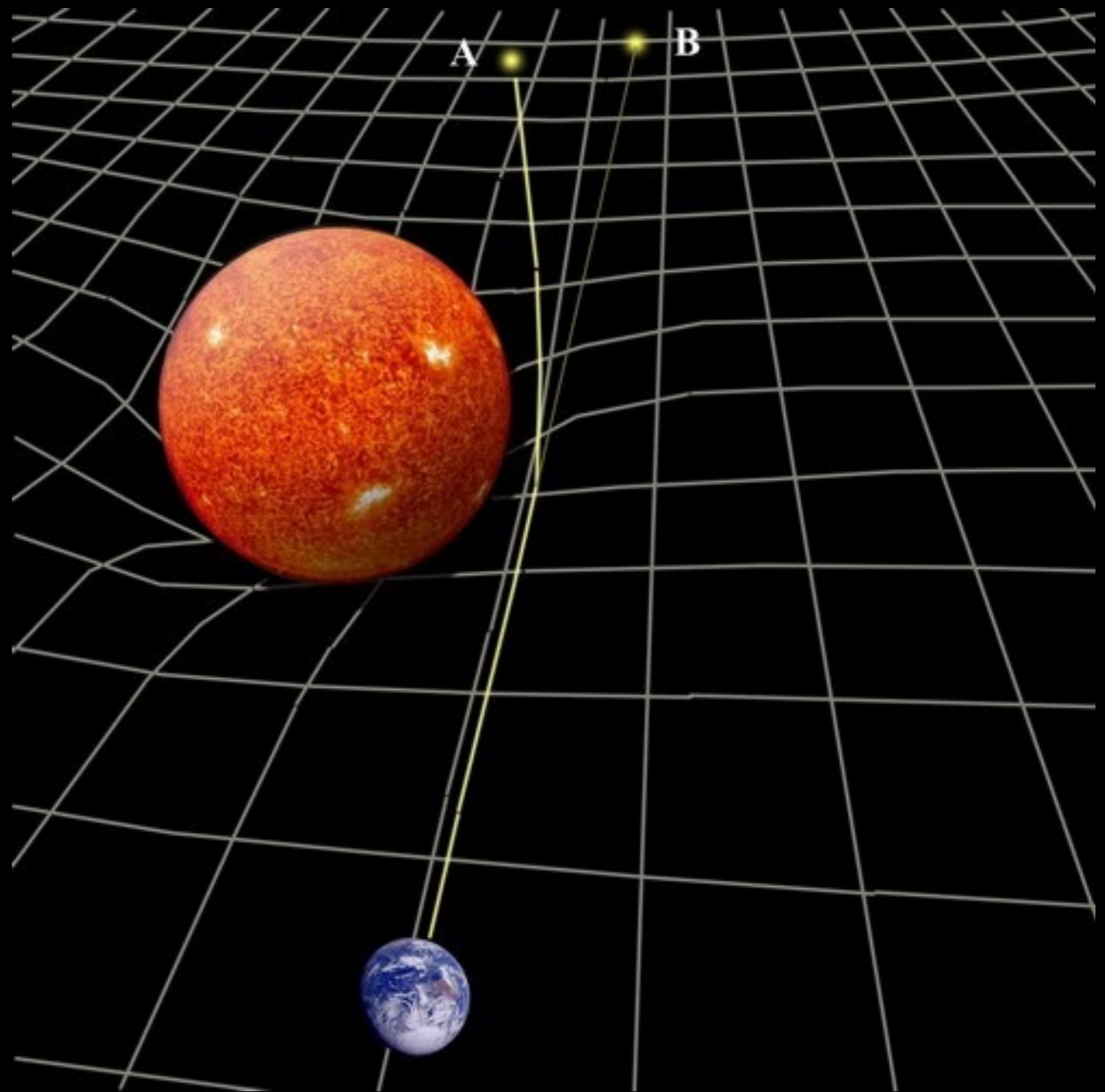
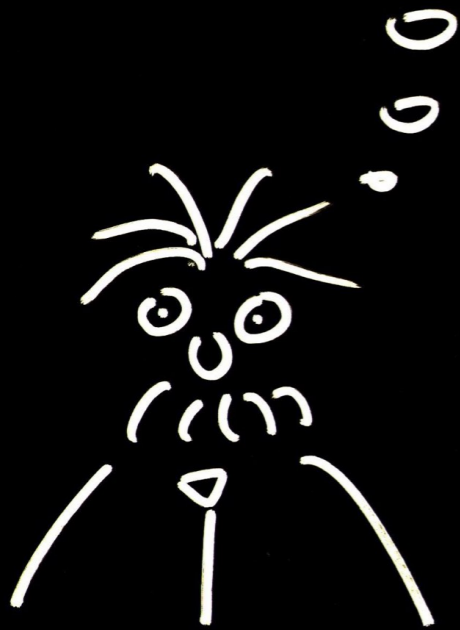
**Energía y materia oscuras:** dos de los principales retos de la física fundamental.

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).

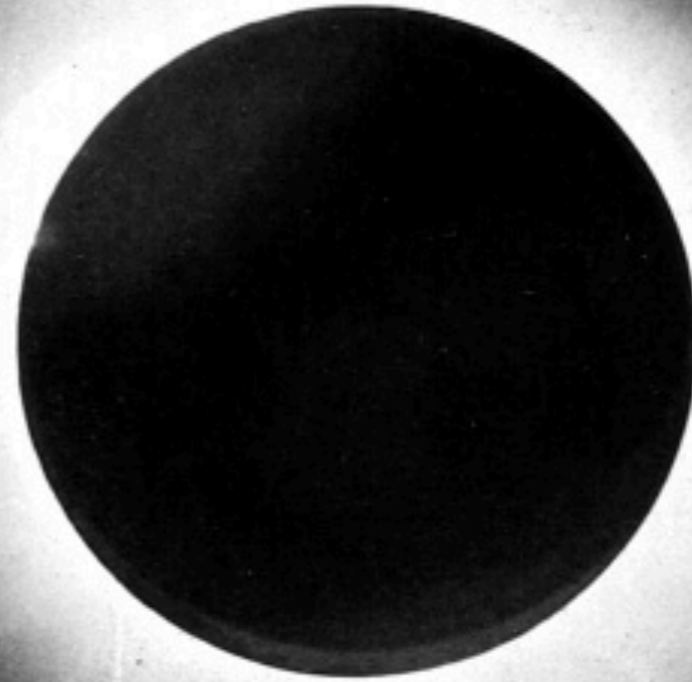
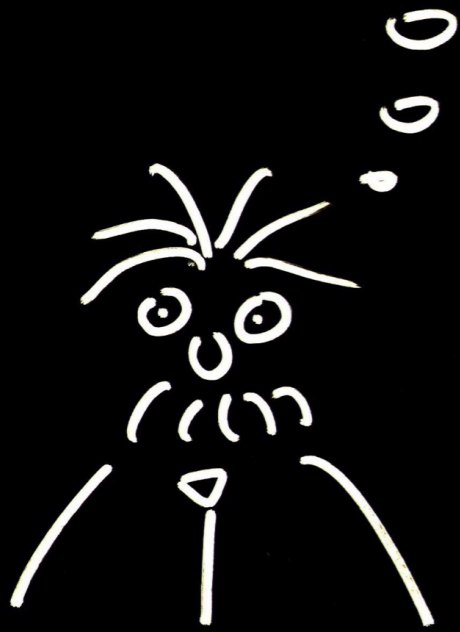


RG



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

$10^{-43}$



Eddington, 1919

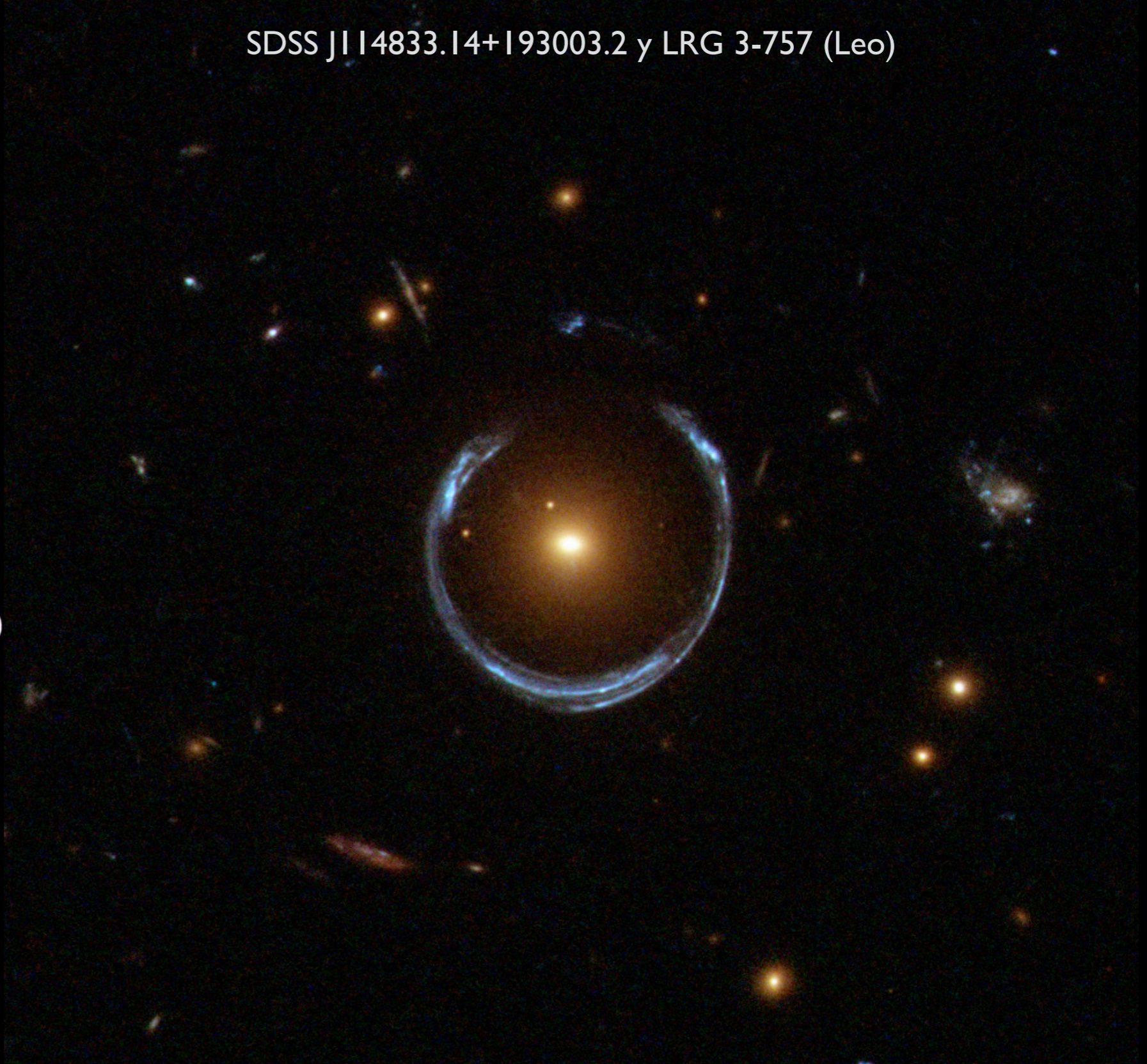
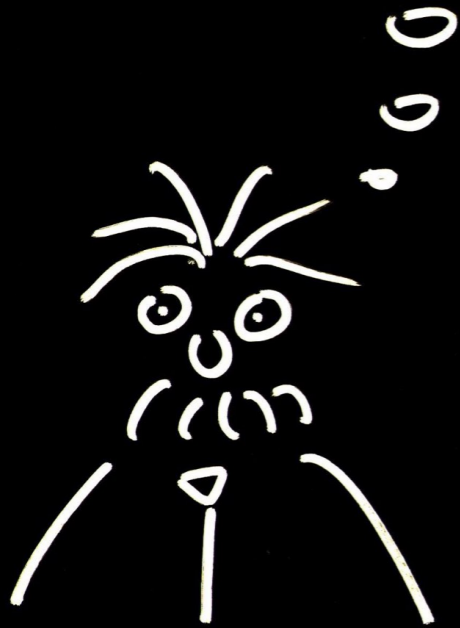
La trayectoria de la luz en un espacio curvo **no es rectilínea (geodésicas)**.

RG



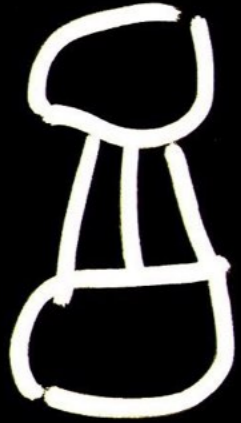
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$10^{-43}$



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).



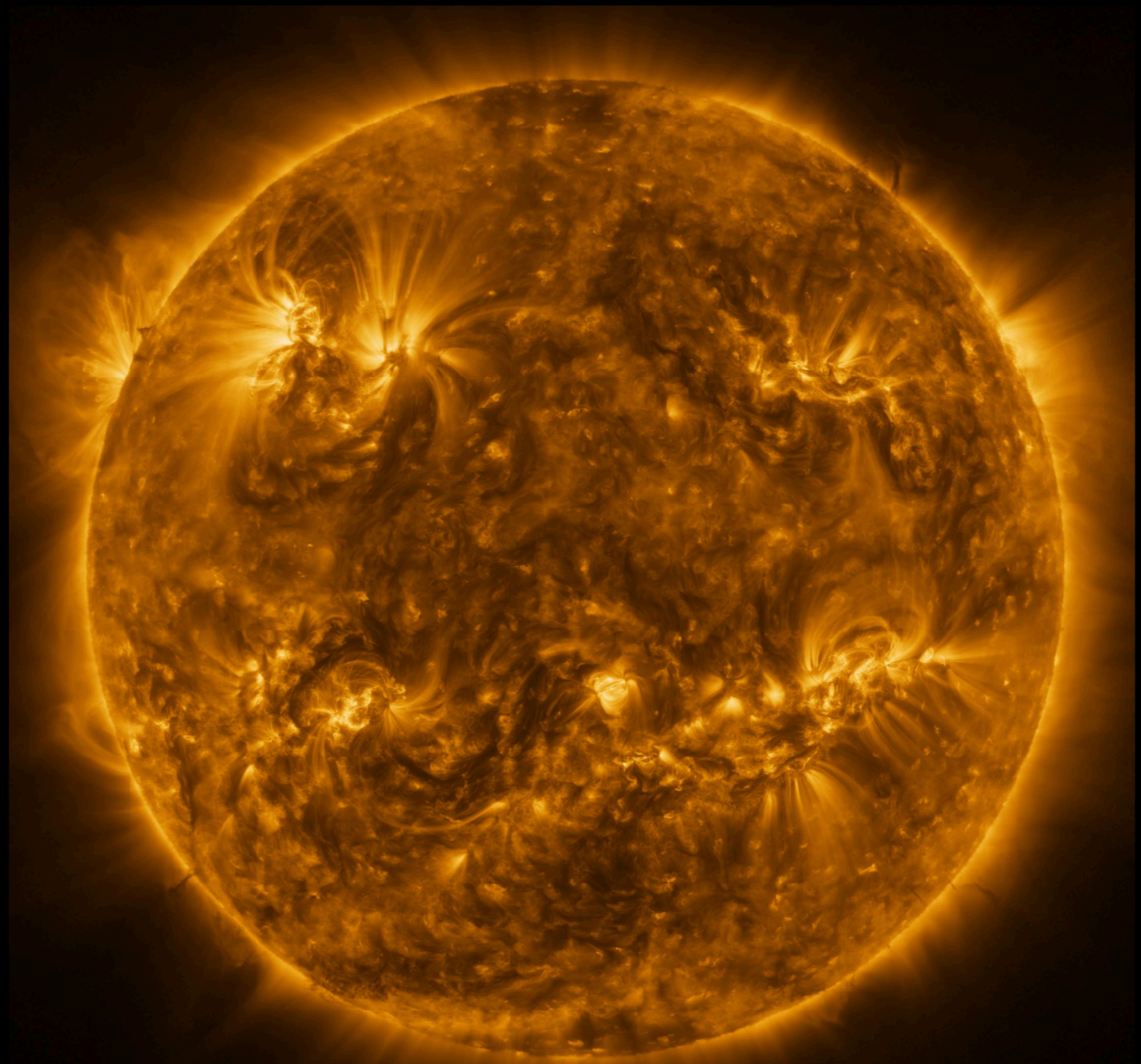
M-87 (Virgo)

# ¿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**  $M_{\odot}$ .

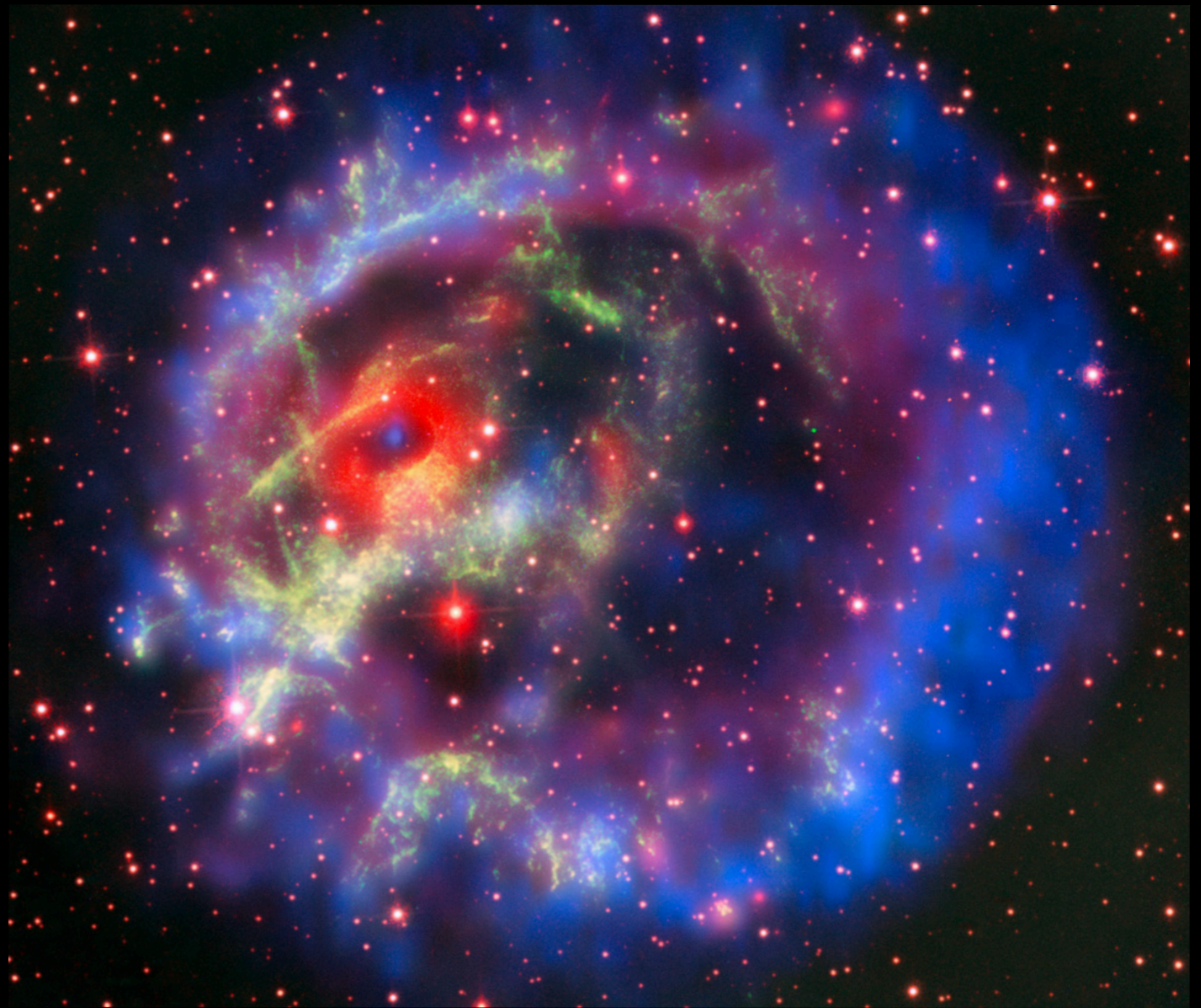


# ¿Qué son los agujeros negros?

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**  $M_{\odot}$ .



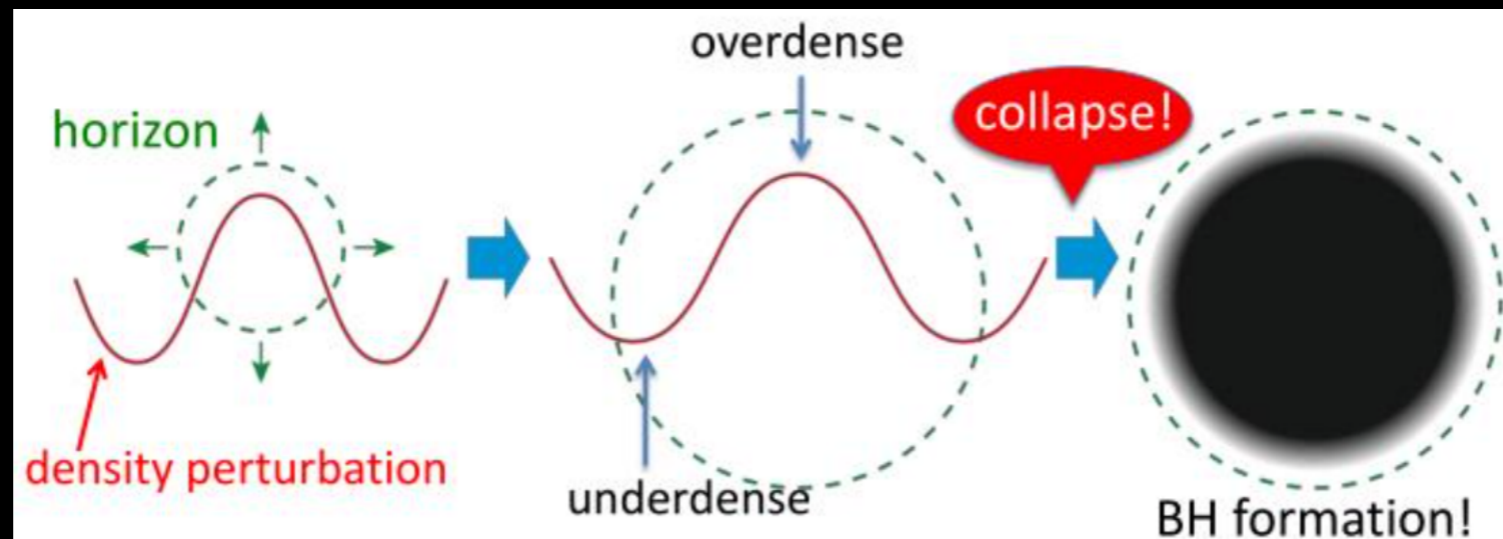
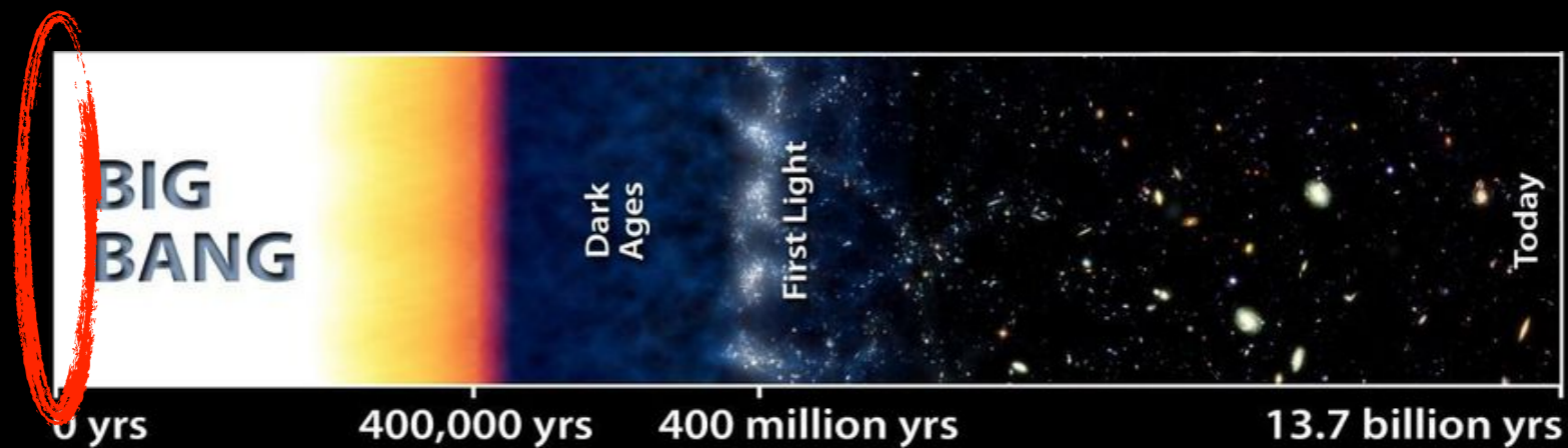
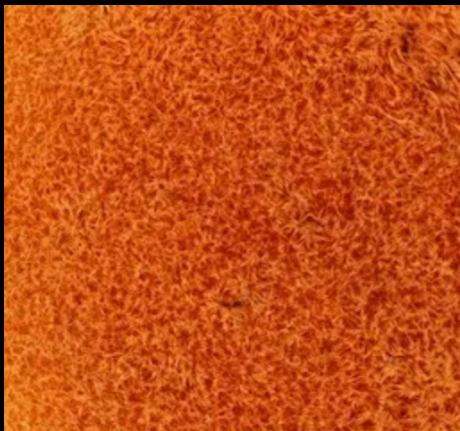
SN 1E 0102.2-7219 (SMC)

# ¿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).

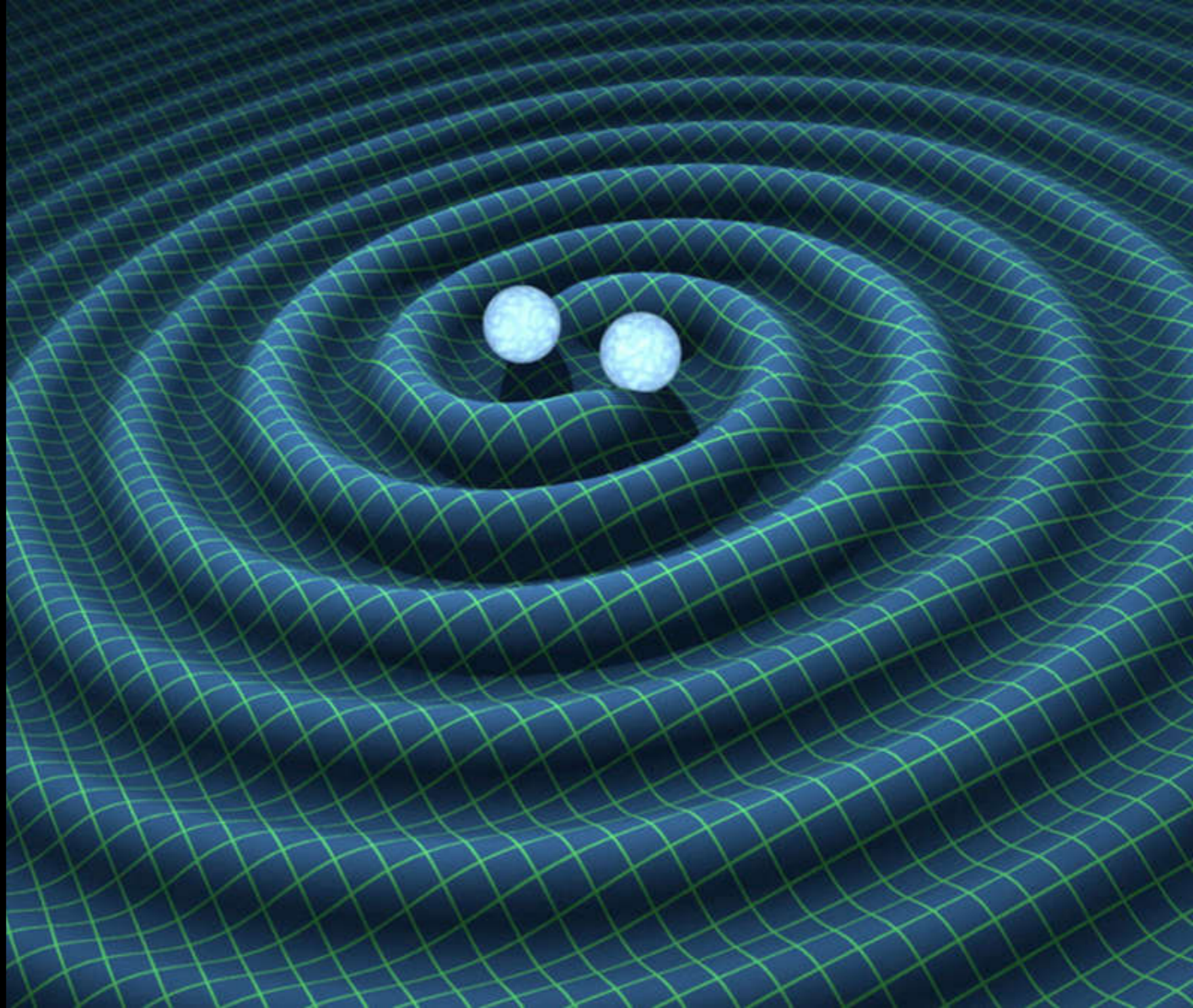
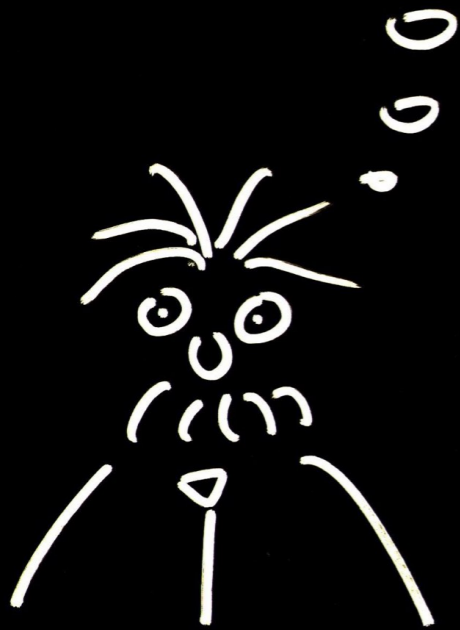


RG



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

$10^{-43}$

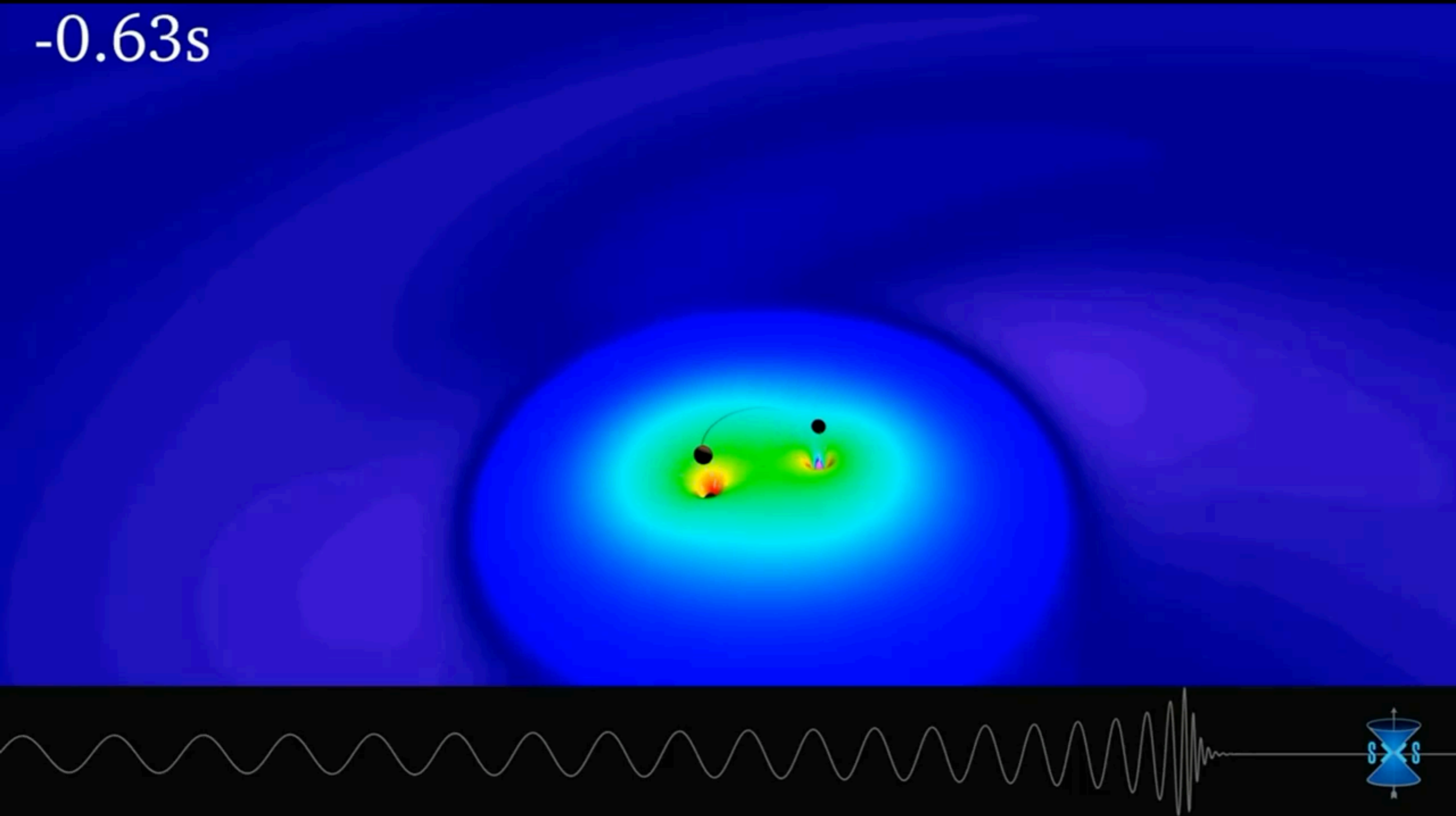


La RG predice la deformación dinámica del espacio-tiempo: **ondas gravitacionales**

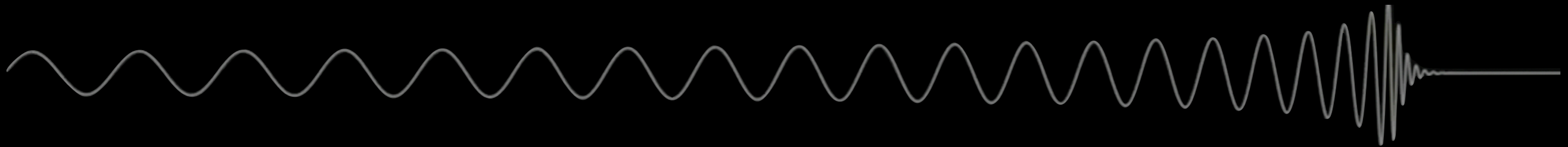


# Emisión de ondas gravitacionales en la fusión de dos agujeros negros

-0.63s

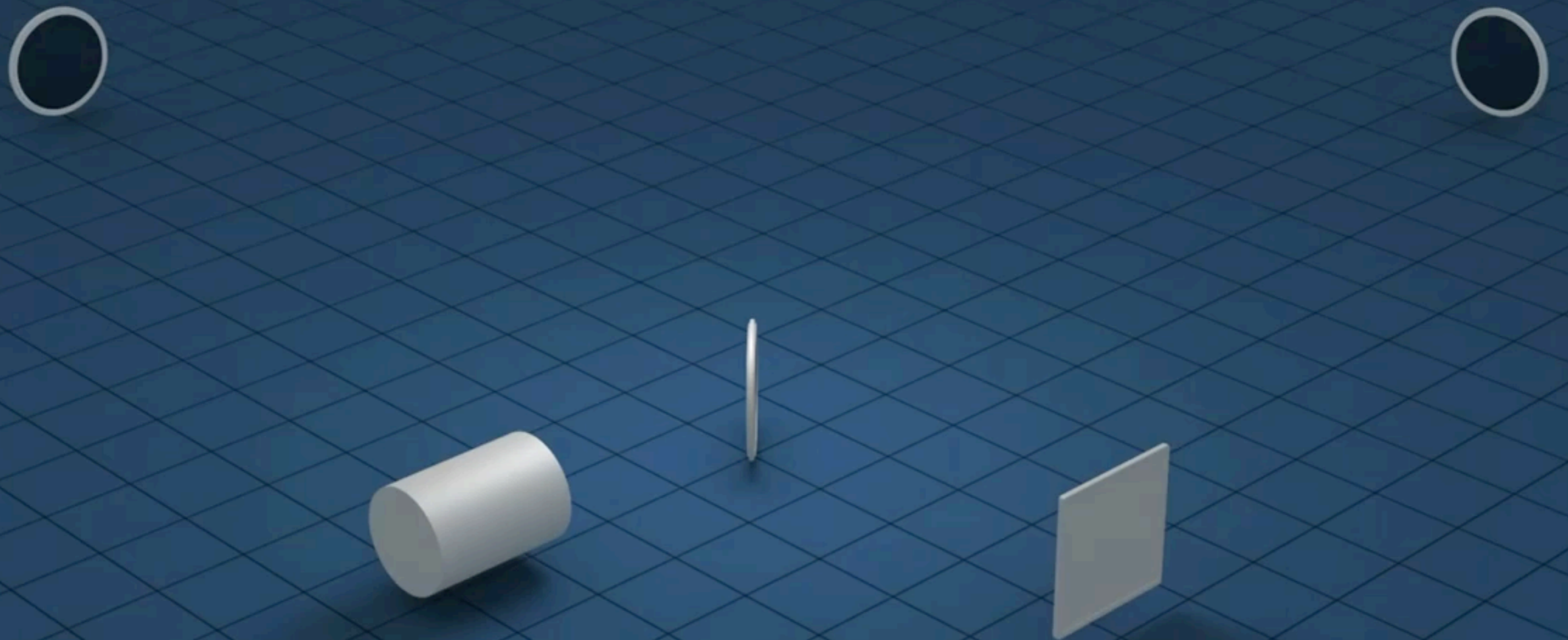


# Emisión de ondas gravitacionales en la fusión de dos agujeros negros

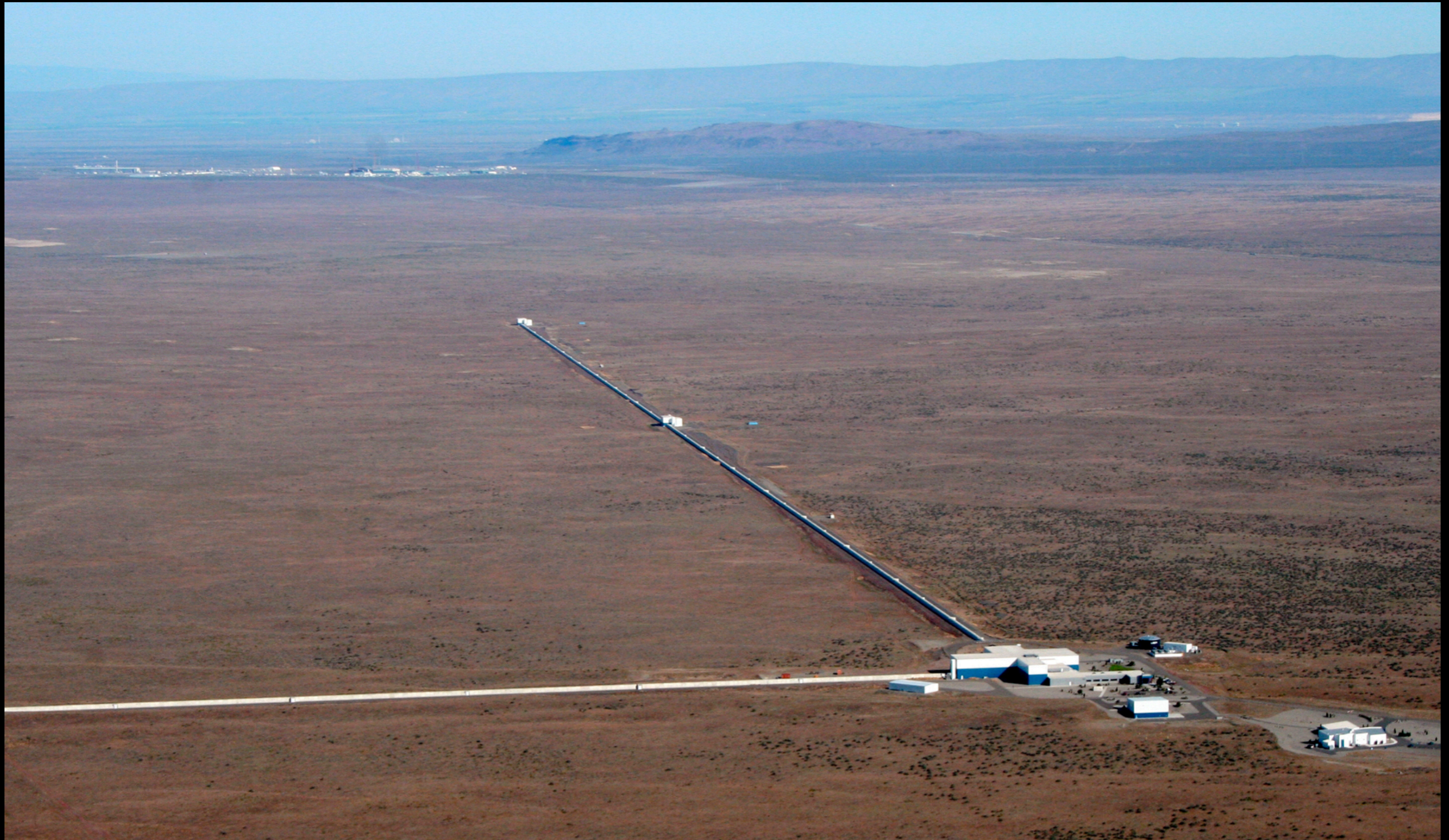


La evolución temporal de la amplitud y la frecuencia de la onda gravitacional nos dan **información sobre las masas de los agujeros negros** y la distancia.

# Detección de ondas gravitacionales: interferómetro láser

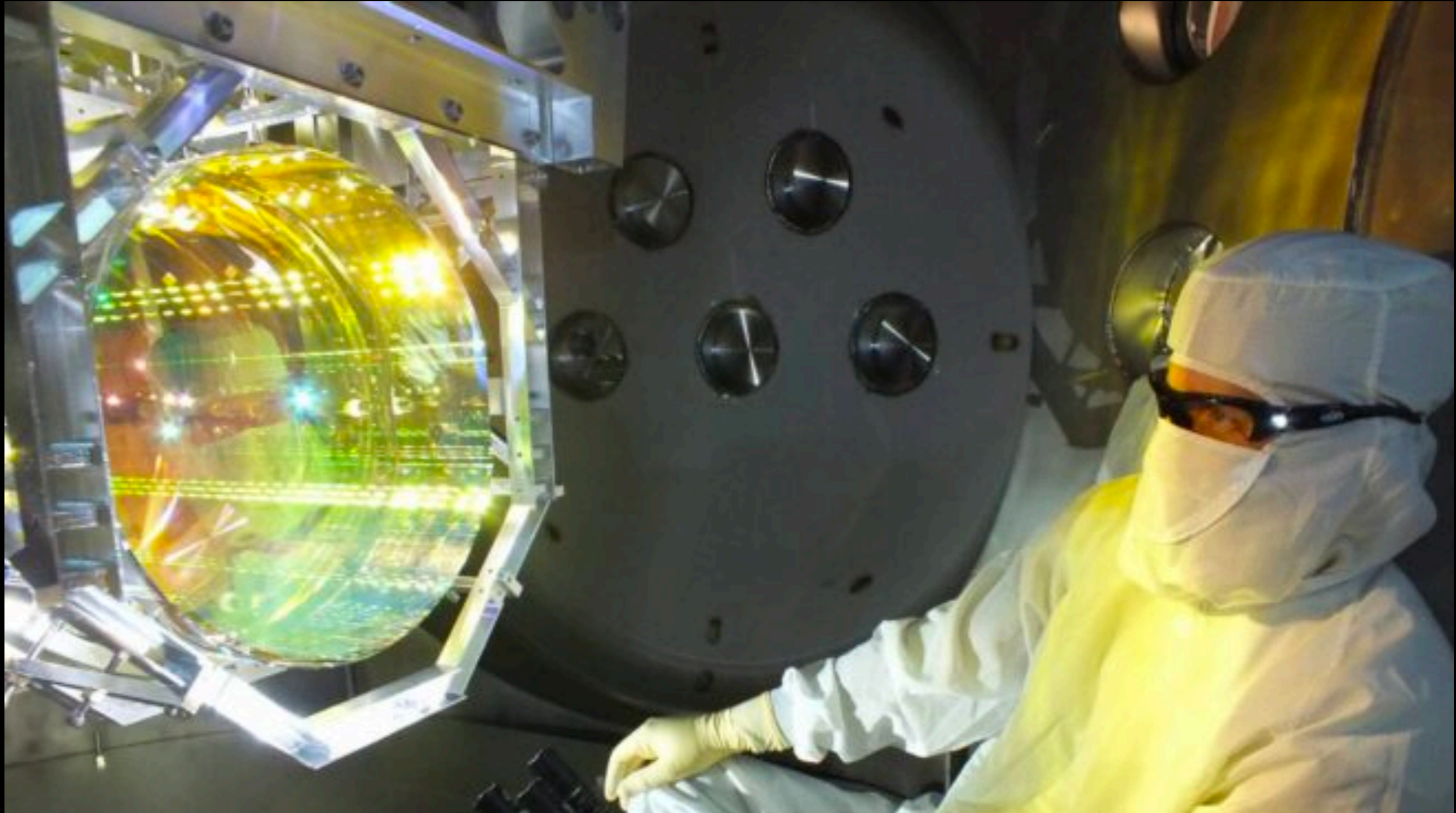


# LIGO: 2 detectores en EEUU



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

# LIGO: 2 detectores en EEUU



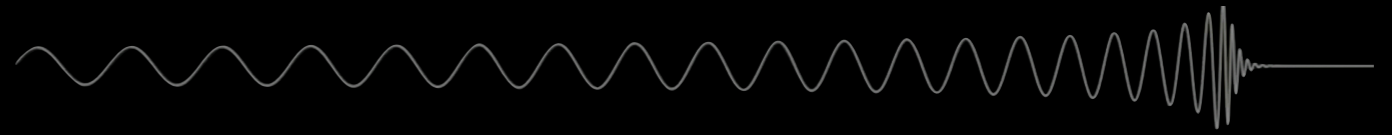
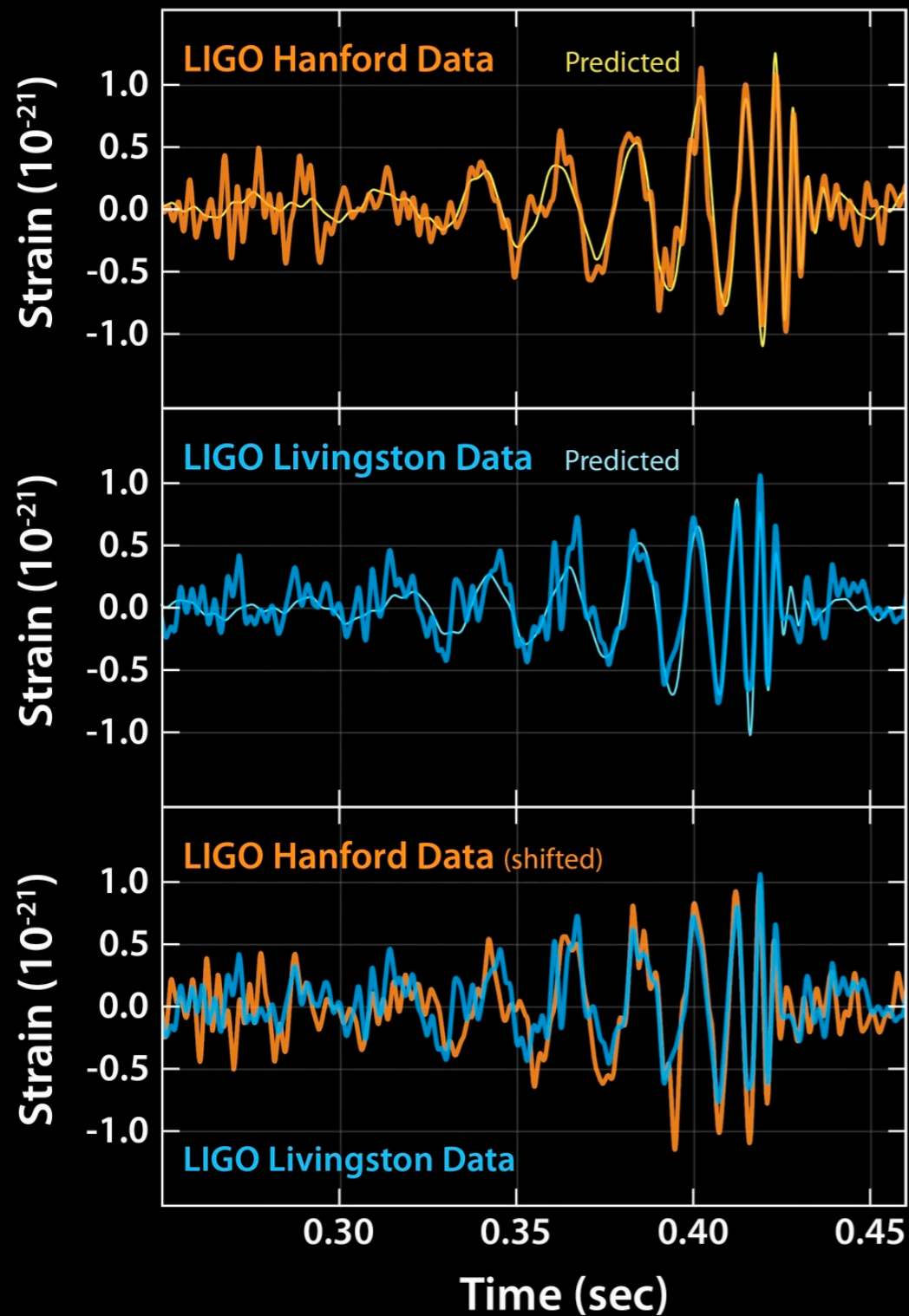
Uno de los espejos de LIGO

# Virgo: detector en EGO (Pisa)



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

# GW150914: la primera detección



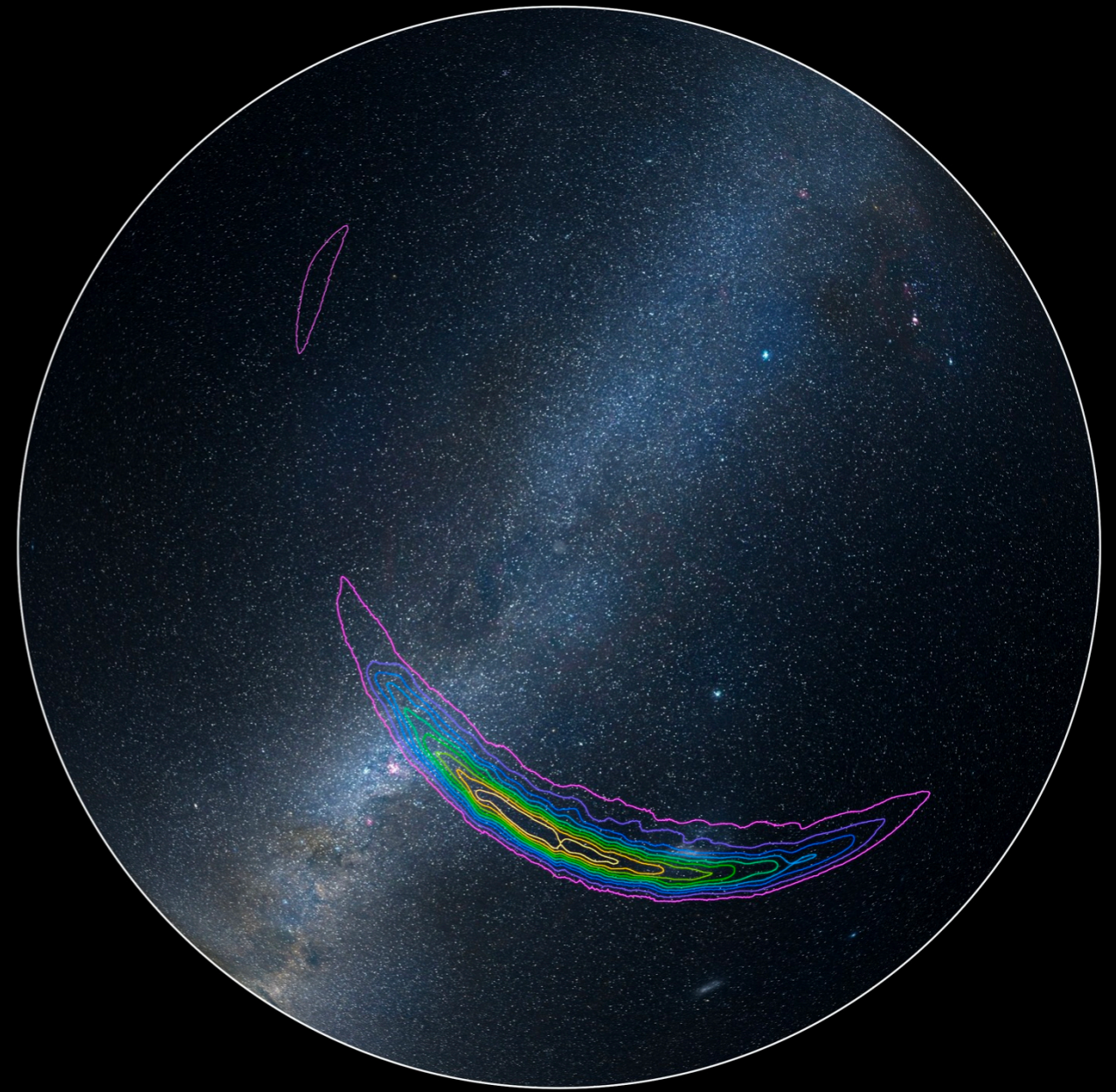
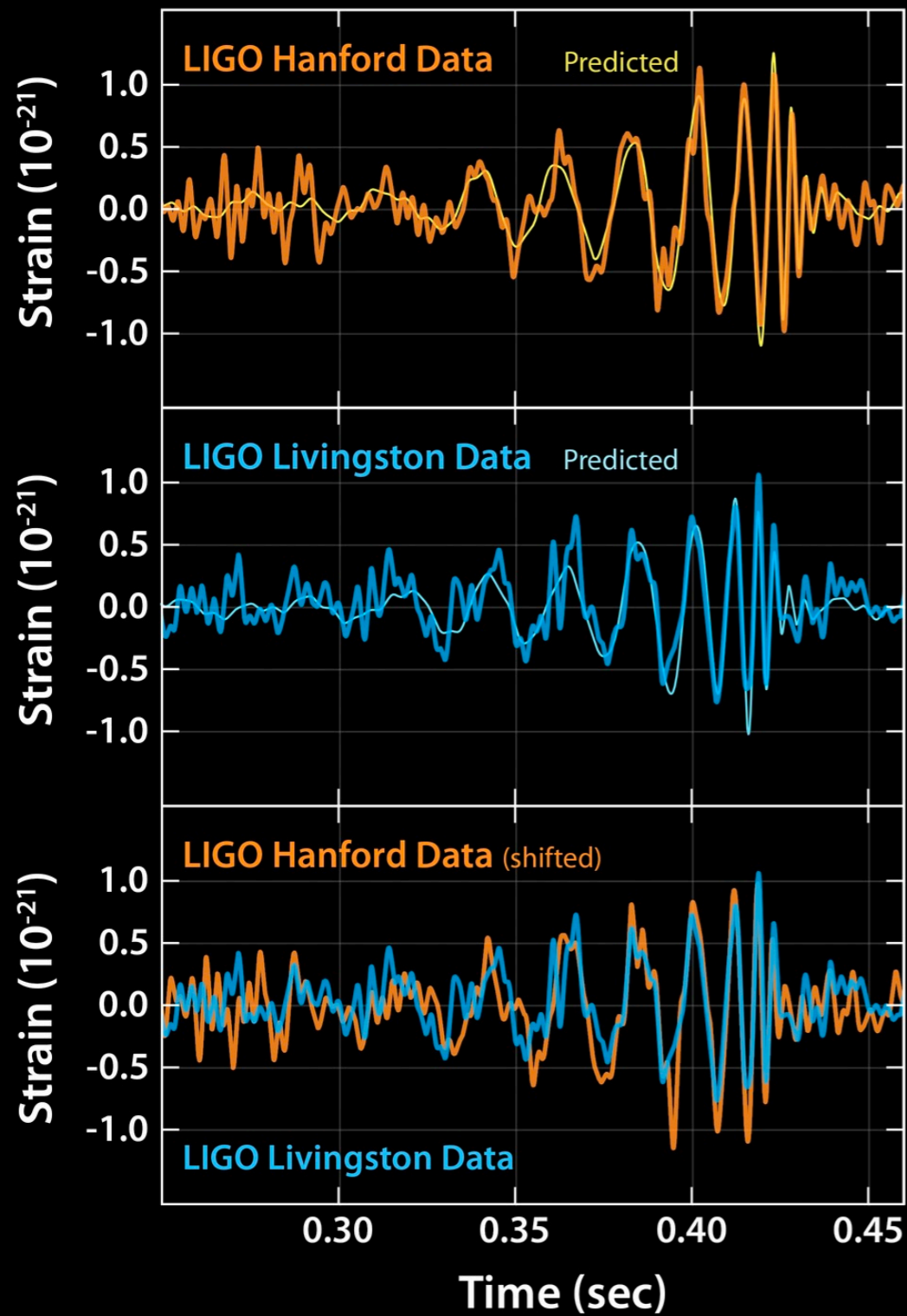
Fusión de dos agujeros negros.

Masas: 36 y 31  $M_{\odot}$ .

Energía liberada: 4  $M_{\odot}$ .

Distancia: 1400 millones años-luz.

# GW150914: la primera detección



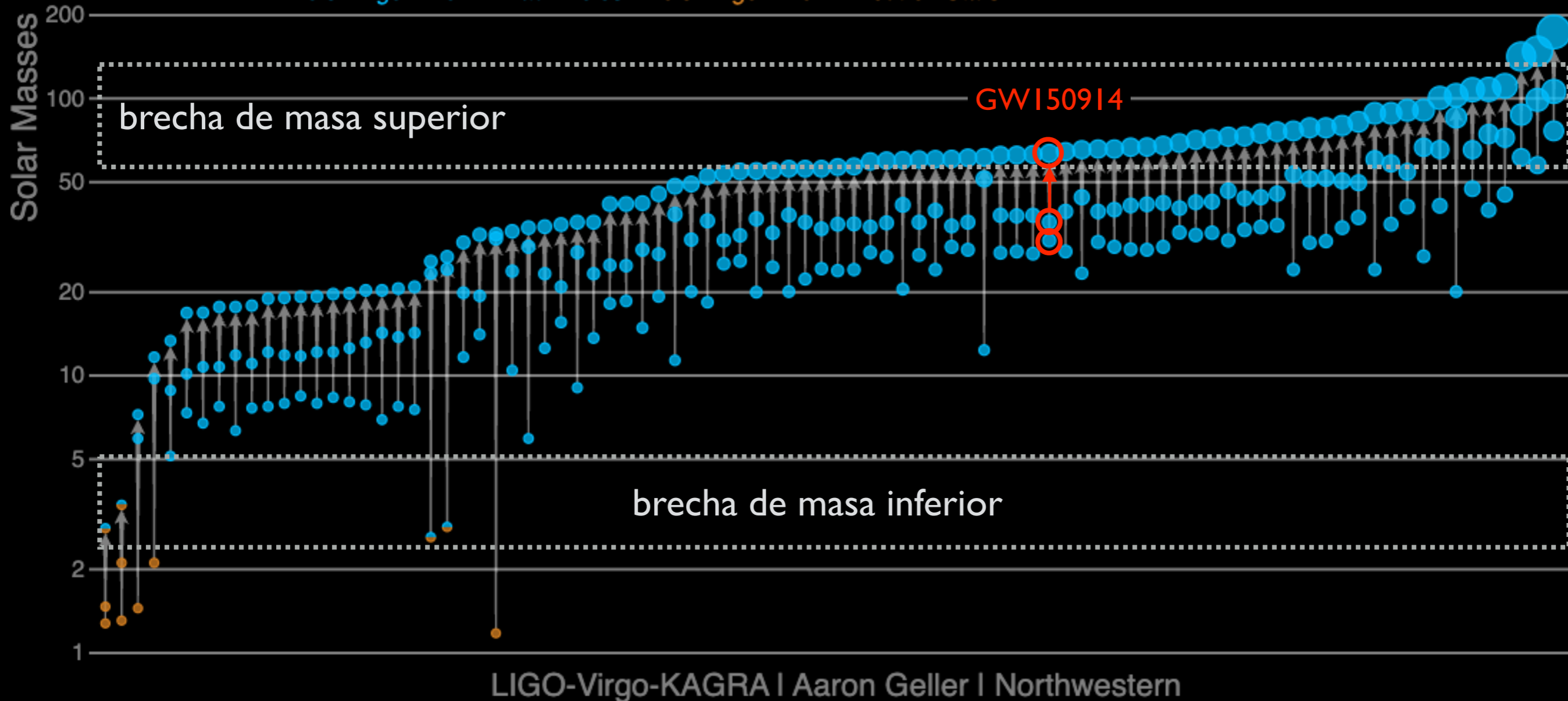
2017: Weiss, Barish, Thorne





# Masses in the Stellar Graveyard

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

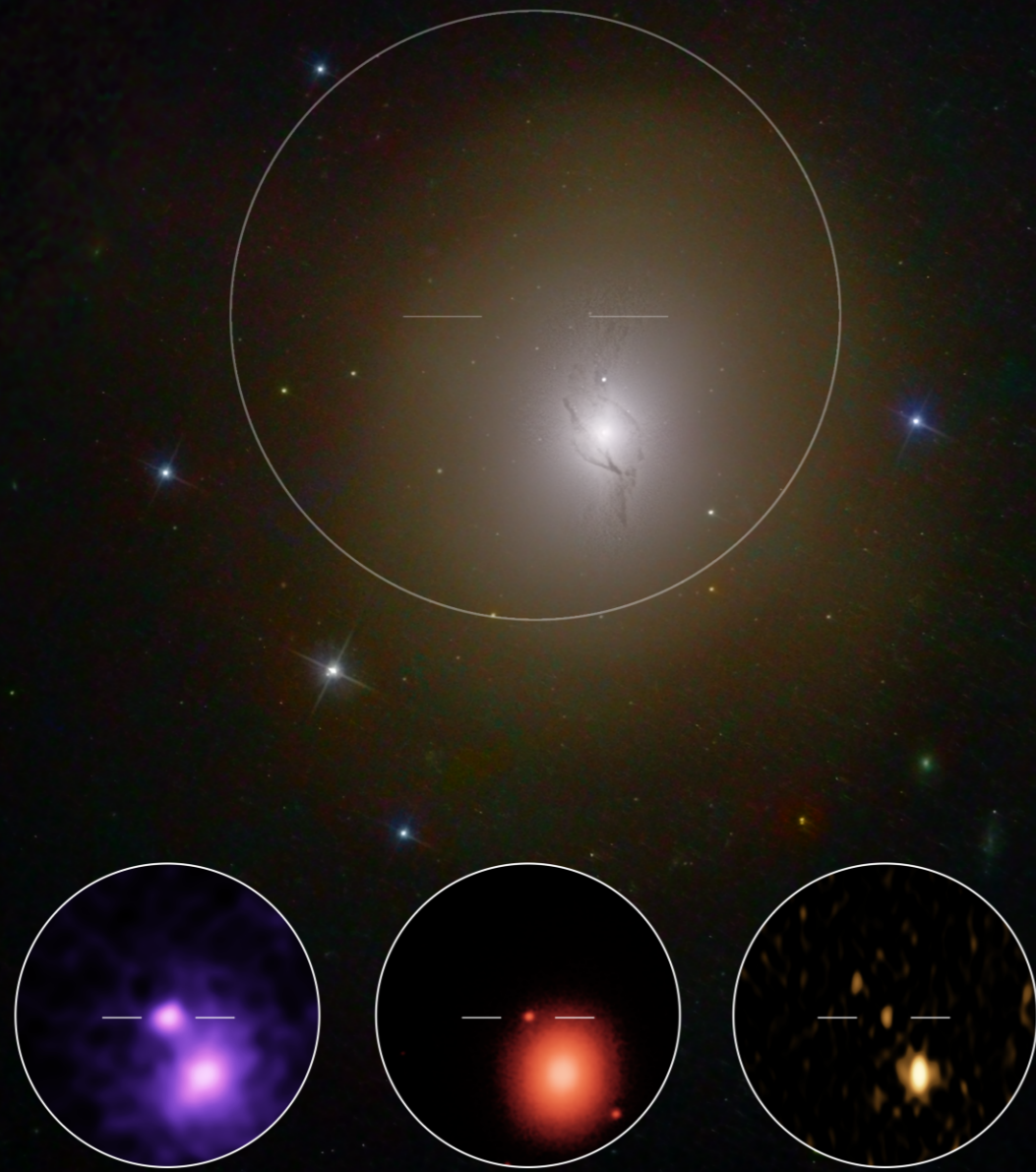


Si algunos de estos son **agujeros negros primordiales** podrían explicar (parte de) la **materia oscura** del Universo.

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

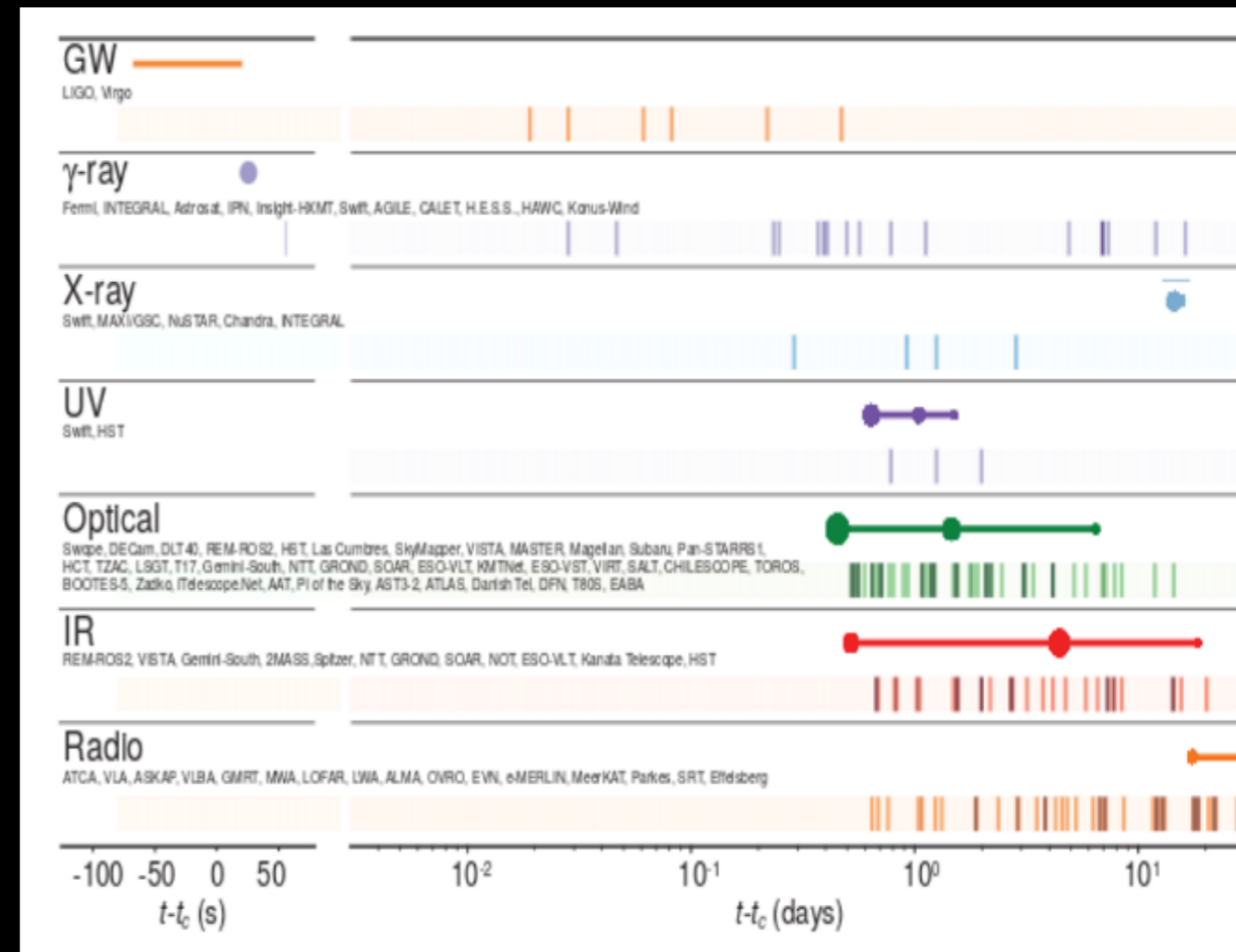
Observación en todas las bandas del espectro electromagnético:

Astrofísica de multi-mensajeros.



UV IR Radio

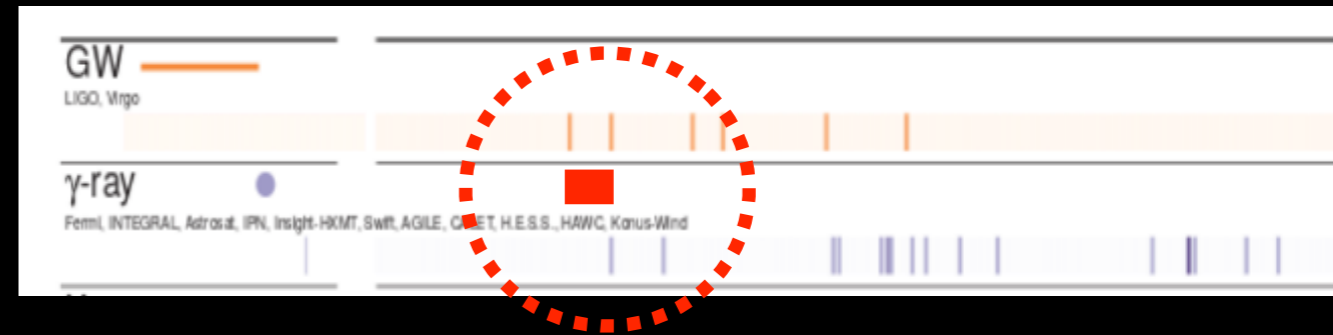
NGC 4993 (Hidra)



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

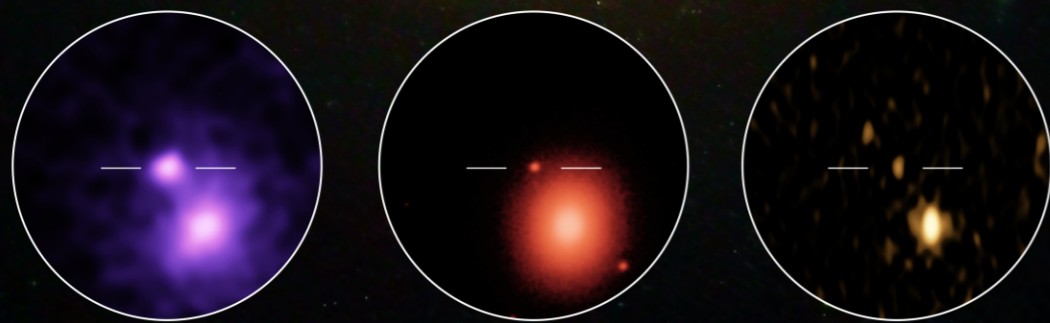
Observación en todas las bandas del espectro electromagnético:

Astrofísica de multi-mensajeros.



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.

### 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

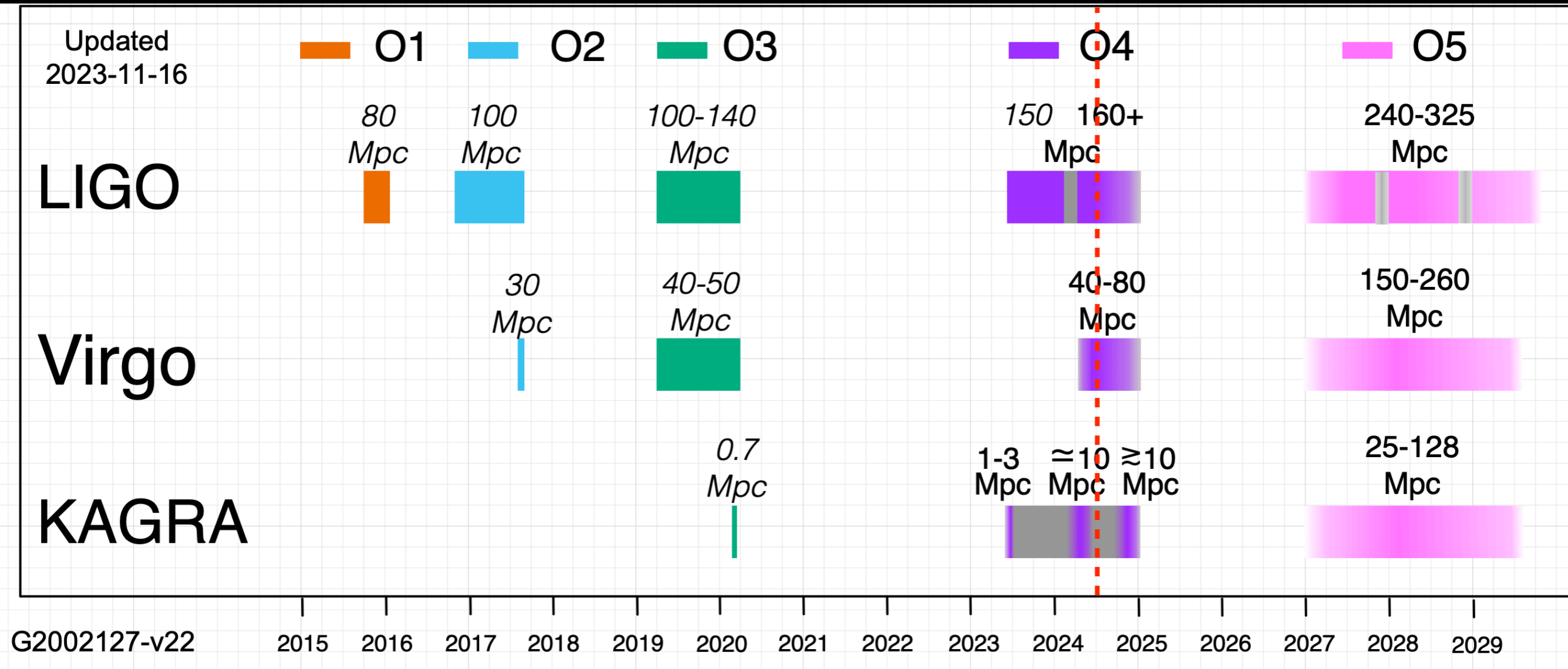
Based on graphic created by



UV IR Radio

NGC 4993 (Hidra)

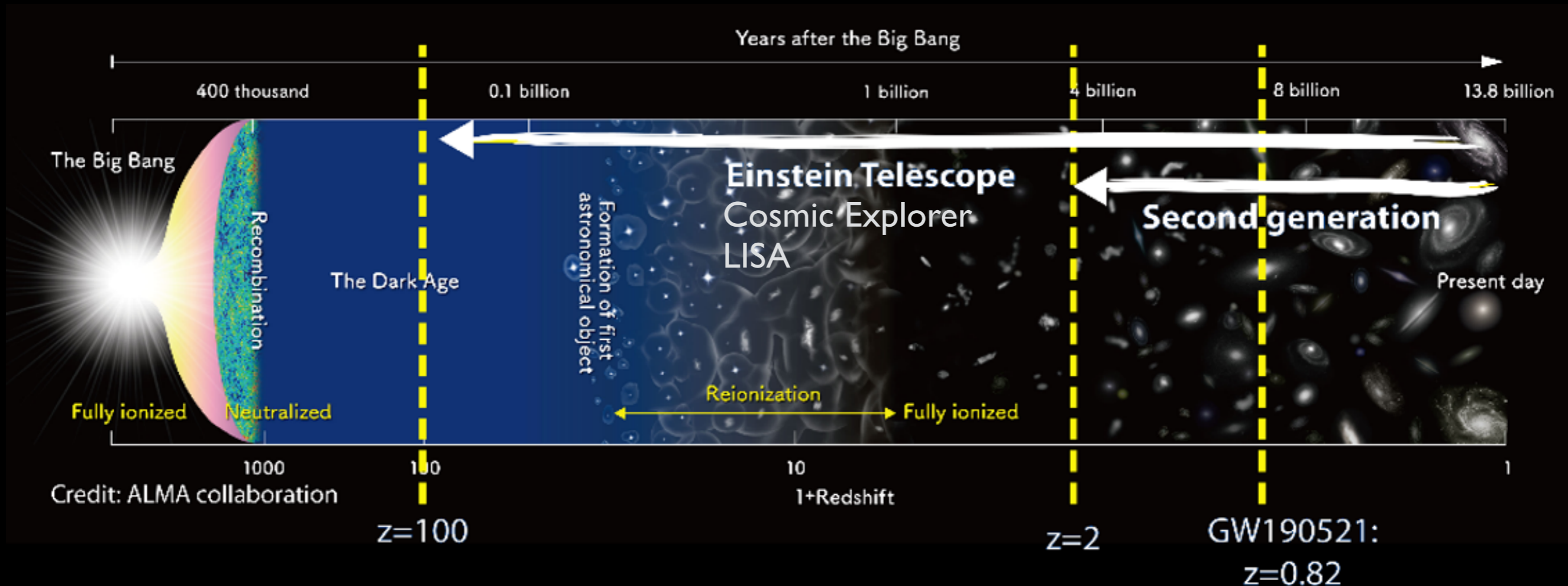
# Calendario de observación de ondas gravitacionales



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](mailto:pablo.garcia@ciemat.es)

