

# **La relatividad y las ondas gravitatorias**

**Tomás Ortín Miguel**

**Instituto de Física Teórica UAM/CSIC**

*Relatividad* → *Ondas*

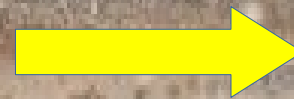
+

*Gravedad*



**Relatividad General** →

*Ondas gravitatorias*





# Plan:

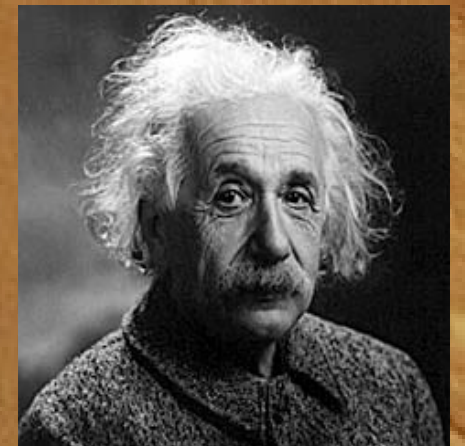
- **La velocidad de la luz y la Relatividad Especial**
- **La Relatividad Especial demanda ondas**
- **La Relatividad General y los agujeros negros**
- **LIGO, VIRGO y las ondas gravitatorias**
- **Colisiones de agujeros negros.**



# LA RELATIVIDAD ESPECIAL

## Principio de Relatividad Especial (Einstein 1905)

Una ley muy especial: la constancia de la  
velocidad de la luz.



# Experimento de Consecuencias sólo 100 Kms/h.

Una ciclista que se desplazó 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 della guardia y esto, es lo que se 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.**



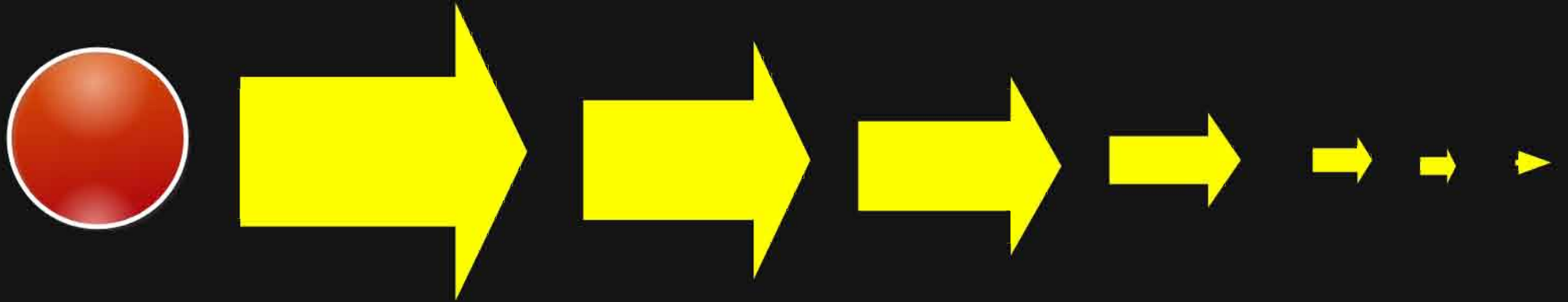
*Ni objetos materiales rígidos*



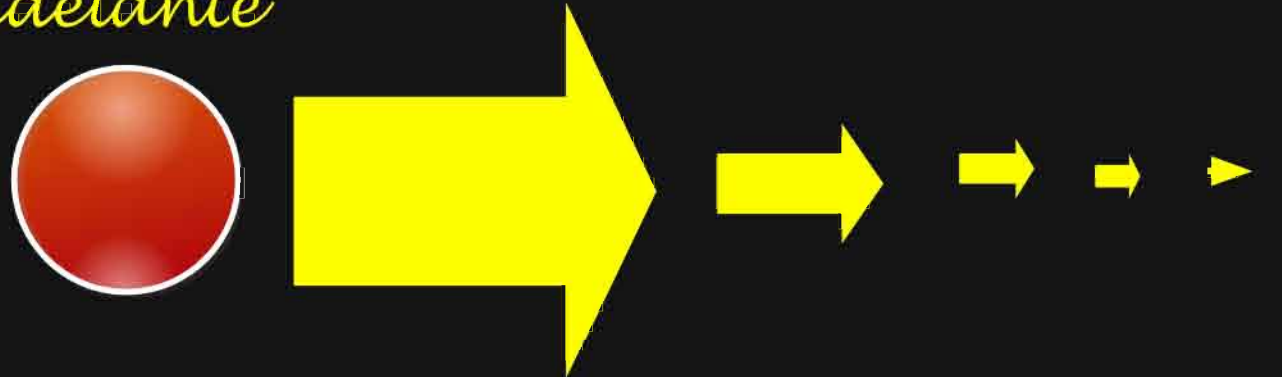
*Ni inmateriales....*



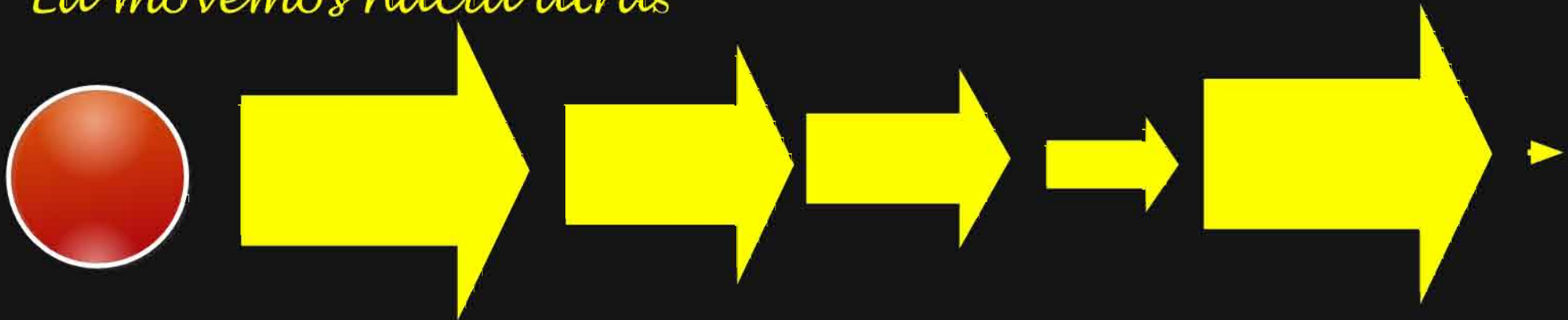
# *Campo eléctrico de una carga*



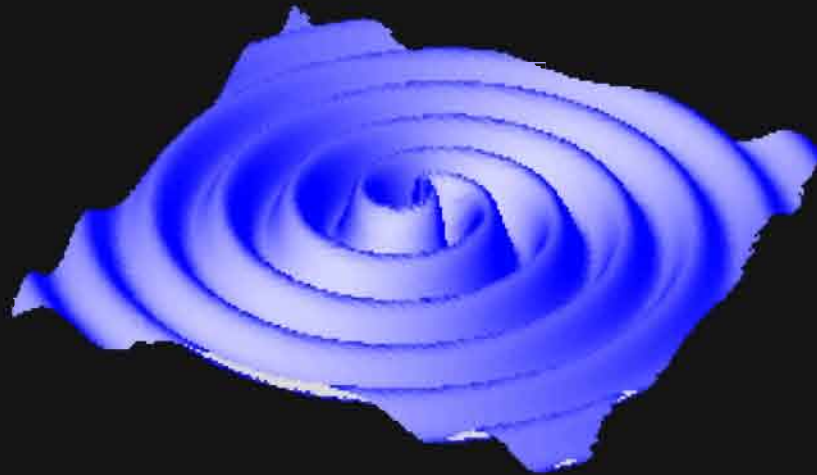
*La movemos hacia adelante*



*La movemos hacia atrás*



- *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).*







**Así se generan y propagan  
todas las ondas.**


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



- 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.
- Ni nada rígido: todo se propaga necesariamente como una onda.
- Masa y energía son lo mismo.  $E = m c^2$



**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.*



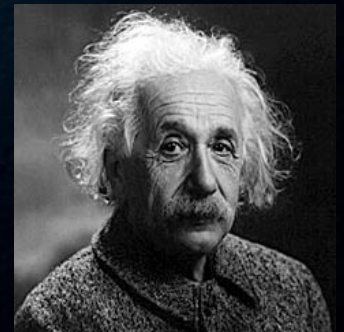
**La gravedad es la más débil de las fuerzas conocidas ( $10^{-39}$  en un átomo), aunque gobierna el Universo.**

**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)**

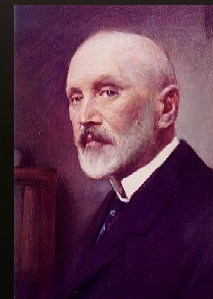
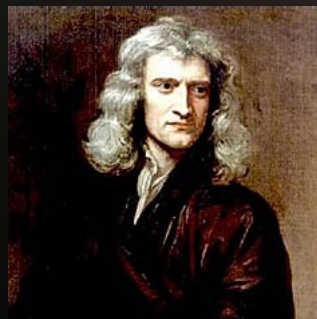
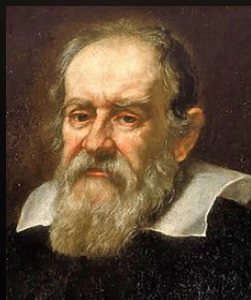


La nueva teoría parte de un nuevo principio:

# Principio de Equivalencia (de la gravedad y la inercia)



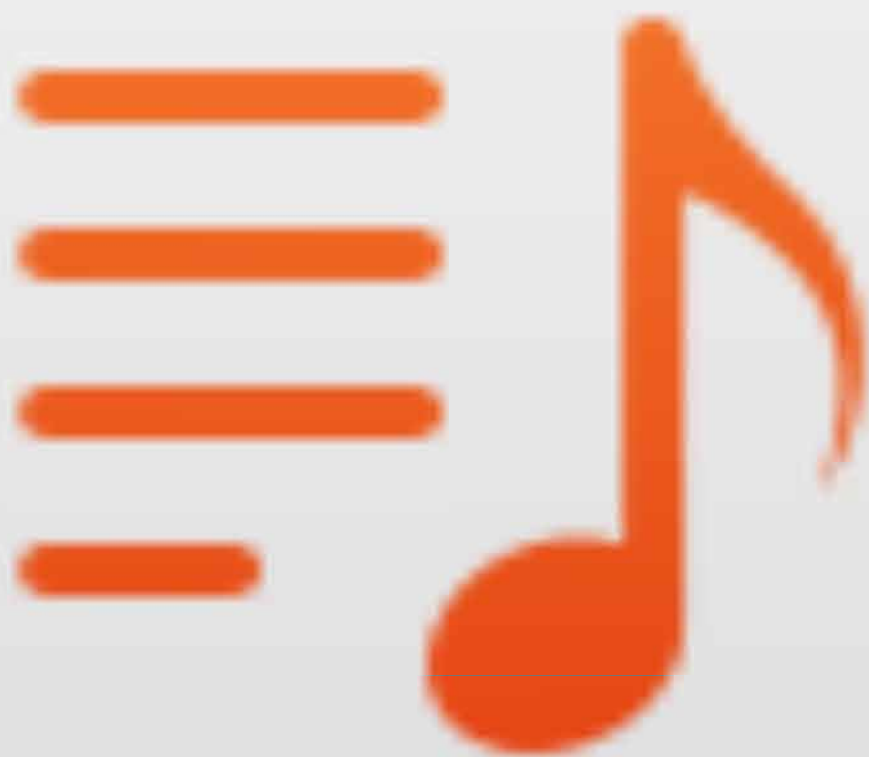
(Simon Stevin 1586, Galileo Galilei 1638, Newton 1687,  
Loránd Eötvös, 1885, Robert H. Dicke 1964...)





# PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA

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







# 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 *todo*  
se mueve en línea recta en ese espaciotiempo  
de medidas alteradas.

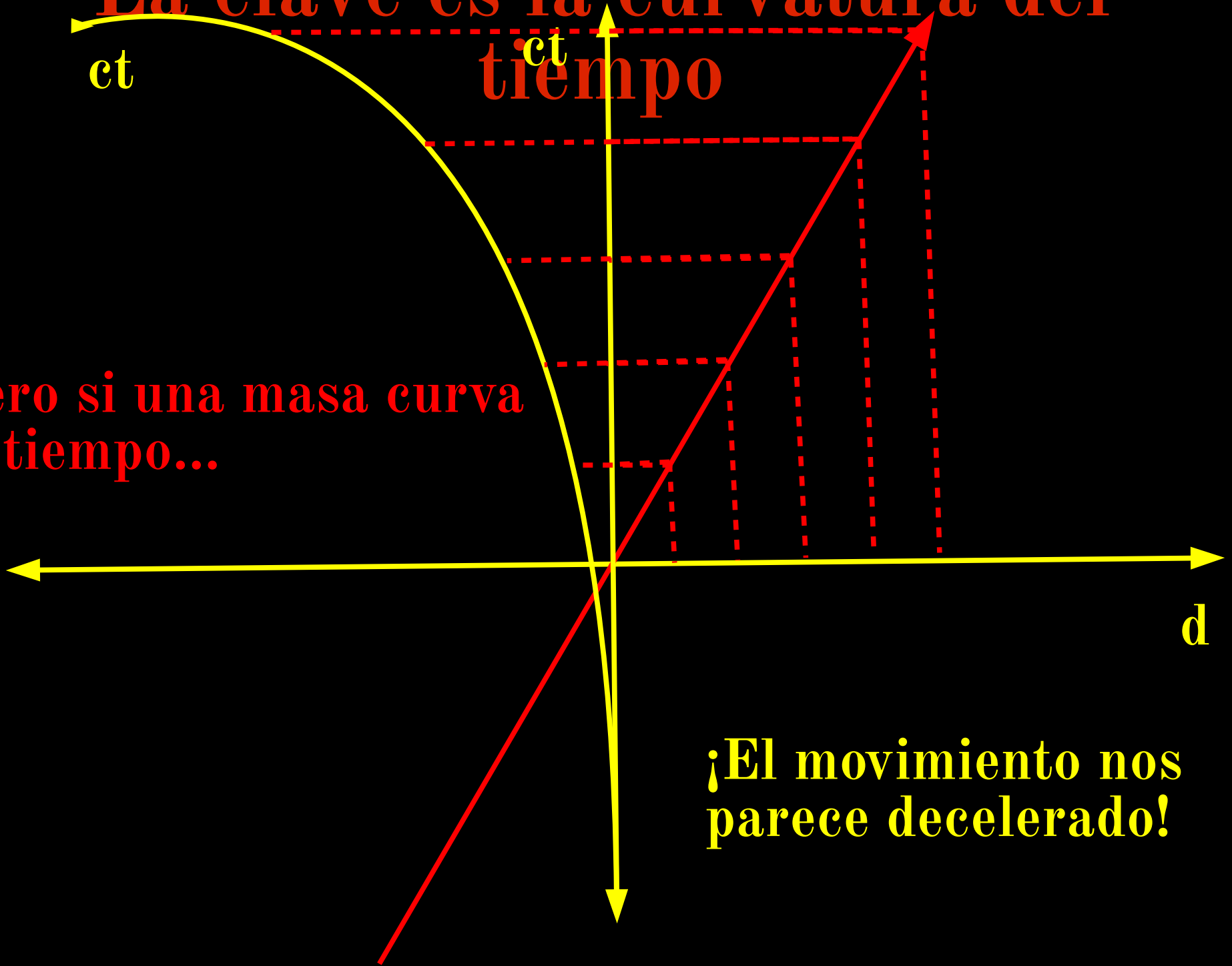
*Espaciotiempo  
curvo*

# La clave es la curvatura del tiempo

ct

ct

Pero si una masa curva el tiempo...



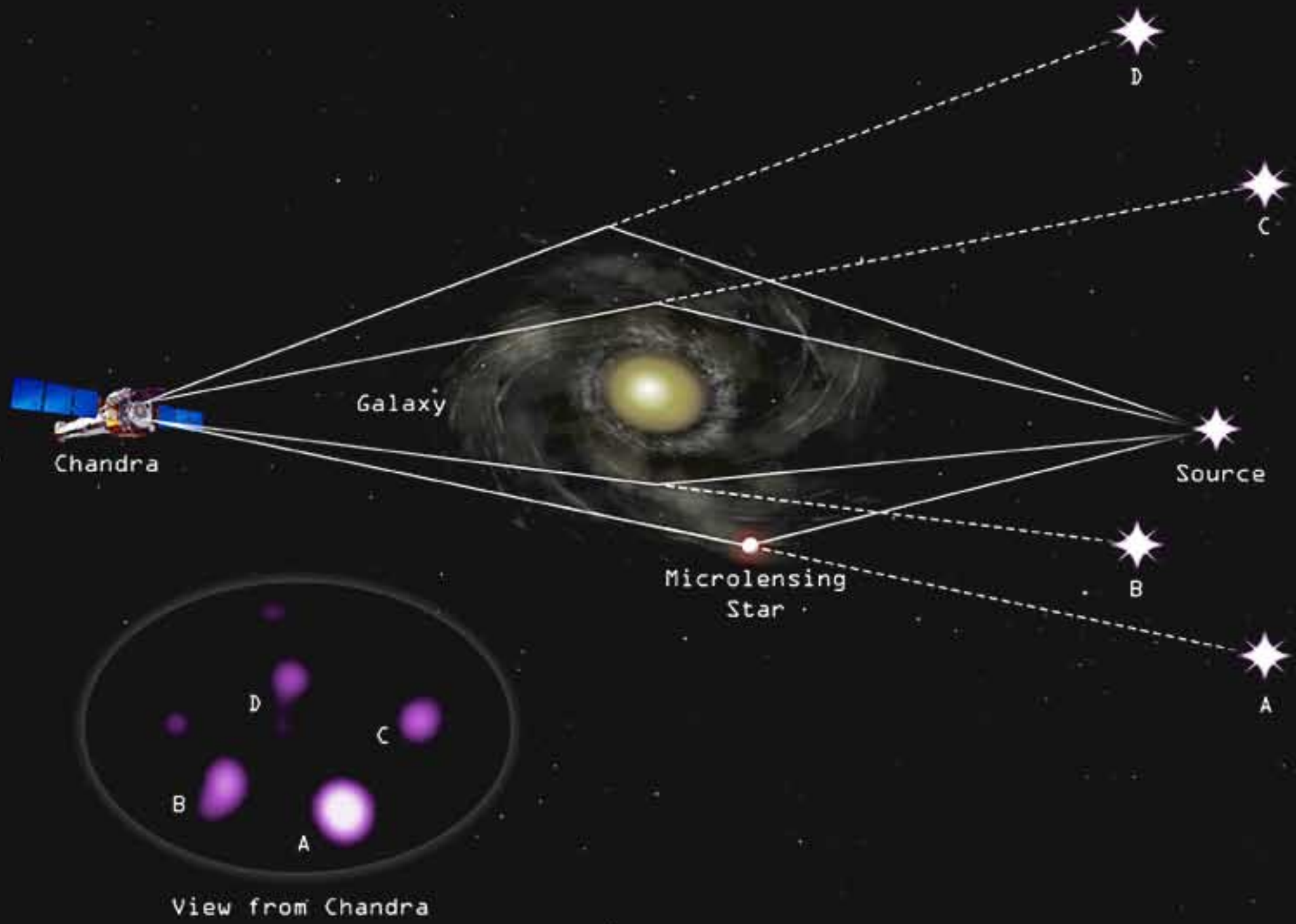
¡El movimiento nos parece decelerado!

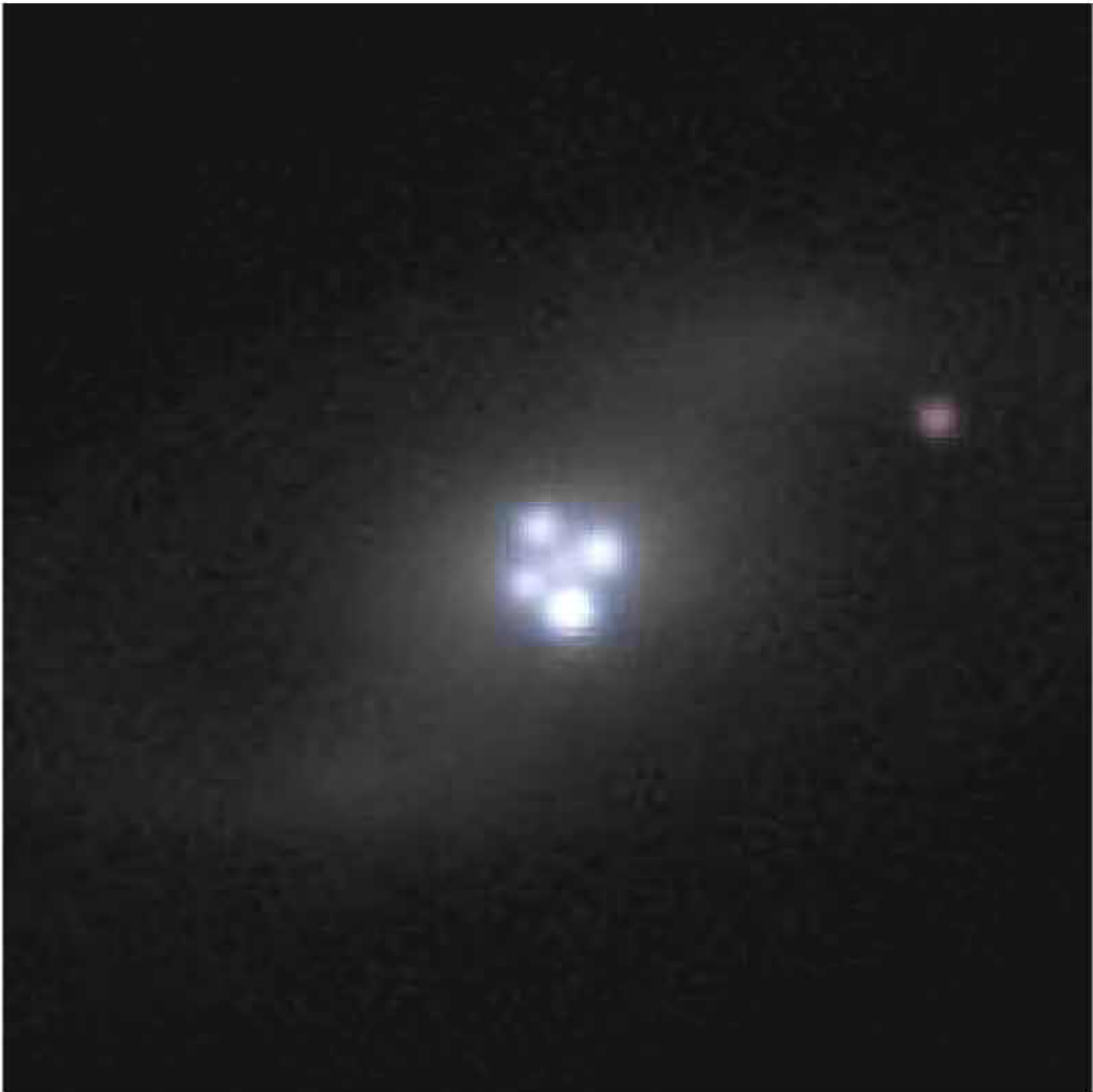


**El Principio de Equivalencia  
también nos dice que la luz  
(como todo)  
siente la gravedad.**



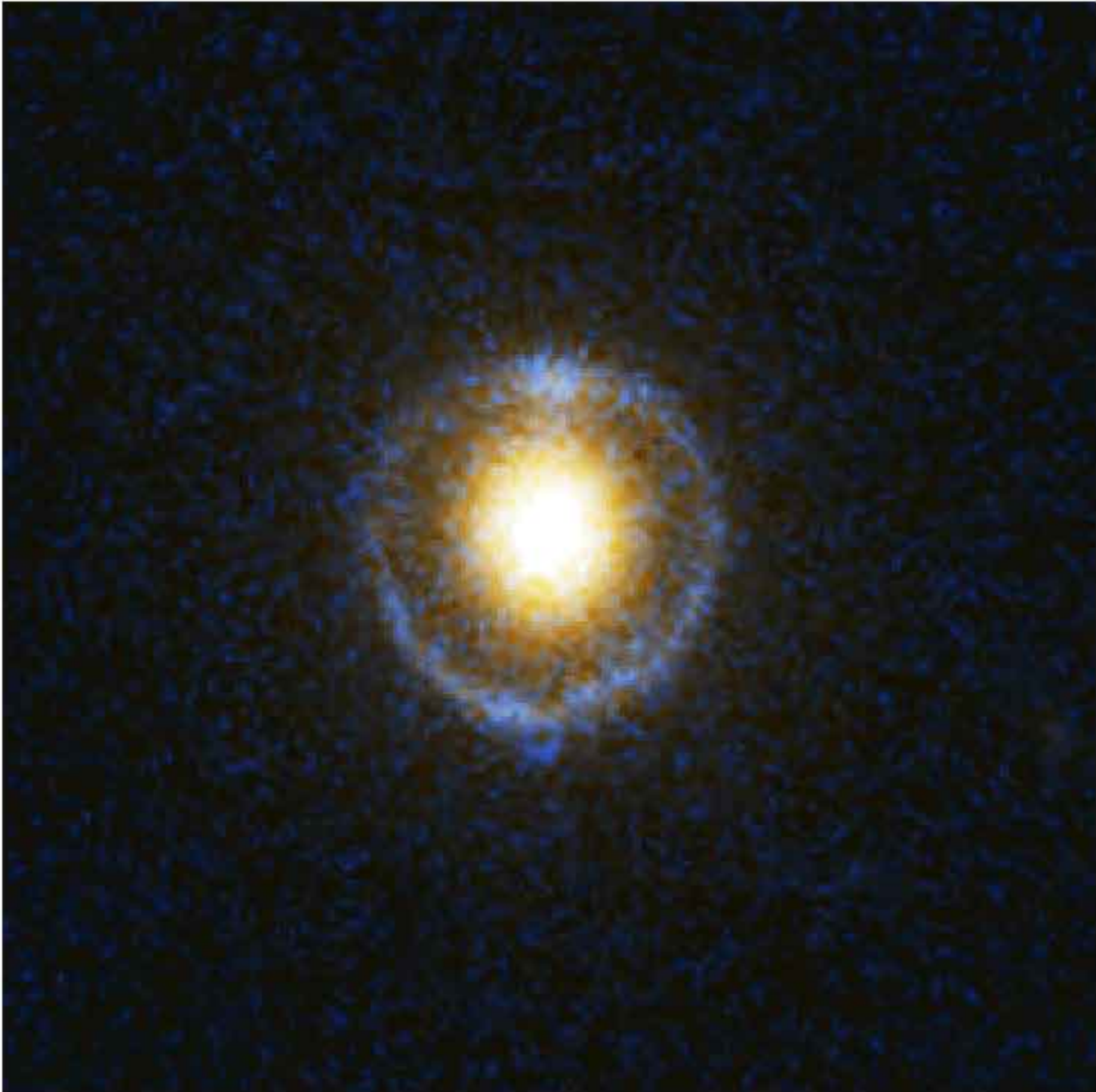


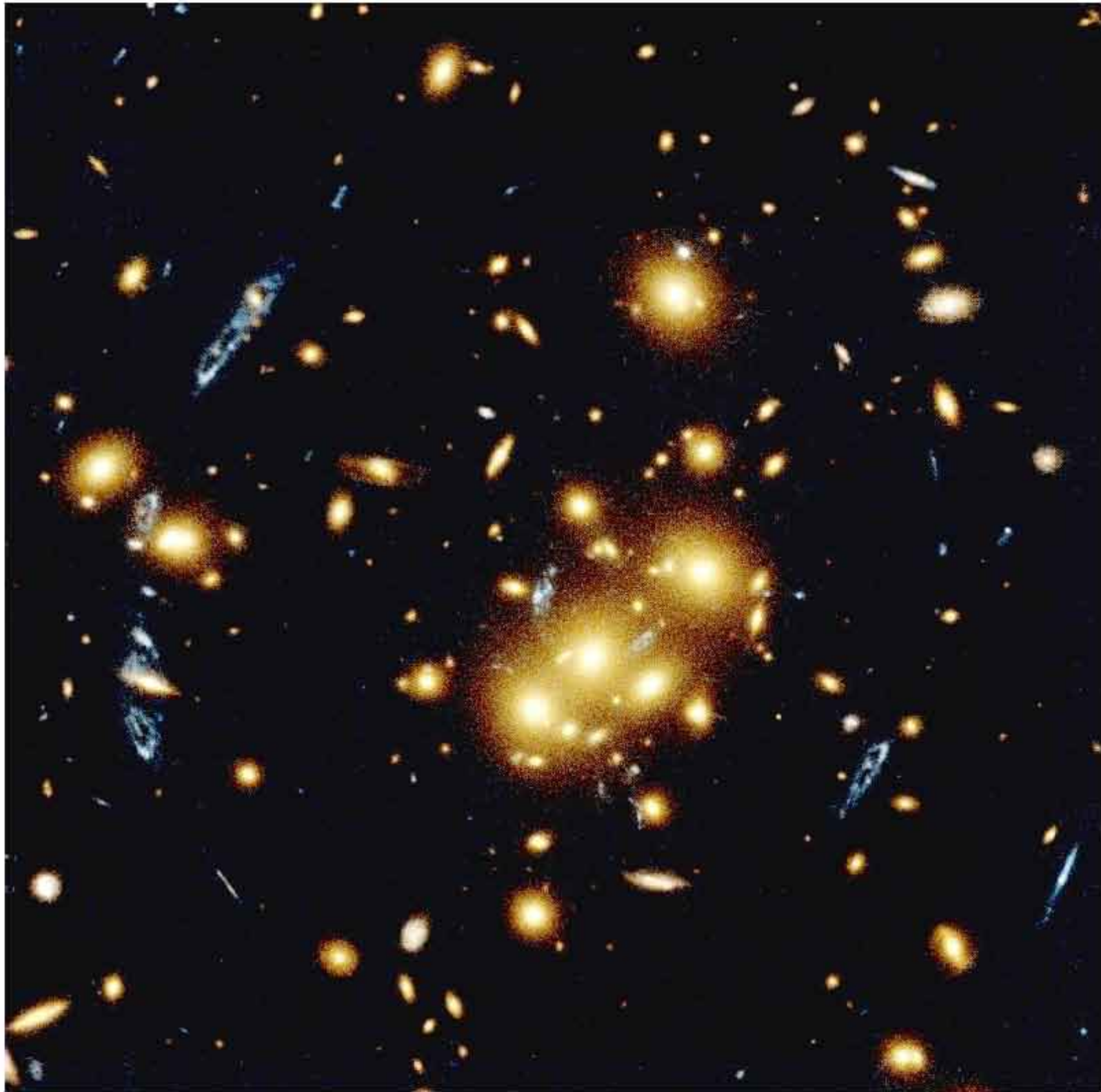












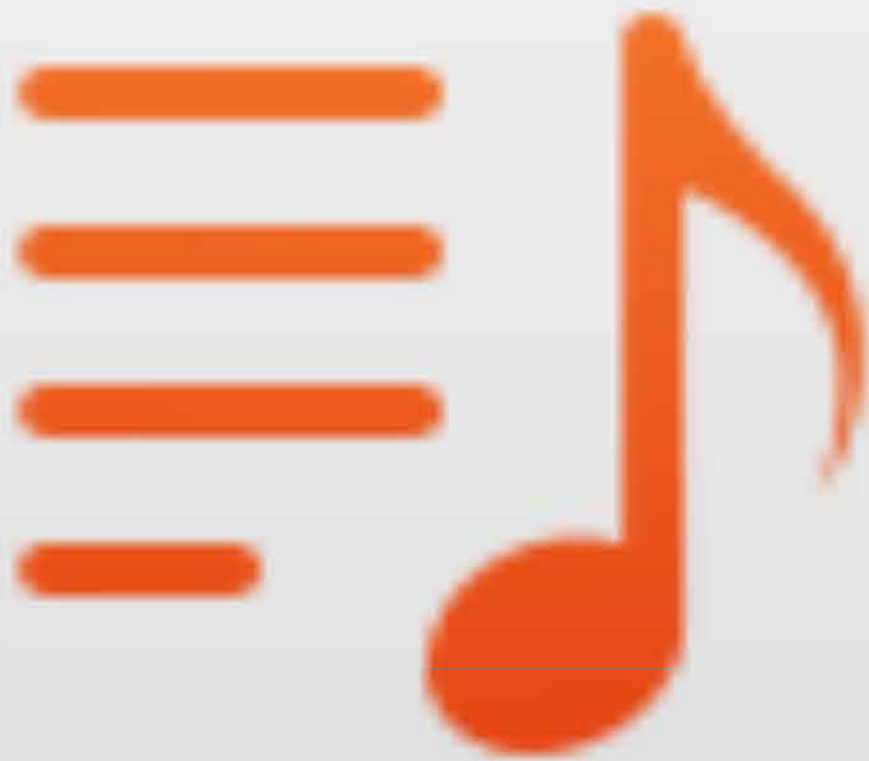




# ONDAS GRAVITATORIAS

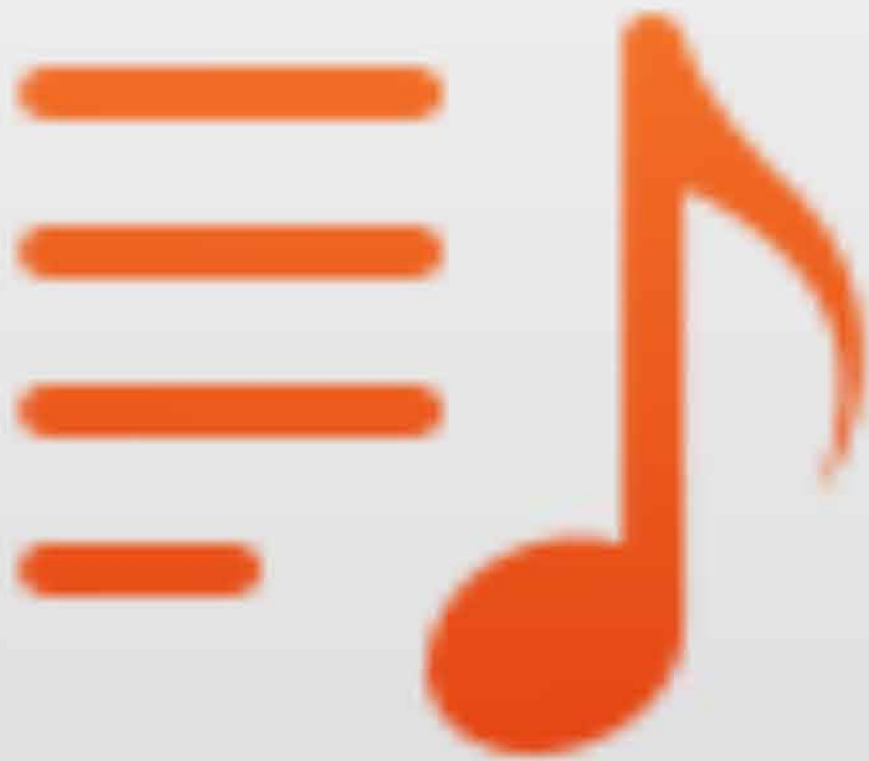
- *Producidas por cambios de posición de masas.*
- *A su paso cambian las medidas del espaciotiempo.*
- *Para poder detectarlas:*
  - *Cambios bruscos de masas enormes*
  - *Cercanos (mejor)*
  - *Detector de sensibilidad extrema*





# EL DETECTOR: REGLA Y RELOJ









*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.*



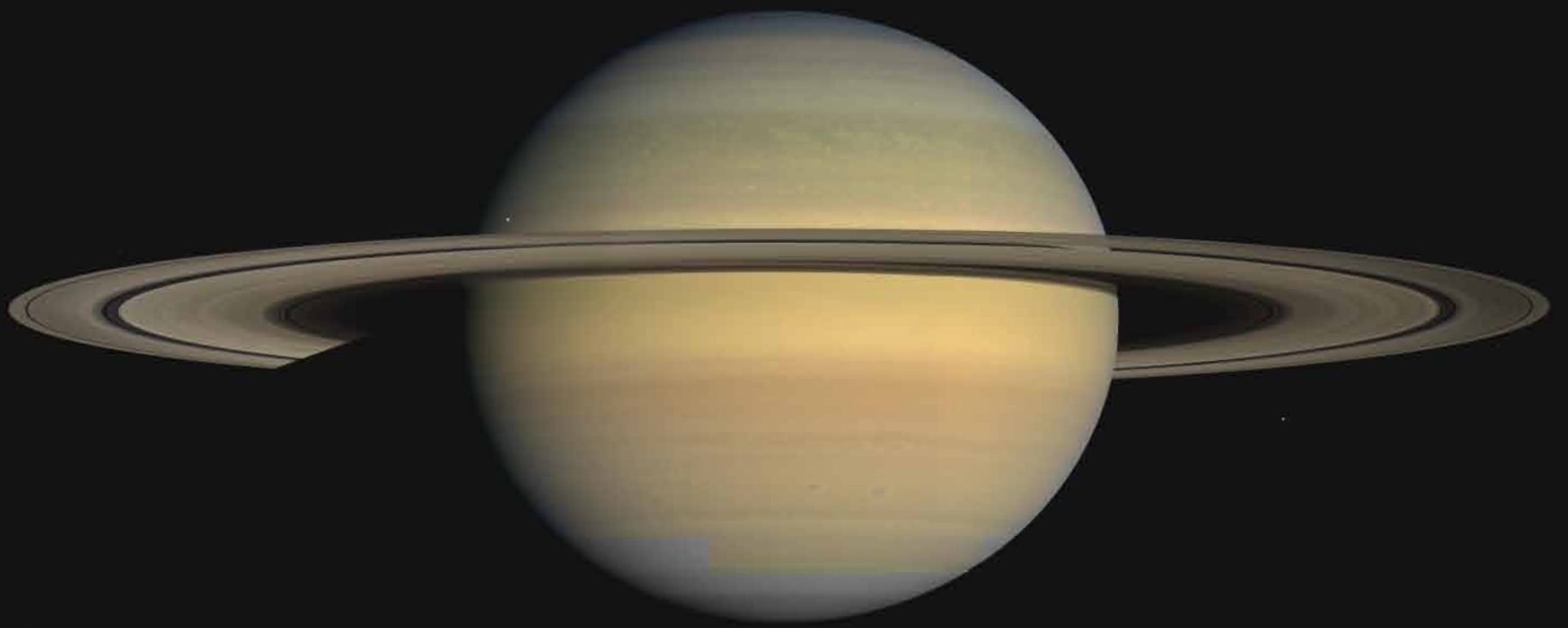


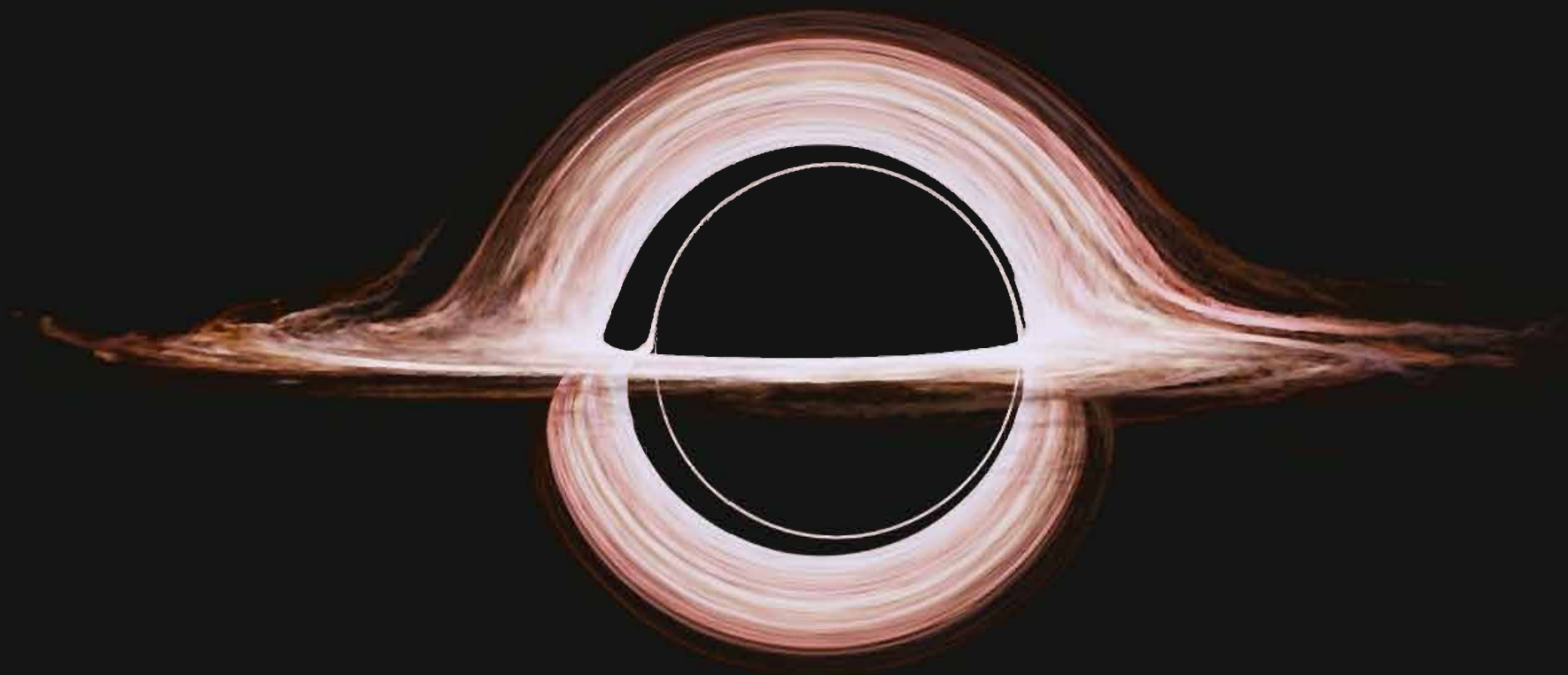
**CHOQUES DE AGUJEROS  
NEGROS**



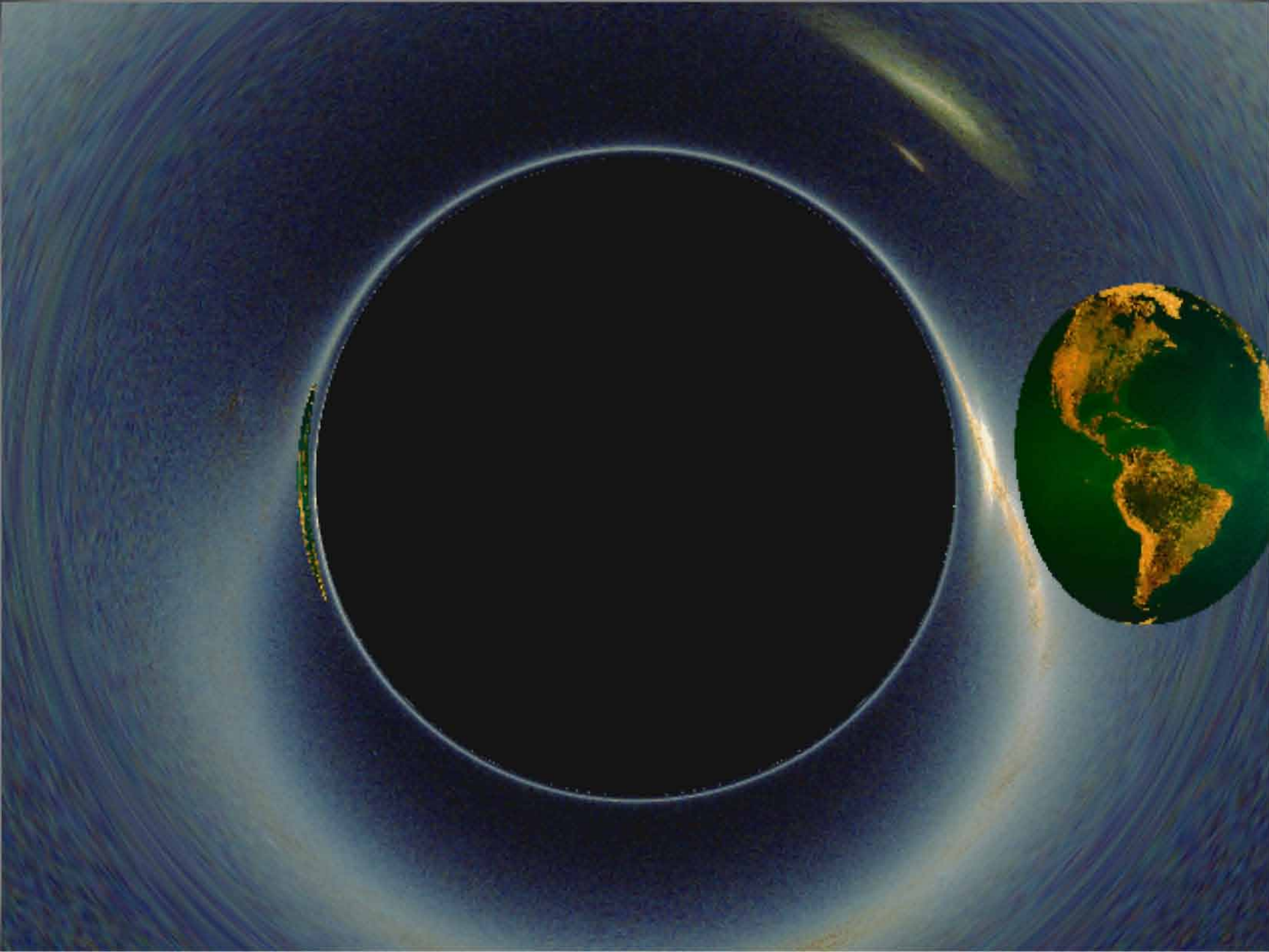
- *Gran masa en muy poco volumen*
- *Delimitado por una "burbuja" en la que se puede entrar pero nada puede salir (horizonte)*
- *La distorsión del espaciotiempo cerca del horizonte es enorme: luz en órbita.*











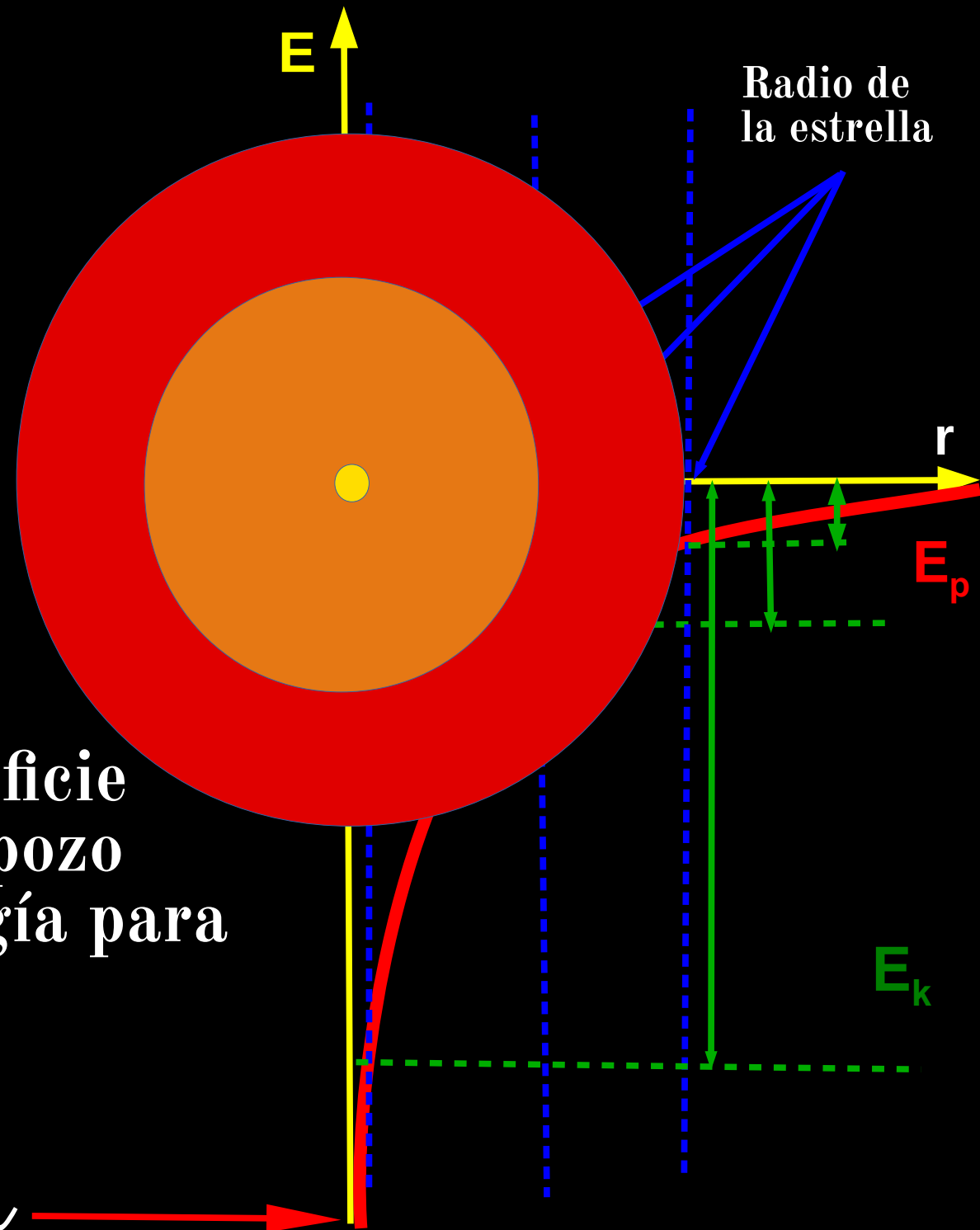






¿De dónde se puede sacar más energía, de los procesos nucleares (bombas atómicas) o de los procesos gravitatorios?

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

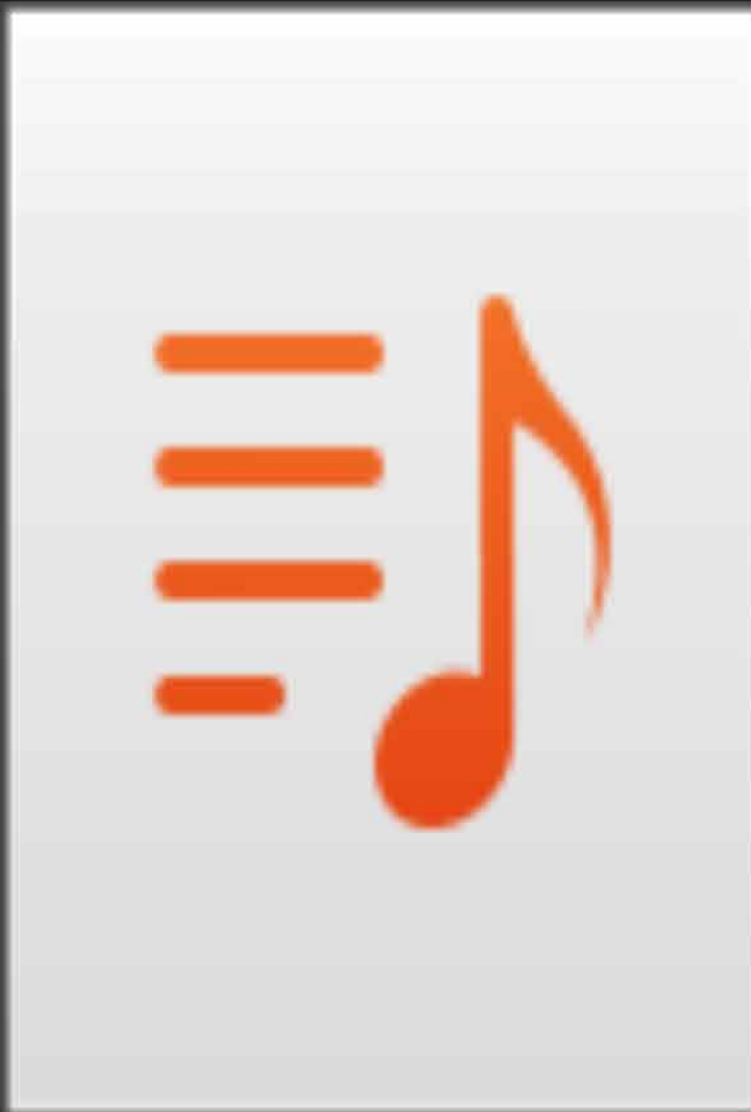
European Southern Observatory



# Evidencia: el agujero negro supermasivo de la Vía Láctea

European Southern Observatory





**UCLA  
Galactic Center Group**

**W.M. Keck Observatory  
Laser Team**

## **Stellar Orbits in the Central Parsec**

A 2.2 micron animation of the stellar orbits in the central 0.5 arcsec. Images taken from the years 1995 through 2016 are used to track specific stars orbiting the proposed black hole at the center of the Galaxy. These orbits, and a simple application of Kepler's Laws, provide the best evidence yet for a supermassive black hole, which has a mass of 4 million times the mass of the Sun. Especially important is the star S0-2 as it has been observed for more than one full orbital period, which is only 16.17 years.



**UCLA  
Galactic Center Group**

**W.M. Keck Observatory  
Laser Team**

## **3D Movie of Stellar Orbits in the Central Parsec**

Stellar orbits that have revealed the existence of a supermassive black hole that is 4 million times the mass of the sun and that lies at the center of the Galaxy ~25,000 light years away. The Galactic center also plays host to an unexpected population of young, massive stars, whose orbits can provide insight into their origin as well as the hostile environment surrounding a supermassive black hole.

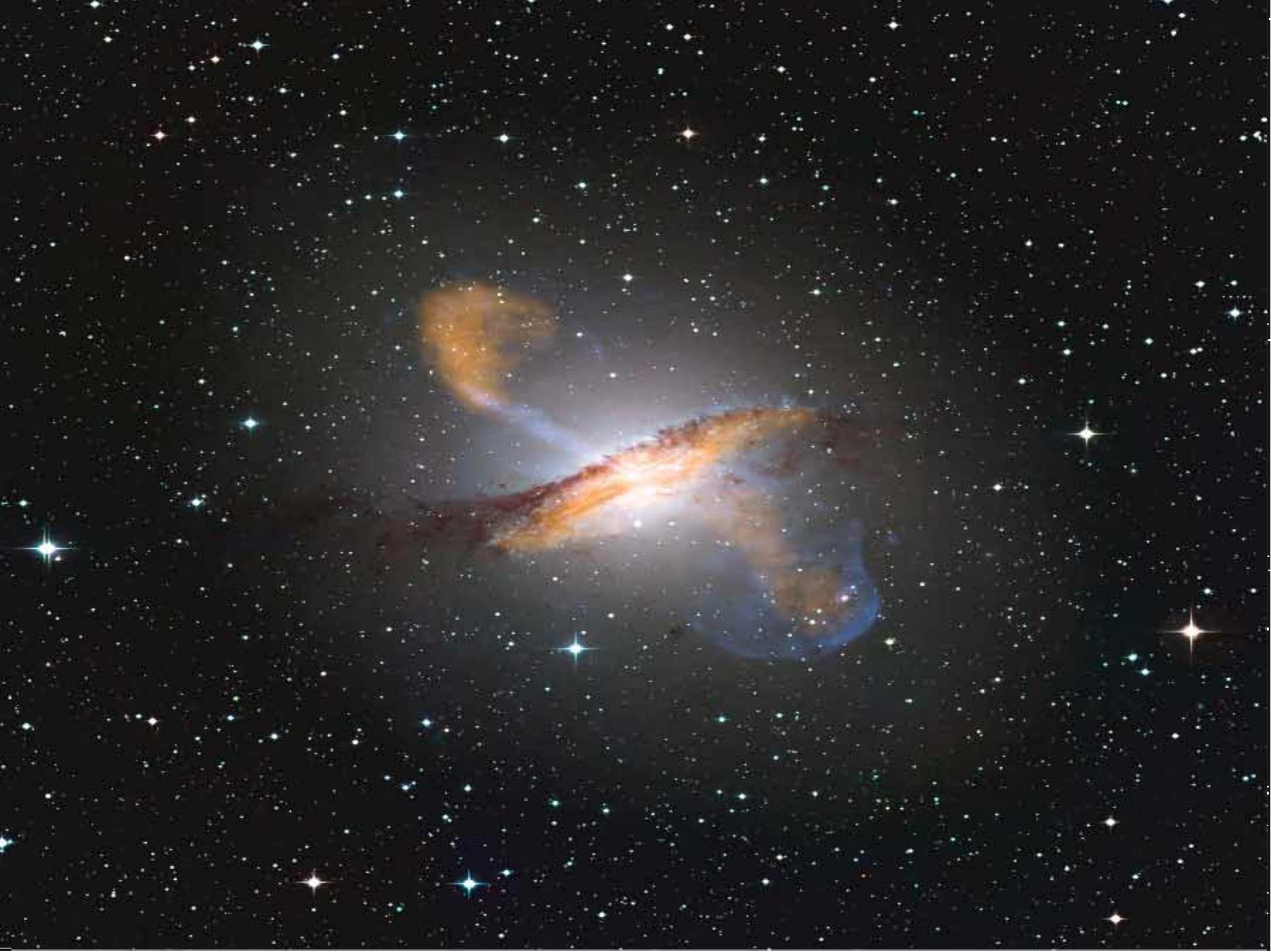
The movie shows a 3-dimensional visualization of the stellar orbits in the Galactic center based on data obtained by the W. M. Keck Telescopes between 1995 and 2012. Stars with the best determined orbits are shown with full ellipses and trails behind each star span ~15-20 years. These stars are color-coded to represent their spectral type: Early-type (young) stars are shown in teal green, late-type (old) stars are shown in orange, and those with unknown spectral type are shown in magenta.

Stars without ellipses are from a statistical sample and follow the observed radial distributions for the early (white) or late (yellow/orange) type stars. These stars are embedded in a model representation of the inner Milky Way provided by NCSA/AVL to provide context for the visualization.

The movie begins at the very center of the Galaxy, ~0.015 pc from the supermassive black hole, in the year 1893, and pulls away to a distance of 0.2 pc as the movie reaches the year 2013, ending from the viewing angle of Earth.

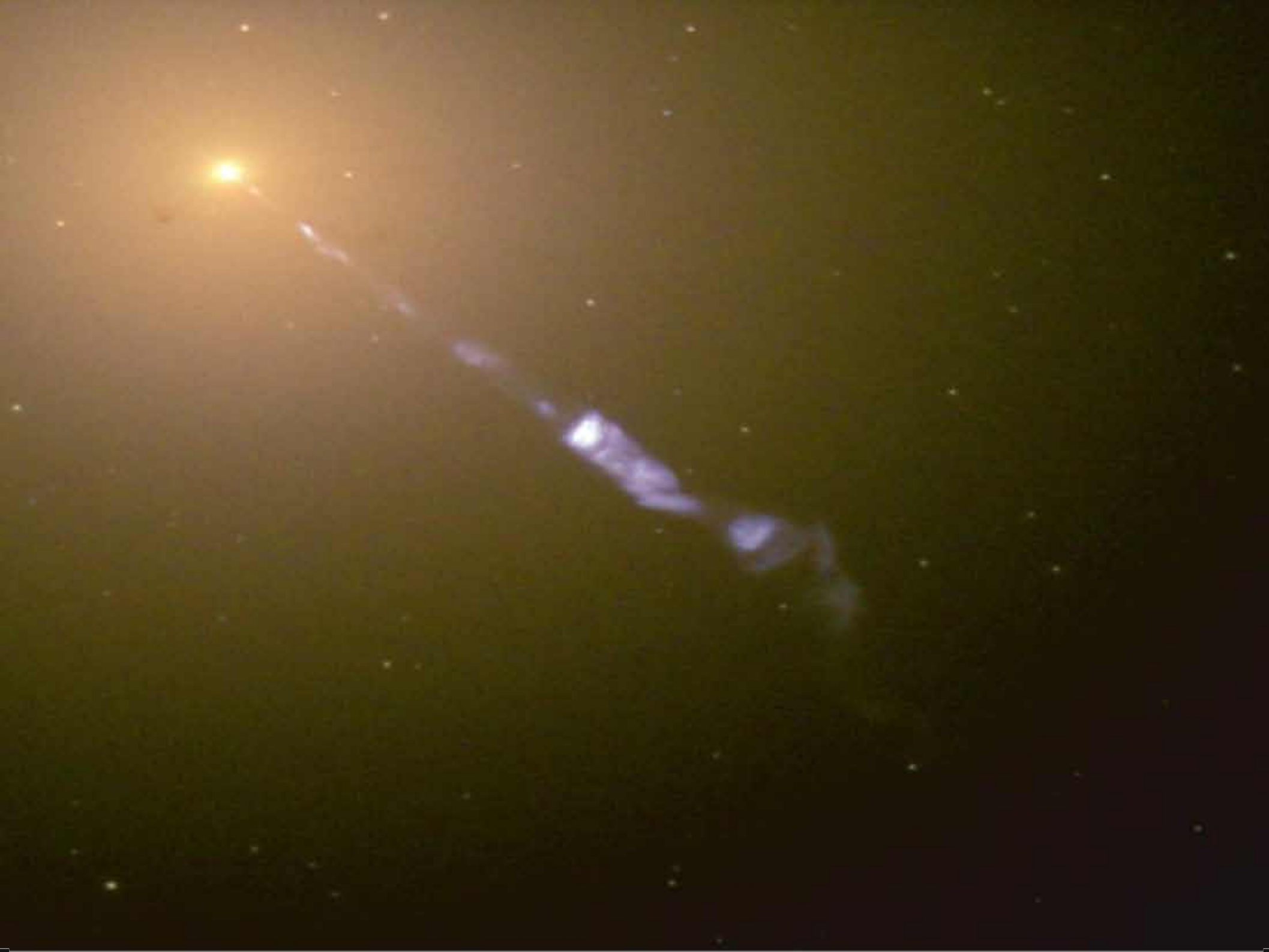












**CUANDO DOS COLISIONAN...**

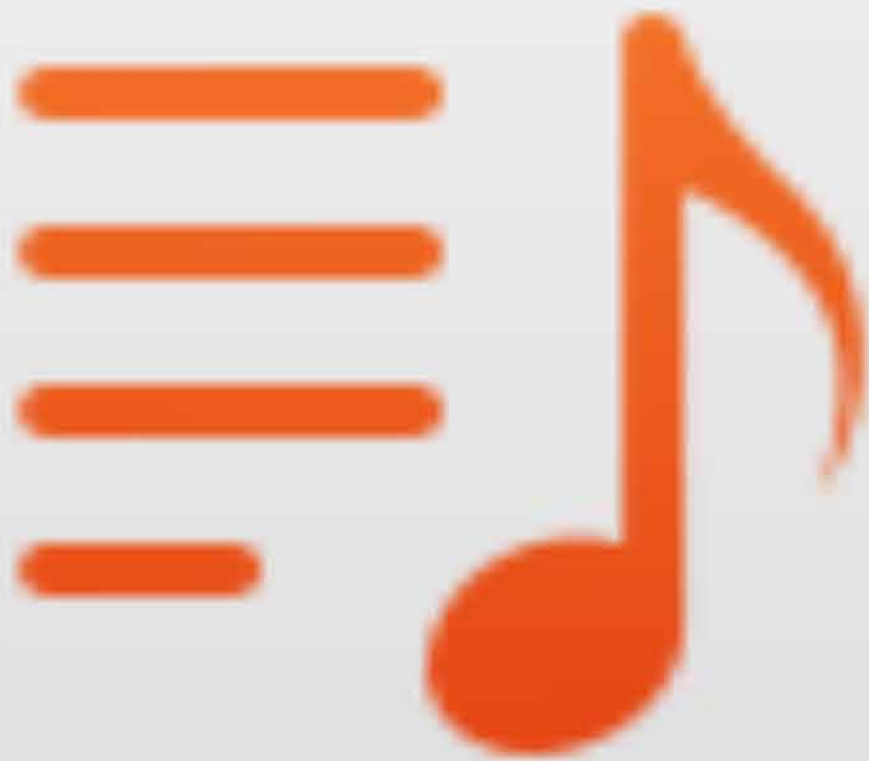


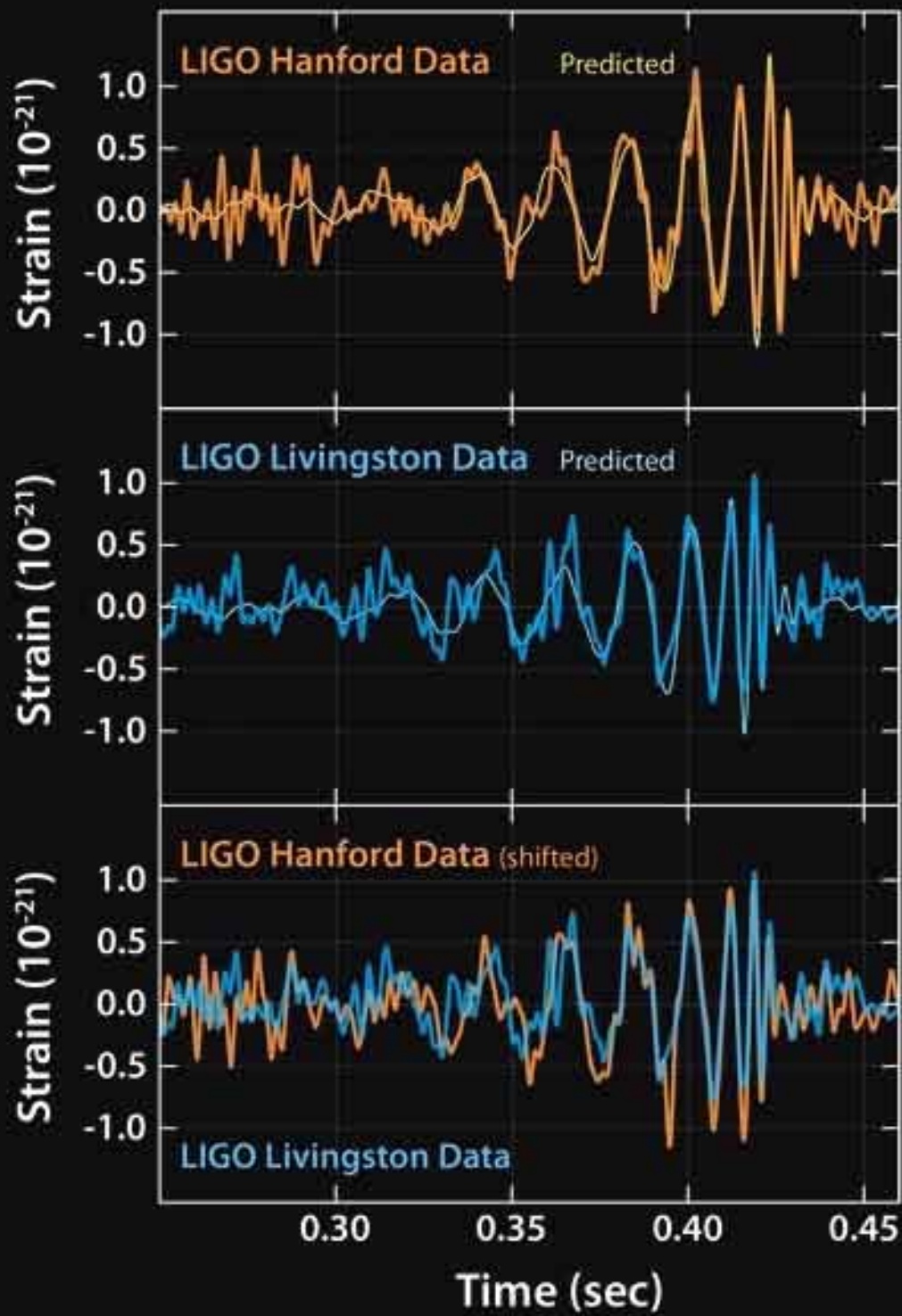
















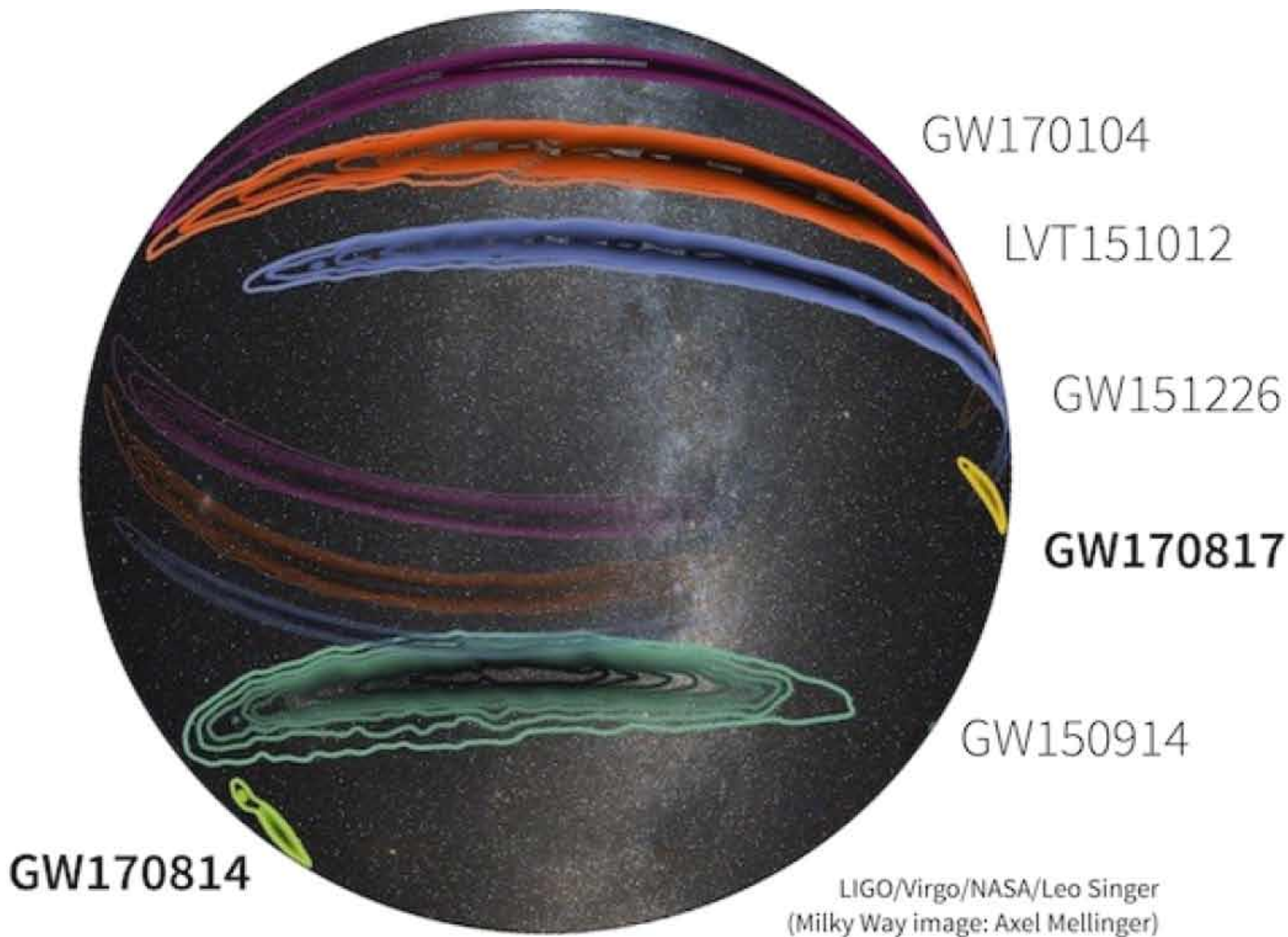
De un caso único no se puede hacer ciencia...

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

Ahora, triangulando con VIRGO











*Hemos descubierto un sexto  
(o séptimo) sentido...*



**FIN**