

Las ondas gravitatorias, el sonido del espaciotiempo

¿Qué son?
¿De dónde vienen?
¿Qué hacen?
¿Por qué son
interesantes?

Tomás Ortín Miguel

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC





Todos hemos oído que **LIGO** y
VIRGO han
detectado algo llamado *ondas*
gravitacionales.

- 
- ¿Qué son?
 - ¿De dónde vienen?
 - ¿Qué hacen?
 - ¿Por qué son interesantes?

Ideas principales

- **La gravedad gobierna el Universo.**
- **Ninguna señal se transmite instantáneamente.**
- **La velocidad máxima es la de la luz, y es igual para todos.**

- **Todo se mueve igual bajo el efecto de la gravedad.**
- **La luz también siente la gravedad.**
- **Todos los cambios generan ondas (sonido, radio, gravitación).**
- **Las ondas propagan esos cambios y nos permiten conocerlos a distancia.**

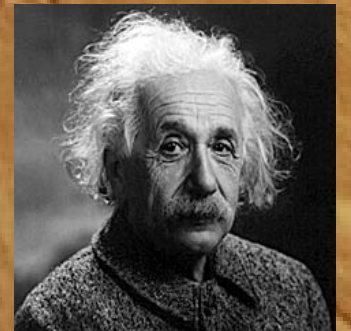
Plan de la charla

- **La velocidad de la luz y la Relatividad Especial**
- **La gravedad y la Relatividad General**
- **Ondas: cómo producirlas y detectarlas.**
- **LIGO, VIRGO y las ondas gravitatorias**
- **Colisiones de agujeros negros y de estrellas de neutrones.**

LA RELATIVIDAD ESPECIAL

Principio de Relatividad Especial (Einstein 1905)

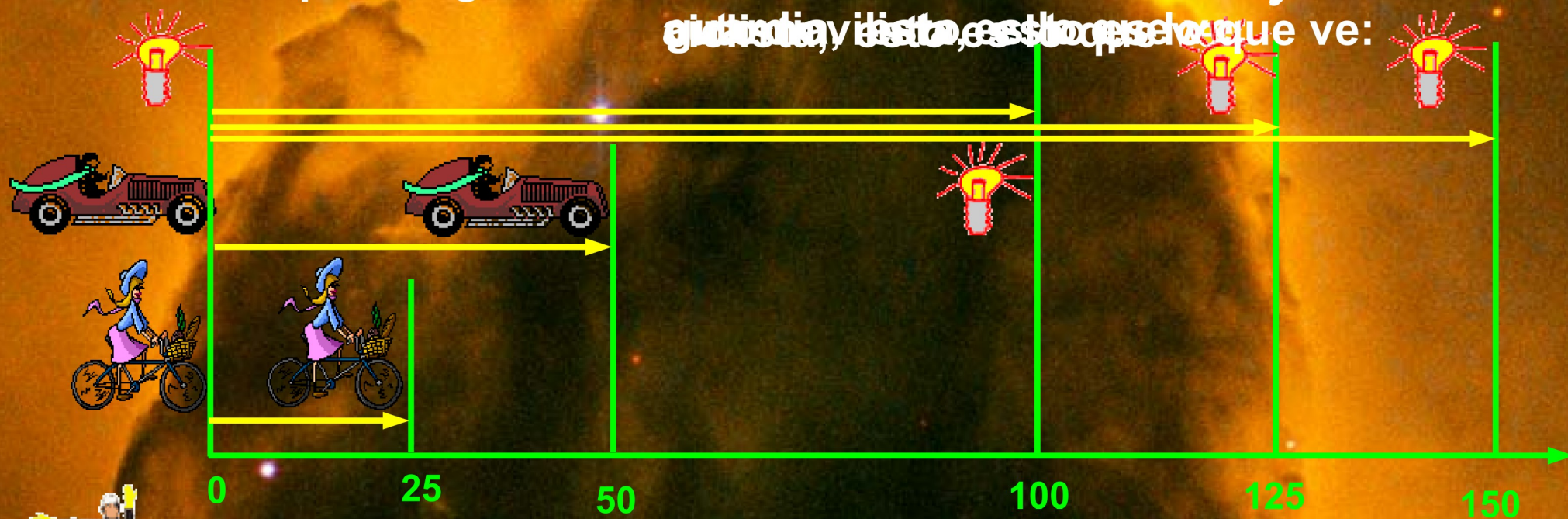
Una ley muy especial: la velocidad de la luz.



Consecuencias sólo 100 Kms/h.

Una ciclista que se desplaza con una velocidad de $c/4$ (25 Kms/h) y un automóvil que se desplaza a una velocidad de $c/2$ (50 Kms/h) parten a la vez que un rayo de luz del semáforo, observados por un guardia.

Al cabo de una hora del reloj del guardia y visto, esto es lo que ve:

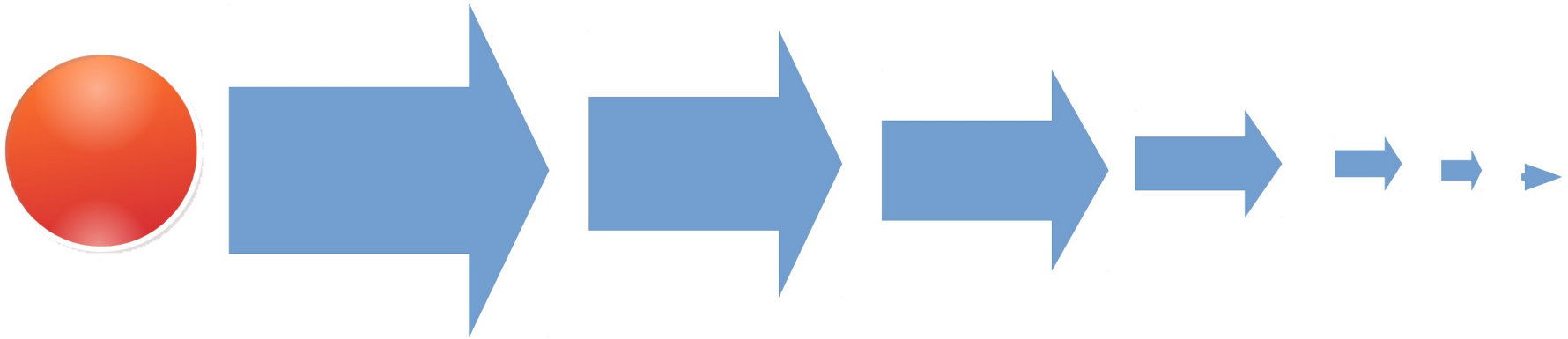


Los relojes y las reglas del guardia, el ciclista y el automovilista son distintos (**relatividad**). Más diferentes cuanto mayor es la velocidad relativa. Con respecto a la luz siempre ha de ser c y nunca se puede alcanzar esa velocidad, que es **máxima**.

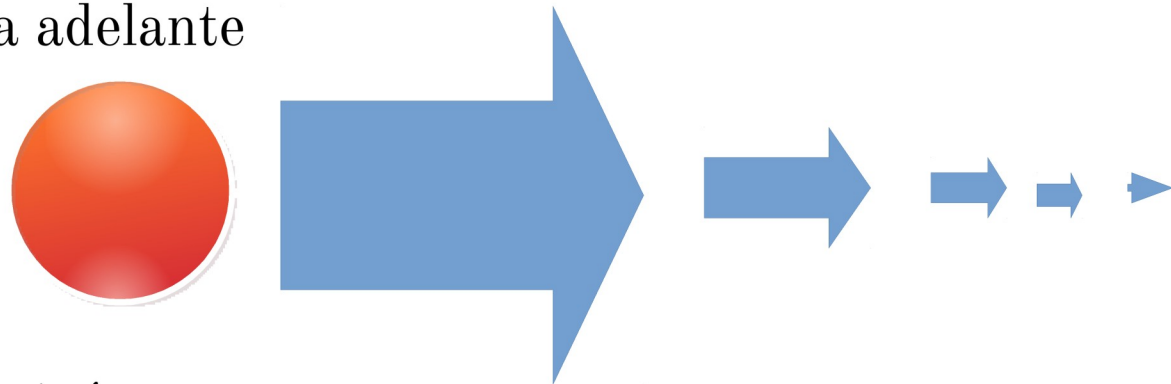
- Medimos tiempos y distancias diferentes, pero sabemos relacionar nuestras medidas (¿qué es la realidad?)
- Podemos *congelar* el tiempo.
- Nada (objetos, señales, información) puede viajar más rápido que la luz.
- No existen los sólidos rígidos.
- Todo se propaga necesariamente como una onda.
- Masa y energía son lo mismo.

$$E = m c^2$$

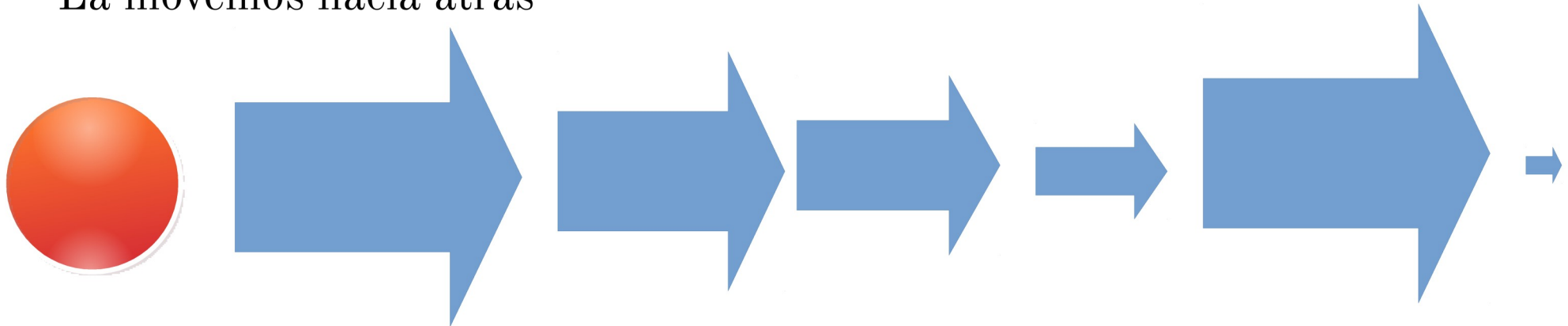
Campo eléctrico de una carga



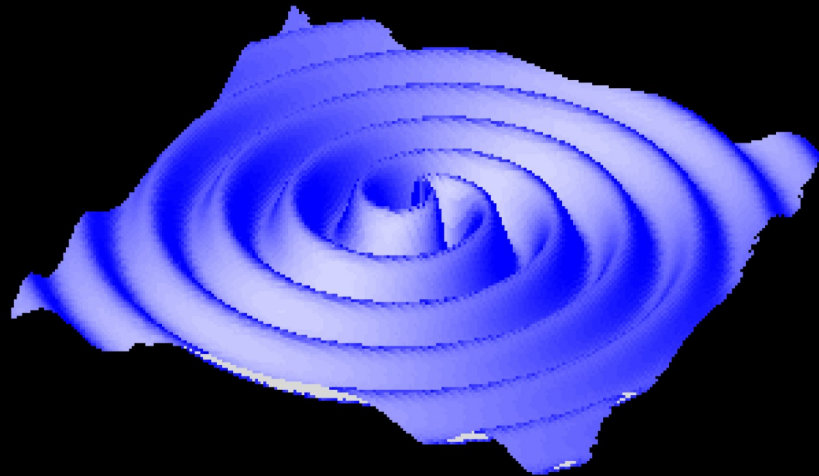
La movemos hacia adelante




La movemos hacia atrás



- **El cambio en la posición de la carga cambia el campo eléctrico.**
- **El cambio en el campo eléctrico no se nota instantáneamente: se propaga a velocidad c .**
- **Si el cambio es periódico (carga en péndulo o girando) generamos una onda electromagnética (leyes de Maxwell).**



The background is a piece of marbled paper with a complex, organic pattern. It features a large, central, circular swirl in shades of brown and tan, surrounded by more intricate, swirling patterns in various tones of brown, tan, and grey. The overall effect is that of a natural, flowing texture.

Todas las ondas se generan y propagan esencialmente igual.

Sólo varía su naturaleza y el medio en que se propagan.

Las características de la onda dependen del cambio que las originó.

La amplitud o intensidad es proporcional a la magnitud del cambio y a la energía.

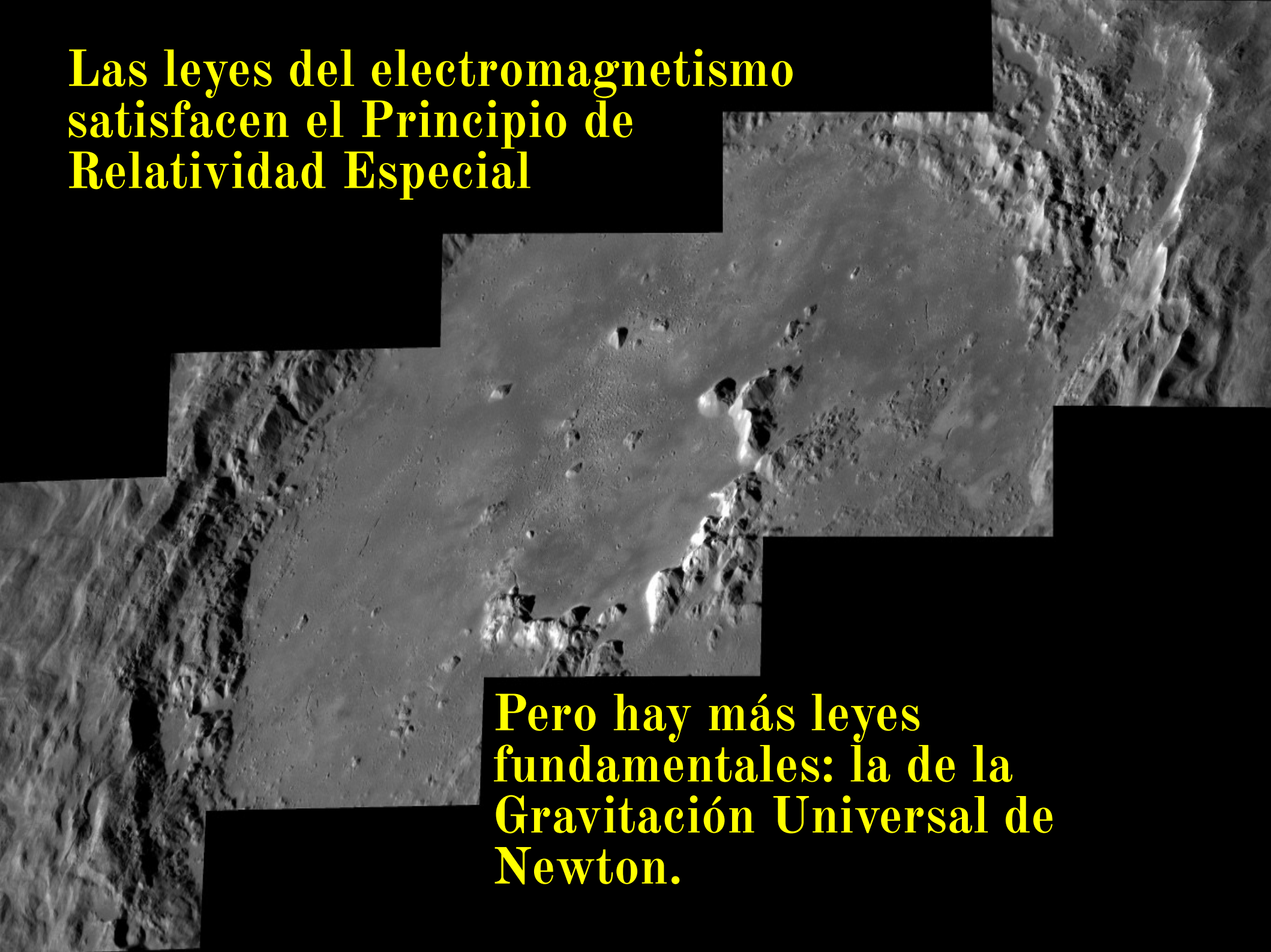
Decrece con el cuadrado de la distancia recorrida.

Al llegar la onda produce ese cambio con la intensidad correspondiente.

Detectar (“oír”, “ver”) la onda es ser sensible al cambio.


**Las leyes del electromagnetismo
satisfacen el Principio de
Relatividad Especial**

**Pero hay más leyes
fundamentales: la de la
Gravitación Universal de
Newton.**



Gravitación Universal: la gravedad es una fuerza atractiva entre objetos con masa que decrece con el cuadrado de la distancia.

La gravedad es la más débil de las fuerzas conocidas (10^{-39} en un átomo), aunque gobierna el Universo.

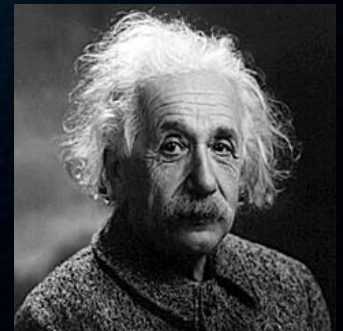


La Gravitación Universal está incompleta: no nos dice qué pasa cuando las masas se mueven.

**La Ley de la Gravitación
Universal de Newton no obedece
el Principio de Relatividad
Especial.**

**Hace falta una nueva teoría
relativista de la Gravitación:
la Relatividad General.**

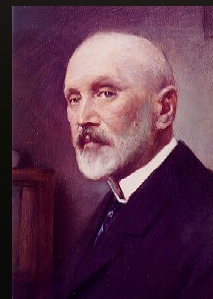
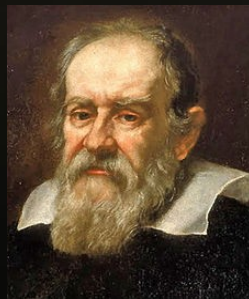
(Hilbert, Einstein 1915)



La nueva teoría parte de un nuevo principio:

Principio de Equivalencia (de la gravedad y la inercia)

(Simon Stevin 1586, Galileo Galilei 1638, Loránd Eötvös, 1885,
Robert H. Dicke 1964...)



Principio de Equivalencia

- Todas las cosas caen igual en un campo gravitatorio: véase

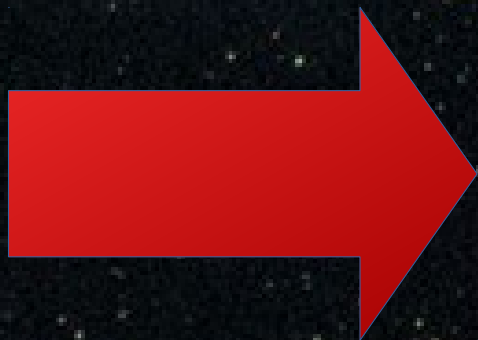


TWO



Principio de Equivalencia

- Todas las cosas caen igual en un campo gravitatorio: véase
- Para alguien que cae libremente, no hay campo gravitatorio (ascensores y cohetes)



**El campo gravitatorio
no es una fuerza ordinaria**

Conclusión:
la gravedad altera
las medidas del tiempo y el espacio y que todo
se mueve en línea recta en ese espaciotiempo
de medidas alteradas.

Espaciotiempo
curvo

La clave es la curvatura del tiempo

ct

ct

Pero si una masa curva el tiempo...

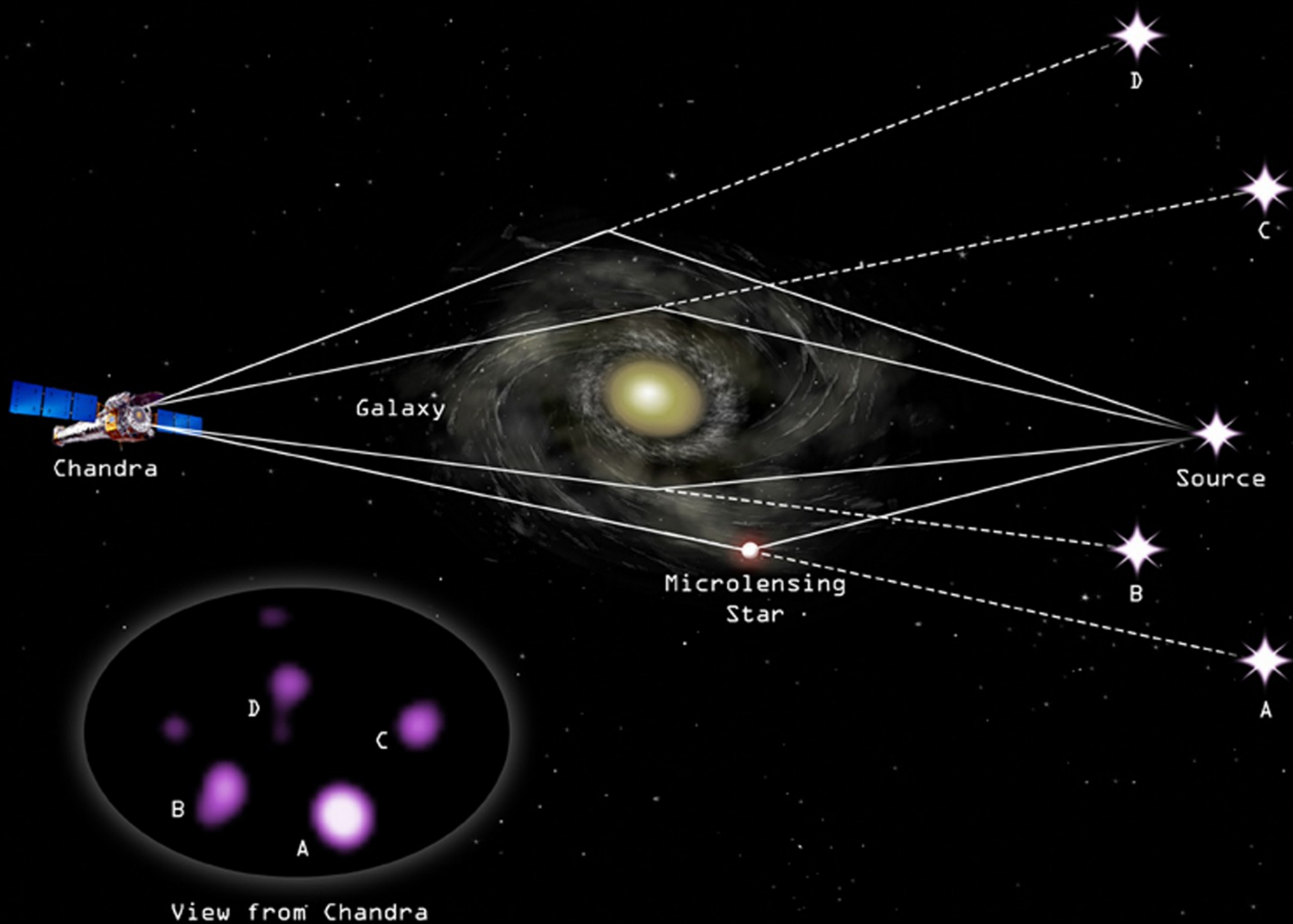
d

¡El movimiento nos parece decelerado!

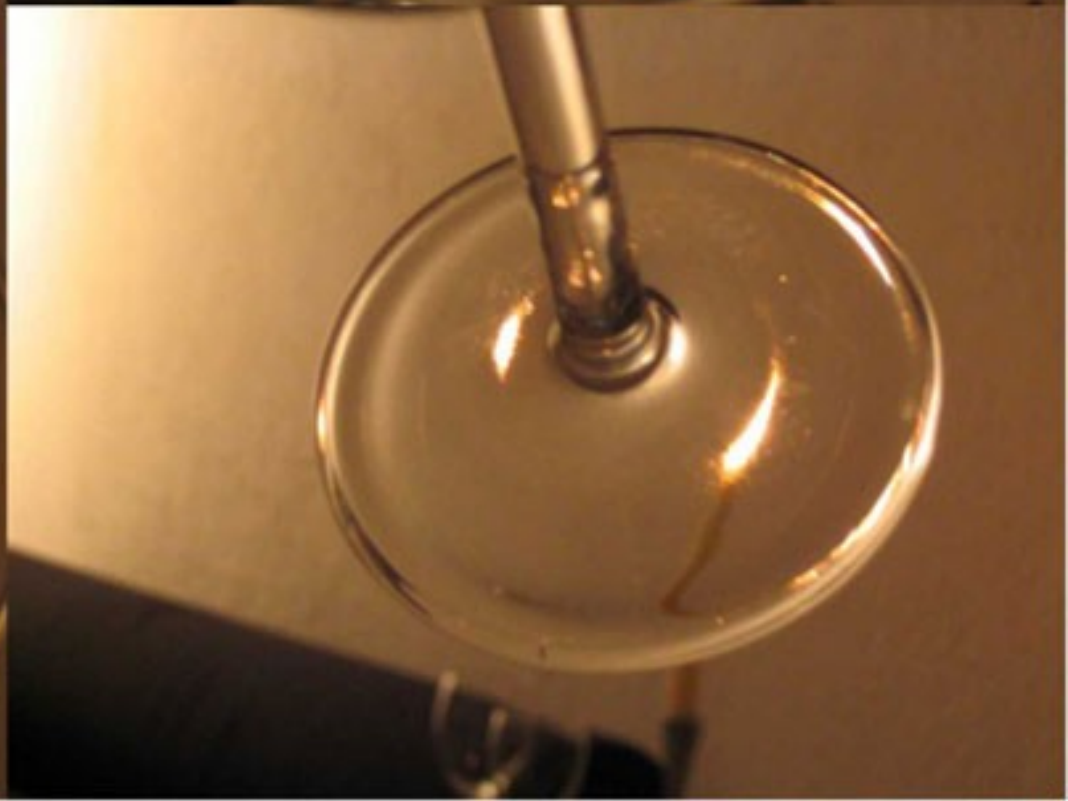


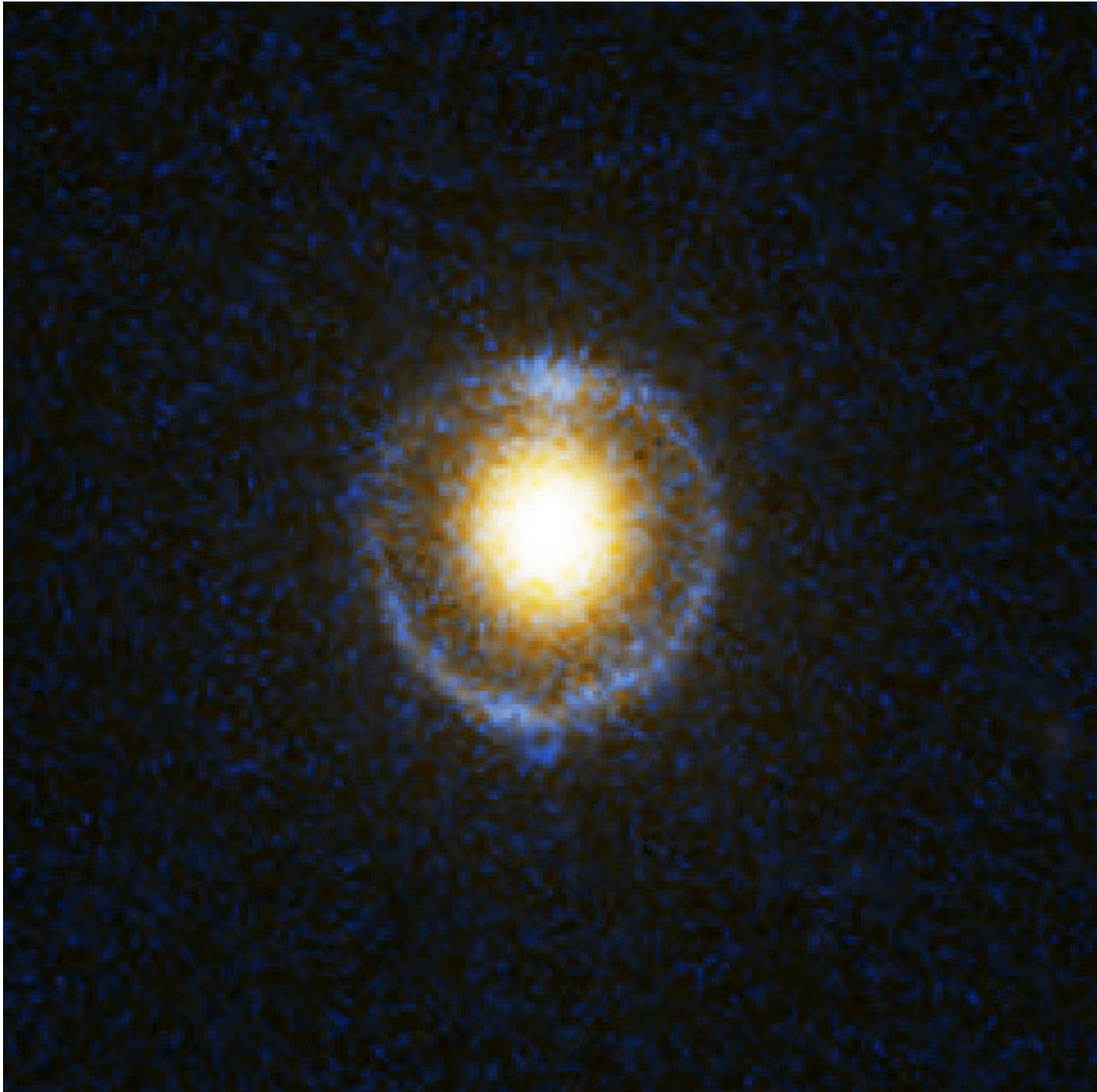
**El Principio de Equivalencia
también nos dice que la luz
(como todo)
siente la gravedad.**















ONDAS GRAVITATORIAS

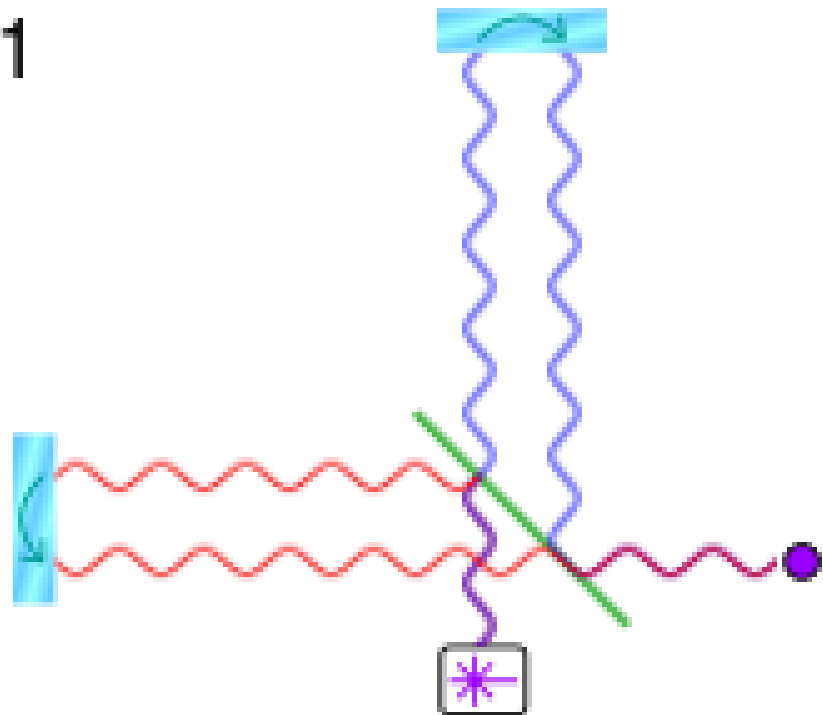
- Producidas por cambios de posición de masas.
- A su paso cambian las medidas del espaciotiempo.
- Para poder detectarlas:
 - Cambios bruscos de masas enormes
 - Cercanos
 - Detector de sensibilidad extrema



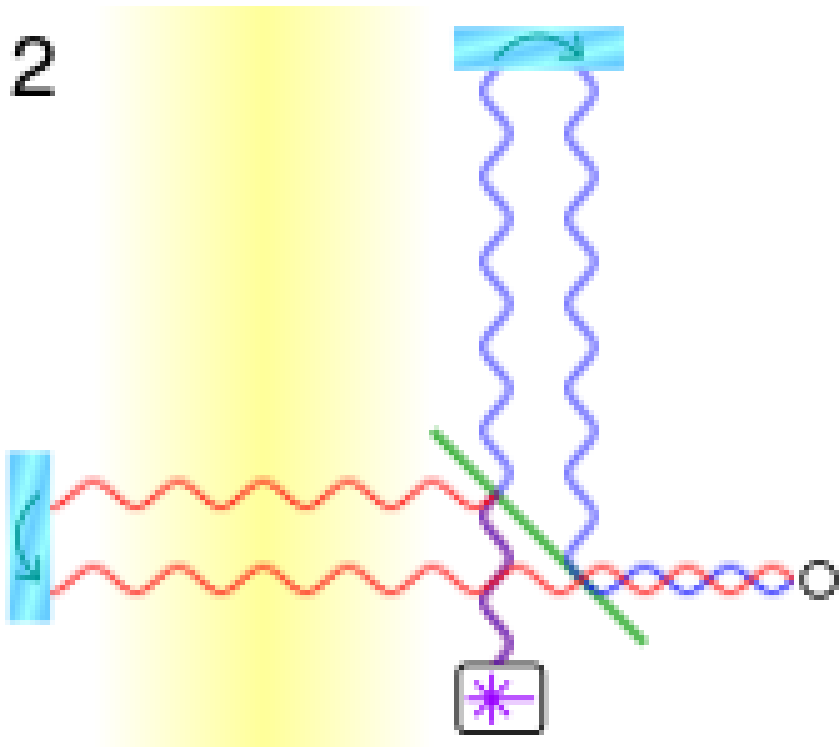
EL DETECTOR: REGLA Y RELOJ

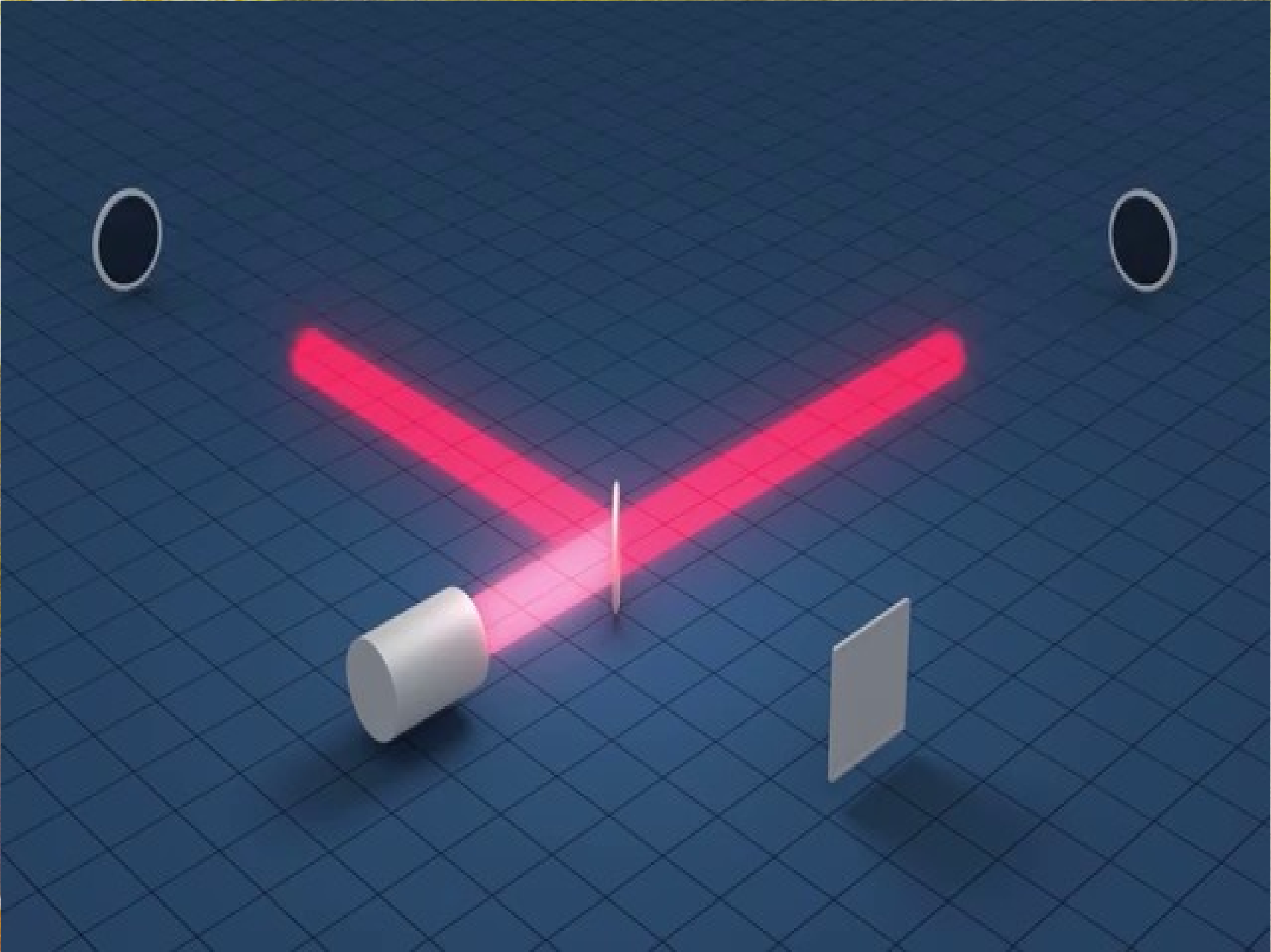


1



2





**No se puede identificar nada
cuya “imagen” o “sonido” no se
conozca de antemano.**

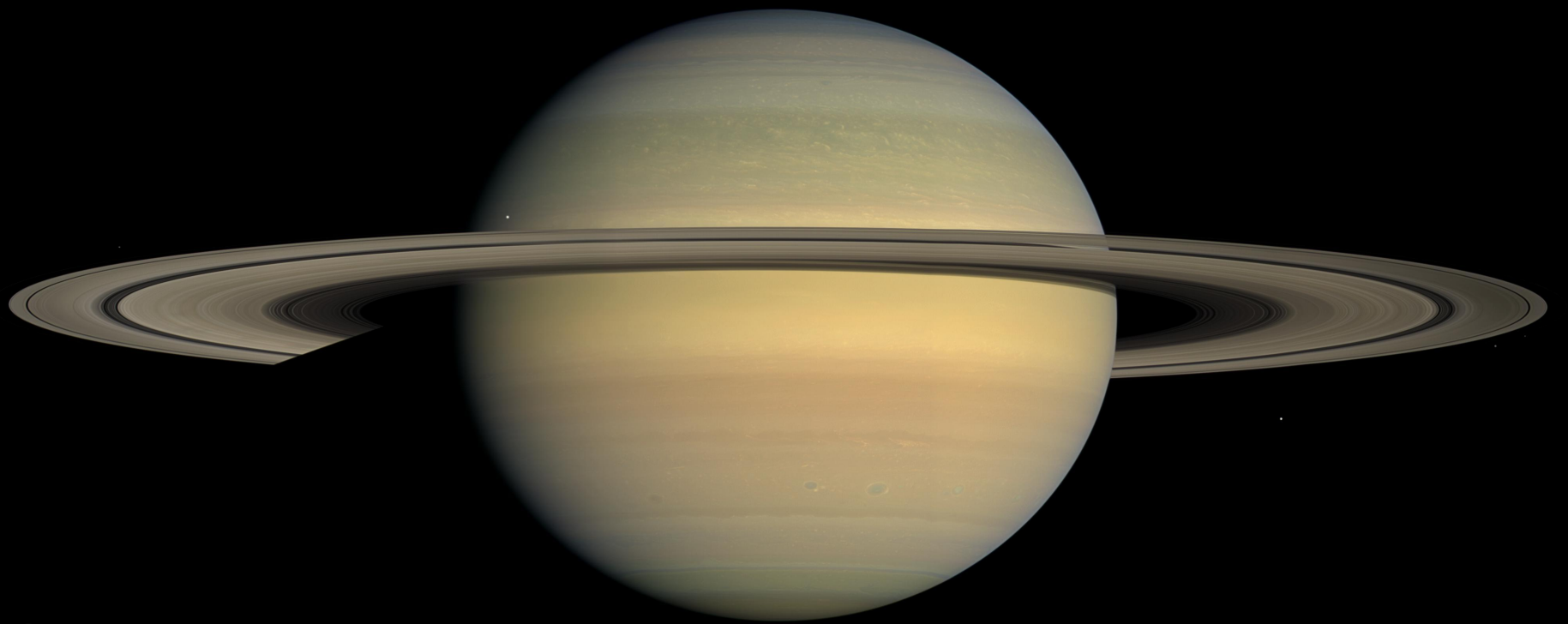


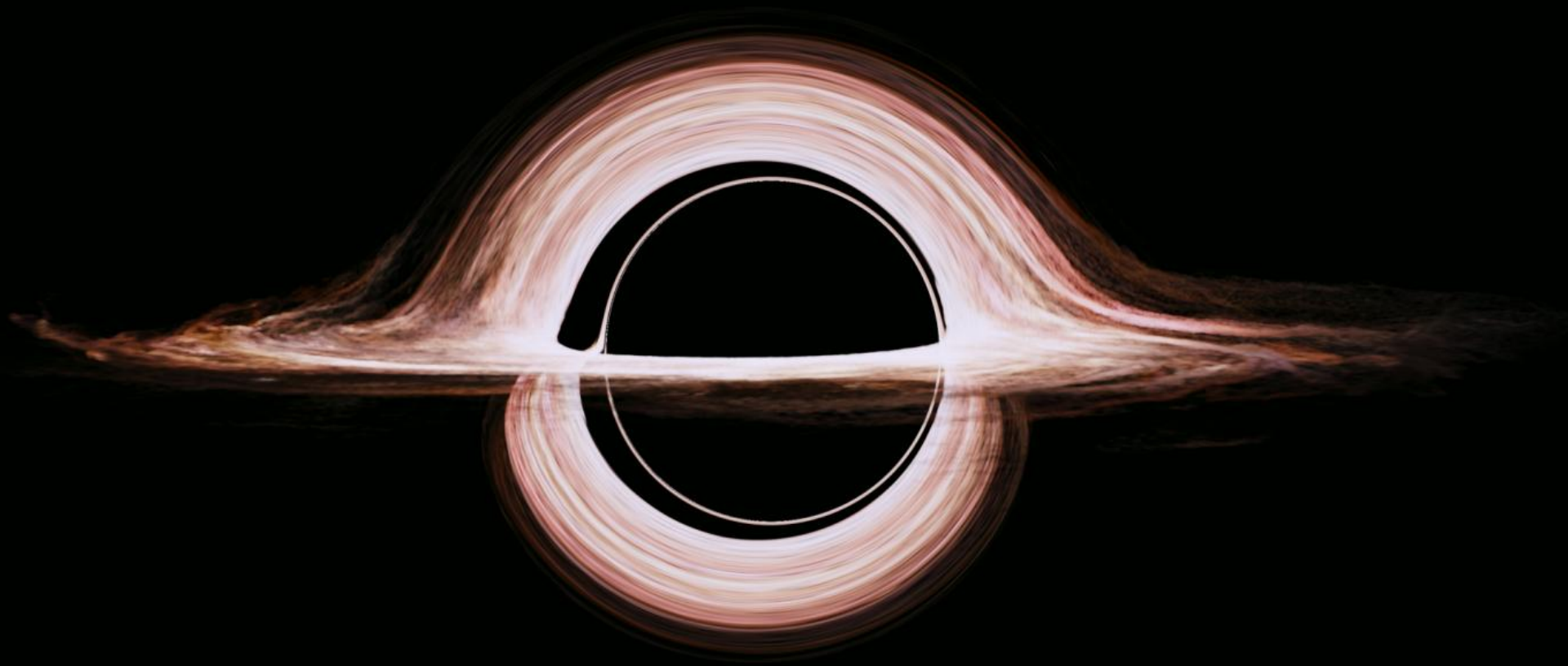
**Hay que simular en
ordenadores
los cambios más
bruscos e
intensos concebibles.**

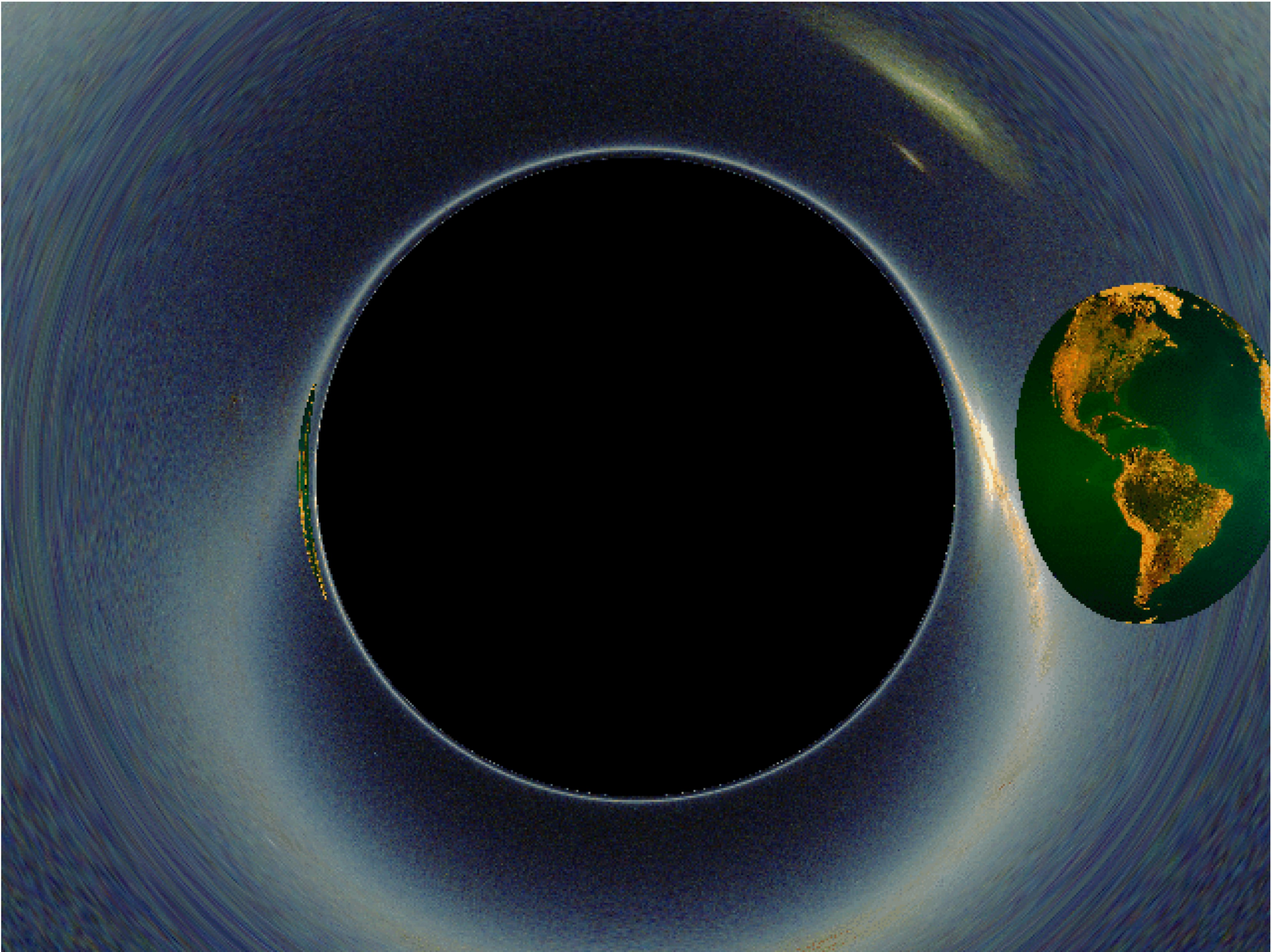


**CHOQUES DE AGUJEROS
NEGROS**

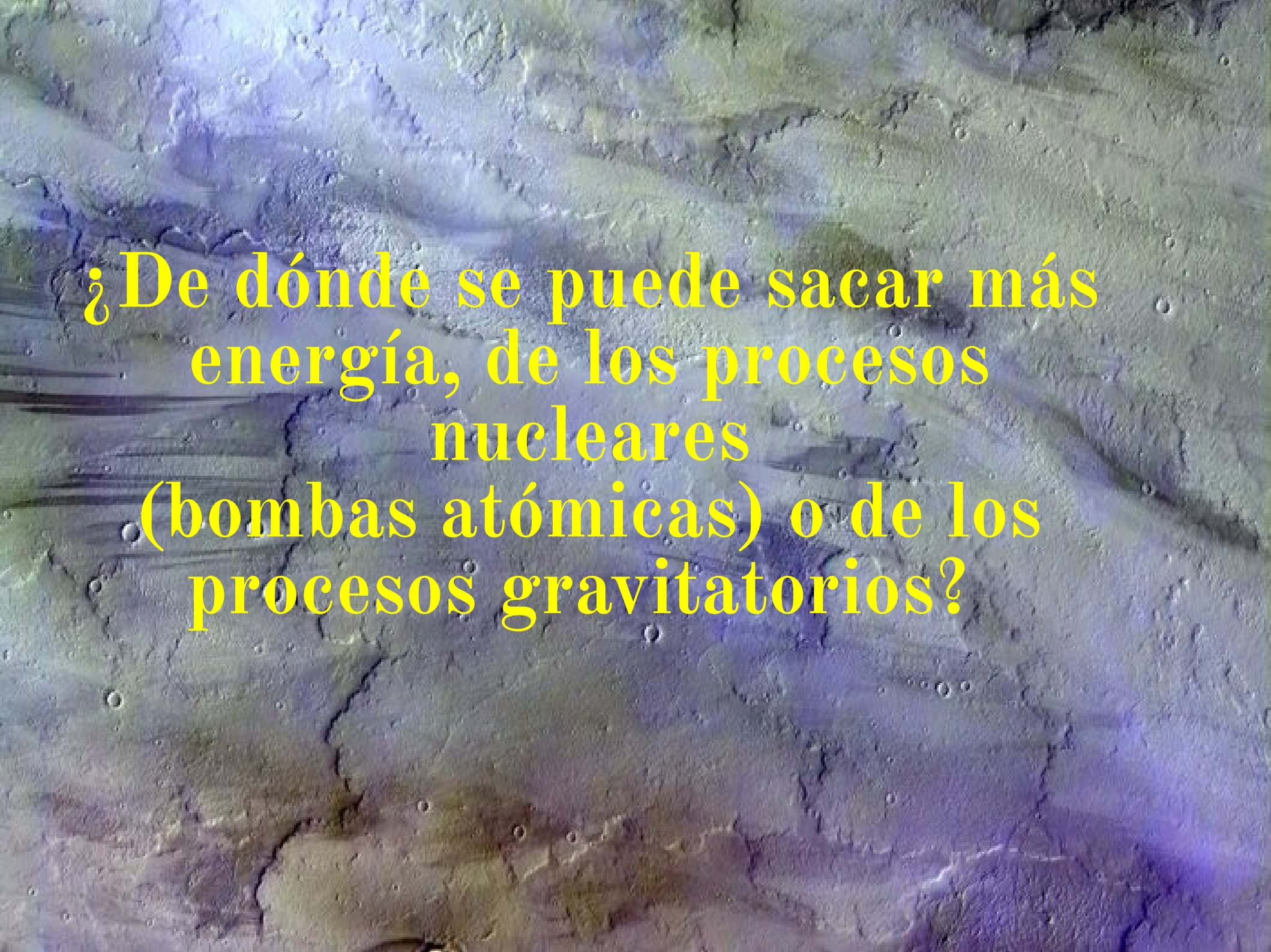
- Gran masa en muy poco volumen
- Delimitado por una “burbuja” en la que se puede entrar pero nada puede salir (*horizonte*)
- La distorsión del espaciotiempo cerca del horizonte es enorme: luz en órbita.





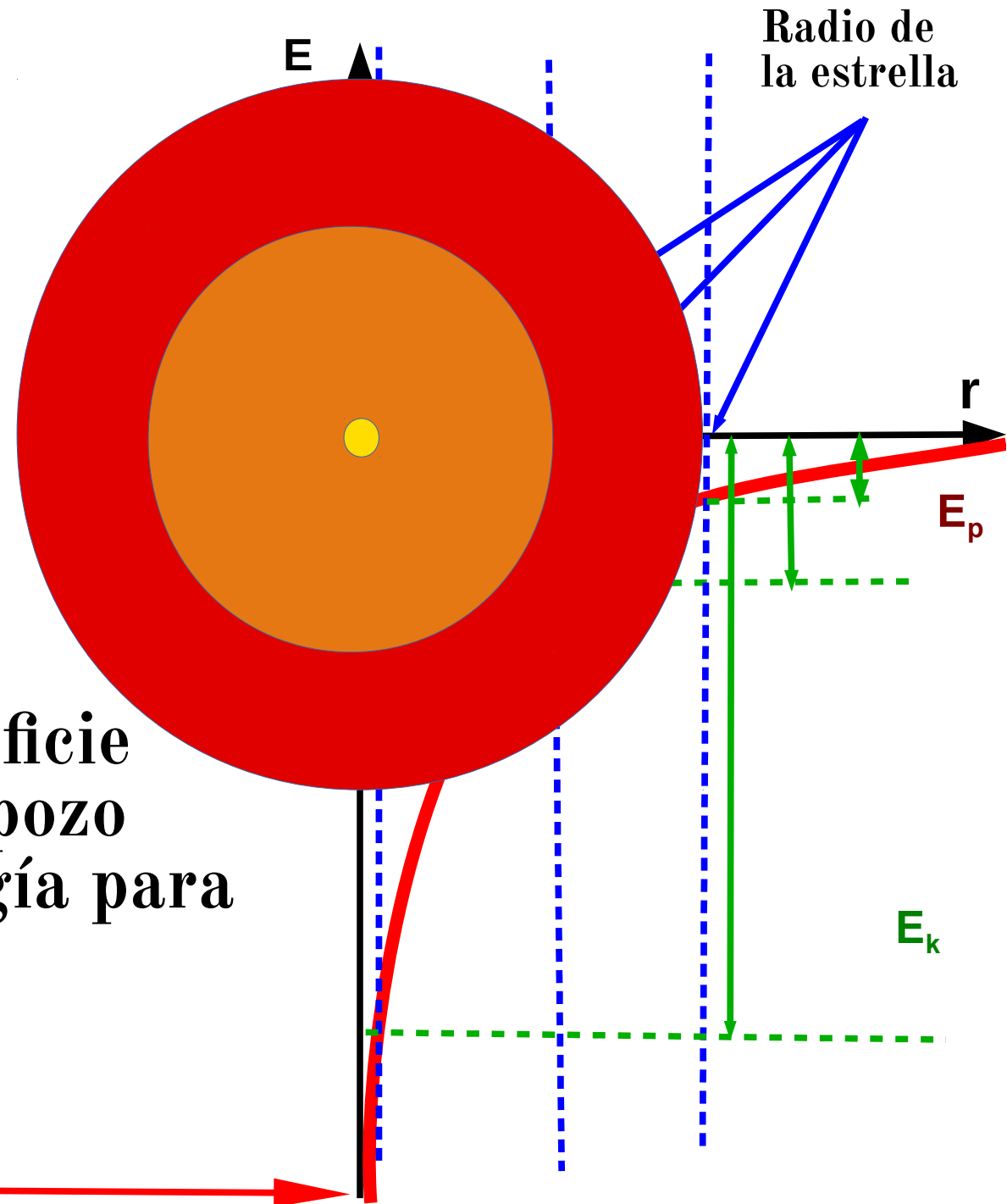






¿De dónde se puede sacar más energía, de los procesos nucleares (bombas atómicas) o de los procesos gravitatorios?

Una estrella crea un
“pozo de energía
gravitatoria
a su alrededor
con esta forma:



Si se contrae, la superficie
está más al fondo del pozo
y hace falta más energía para
salir.

Singularidad de Newton

Pero, ¿realmente existen?

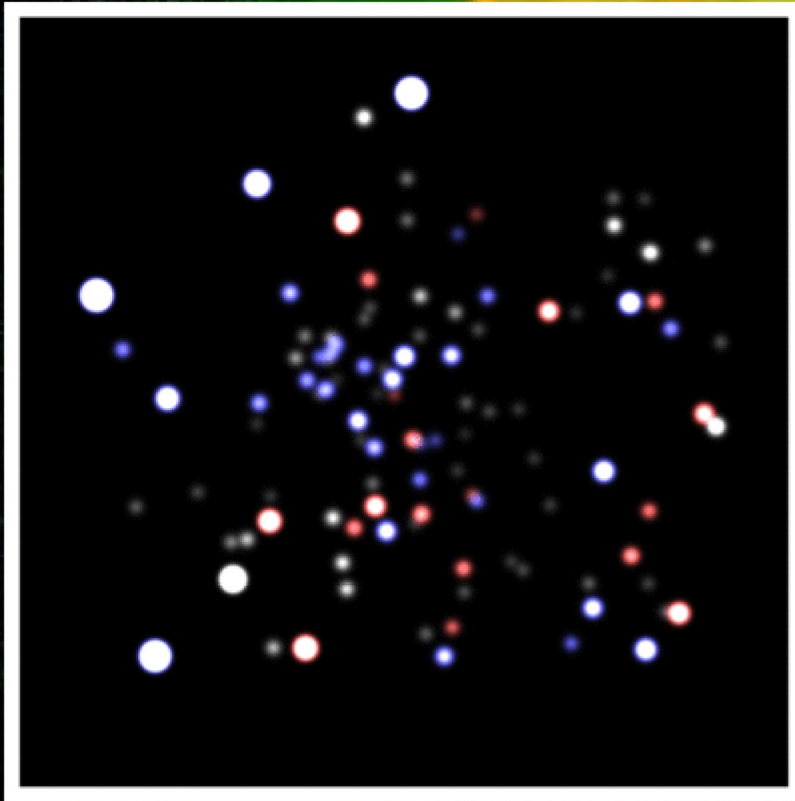
Por sus efectos los reconoceréis.

**Hasta hace un año, sólo
agujeros negros supermasivos
en núcleos de galaxias**

$M \sim 1.000.000 M_S$

Evidencia: el agujero negro supermasivo de la Vía Láctea

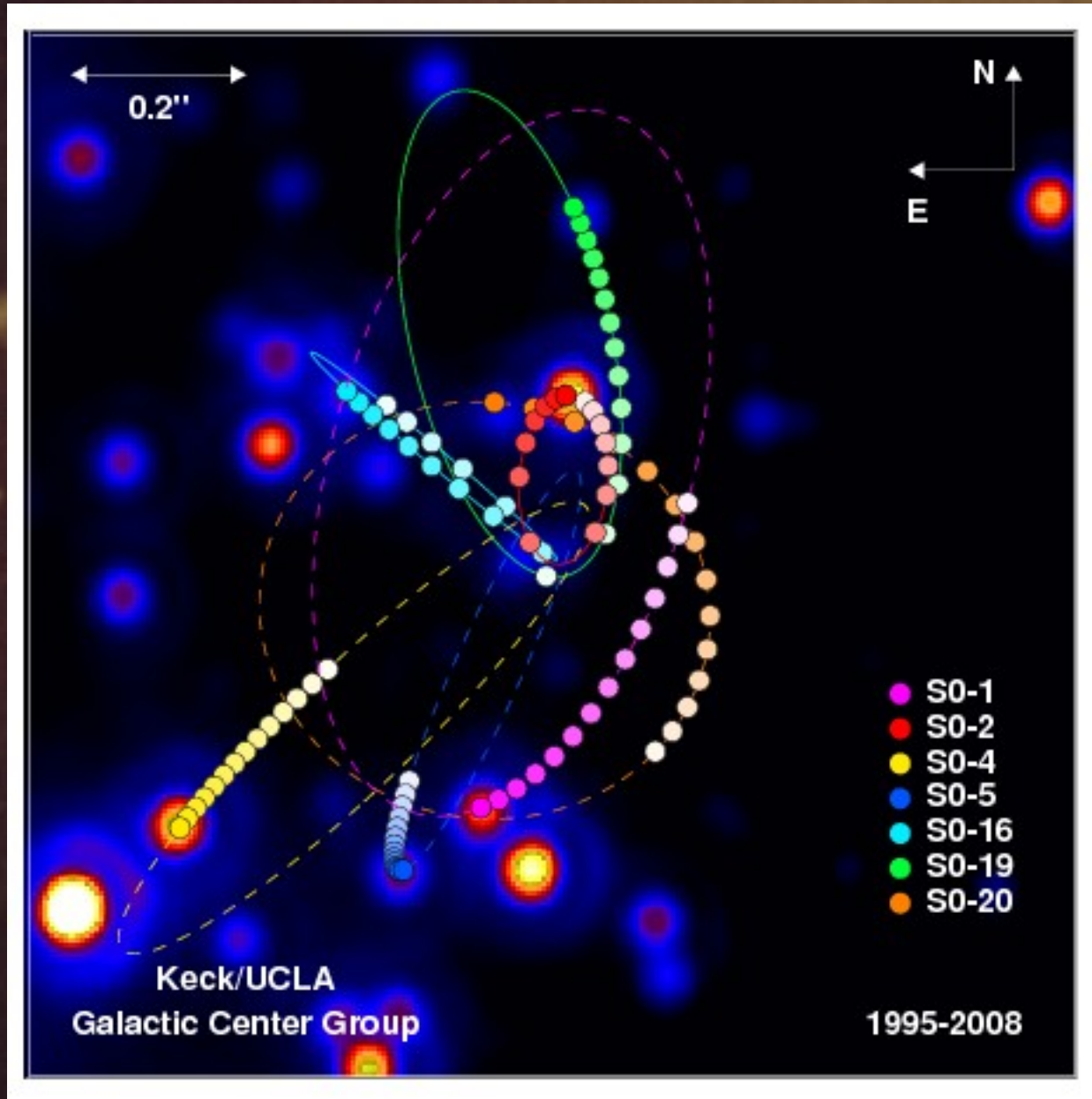
Secuencia de imágenes tomadas por investigadores del Max Planck 1992-2009

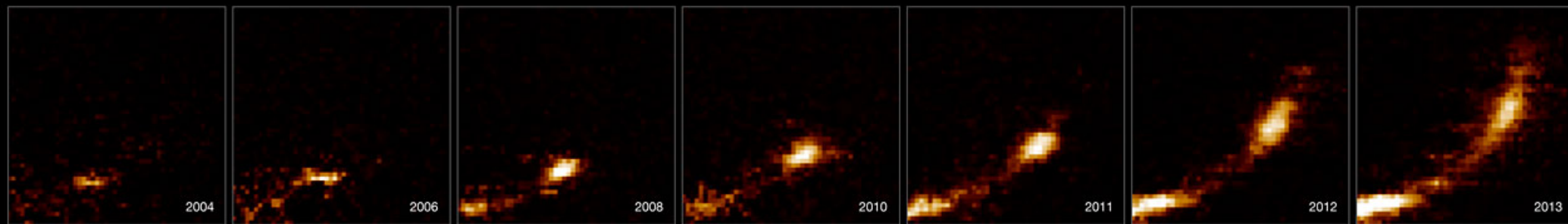


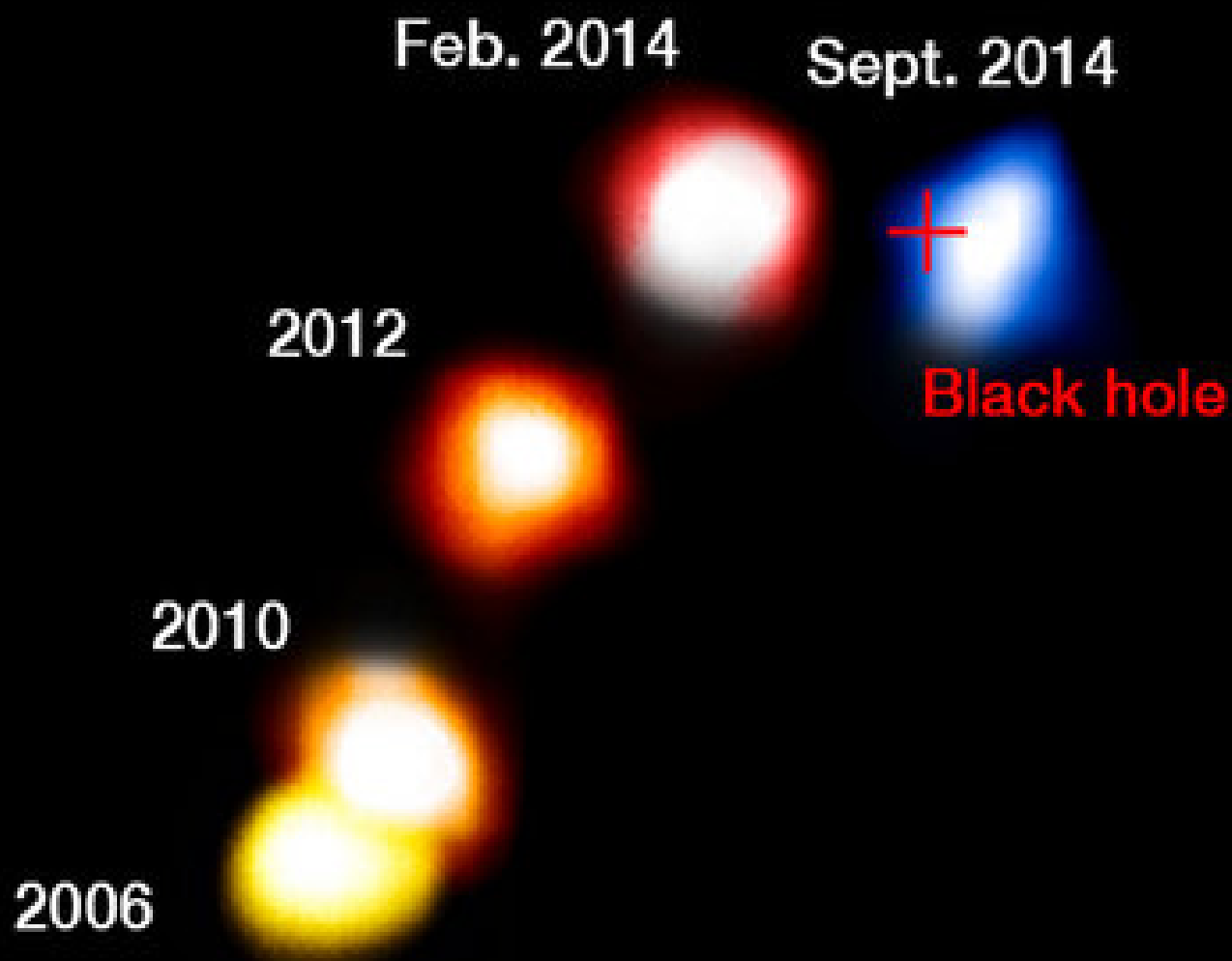
Animación que reconstruye las órbitas de las estrellas alrededor de un objeto Invisible de **37 millones masas solares**

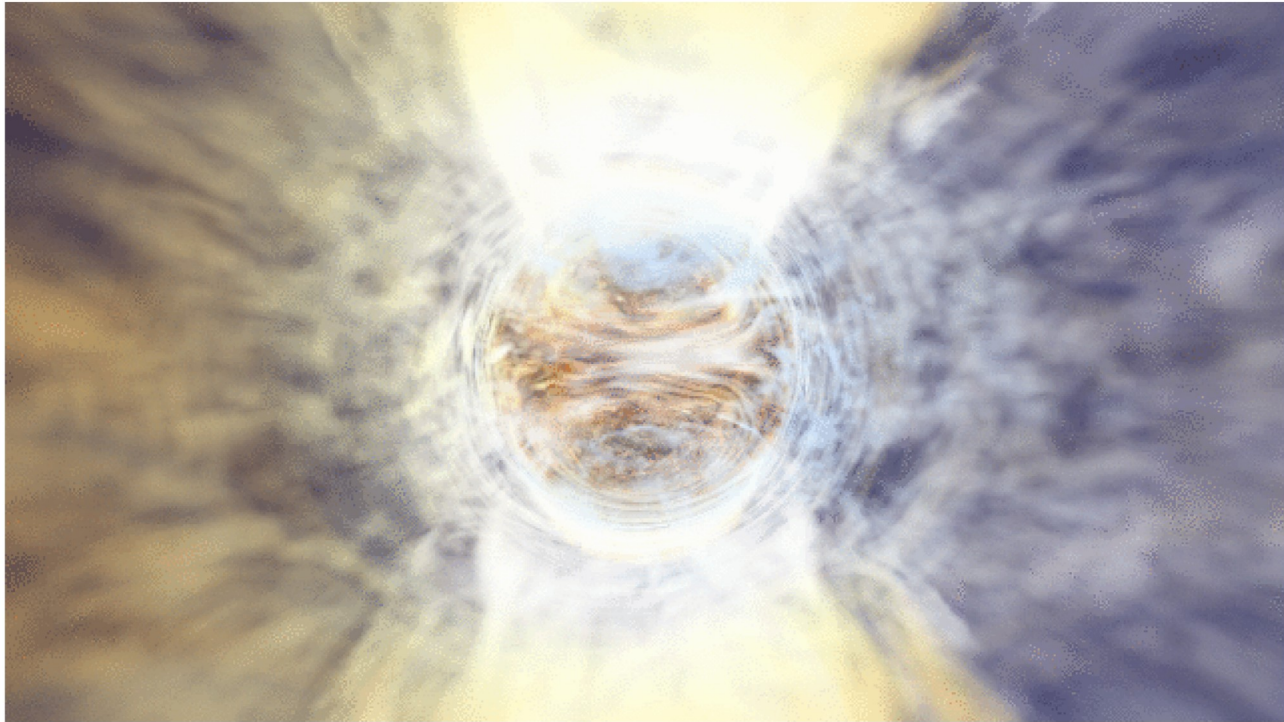


Resultados de las observaciones del grupo Keck/UCLA en la misma región de la Vía Láctea





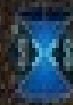






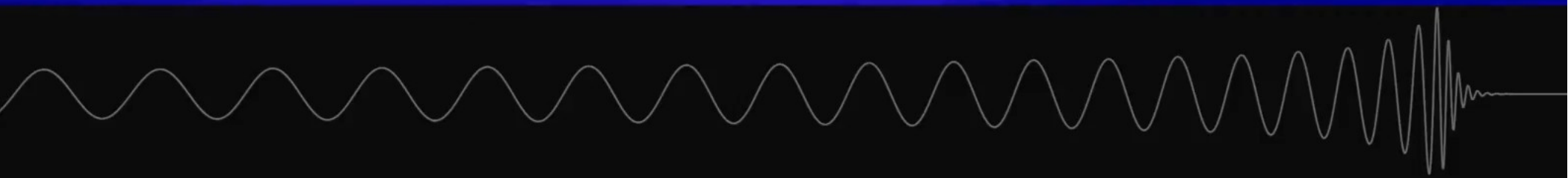


CUANDO DOS COLISIONAN...





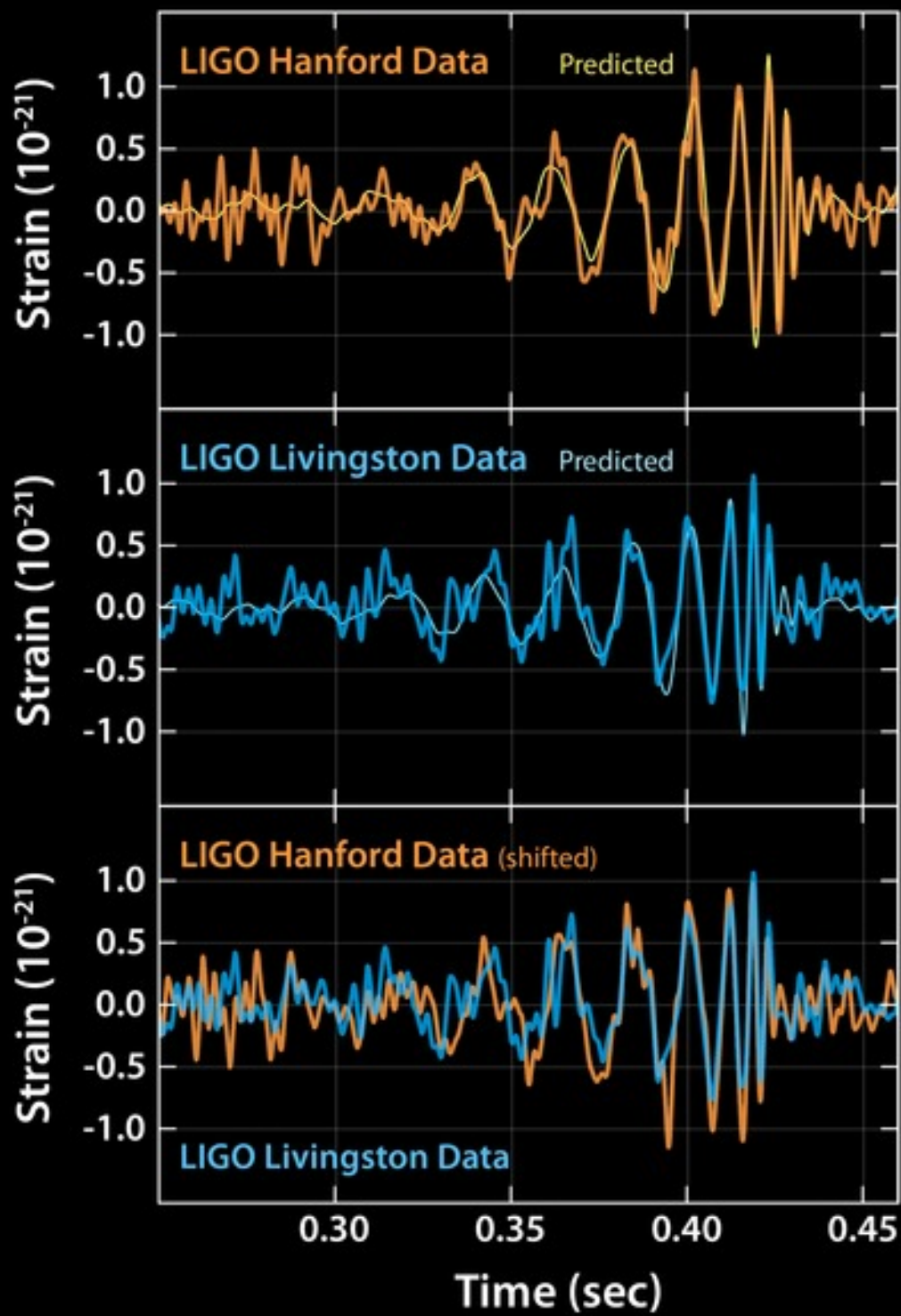
0.70s

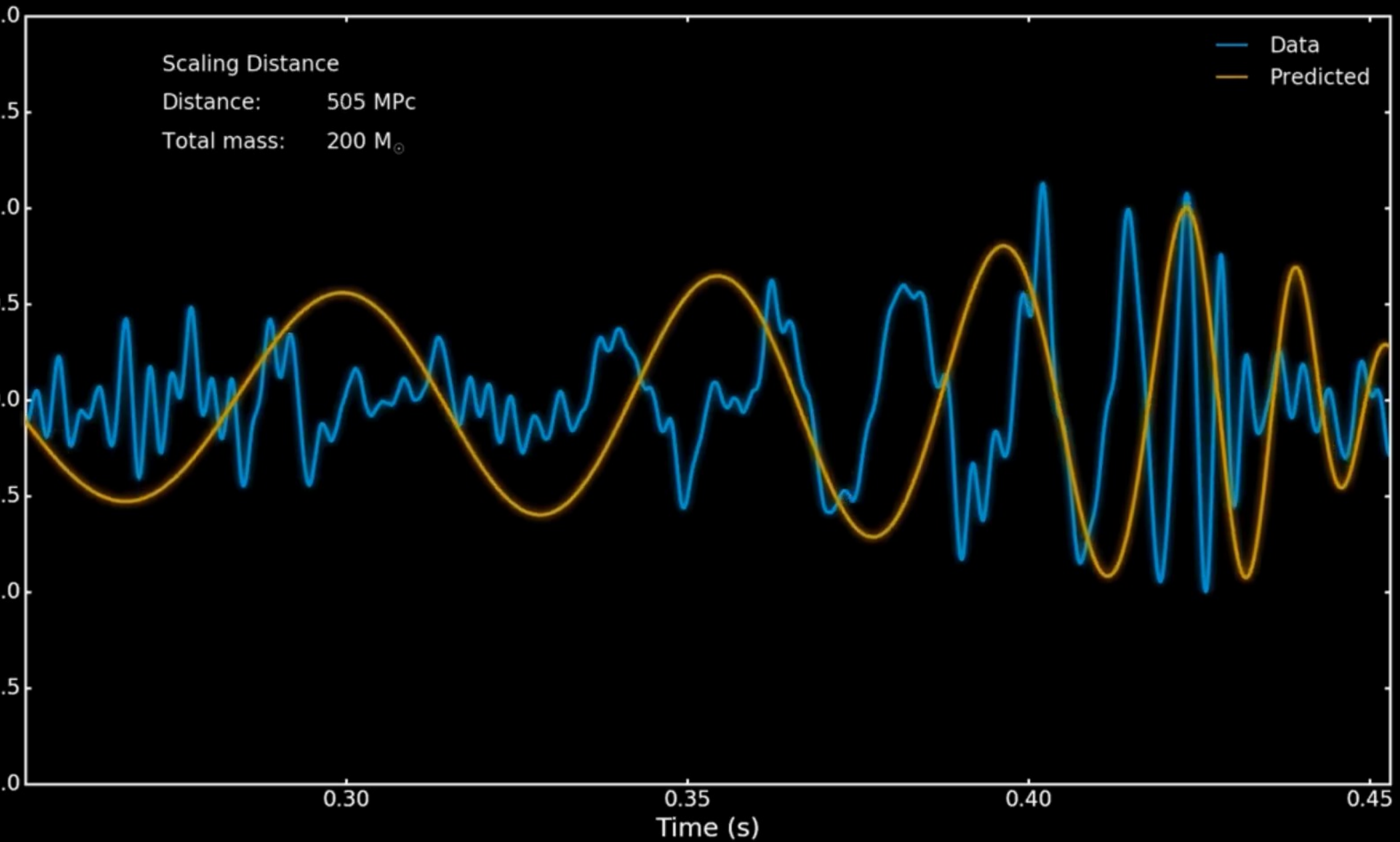




LIGO Hanford

LIGO Livingston





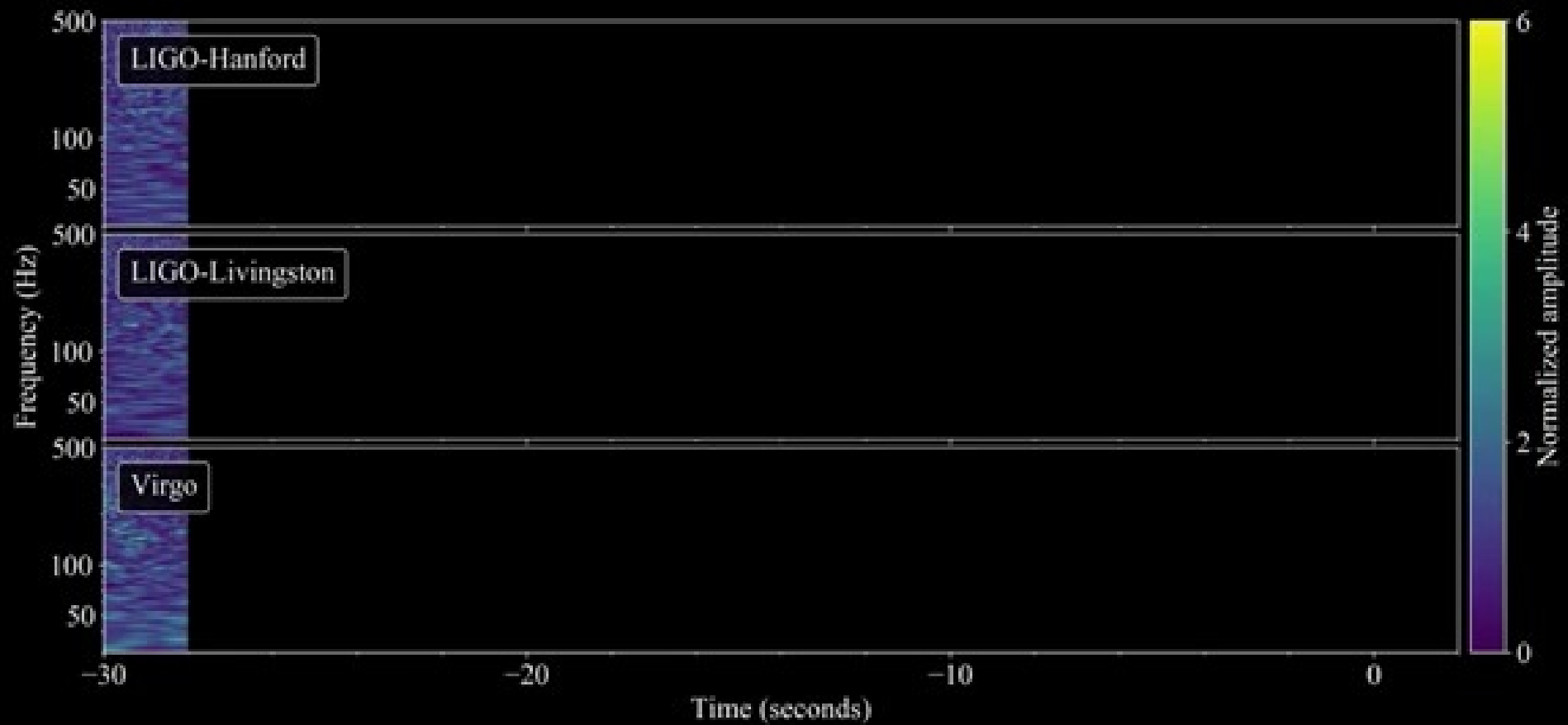


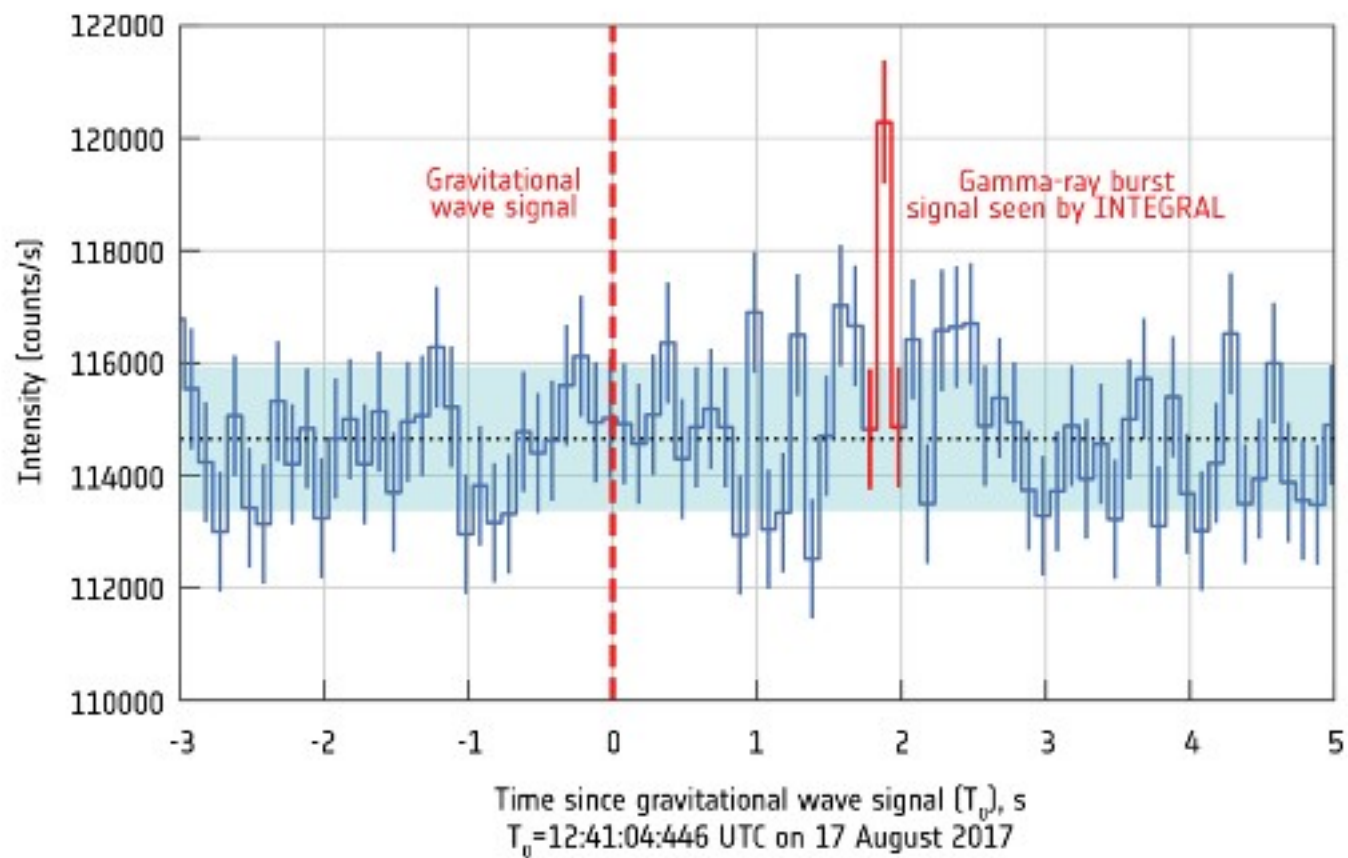
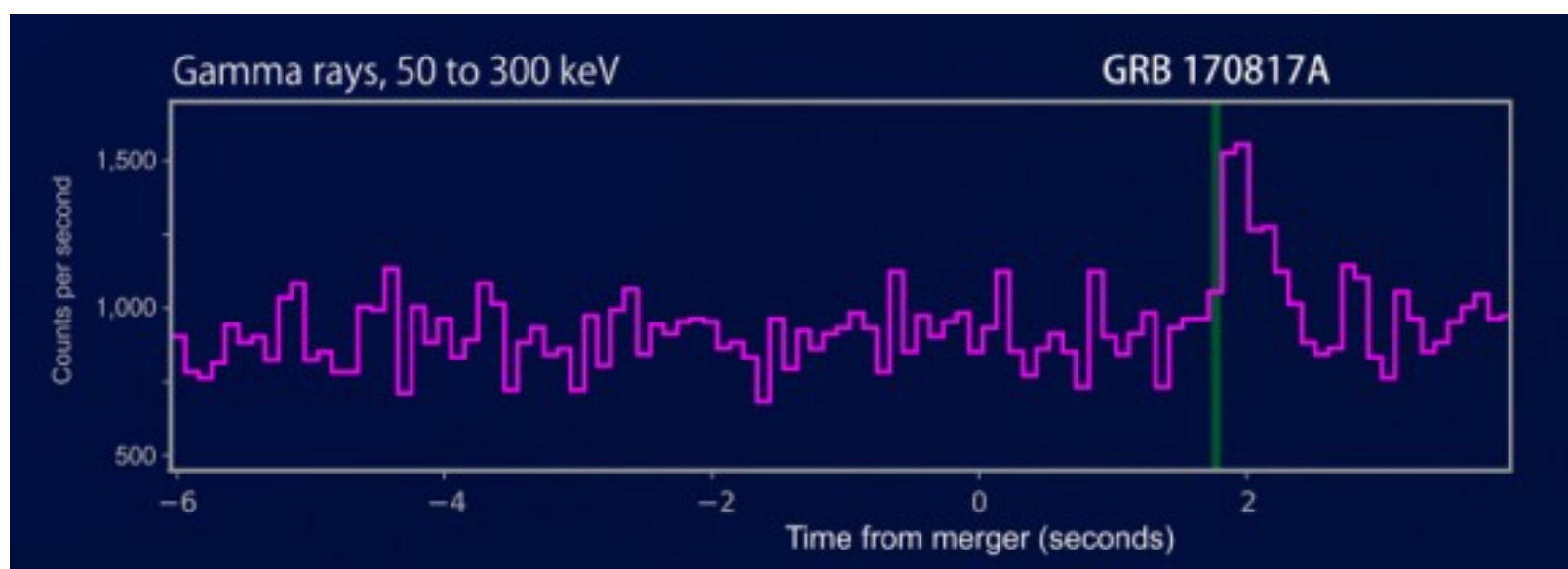
De un caso único no se puede hacer ciencia...

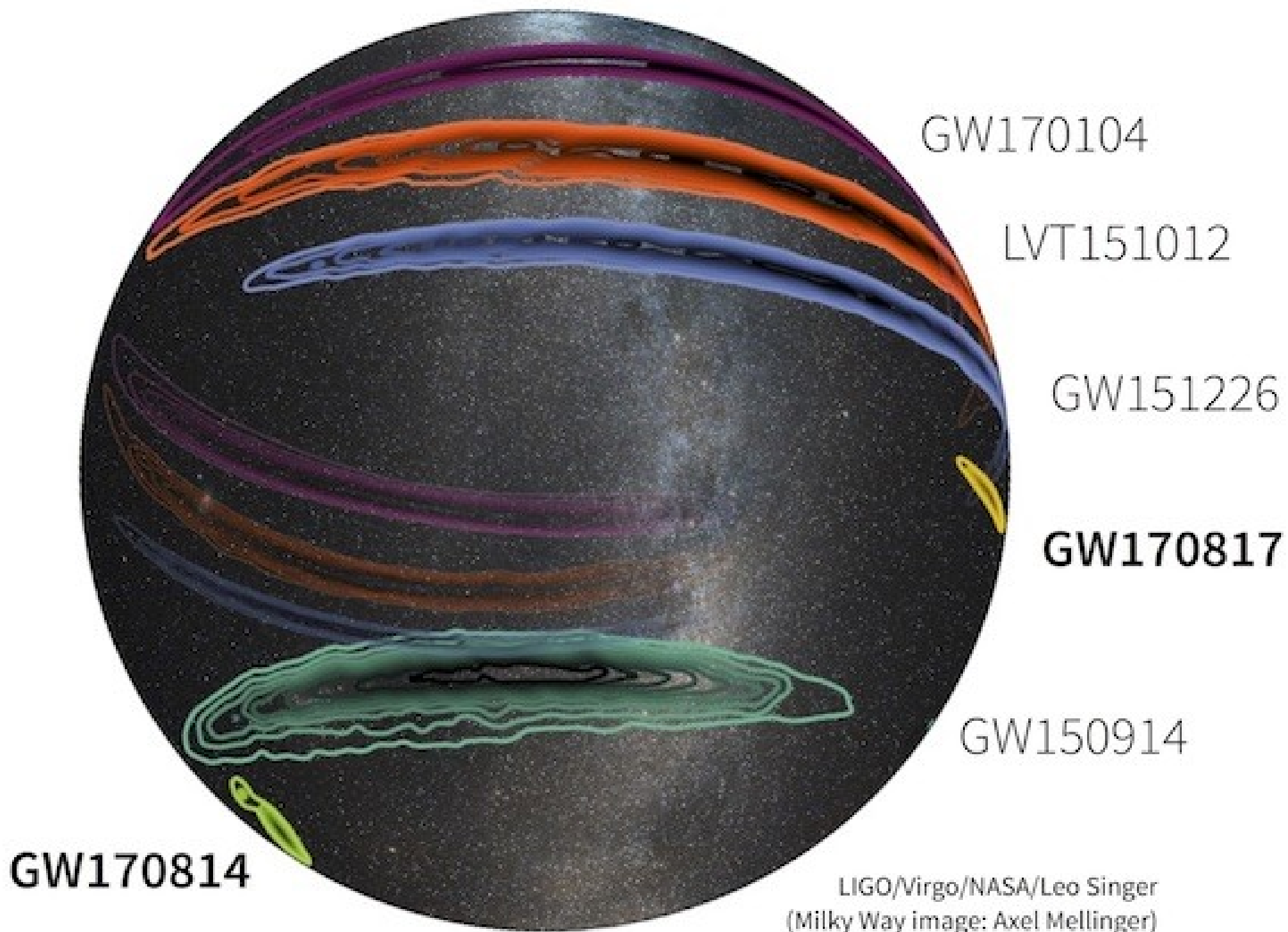
Pero se han detectado otras tres colisiones de agujeros negros de tamaños parecidos.

Ahora, triangulando con VIRGO









Earth

Space



SSS17a



August 17, 2017

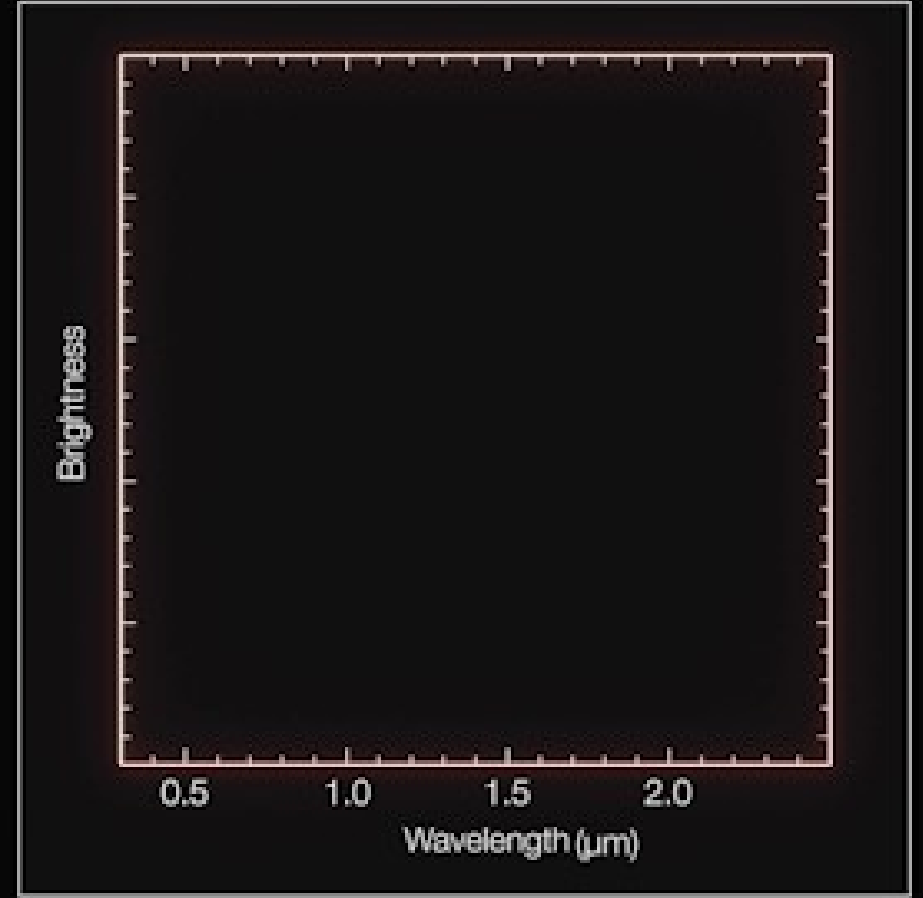


August 21, 2017

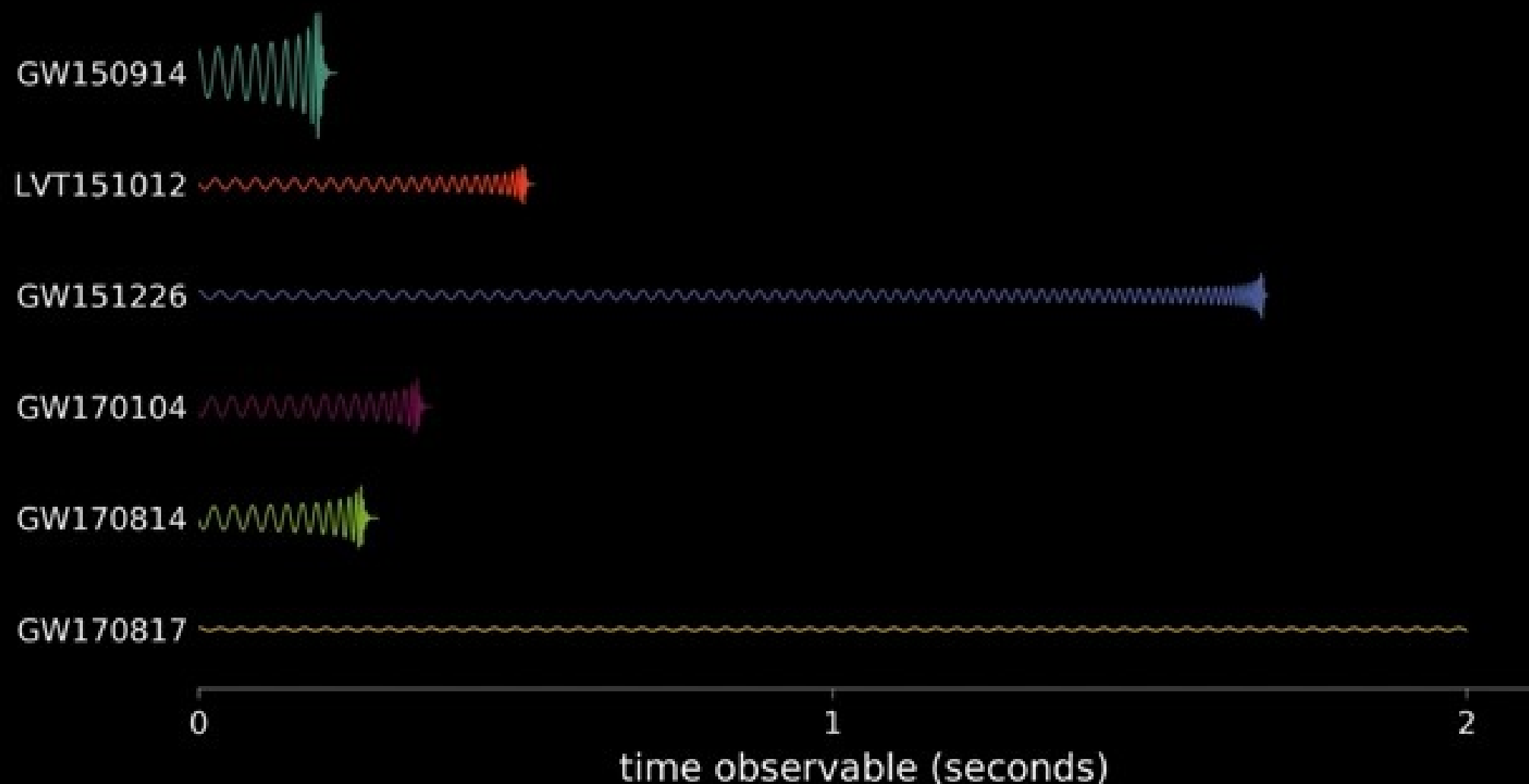
Swope & Magellan Telescopes



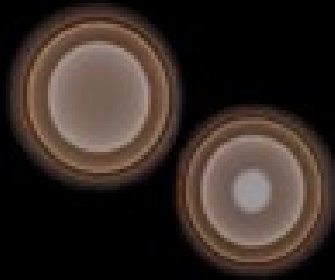
Aug 22



Time: -1225 days



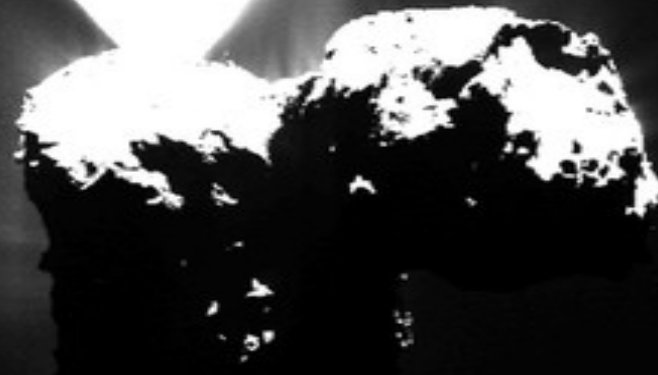
GW170817: The Merger of Two Neutron Stars



Matter Density

Gravitational Waves

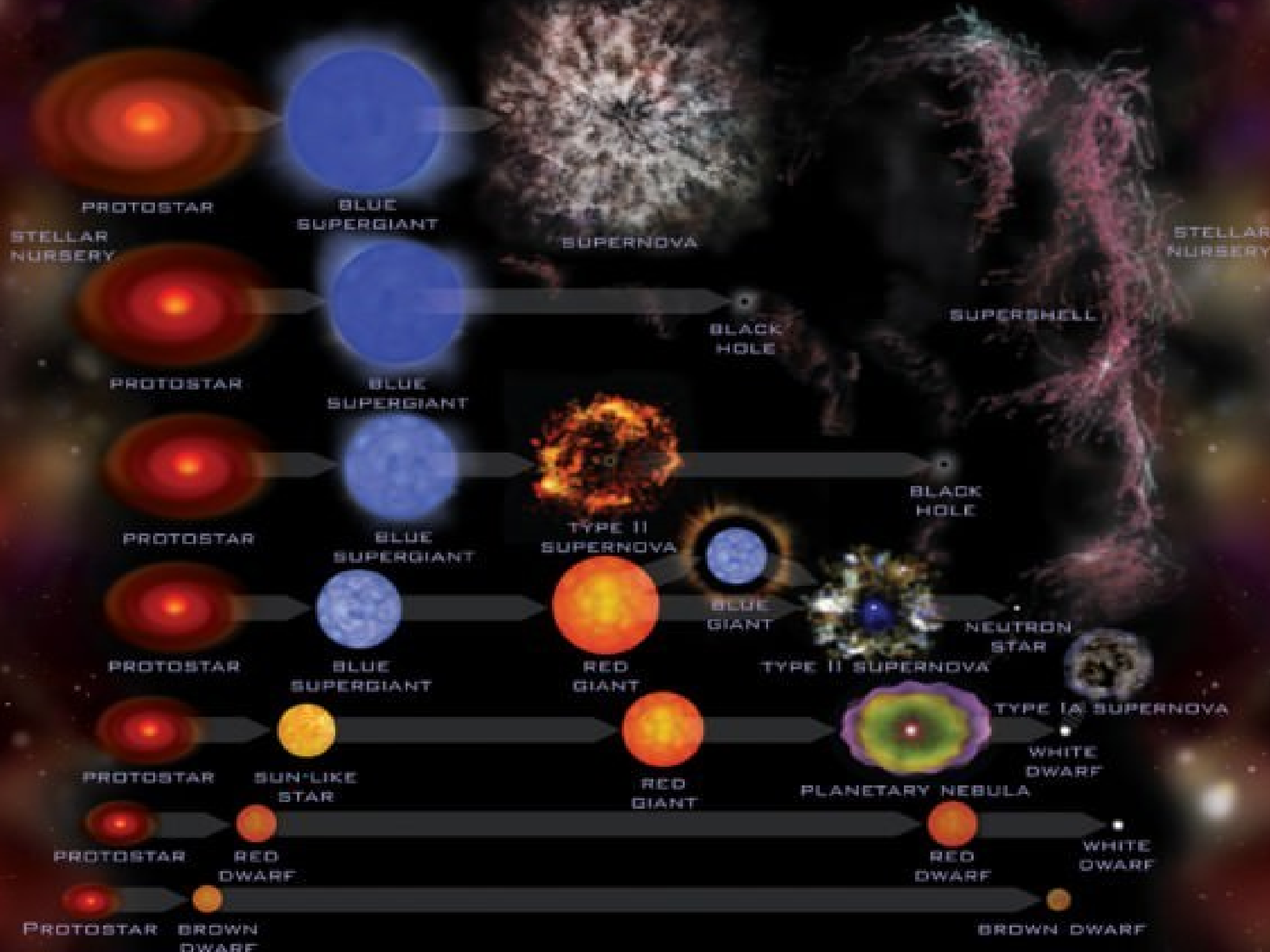
¡¿Qué ha sido eso?!



**Todo cuadra con la colisión de dos
estrellas de neutrones.**



¿Qué es una estrella de neutrones?





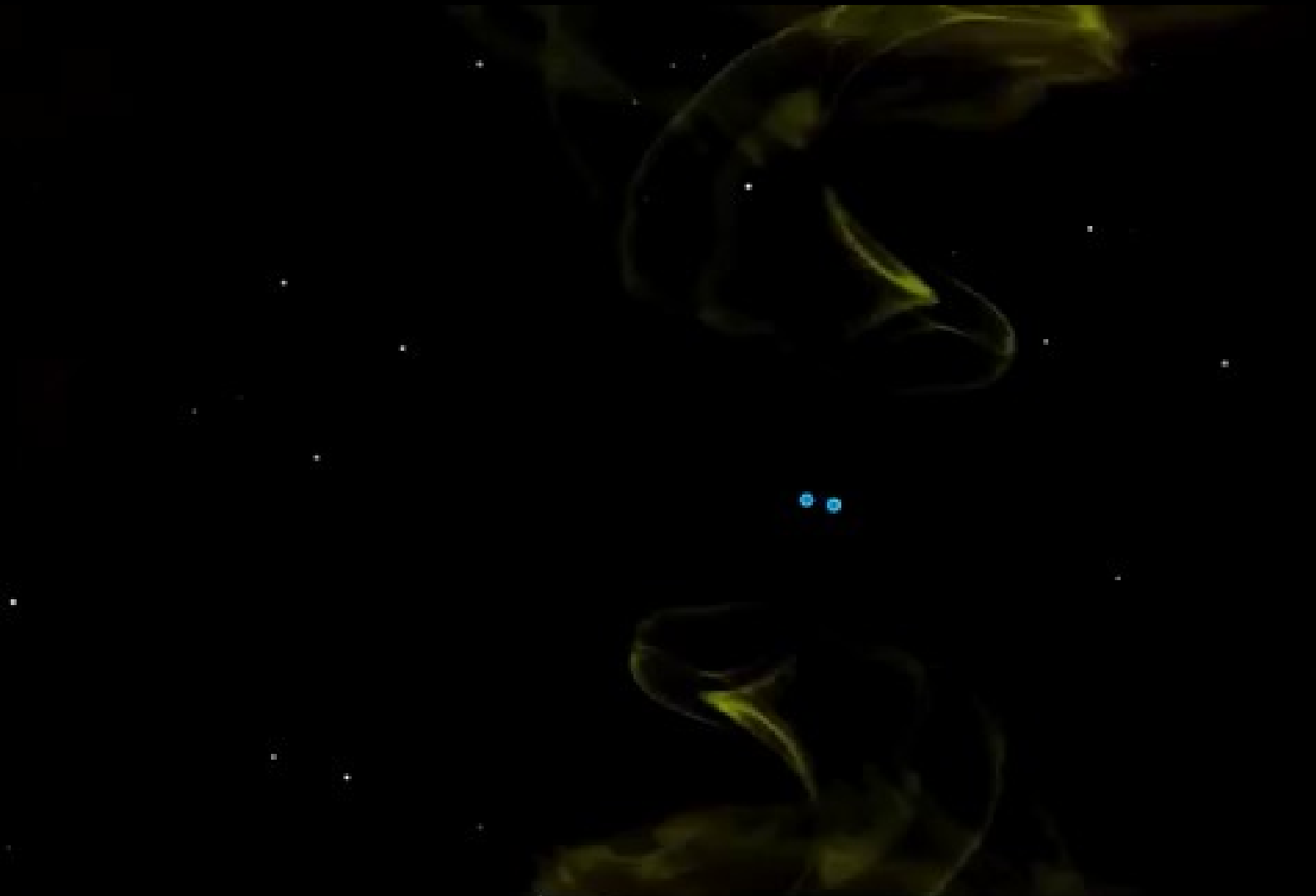
The background of the slide is a mosaic of astronomical images, likely from the Hubble Space Telescope, showing a nebula with a central bright spot. The mosaic is composed of several rectangular panels arranged in a grid-like pattern. The colors are primarily blue and purple, with some orange and red highlights. A large, stylized letter 'A' is overlaid on the mosaic, with its top bar extending across the top and its vertical stem extending down the center. The text is centered within the 'A' shape.

**A menudo aparecen aparejadas
a una estrella u otro púlsar**

Time Until
Merger



G





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



FIN



RIPPLES OF GRAVITY,
FLASHES OF LIGHT:

WORLD'S OBSERVATORIES
WITNESS A COSMIC CATAclySM