

# Las ondas gravitacionales

- ¿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** ha detectado *ondas gravitacionales* y que eso confirma la *Teoría de la Relatividad General* de **Einstein**.

El objetivo de esta charla es explicar las *cursivas*.

¿Demasiado difícil?

# Ideas principales

- 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.

**En estos términos lo que ha  
pasado es que**

**un cambio brutal (el choque de dos agujeros  
negros) ha producido una onda que ha llegado  
a la Tierra causando pequeños cambios que  
LIGO (la regla más precisa) ha medido.**

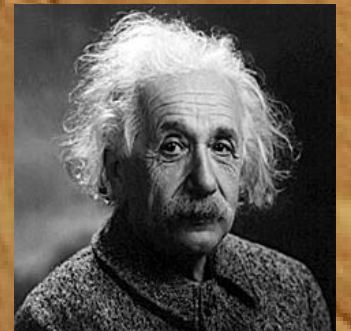
# Plan de la charla

- **La velocidad de la luz y la Relatividad Especial**
- **La gravedad y la Relatividad General**
- **Ondas: cómo producirlas y detectarlas.**
- **LIGO y las ondas gravitatorias**

# LA RELATIVIDAD ESPECIAL

Principio de Relatividad Especial (Einstein 1905)

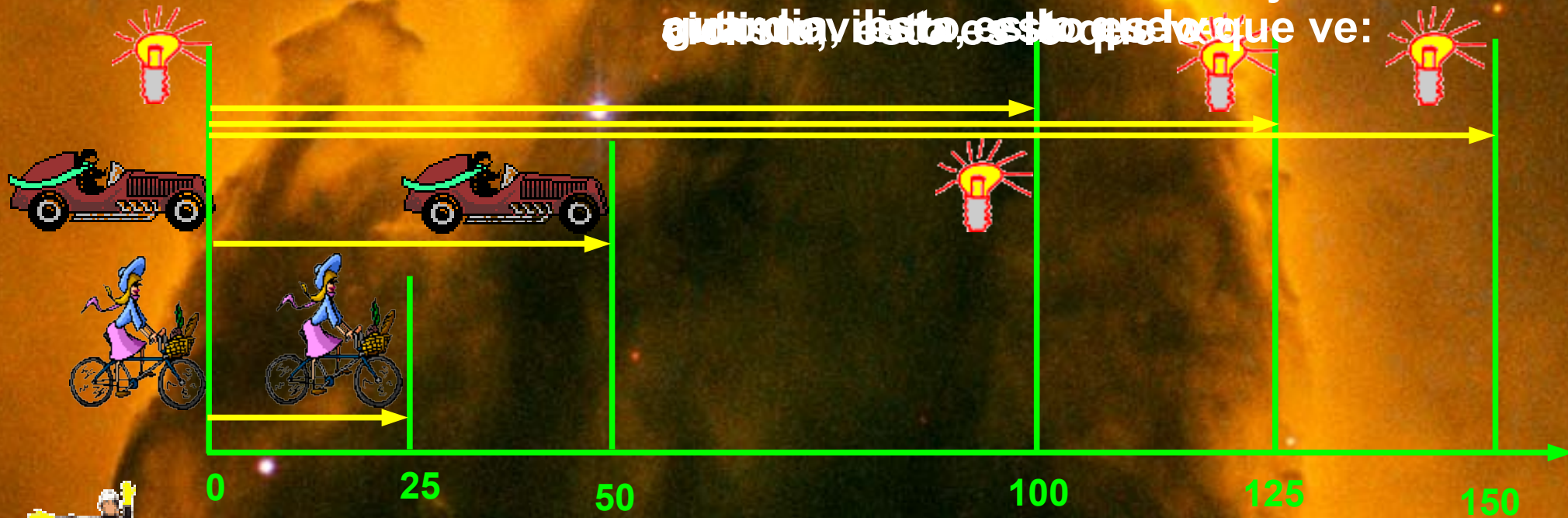
Una ley muy especial: la velocidad de la luz.



**Gedankenexperiment:**  **Consecuencias** Supongamos que  $c$  fueran 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 della**

**guardia, y esto, es lo que ve:**



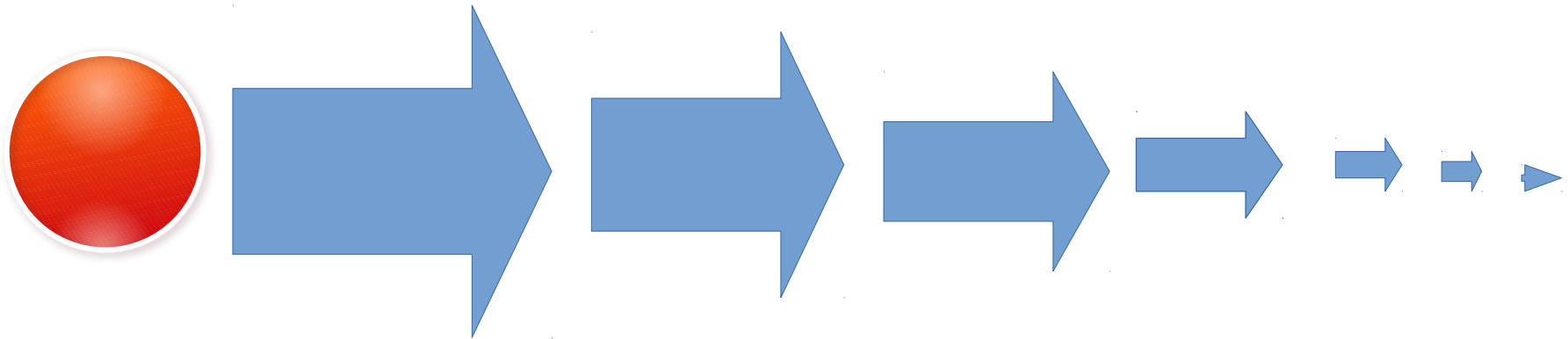
Los relojes y las reglas del guardia, el ciclista y el automovilista son distintas (**relatividad**). Más diferentes cuanto mayor es la velocidad relativa. Con respecto a la luz siempre ha de ser  $c$  y nunca se puede alcanzar esa velocidad, que es **máxima**.



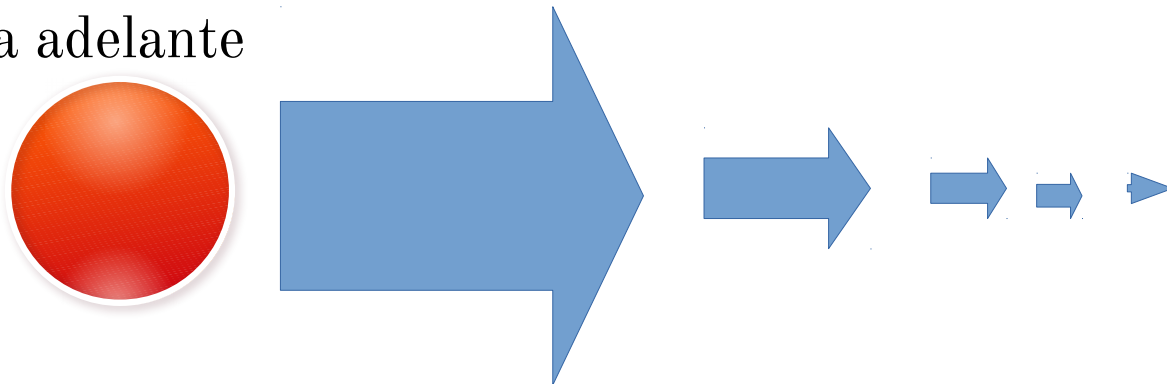
- **Medimos tiempos y distancias diferentes, pero sabemos relacionar nuestras medidas (¿qué es la realidad?)**
- **Podemos congelar el tiempo.**
- **Nada (objetos, señales, información) puede viajar más rápido que la luz.**
- **No existen los sólidos rígidos.**
- **Todo se propaga necesariamente como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

$$E = m c^2$$

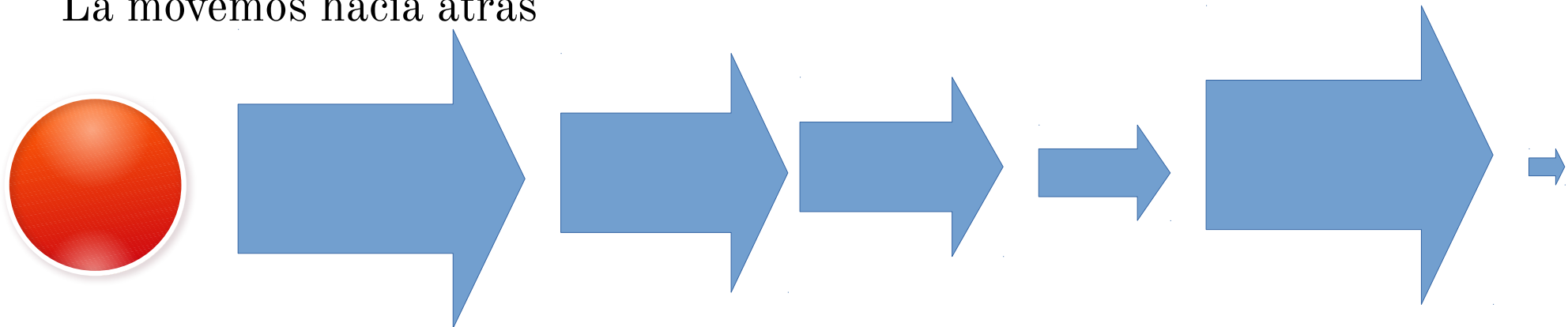
# Campo eléctrico de una carga



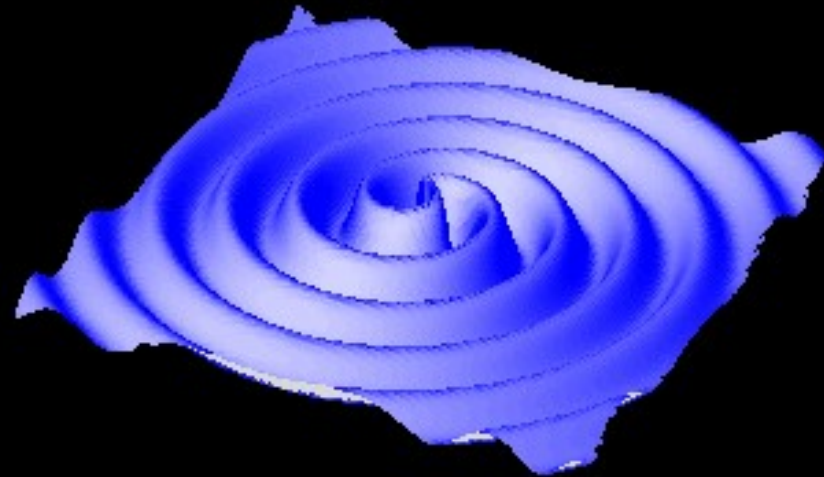
La movemos hacia adelante



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**

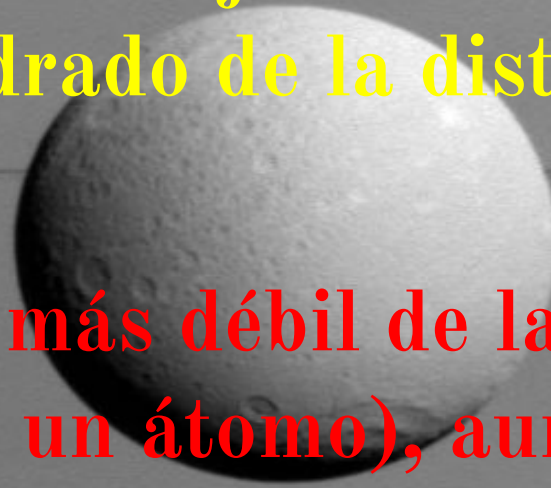
**Pero hay más leyes  
fundamentales: la de la  
Gravitación Universal de  
Newton.**



**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.**

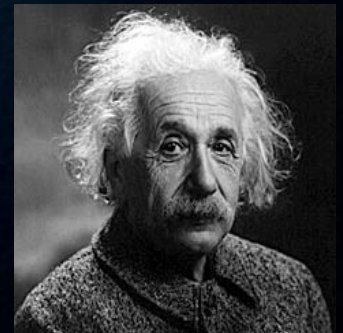
**La Gravitación Universal está incompleta: no nos dice qué pasa cuando las masas se mueven.**



**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)**

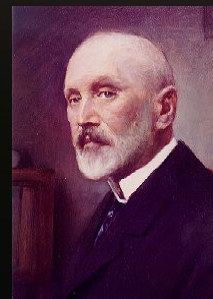
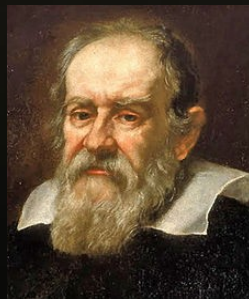




La nueva teoría parte de un nuevo principio:

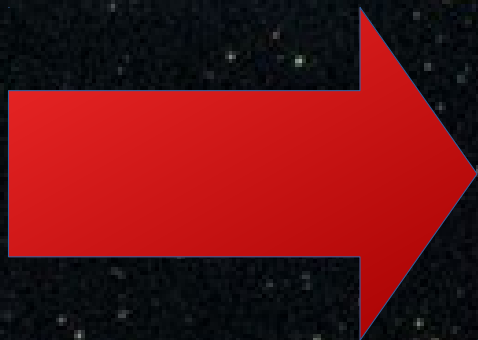
# Principio de Equivalencia (de la gravedad y la inercia)

(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
- 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

et

et  
tiempo

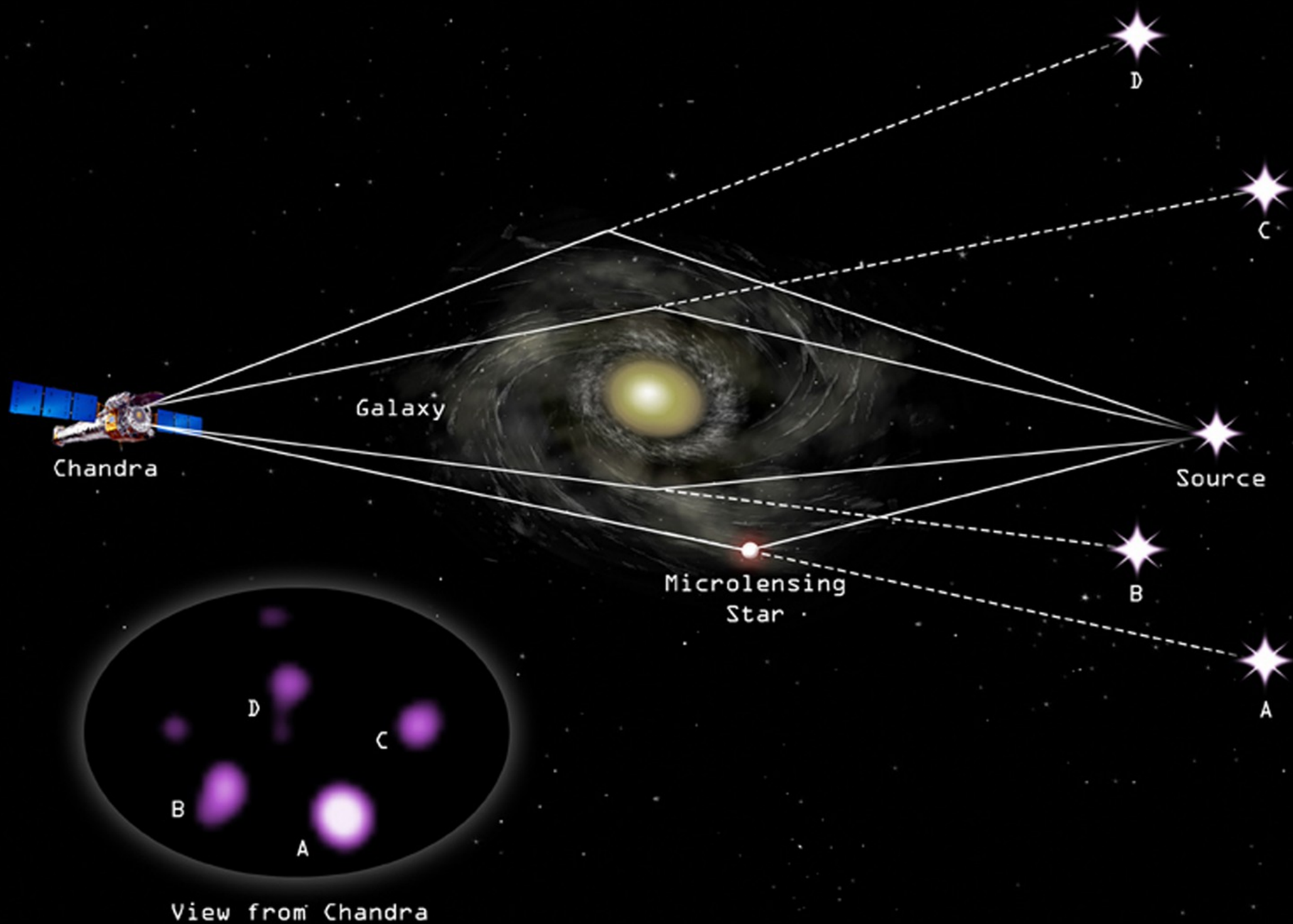
Pero si una masa curva  
el tiempo...

d

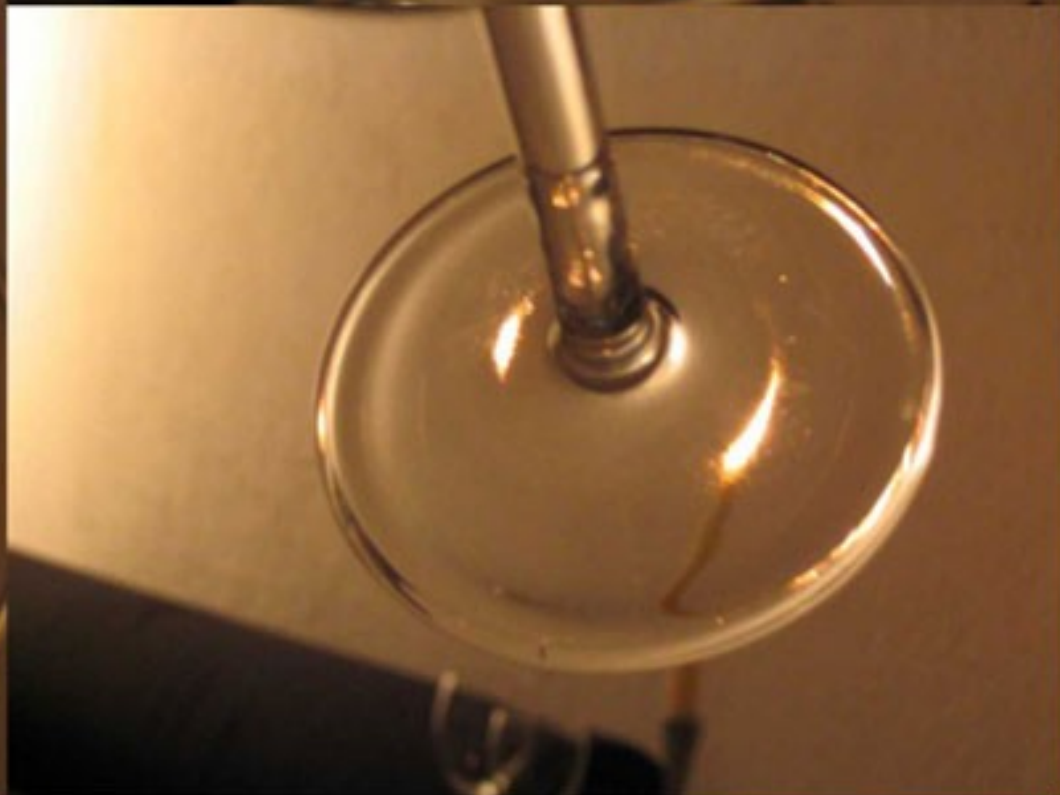
¡El movimiento nos  
parece decelerado!



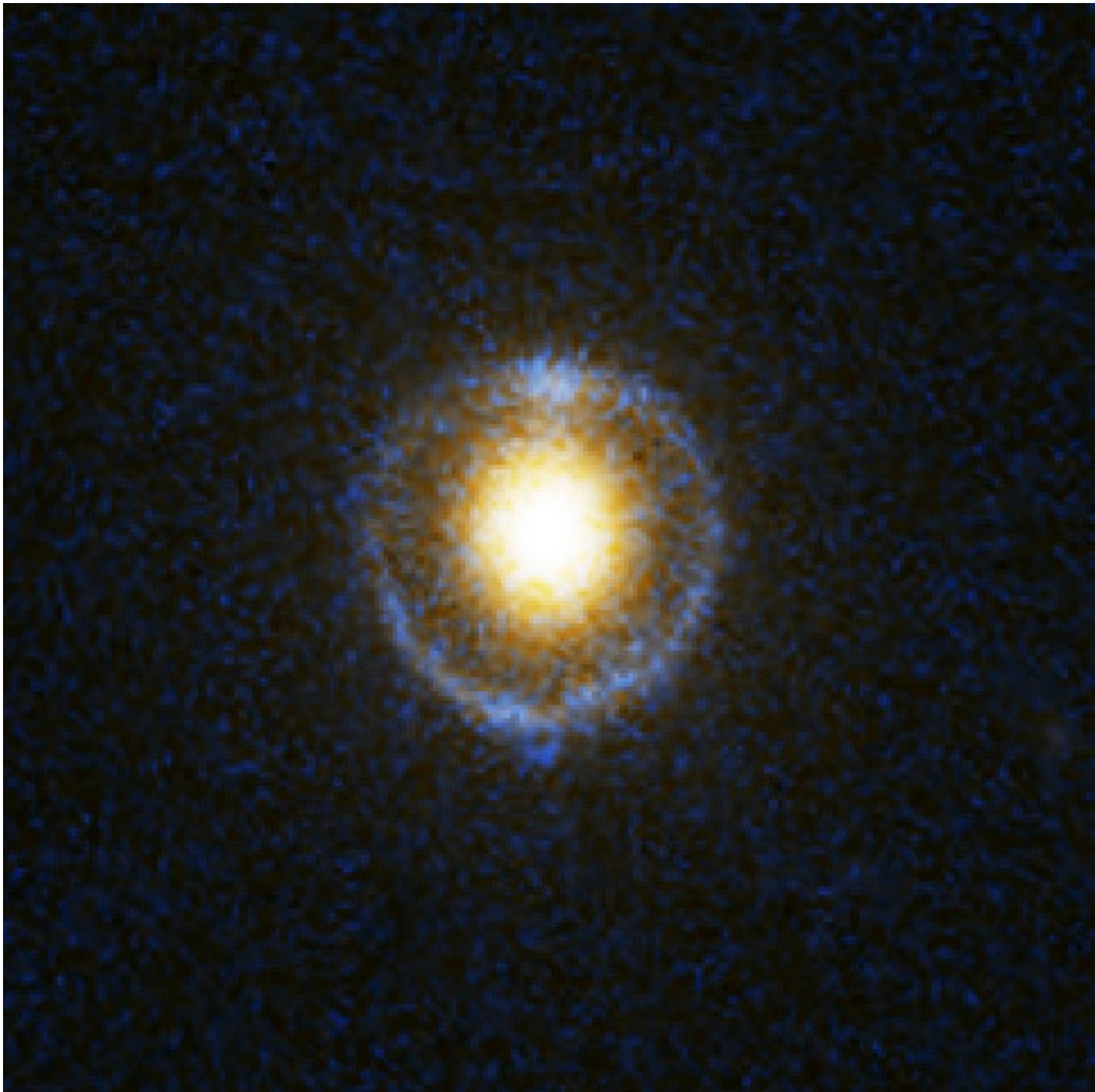
**El Principio de Equivalencia  
también nos dice que la luz  
(como todo)  
siente la gravedad.**















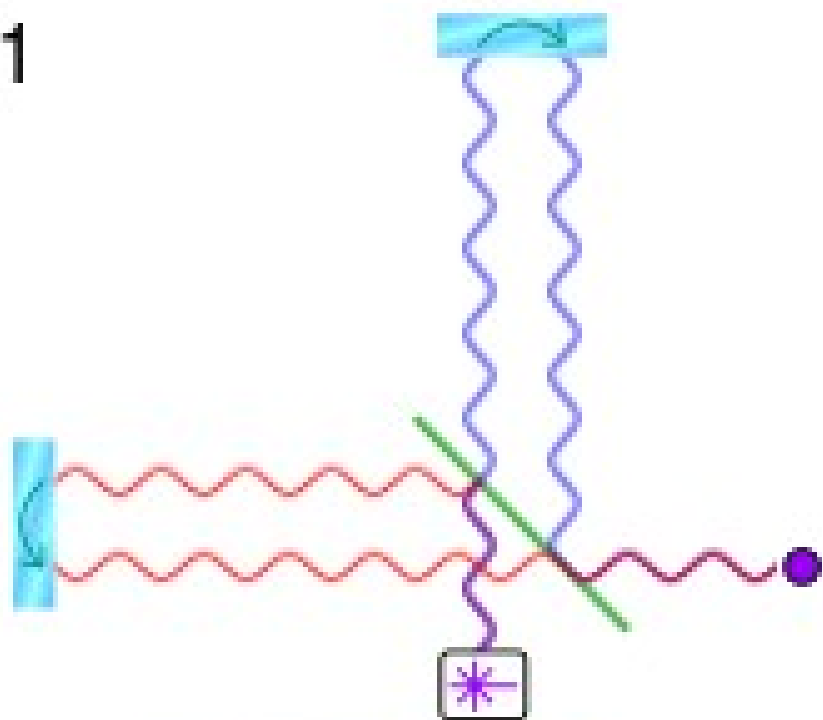
# ONDAS GRAVITACIONALES

- 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

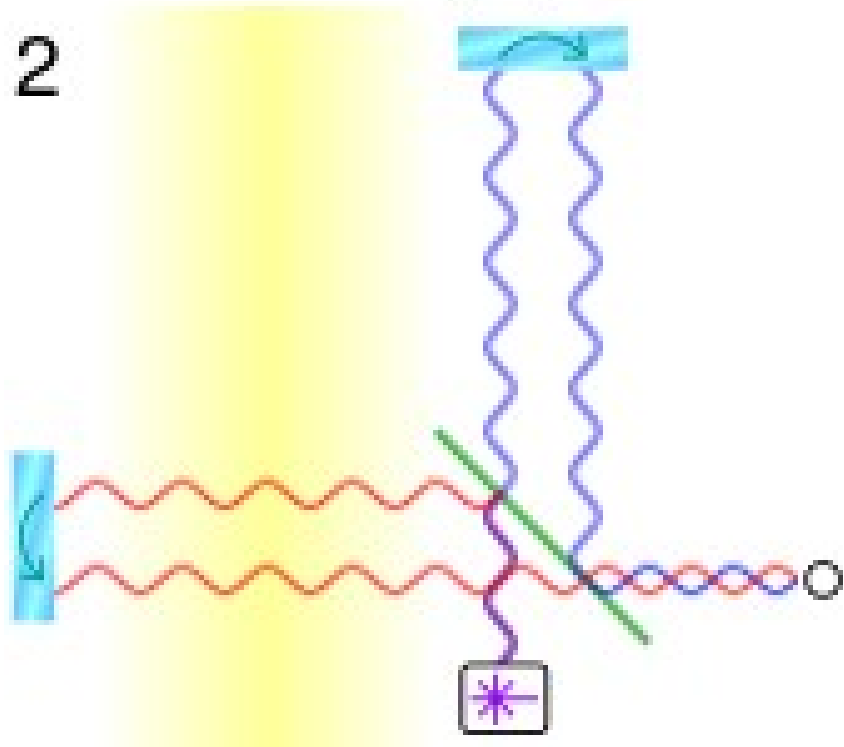
# EL DETECTOR: REGLA Y RELOJ



1



2





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



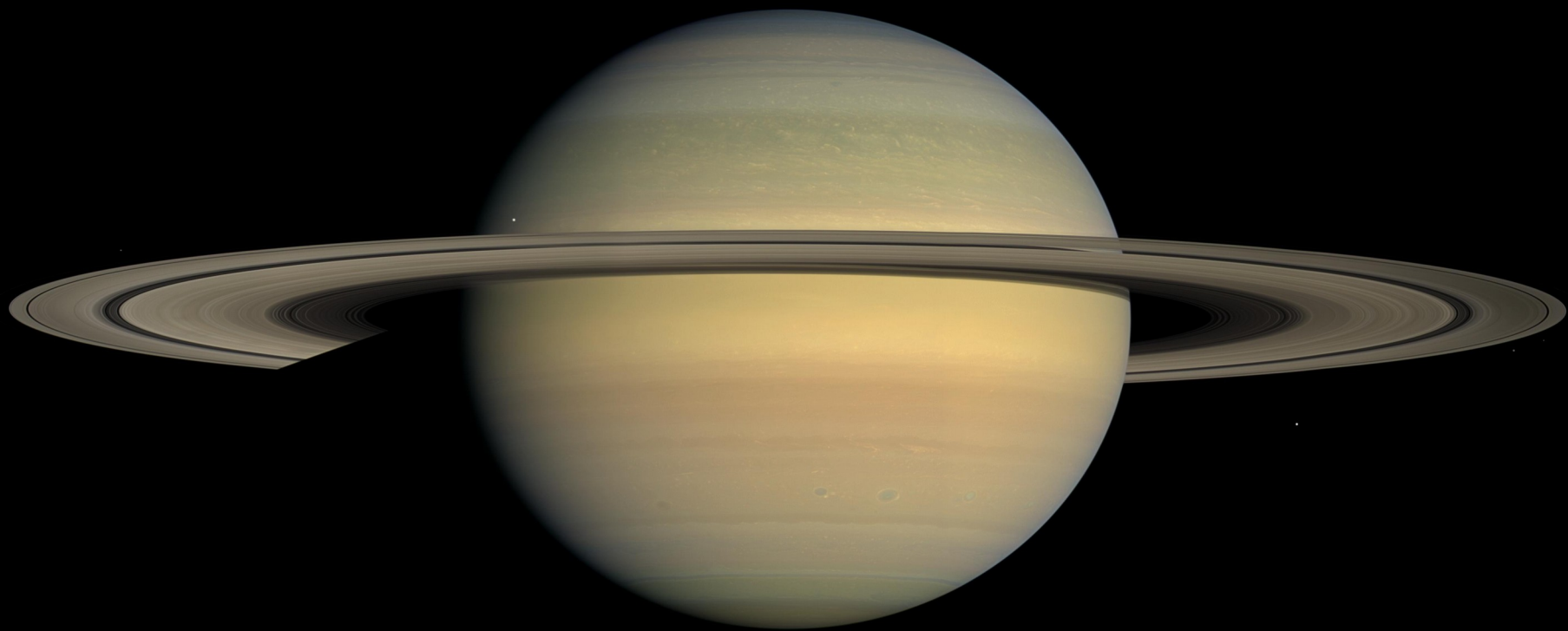
**Hay que simular en  
ordenadores  
los cambios más  
bruscos e  
intensos concebibles.**

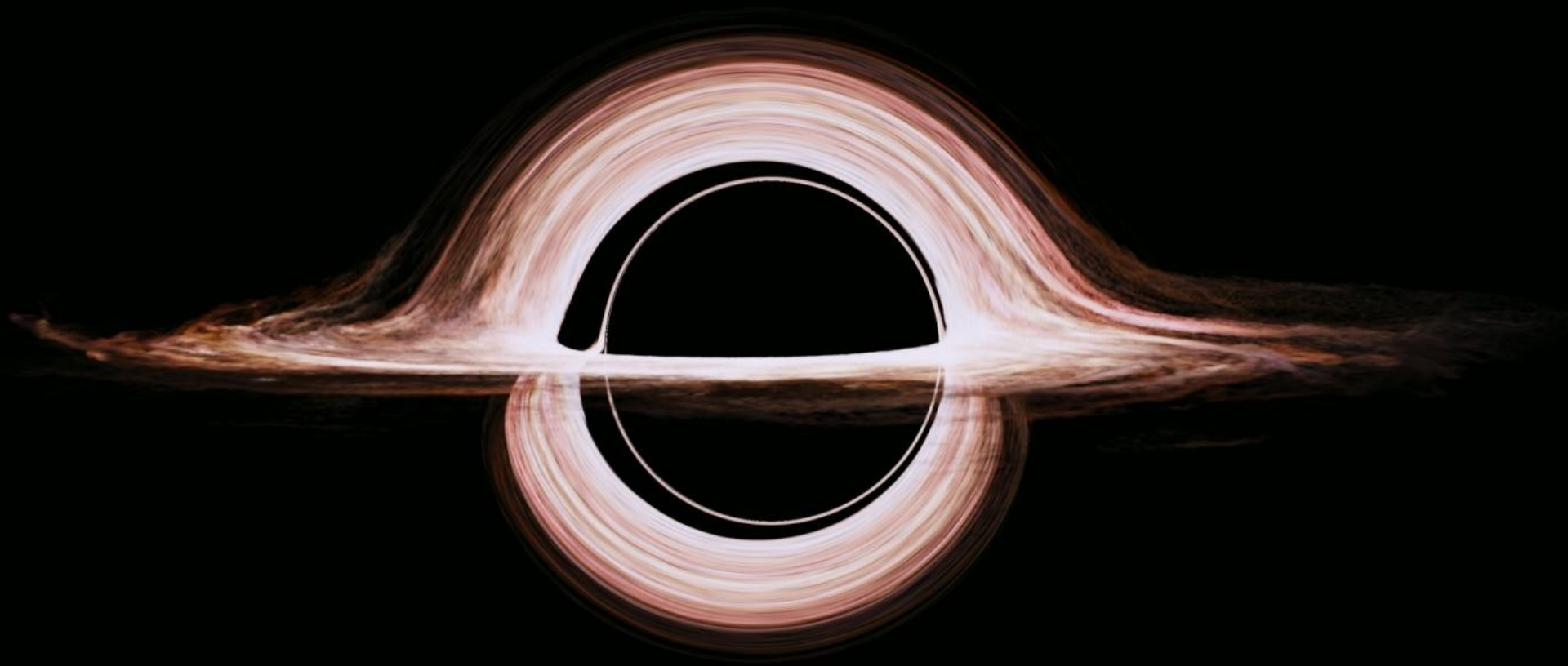


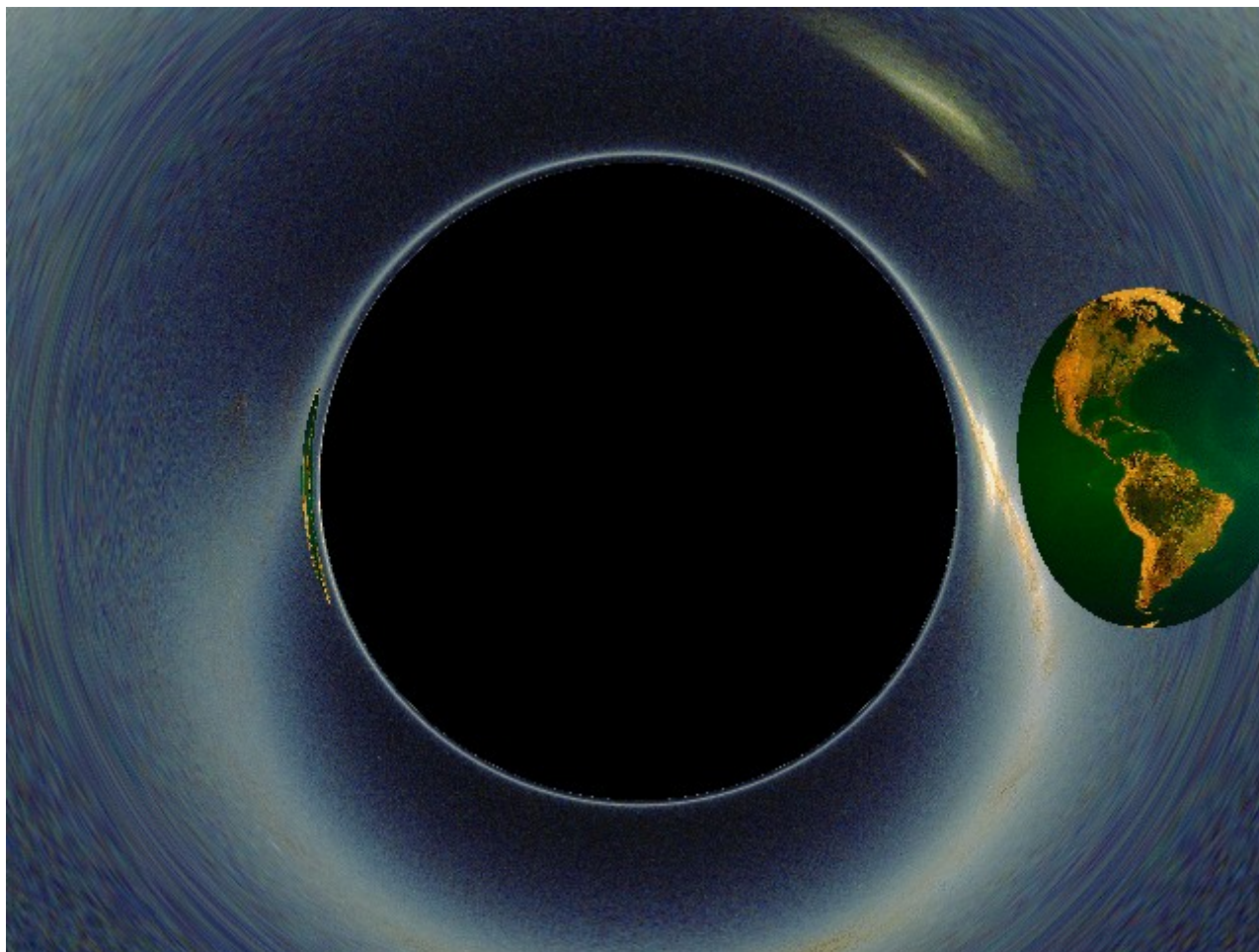
**CHOQUES DE  
AGUJEROS NEGROS**



- 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.







**Pero, ¿realmente existen?**

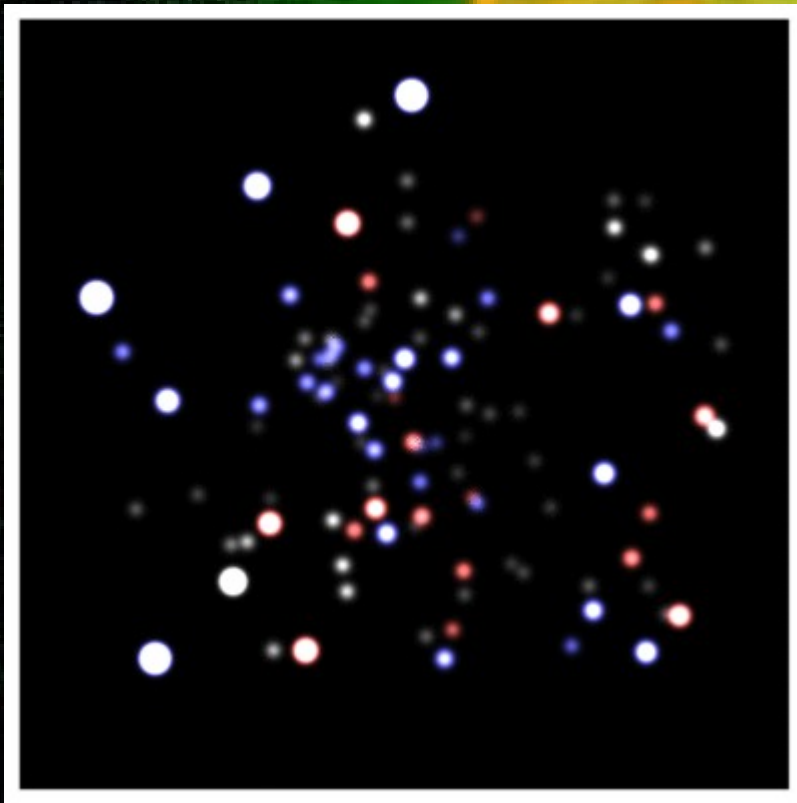
**Por sus efectos los reconoceréis.**

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

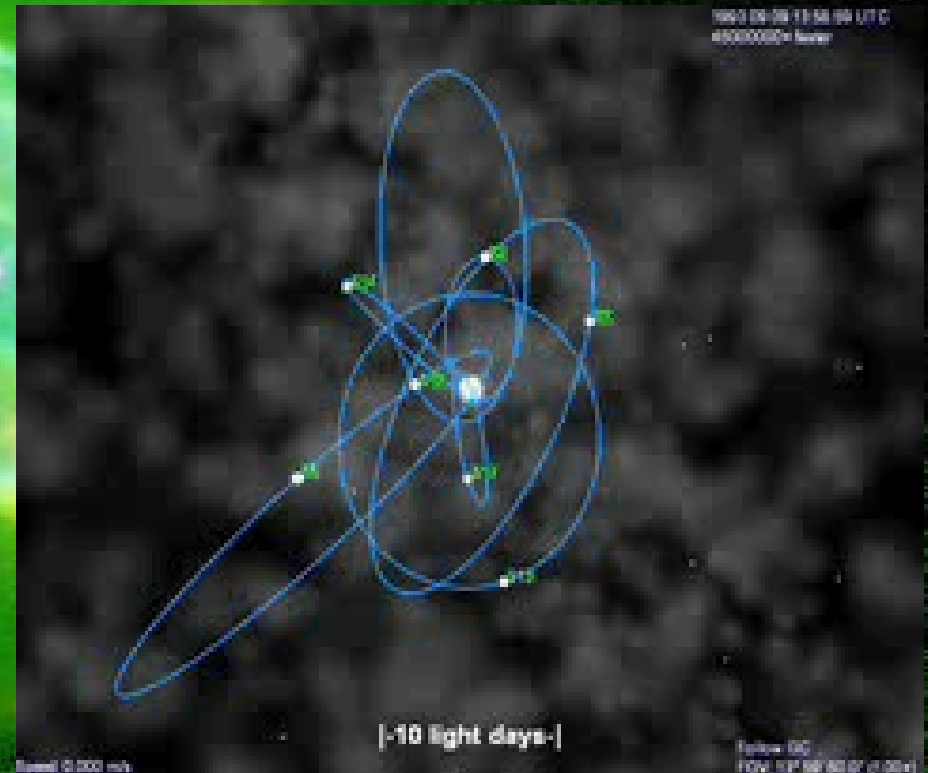
**$M \sim 1.000.000.000.000 M_{\odot}$**

# Evidencia: el agujero negro supermasivo de la Vía Láctea

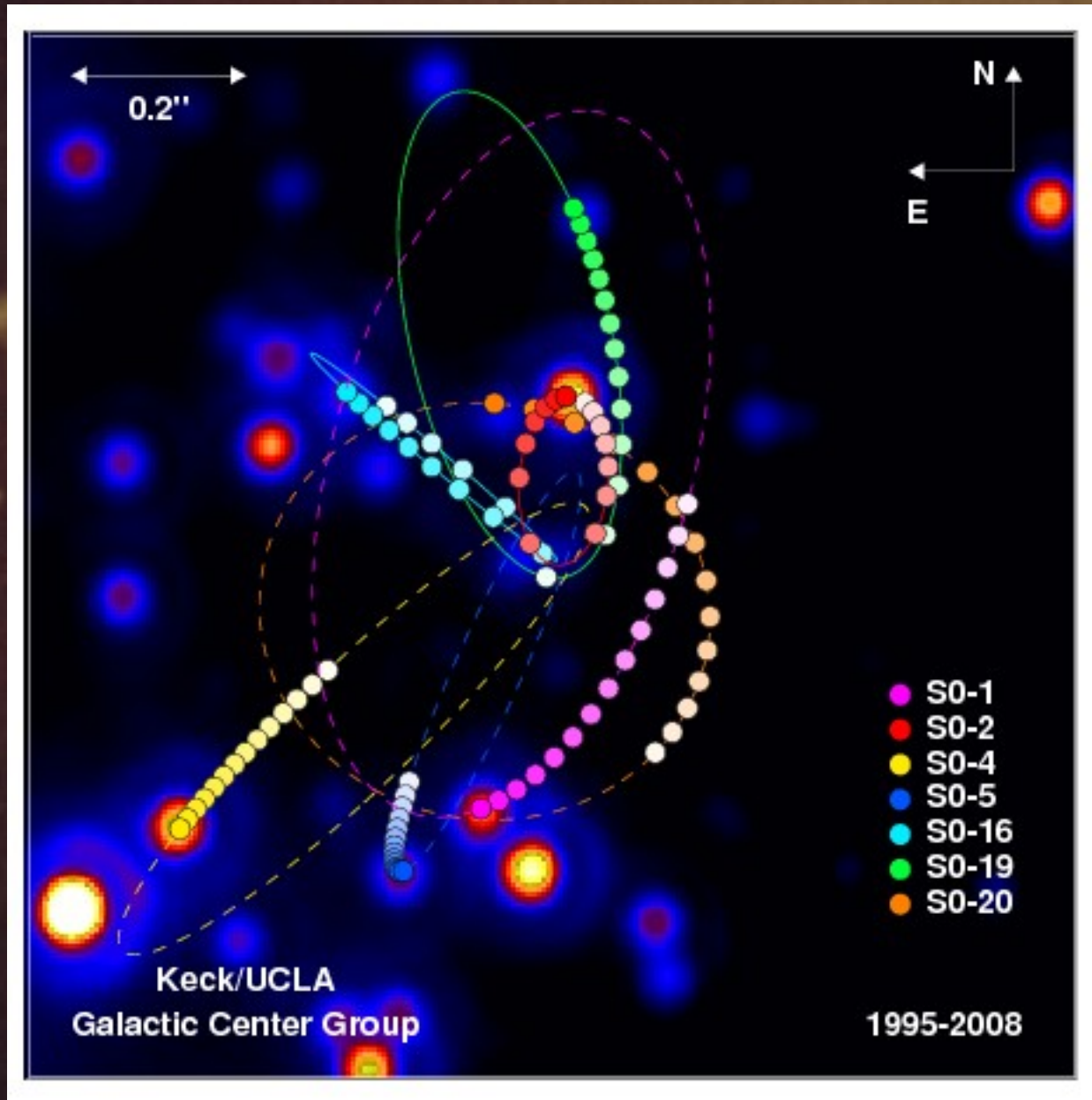
Secuencia de imágenes tomadas por investigadores del Max Planck 1992-2009

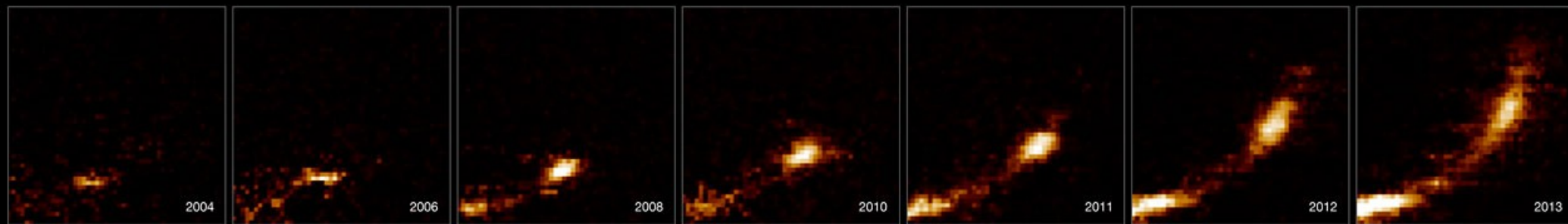


Animación que reconstruye las órbitas de las estrellas alrededor de un objeto Invisible de **37 millones masas solares**

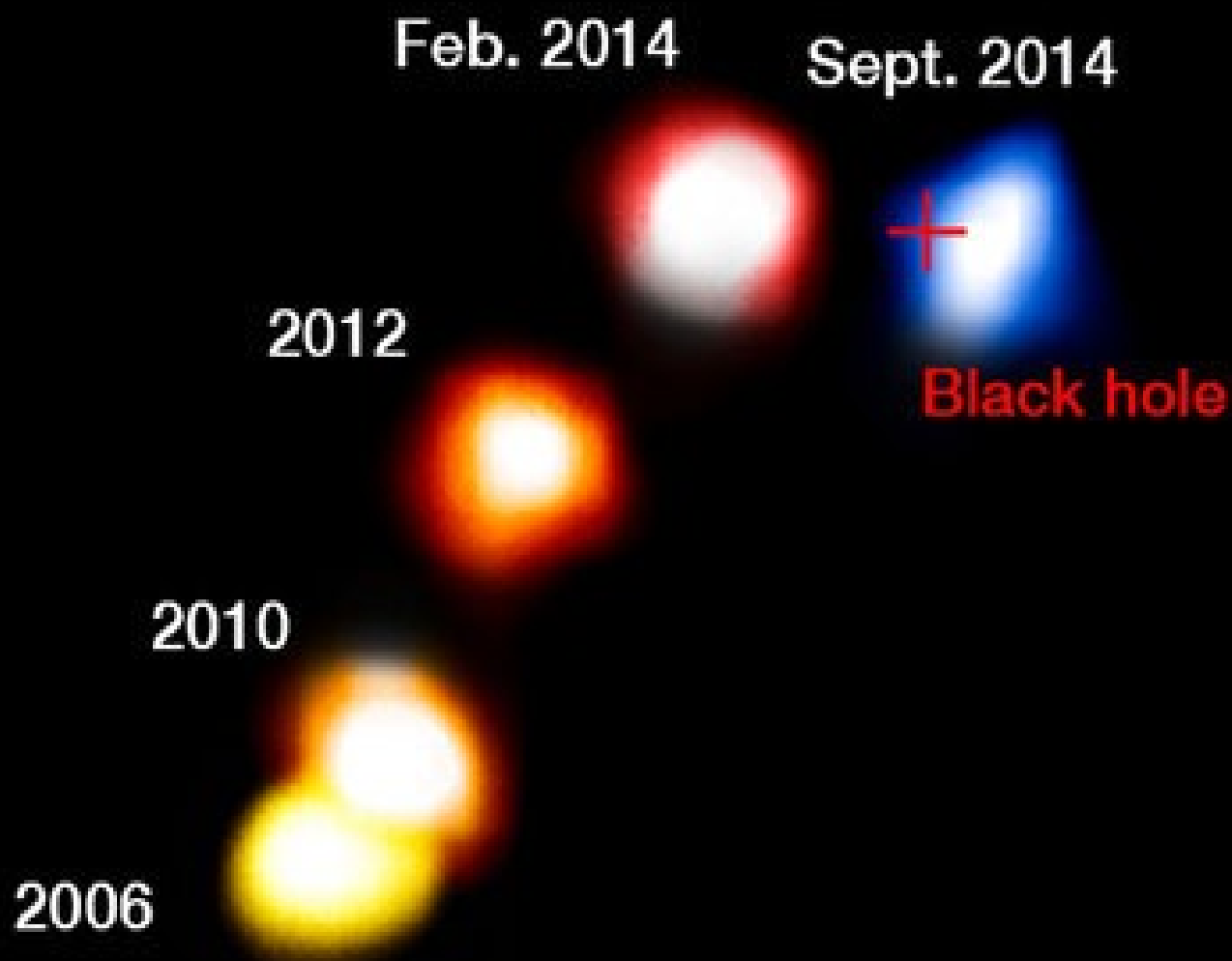


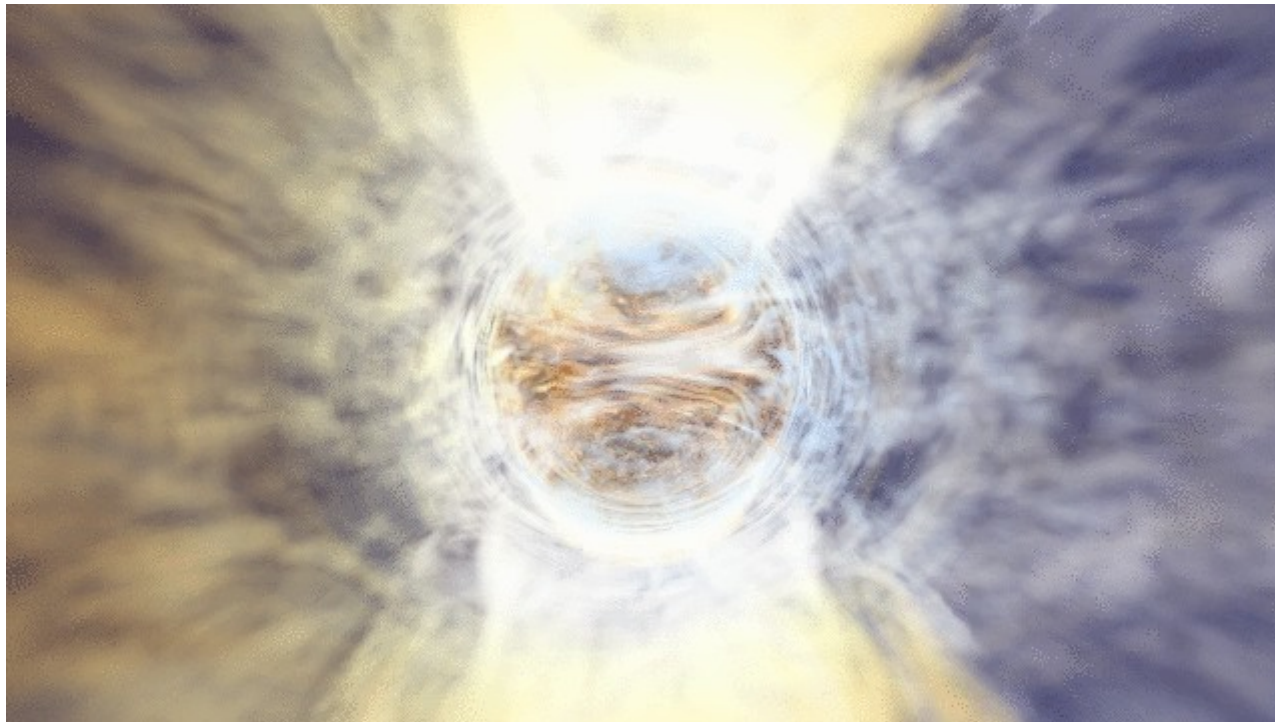
# Resultados de las observaciones del grupo Keck/UCLA en la misma región de la Vía Láctea

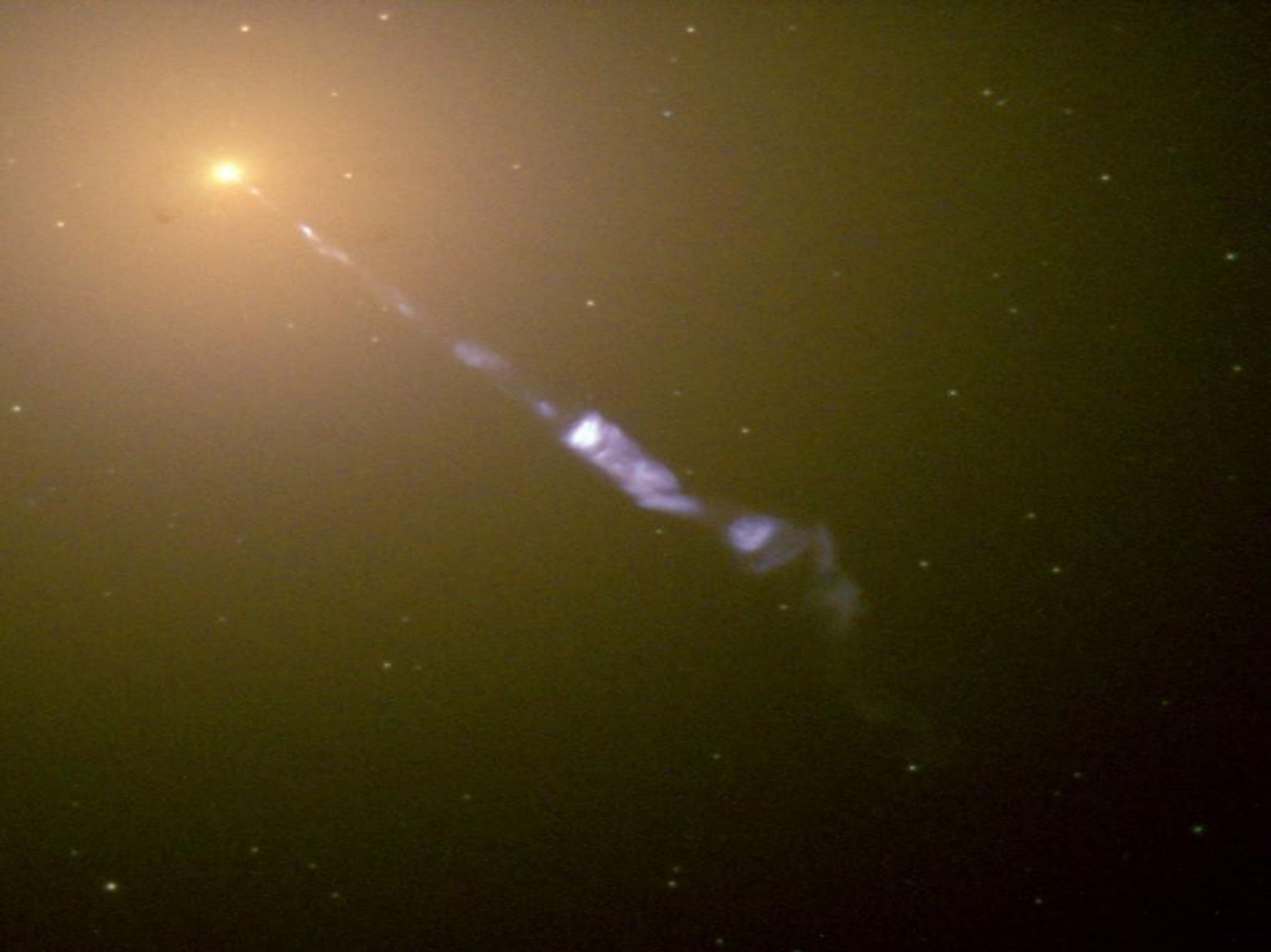
















**CUANDO DOS  
COLISIONAN...**



