

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.**

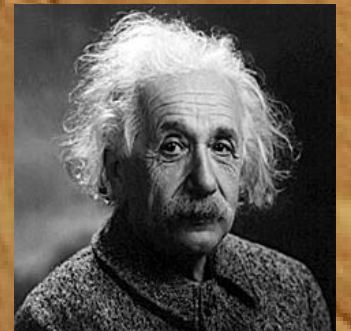
Plan de la charla

- **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)

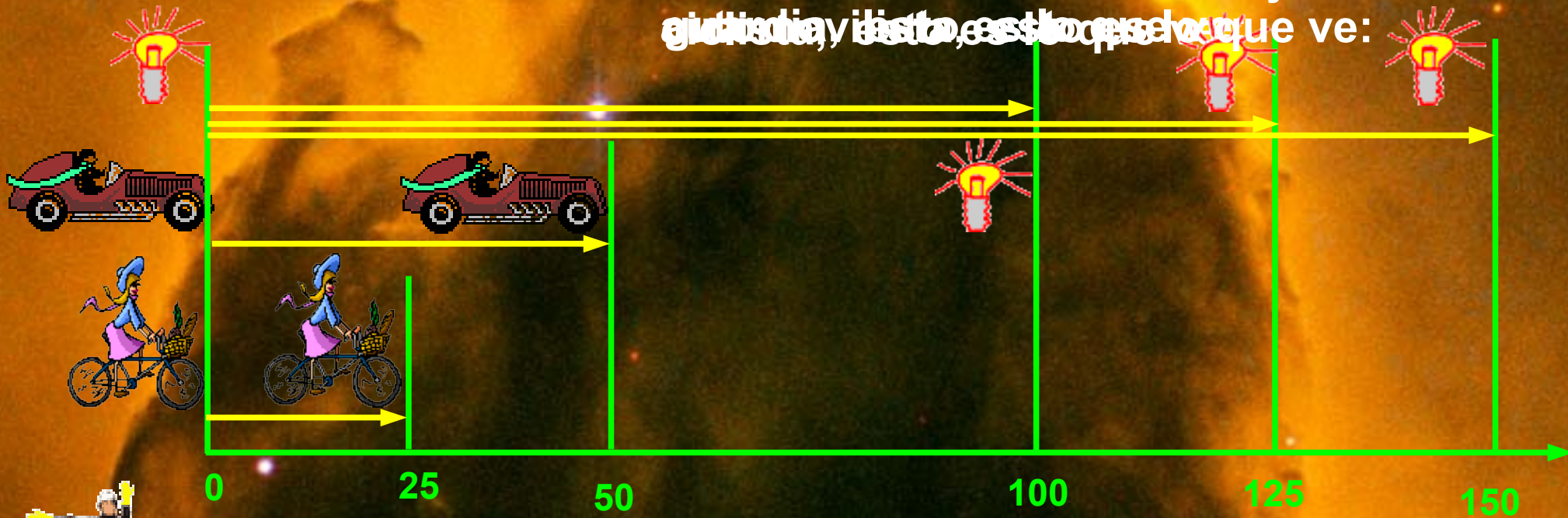
Una ley muy especial: la velocidad de la luz.



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, ¿esto, es lo que ve:**

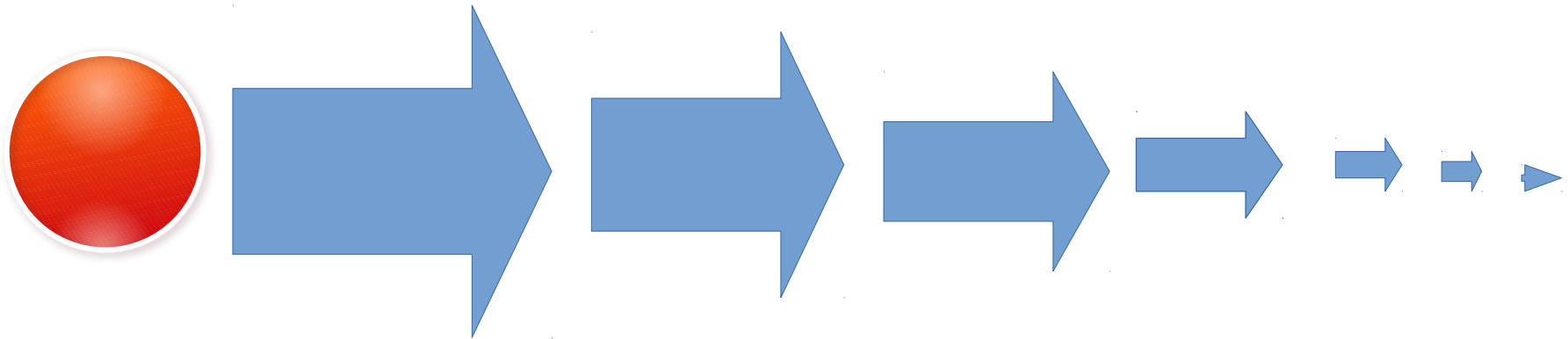


Los relojes y las reglas del guardia, el ciclista y el automovilista son distintas (**relatividad**). Más diferentes cuanto mayor es la velocidad relativa. Con respecto a la luz siempre ha de ser c y nunca se puede alcanzar esa velocidad, que es **máxima**.

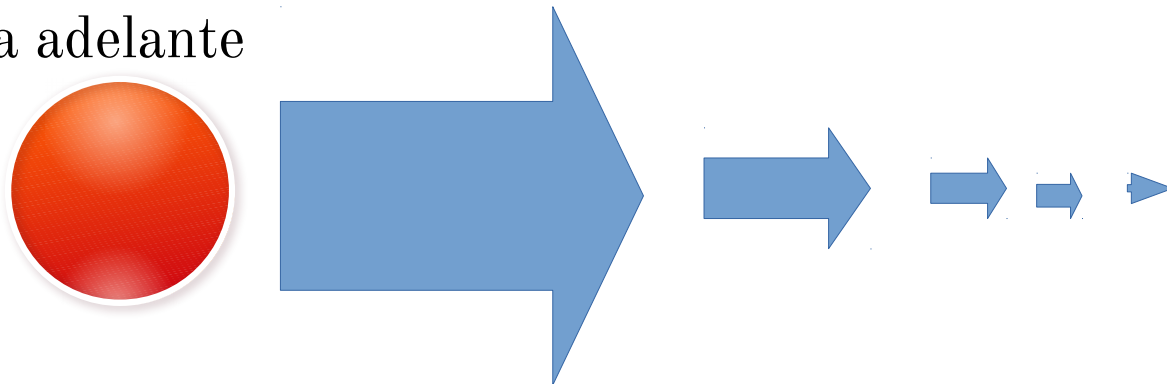
- **Medimos tiempos y distancias diferentes, pero sabemos relacionar nuestras medidas (¿qué es la realidad?)**
- **Podemos congelar el tiempo.**
- **Nada (objetos, señales, información) puede viajar más rápido que la luz.**
- **No existen los sólidos rígidos.**
- **Todo se propaga necesariamente como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

$$E = m c^2$$

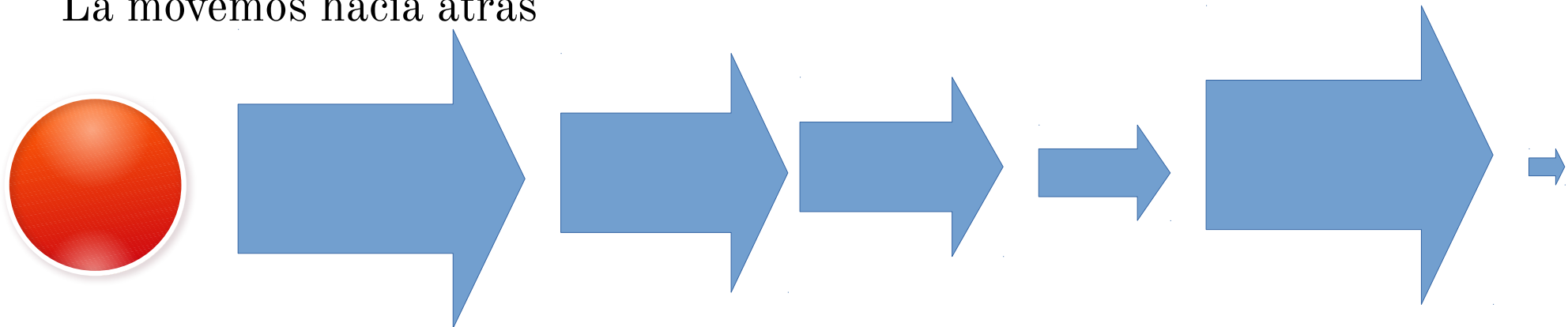
Campo eléctrico de una carga



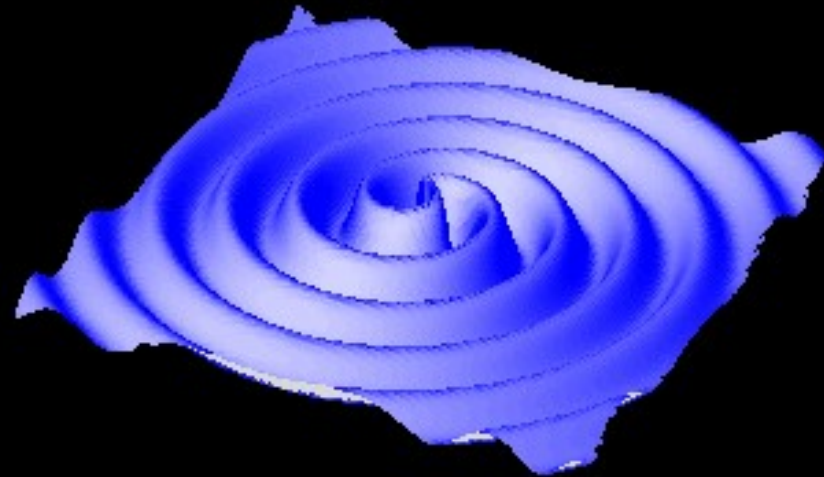
La movemos hacia adelante



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**

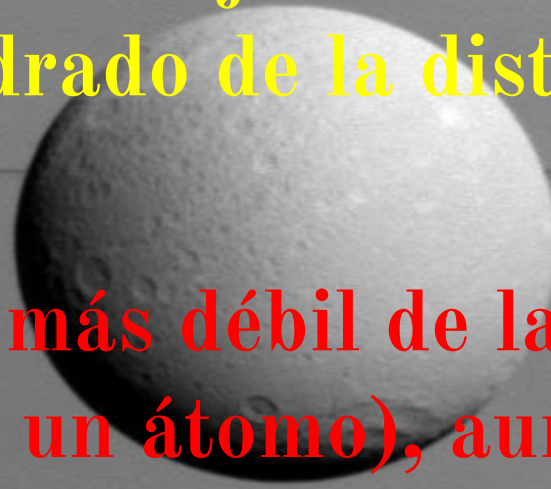
**Pero hay más leyes
fundamentales: la de la
Gravitación Universal de
Newton.**



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.

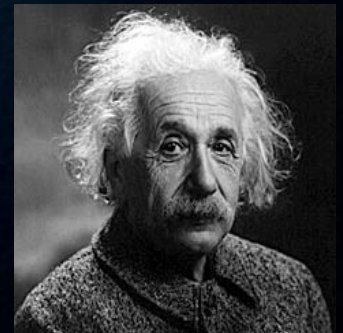
La Gravitación Universal está incompleta: no nos dice qué pasa cuando las masas se mueven.



**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.**

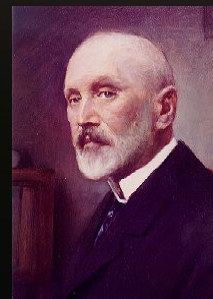
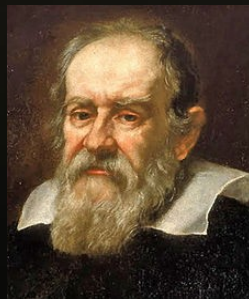
(Hilbert, Einstein 1915)



La nueva teoría parte de un nuevo principio:

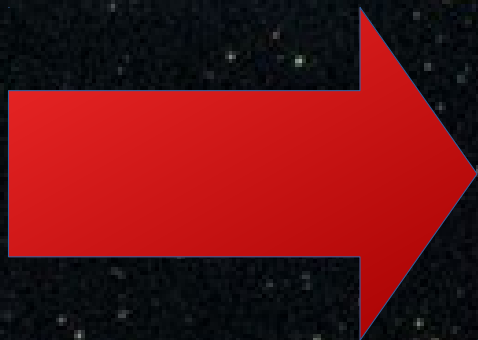
Principio de Equivalencia (de la gravedad y la inercia)

(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

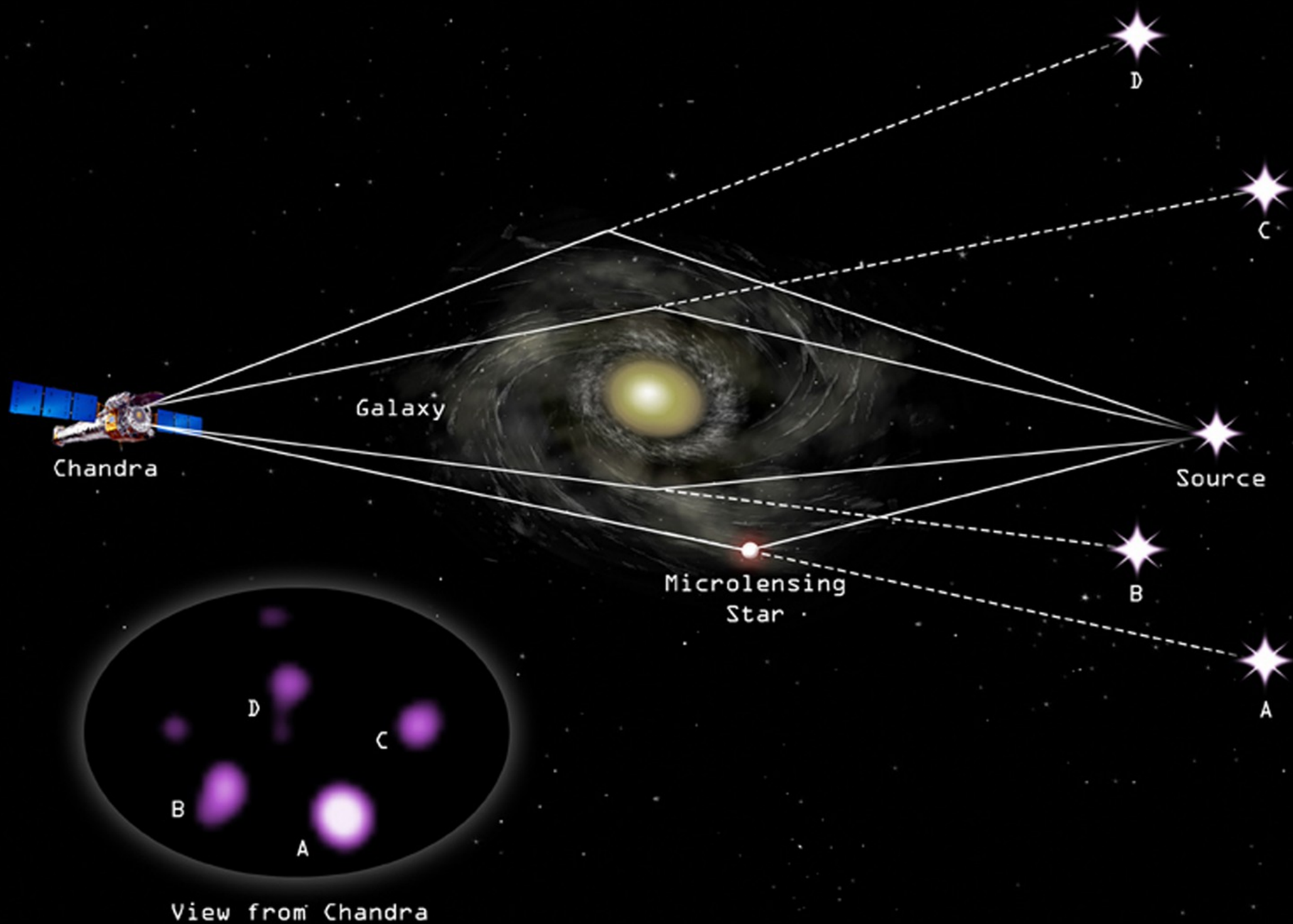
Pero si una masa curva
el tiempo...

d

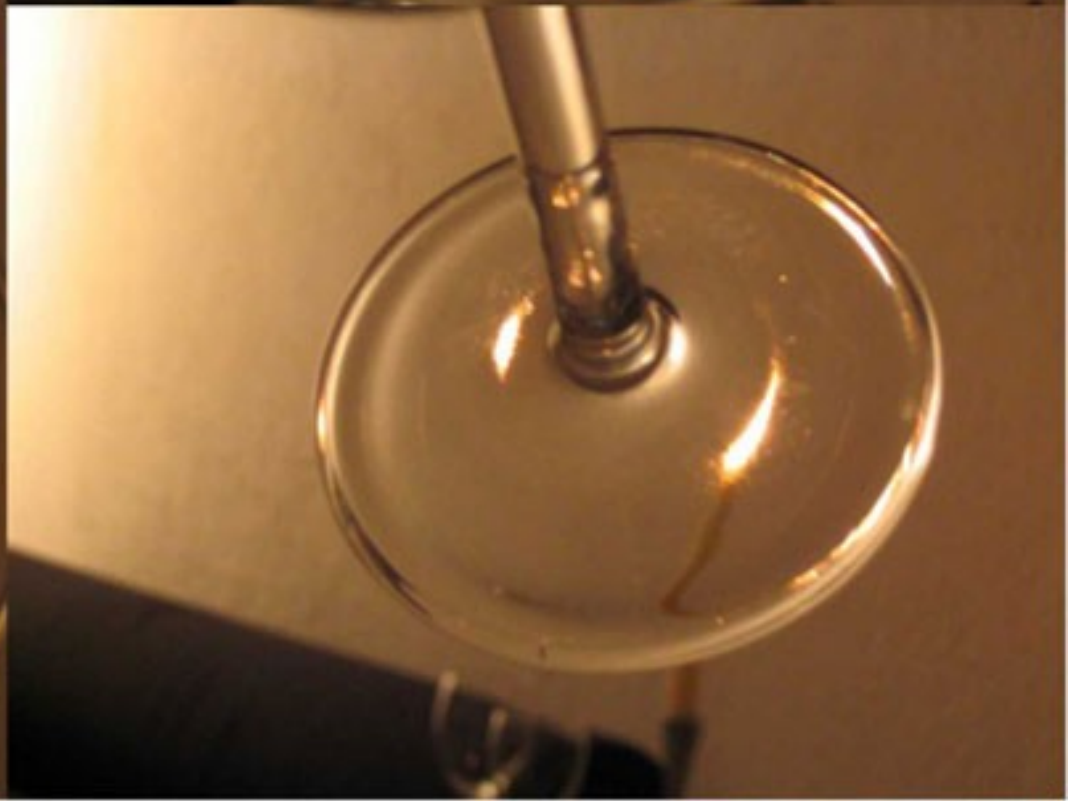
¡El movimiento nos
parece decelerado!

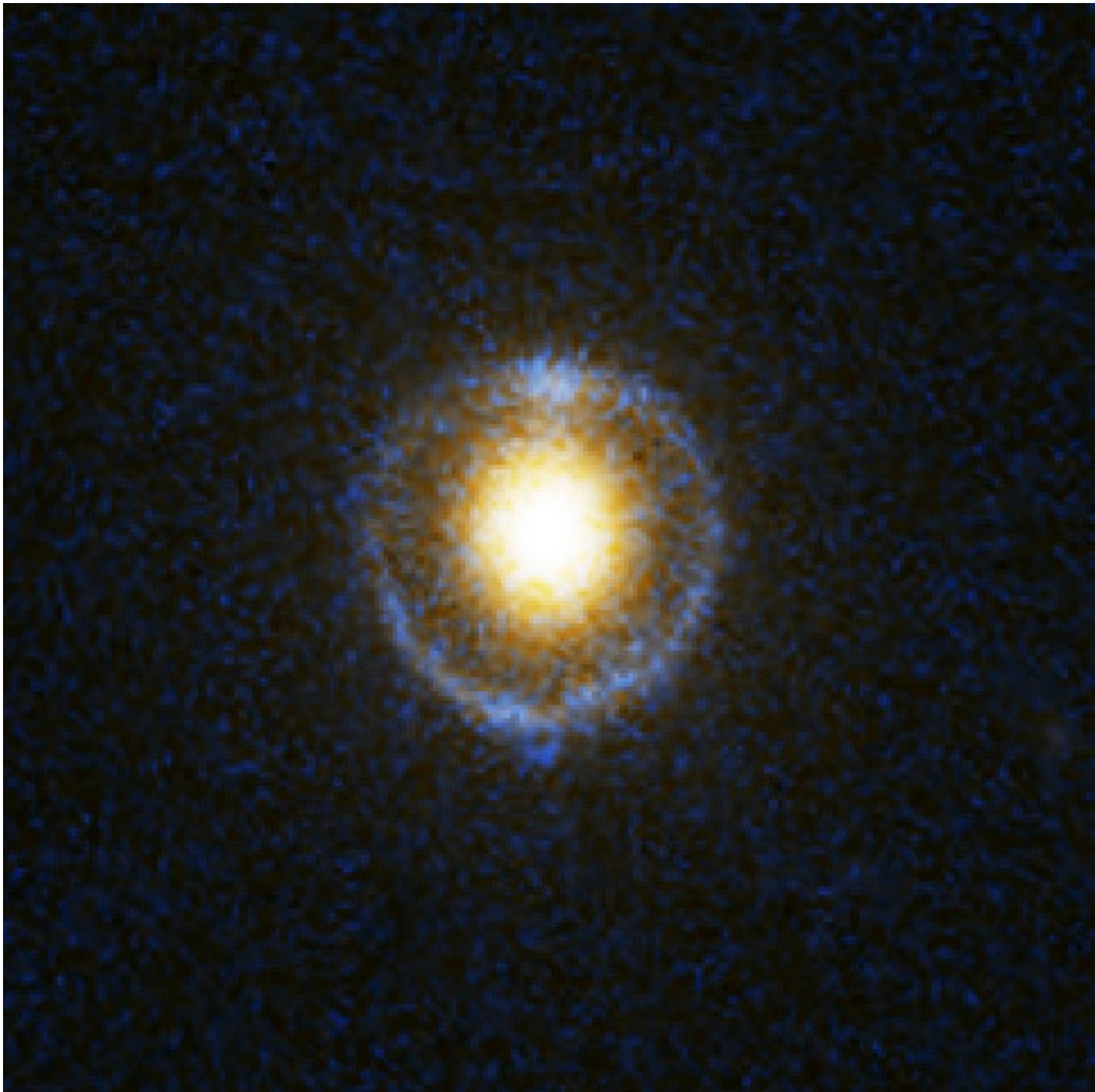


**El Principio de Equivalencia
también nos dice que la luz
(como todo)
siente la gravedad.**













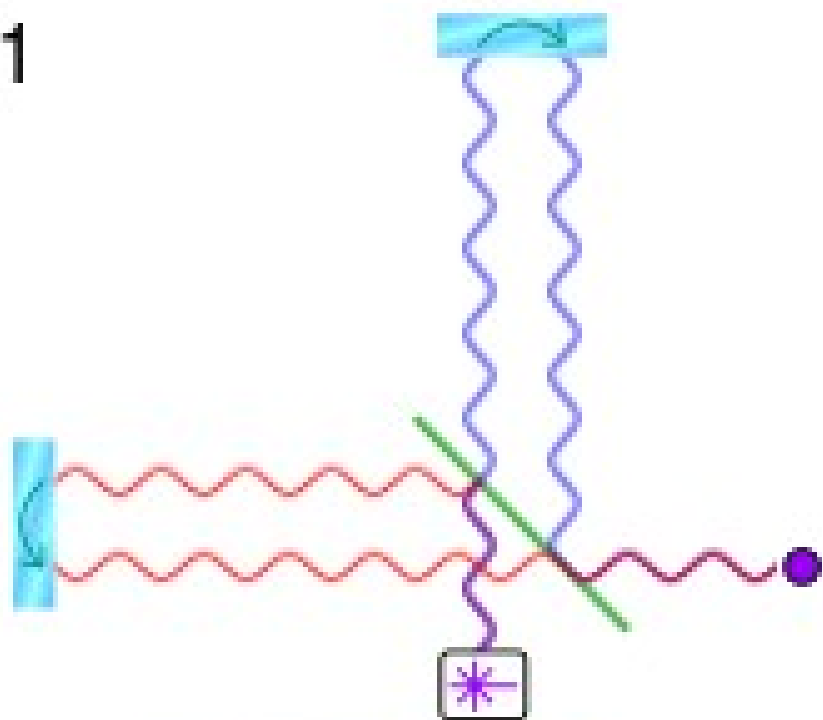
ONDAS GRAVITACIONALES

- 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

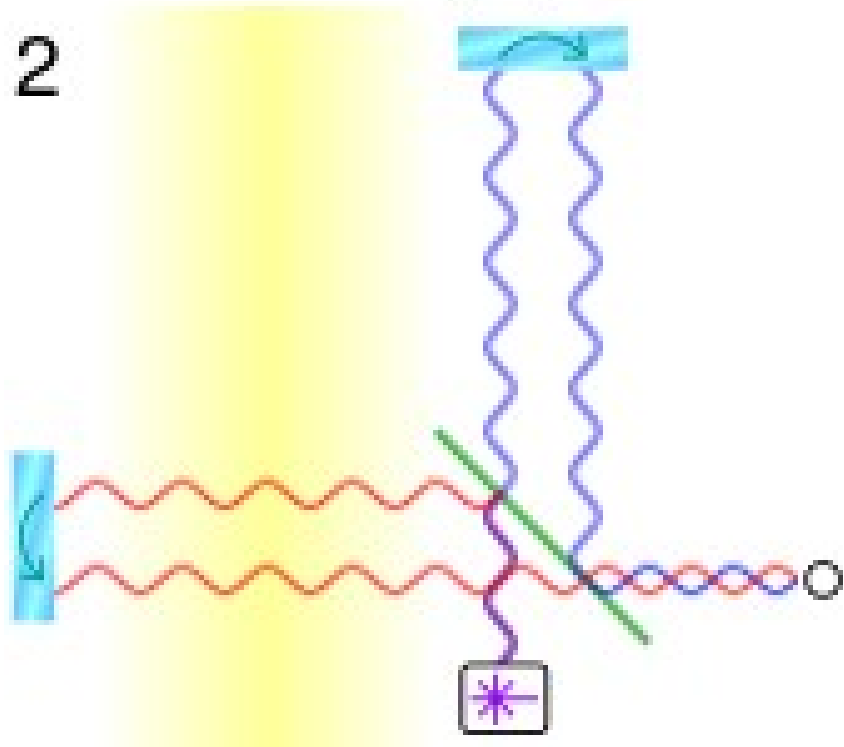
EL DETECTOR: REGLA Y RELOJ



1



2





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

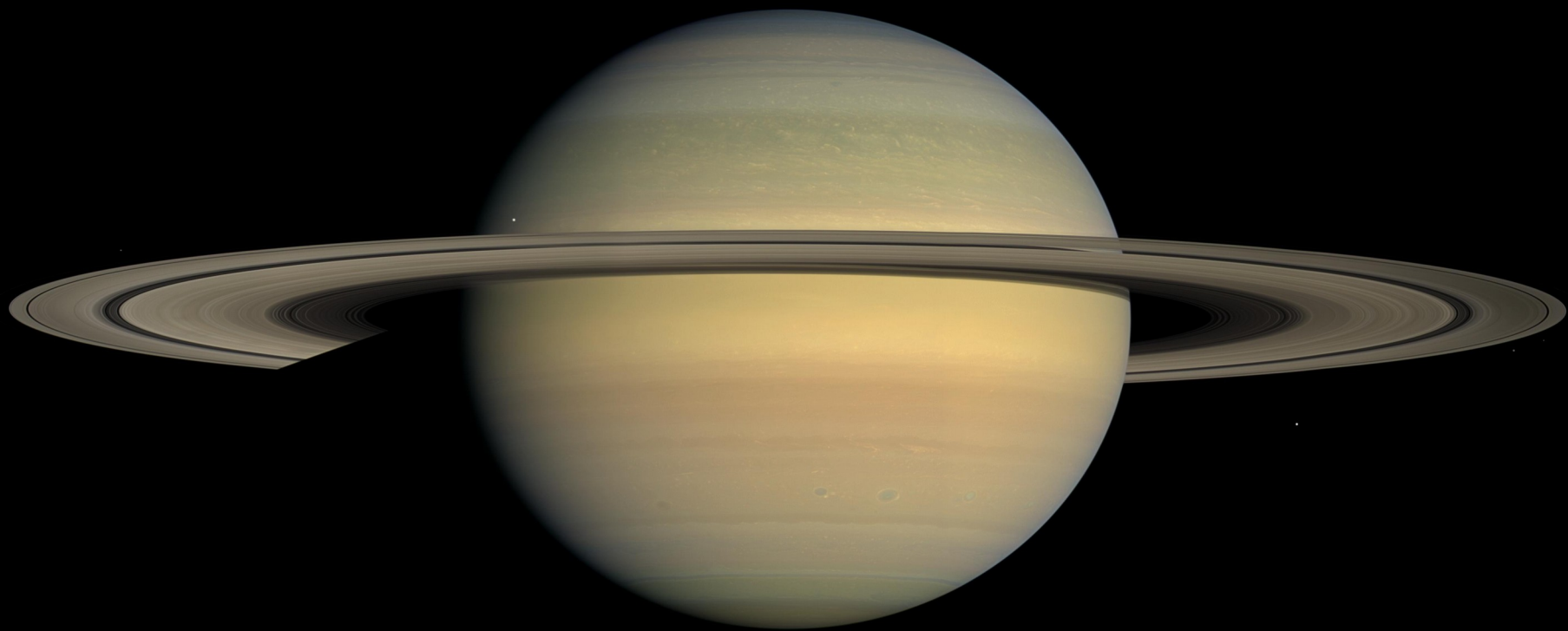


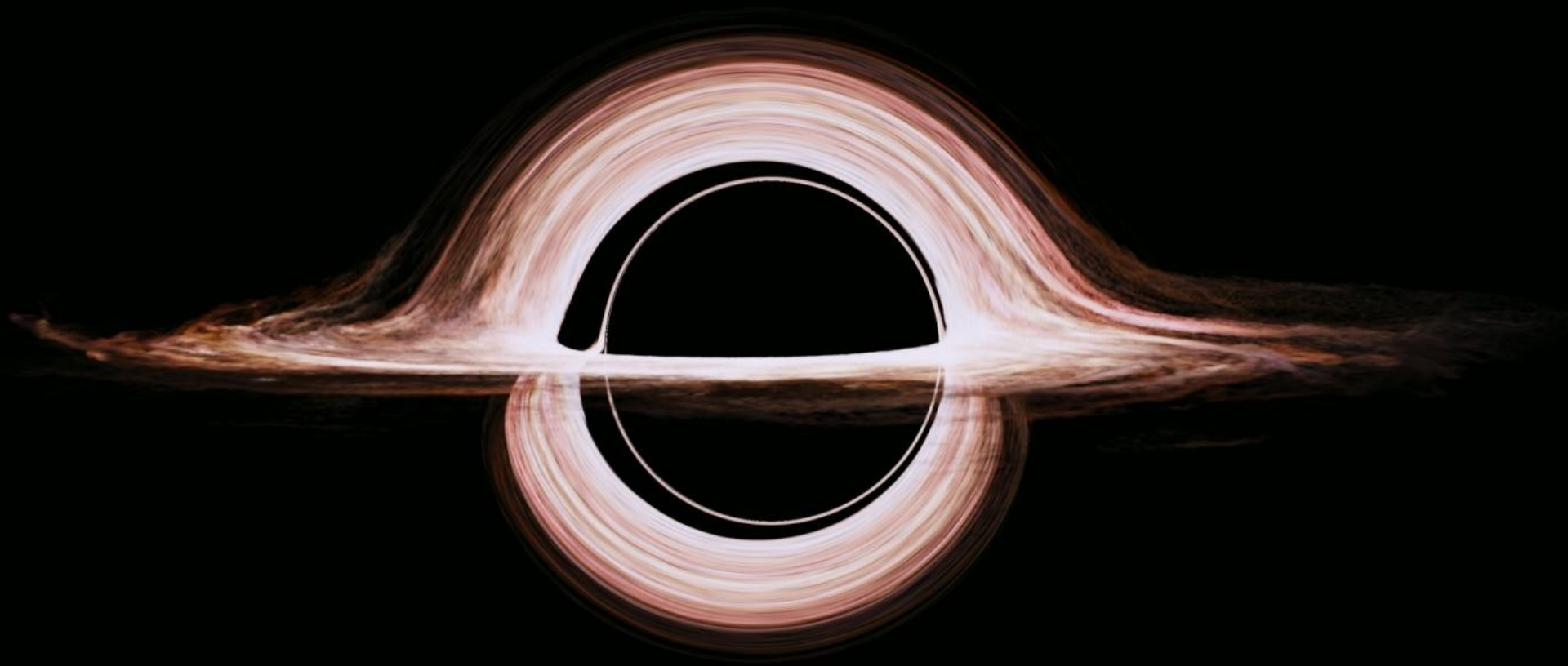
**Hay que simular en
ordenadores
los cambios más
bruscos e
intensos concebibles.**

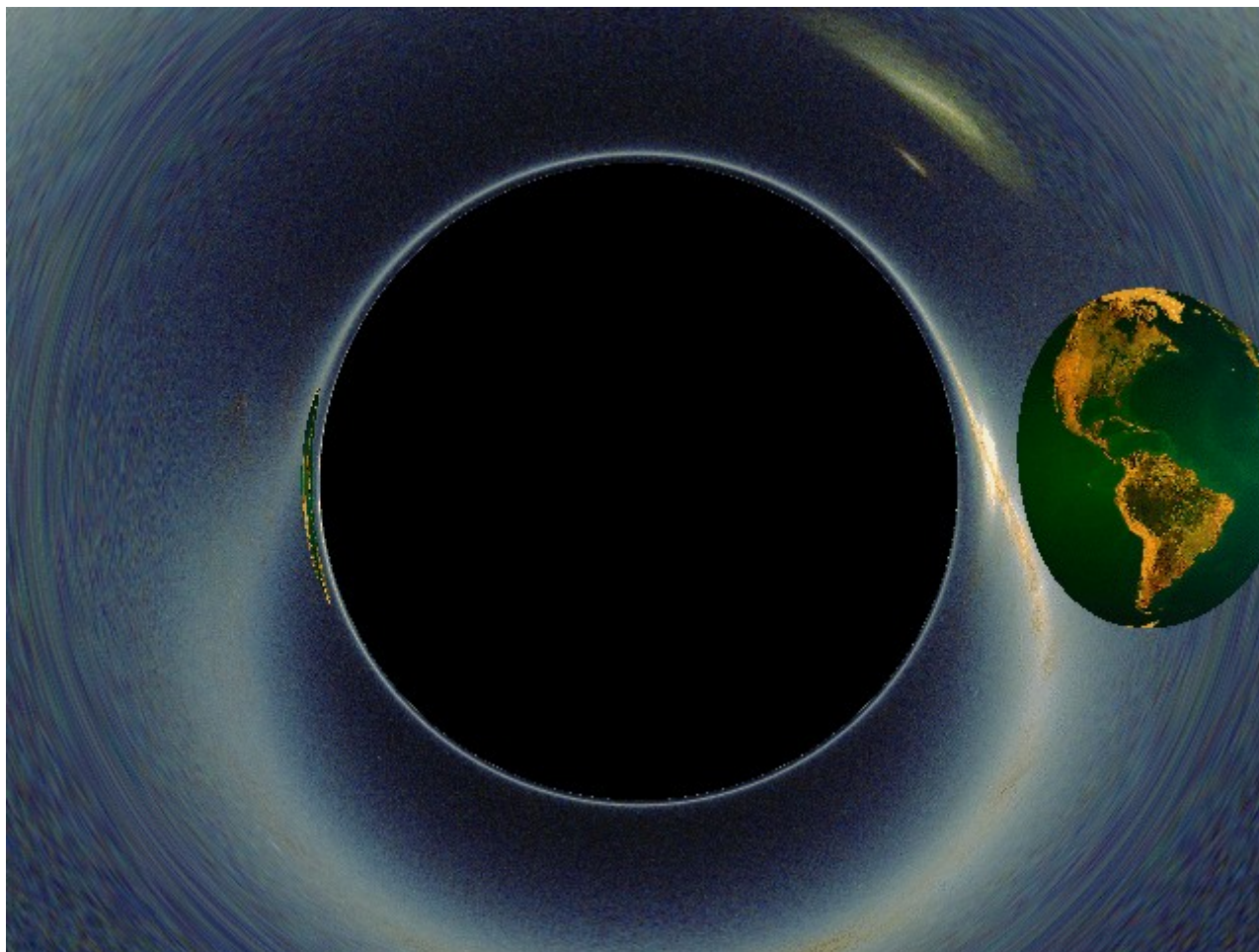


**CHOQUES DE
AGUJEROS NEGROS**

- 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?

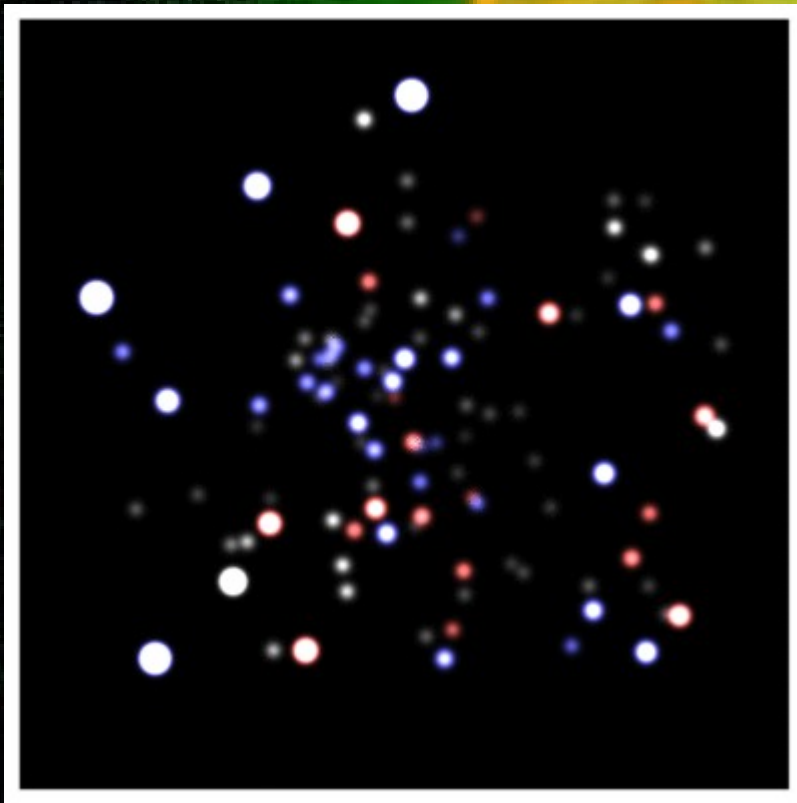
Por sus efectos los reconoceréis.

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

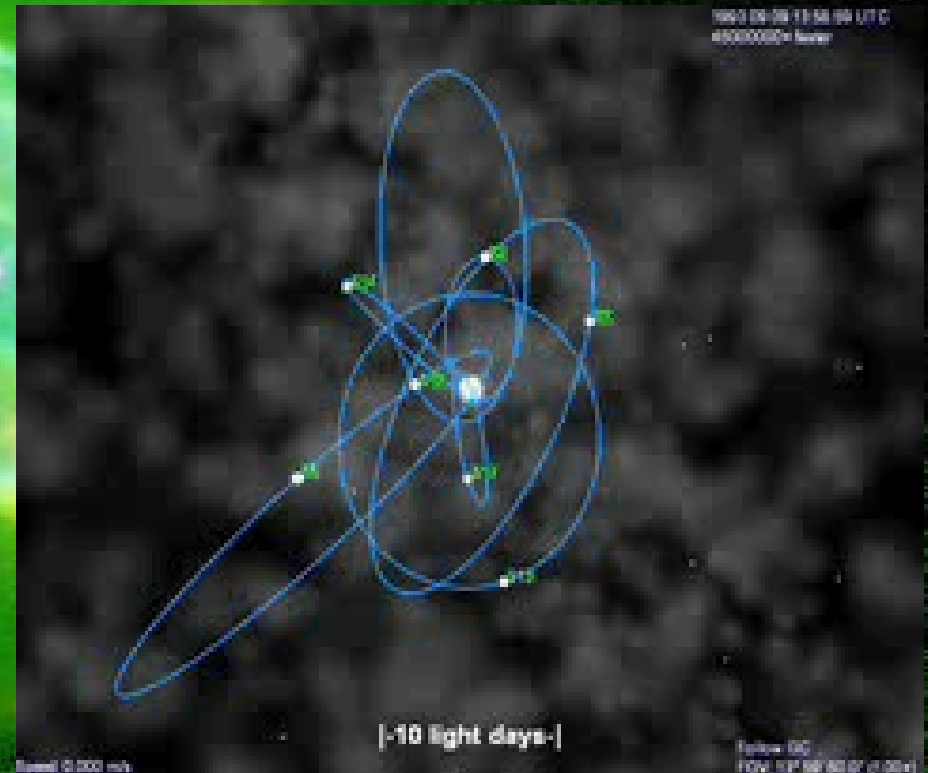
$M \sim 1.000.000.000.000 M_{\odot}$

Evidencia: el agujero negro supermasivo de la Vía Láctea

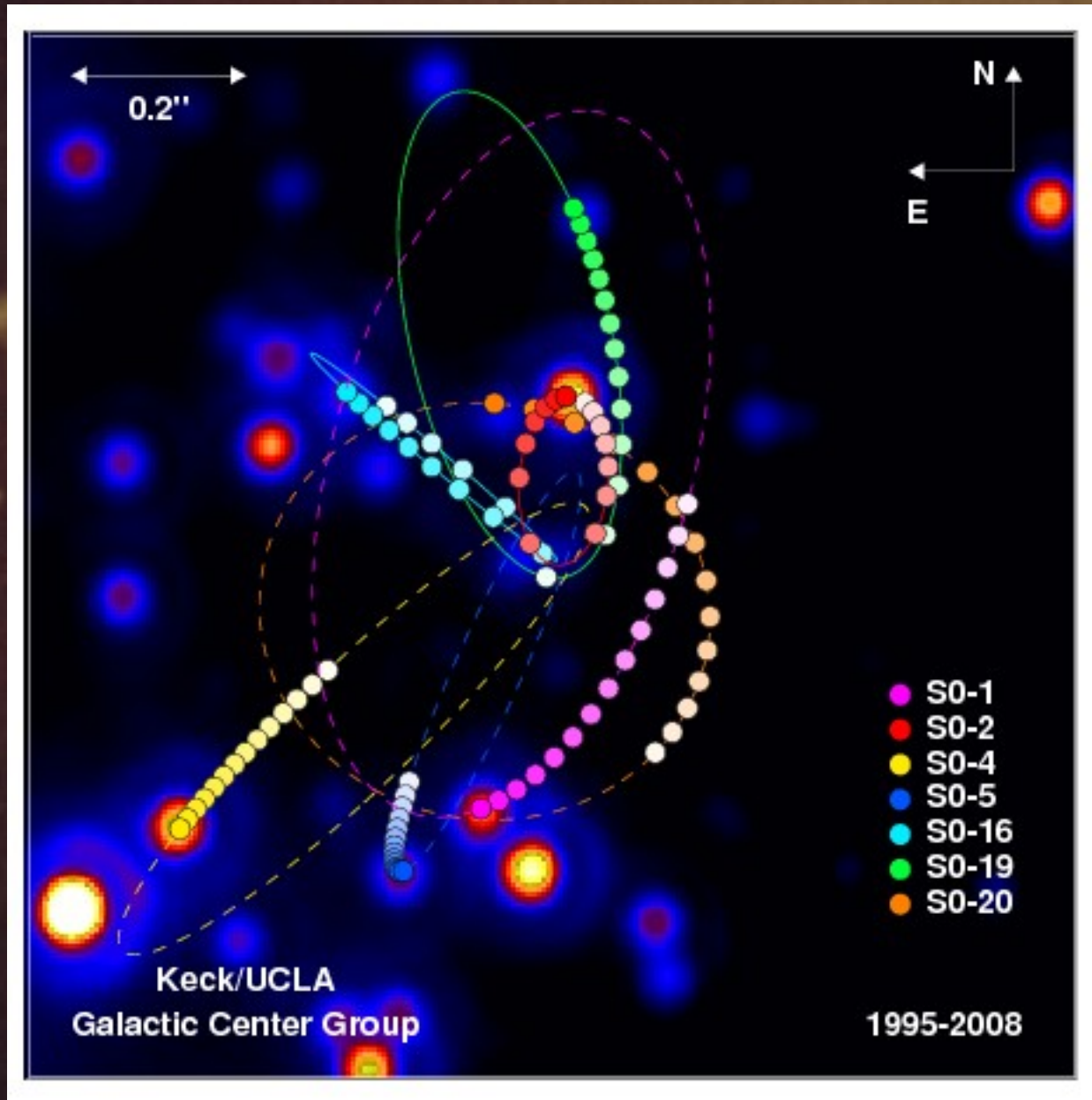
Secuencia de imágenes tomadas por investigadores del Max Planck 1992-2009

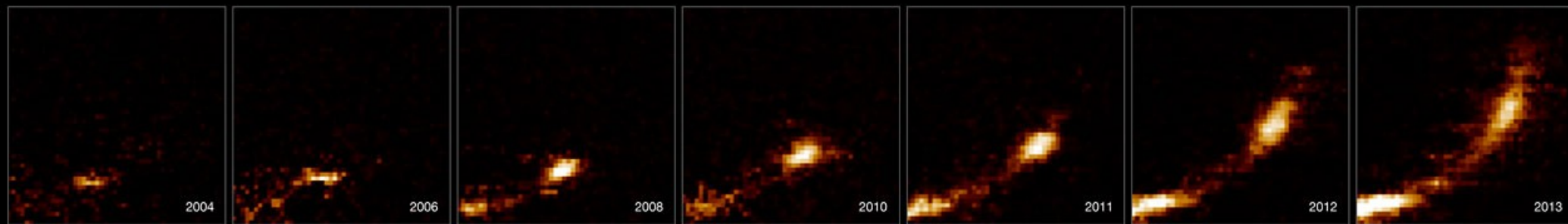


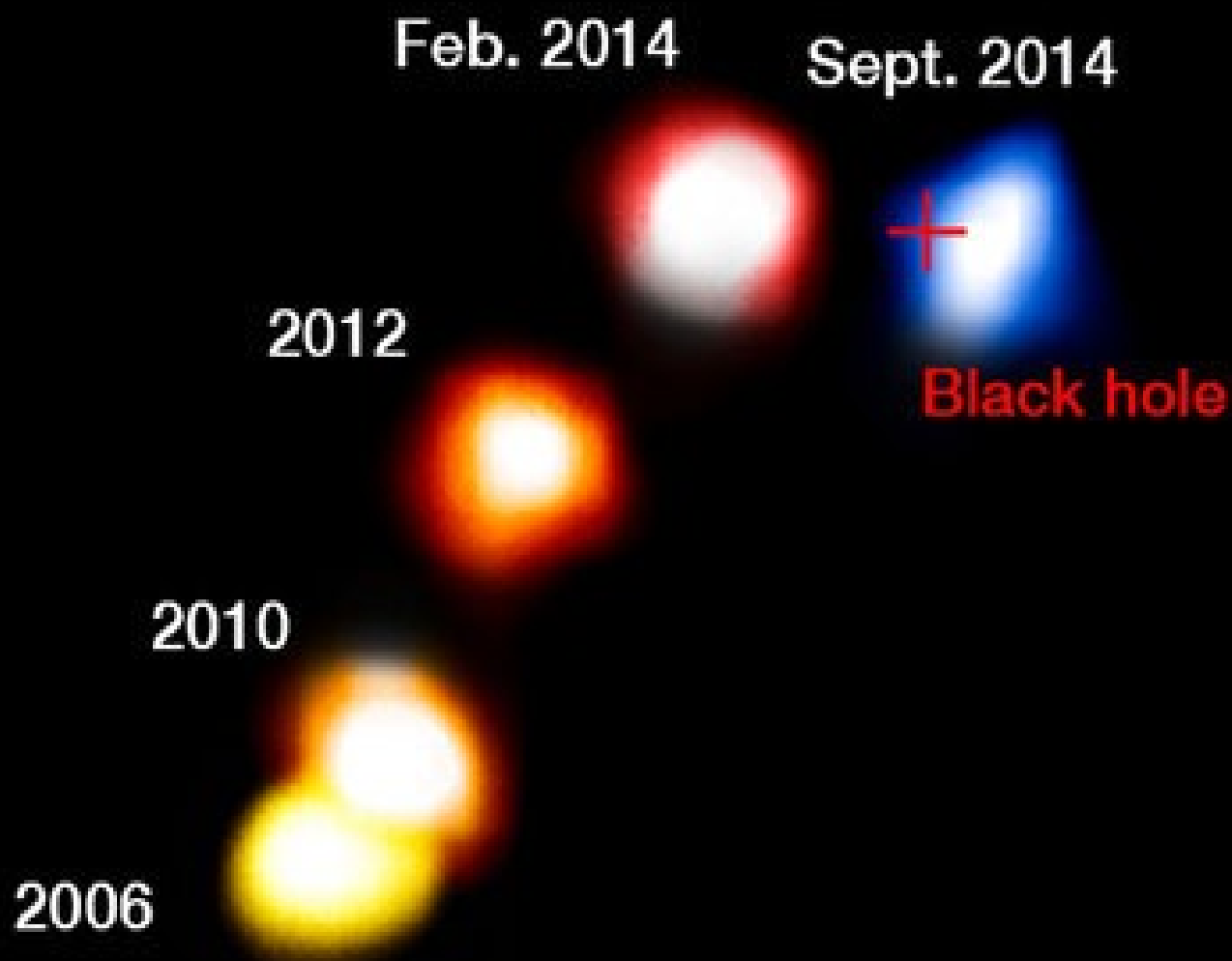
Animación que reconstruye las órbitas de las estrellas alrededor de un objeto Invisible de **37 millones masas solares**

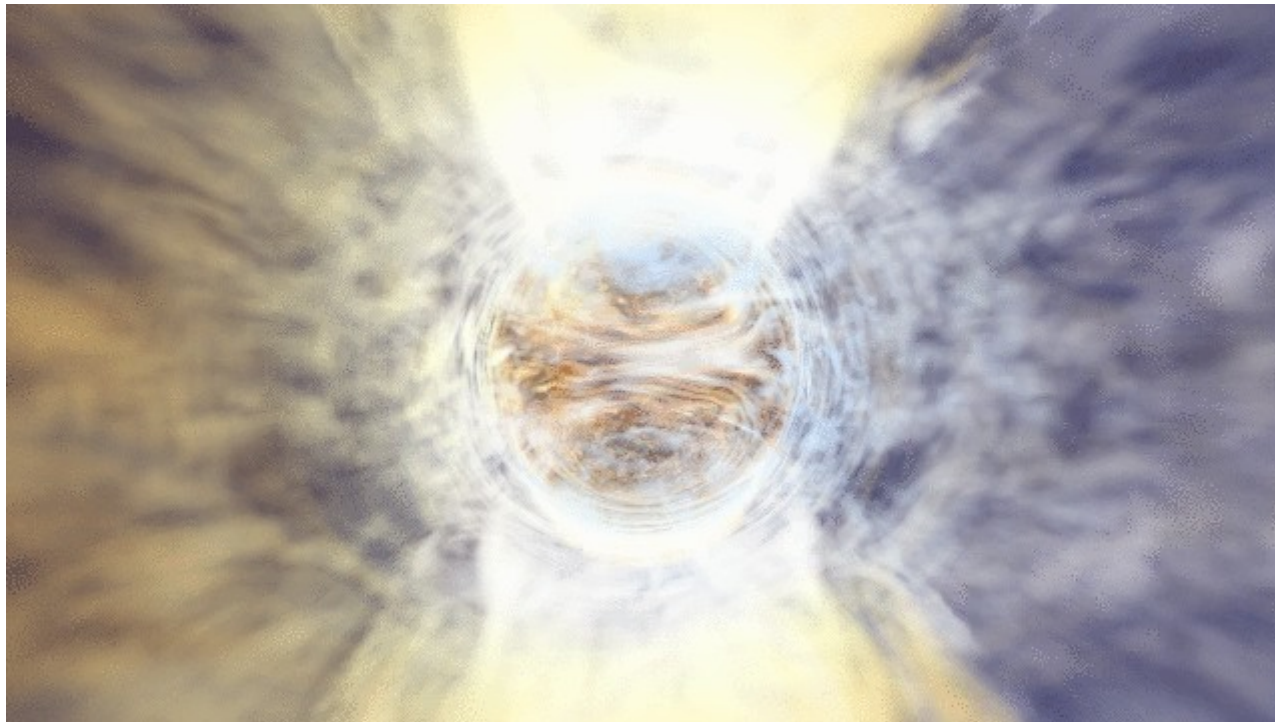


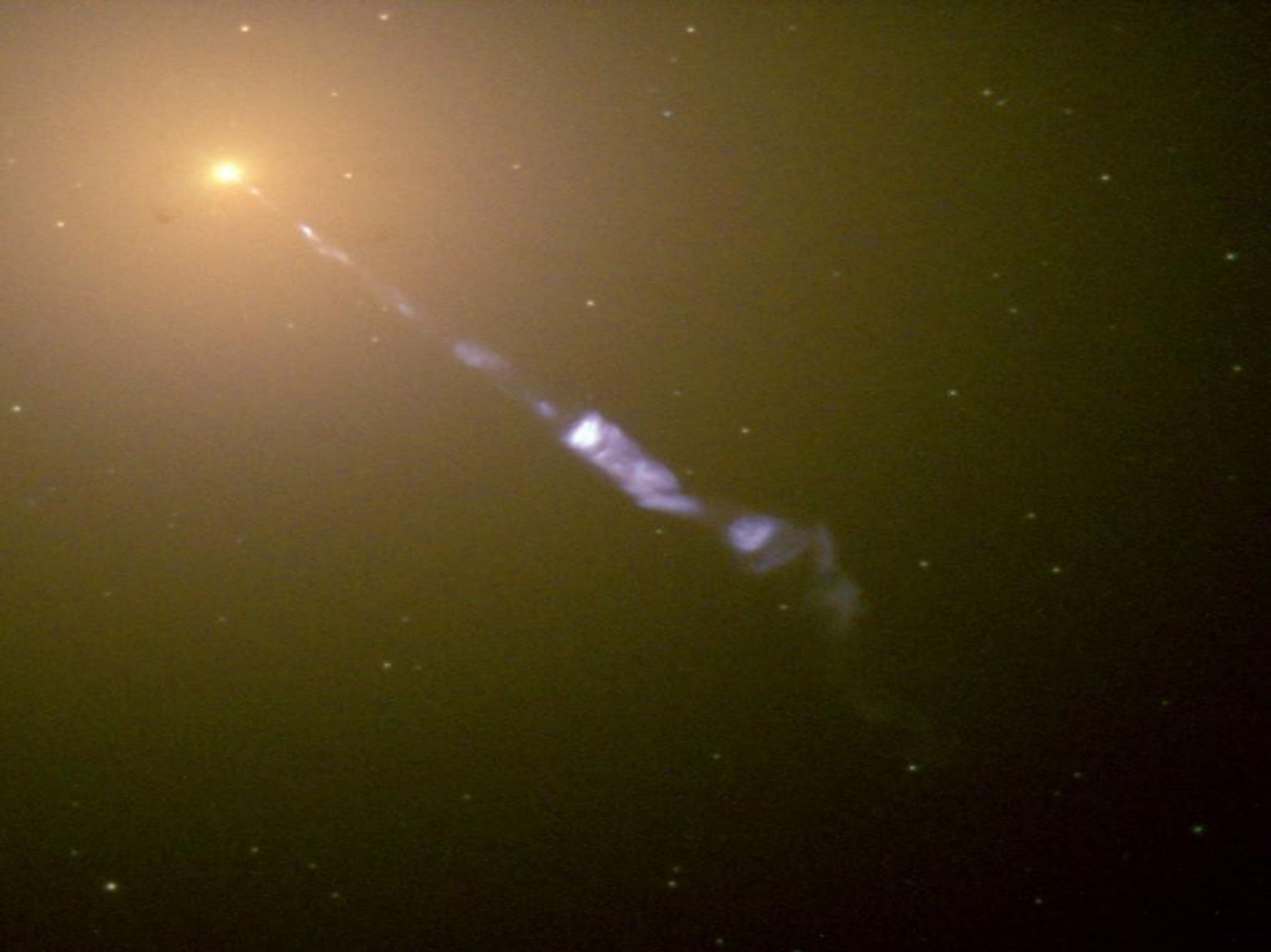
Resultados de las observaciones del grupo Keck/UCLA en la misma región de la Vía Láctea















**CUANDO DOS
COLISIONAN...**



