

# ¿QUÉ ES LA RELATIVIDAD?

**J. Fernando Barbero G.**

Instituto de Estructura de la Materia, CSIC.  
Semana de la Ciencia, 7 de noviembre de 2014.

75  
AÑOS



**CSIC**  
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

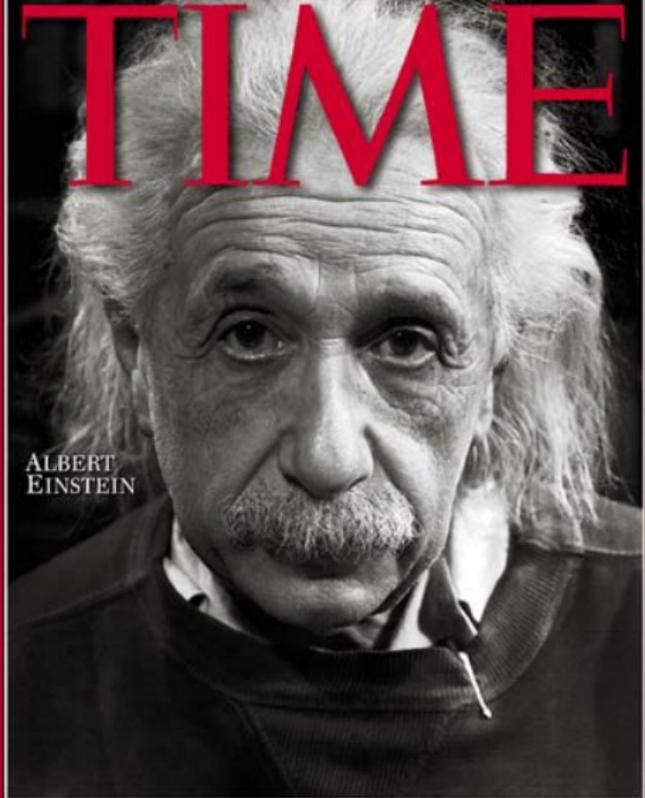
DECEMBER 31, 1999 \$4.95

www.fox.com

PERSON OF THE CENTURY

TIME

ALBERT  
EINSTEIN



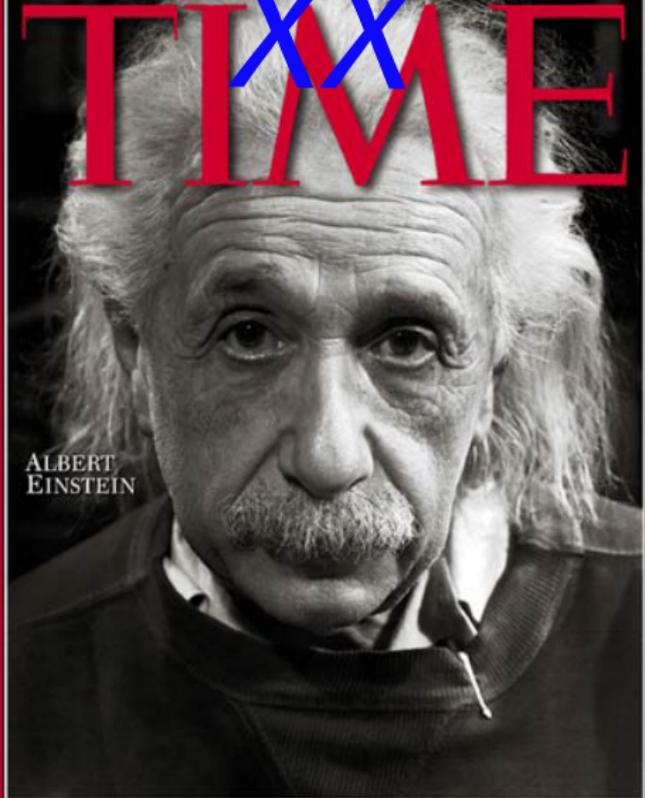
DECEMBER 8, 1999 \$4.95

www.fox.com

PERSON OF THE CENTURY

TIME

ALBERT  
EINSTEIN



## EINSTEIN Y SU “EXPERIMENTO MENTAL” A LOS 16 AÑOS

...una paradoja de la que me di cuenta a los dieciséis años: si persiguiera a un rayo de luz a la velocidad de la luz en el vacío  $c$ , debería percibirlo como un campo electromagnético en reposo, aunque oscilante en el espacio. Sin embargo no parece que exista nada así; ni se ha detectado experimentalmente ni viene descrito por las ecuaciones de Maxwell. Desde el principio me pareció intuitivamente claro que, desde el punto de vista de un observador como ese, todo debería suceder con arreglo a las mismas leyes que rigen para otro que se encuentre en reposo relativo con respecto a la Tierra. Porque, ¿cómo podría el primer observador determinar que se encuentra en un rápido movimiento uniforme? Es posible ver que en esta paradoja se encuentra ya el germen de la relatividad especial. (Einstein, 1951)

## EINSTEIN Y SU “EXPERIMENTO MENTAL” A LOS 16 AÑOS

- Los **procesos de la vida ordinaria** actuando sobre los objetos que nos rodean **no nos permiten** alcanzar velocidades **relativas** grandes.
- Las velocidades más rápidas que podemos lograr (por ejemplo, con el más potente de los cohetes) no superan las **decenas de kilómetros por segundo**. La sonda espacial que menos ha tardado en rebasar la órbita de la Luna necesitó unas nueve horas ( $\simeq 12\text{km/s}$ ).
- Todo sucede como si la luz se propagara de forma instantánea... pero **no es así** (como ya sabía Ole Rømer a finales del siglo XVII).
- ¡¡La velocidad de la luz es de **299792.458km/s**!!
- Por cierto, ¿Cómo es posible medir una velocidad tan enorme? La Luz reflejada por la Luna tarda **un segundo** en llegar a la Tierra y la emitida por el Sol unos **ocho minutos y medio**.
- Pero la luz hace cosas todavía más raras...

# UN UNIVERSO MARAVILLOSO Y EXTRAÑO...



**Messier 51**, Imagen: NASA/ESA.

# UN UNIVERSO MARAVILLOSO Y EXTRAÑO...



**NGC 4414**, Imagen: NASA/ESA.

# UN UNIVERSO MARAVILLOSO Y EXTRAÑO...



**M104, la galaxia del sombrero** Imagen: NASA/ESA.

# UN UNIVERSO MARAVILLOSO Y EXTRAÑO...



**NGC 1300**, Imagen: NASA/ESA.

# UN UNIVERSO MARAVILLOSO Y EXTRAÑO...



**Hubble Ultra Deep Field** Imagen: NASA/ESA.

## ¿CÓMO VEMOS EL UNIVERSO?

Es muy difícil medir las distancias a los astros pero es posible hacerlo:

- 1 Primero los **más cercanos**:  
el Sol, la Luna y los planetas.
- 2 Luego las **estrellas cercanas**  
(paralaje estelar).
- 3 Luego estrellas más **lejanas**:  
(Variables Cefeidas).
- 4 Otras **galaxias** (corrimiento al rojo).
- 5 **Los confines del universo** (SN1a).



Henrietta Swan Leavitt, Foto: AAVSO

Al mirar al universo notamos algo raro: **¡todo se ve muy bien!**

Esto es así porque **la luz se mueve independientemente de la velocidad del cuerpo que la emite** como las ondas en un estanque...

# EL MISTERIOSO ÉTER LUMINÍFERO...



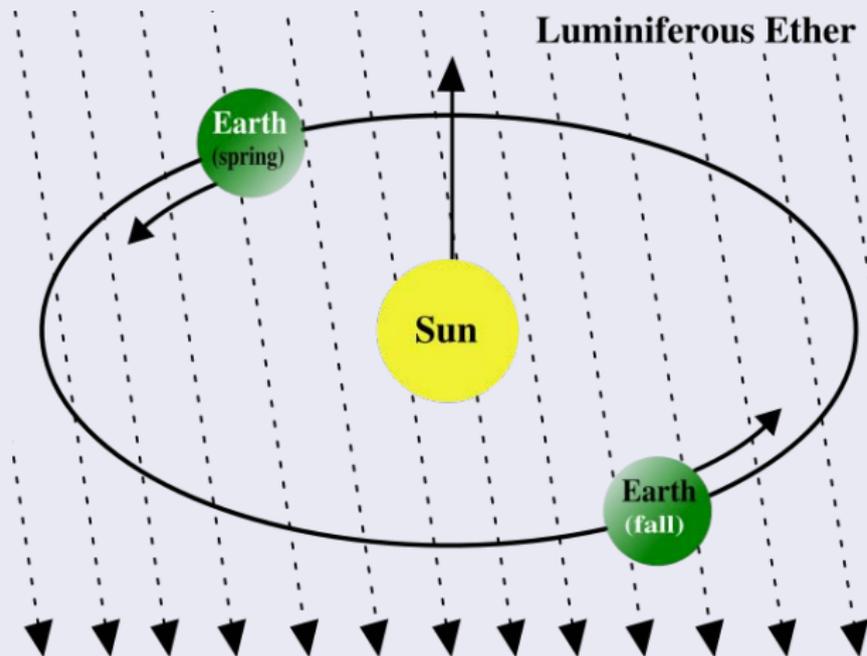
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:2006-01-14\\_Surface\\_waves.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:2006-01-14_Surface_waves.jpg)

## ¿PODEMOS DETECTAR EL ÉTER?

- La velocidad de las ondas depende de las características del medio en el que se propagan.
- Velocidades del sonido en distintos medios:
  - 1 Aire:  $\simeq 340m/s = 0,34km/s$ .
  - 2 Agua:  $\simeq 1500m/s = 1,5km/s$ .
  - 3 Acero:  $\simeq 6000m/s = 6km/s$ .
- **¡Cuanto más rígido** es el medio en el que se propagan **más rápido se mueven** las ondas!, entonces, el éter tiene que ser tremendamente rígido...
- ...y sin embargo **los planetas y las estrellas se mueven a través de él como si nada...**
- ¿A qué velocidad nos movemos a través del éter? (por ejemplo, la Tierra en su movimiento alrededor del Sol).

# UN EXPERIMENTO FAMOSO

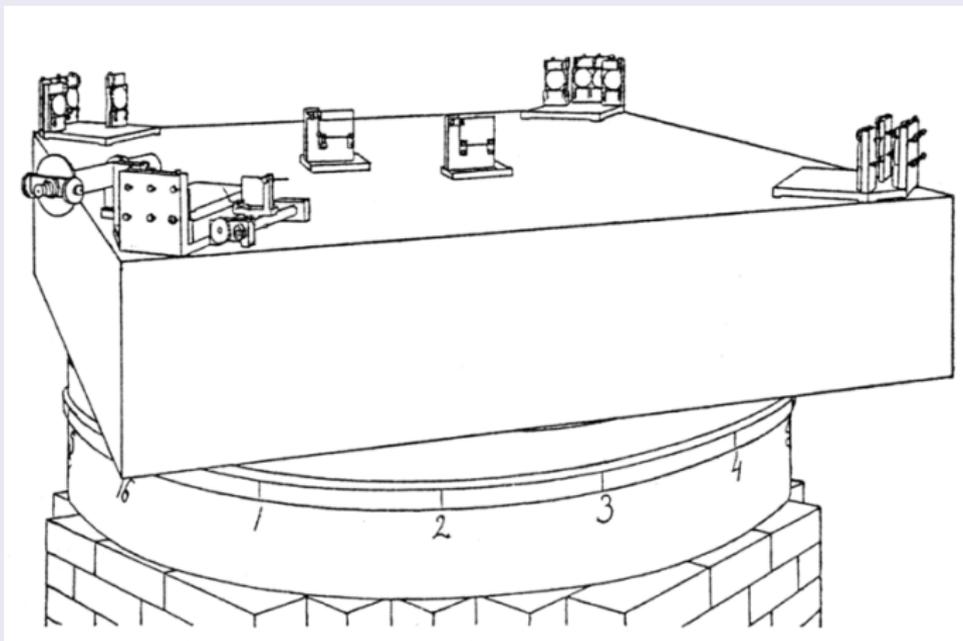
## EL EXPERIMENTO DE MICHELSON Y MORLEY



<http://en.wikipedia.org/wiki/File:AetherWind.svg>

# UN EXPERIMENTO FAMOSO

## EL EXPERIMENTO DE MICHELSON Y MORLEY



[http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%E2%80%93Morley\\_experiment](http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%E2%80%93Morley_experiment)

# UN EXPERIMENTO FAMOSO

El resultado: **No se detecta ningún movimiento a través del éter.**

## UNA SOLUCIÓN RADICAL: LA RELATIVIDAD ESPECIAL

- Todos los observadores inerciales (libres) miden **la misma velocidad para la luz** ¡aunque entre sí ellos se muevan a gran velocidad!
- No podemos perseguir a los rayos de luz... ¡Siempre se nos escaparán a la velocidad de la luz!
- Las ecuaciones que expresan las leyes de la física son las mismas para todos los observadores inerciales: **el Principio Especial de la Relatividad**
- Estos sencillos postulados tienen unas consecuencias dramáticas con respecto al significado del espacio y del tiempo, en particular implican que existe **una física del espacio y del tiempo**
- El éter **no existe**; las ondas luminosas **se propagan por el espacio vacío**.

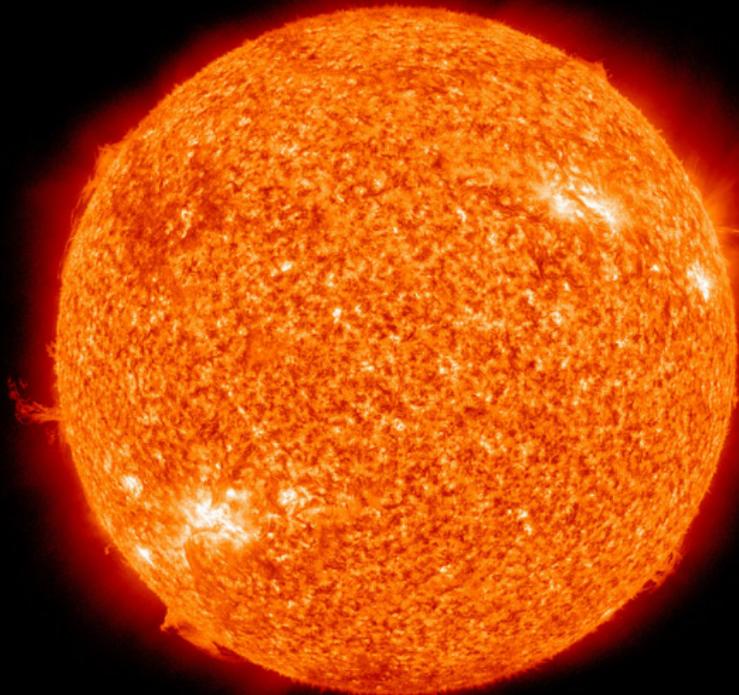
## ¿QUÉ PASARÍA SI $c = 200\text{km/h}$ ?

- O dicho de otra manera, ¿como veríamos el mundo y el universo si no fuera tan difícil conseguir velocidades relativas cercanas a la velocidad de la luz entre objetos macroscópicos?
- Veríamos cosas muy “raras”:
  - 1 El **tiempo propio** y la “paradoja de los gemelos”.
  - 2 “Relatividad de la **simultaneidad**” de sucesos.
  - 3 Contracción de **longitudes**.
  - 4 La extraña regla de composición de **velocidades**.
  - 5 Deformación de imágenes. Distorsión de la bóveda del cielo (aberración estelar).
  - 6 Una curiosidad: El tiempo no pasa para la luz.
- Todas estas cosas **sucedan realmente** pero nos cuesta verlas porque la velocidad de la luz es muy grande.

Es imprescindible definir con precisión los conceptos anteriores para no incurrir en contradicciones y en **paradojas aparentes**.

## UNA CONSECUENCIA DRAMÁTICA: “ $E = mc^2$ ”

- Equivalencia entre masa y energía:  $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ .
- **La energía “pesa”** y la energía de ligadura tiene un peso negativo (!!). Un átomo de hidrógeno pesa un poco menos de lo que pesan un protón y un electrón por separado, por tanto al juntarlos se libera energía.
- Algo parecido sucede con los **núcleos atómicos** (energía nuclear).
- Explica el funcionamiento de las estrellas. La enorme cantidad de energía que despiden el Sol procede de reacciones de fusión nuclear en las que al combinarse los núcleos de distintos elementos para formar otros de masa menor **desprenden el exceso como energía cinética**.
- Creación de partículas en **aceleradores** y **procesos astrofísicos** de altas energías.



**SDO-NASA**, <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>

# LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

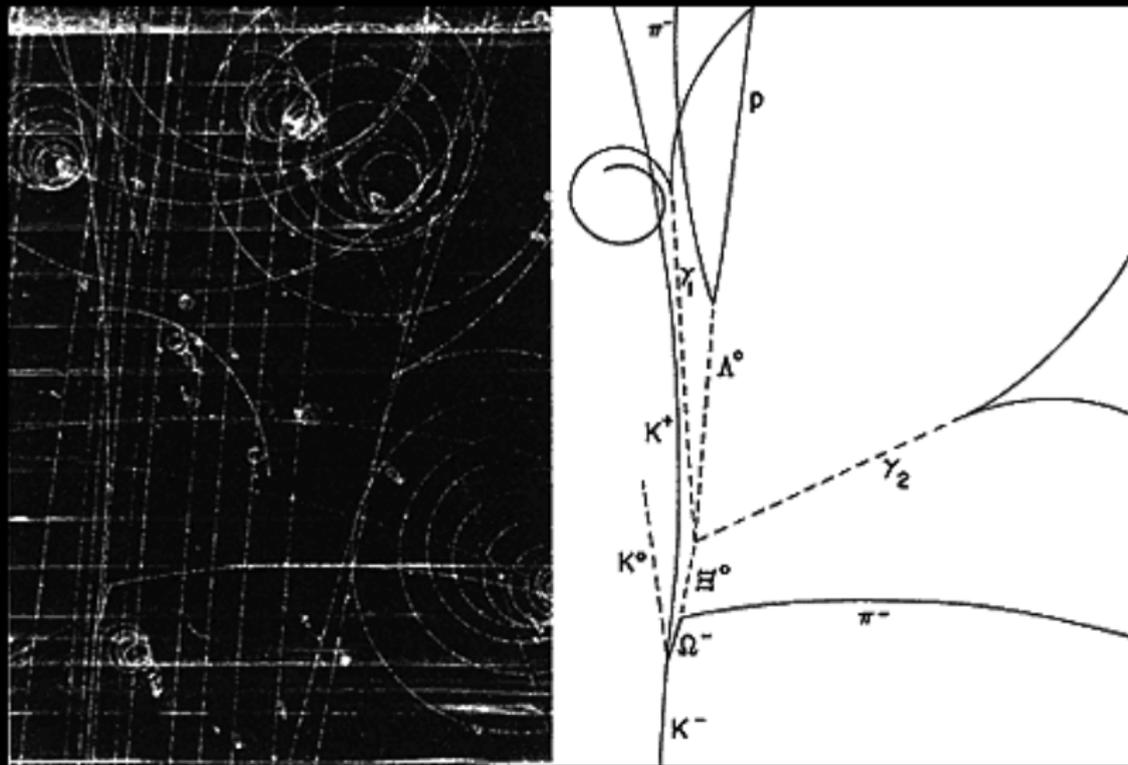


Foto: Brookhaven National Laboratory <http://www.hep.fsu.edu/wahl/satmorn/history/Omega-minus.asp.htm>



**M1, la Nebulosa del Cangrejo.** Imagen: NASA, ESA, J. Hester (Arizona State University)

# ESTRELLAS DE NEUTRONES



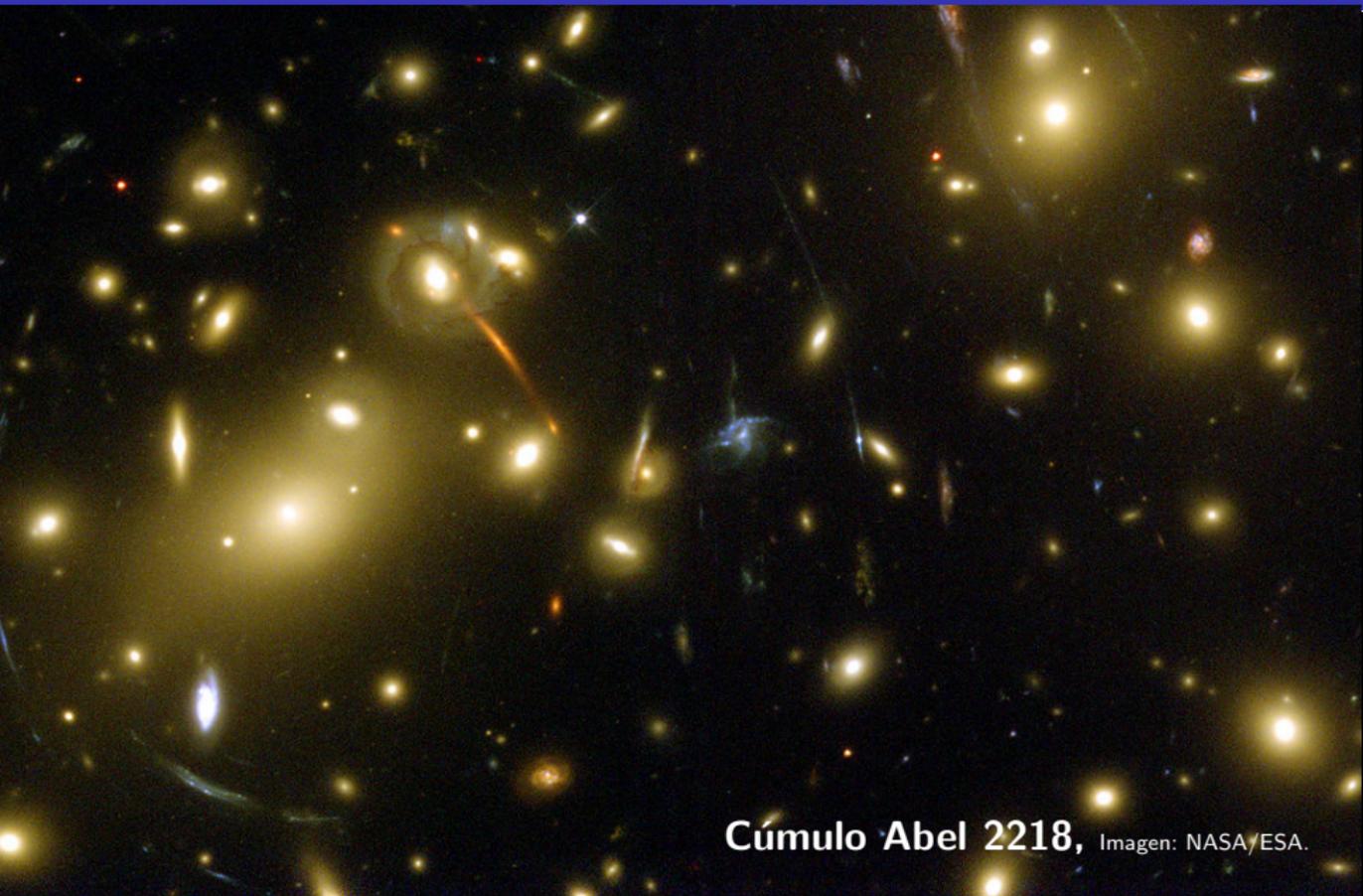
Imagen: NASA/CXC/SAO/F.Seward et al.

**M1, la Nebulosa del Cangrejo.** Imagen: NASA, ESA, J. Hester (Arizona State University)

## OTRAS CONSECUENCIAS SORPRENDENTES

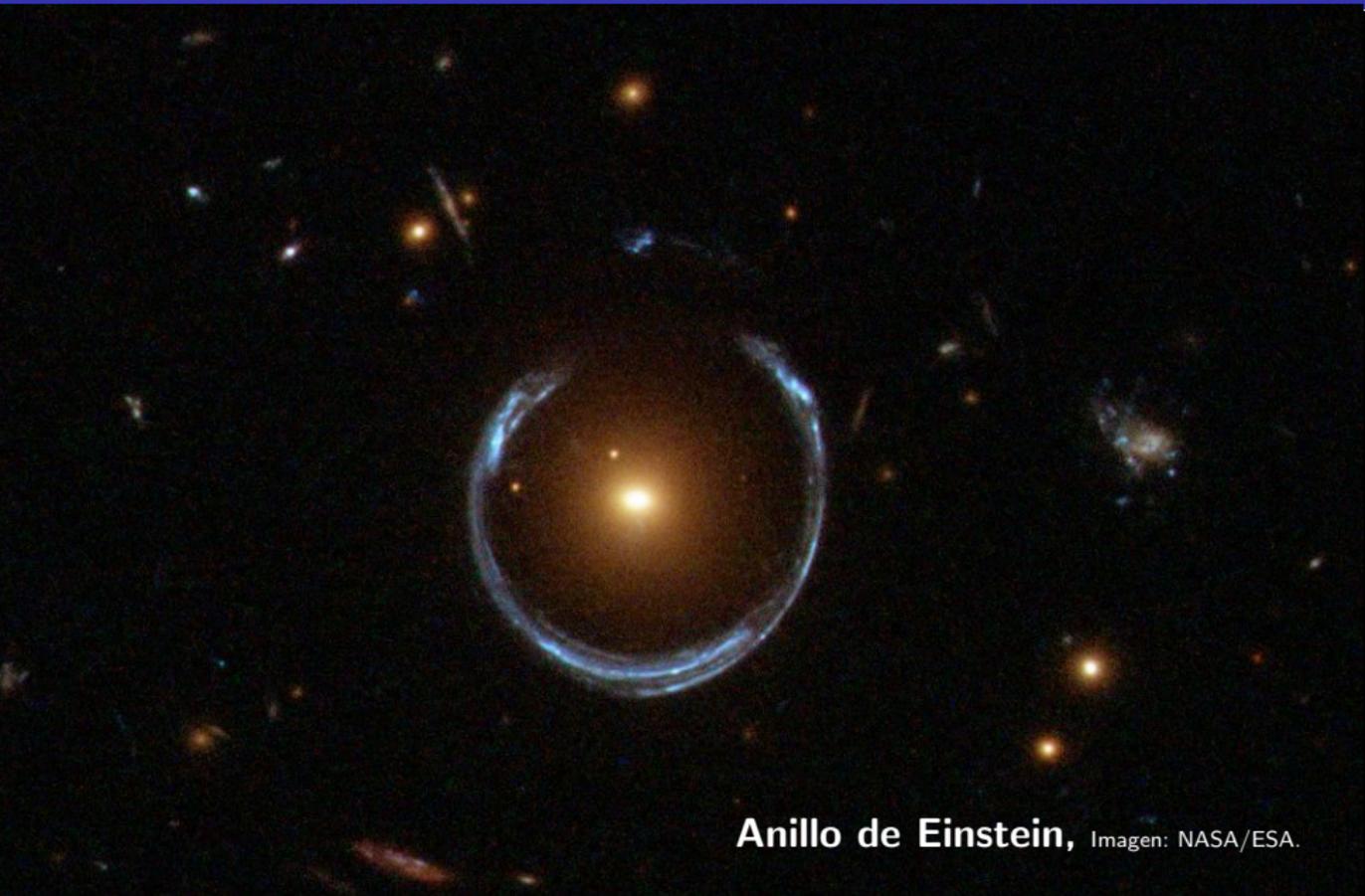
- Los **campos eléctricos se convierten en campos magnéticos** (y viceversa) al observarlos desde sistemas de referencia distintos.
- **Ningún objeto material** (con masa en reposo) puede **alcanzar o superar** la velocidad de la luz.
- Las partículas que forman la luz (los fotones) **no tienen masa**.
- Podemos estar seguros de que la Tierra se mueve alrededor del Sol (por si quedaba alguna duda...).
- El fenómeno de la **aberración estelar**, movimiento aparente de las estrellas en la bóveda celeste.
- La posición aparente de las estrellas para un observador en la Tierra varía periódicamente a lo largo del año al cambiar la velocidad de la Tierra en su movimiento alrededor del Sol.

¿SEGURO QUE LA LUZ NO “PESA”...?



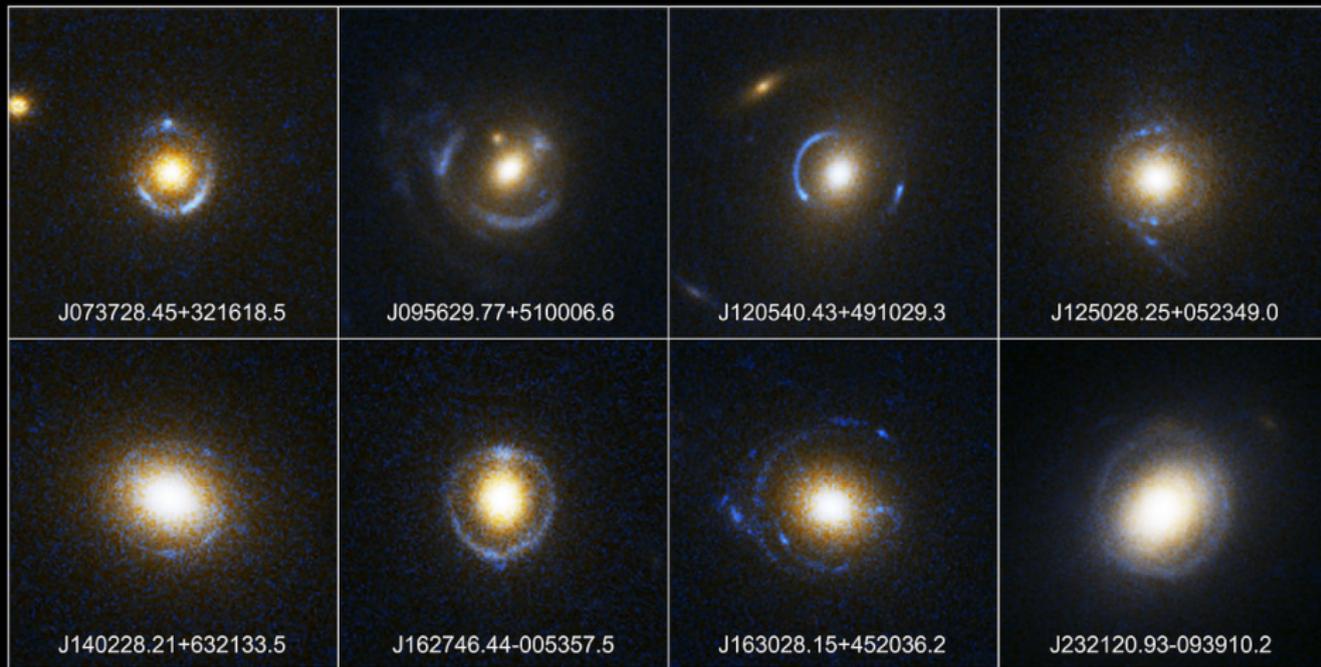
**Cúmulo Abel 2218**, Imagen: NASA/ESA.

¿SEGURO QUE LA LUZ NO “PESA”...?



Anillo de Einstein, Imagen: NASA/ESA.

# ¿SEGURO QUE LA LUZ NO “PESA”...?



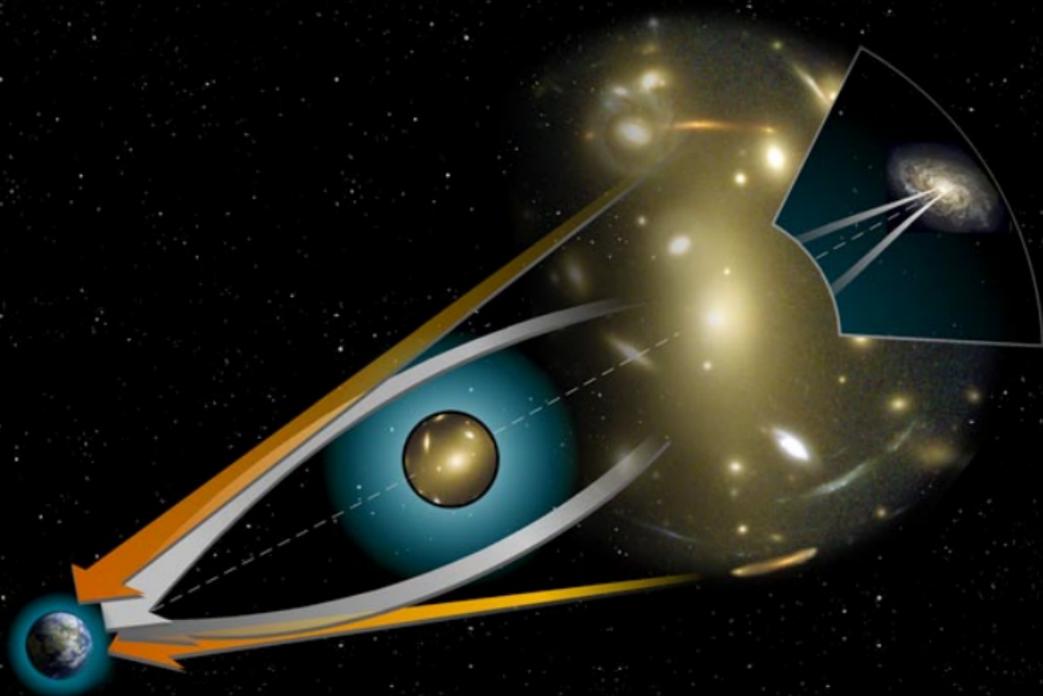
## Einstein Ring Gravitational Lenses

*Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys*

NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

STScI-PRC05-32

# ¿SEGURO QUE LA LUZ NO “PESA”...?



- La luz **no sigue trayectorias rectas** al moverse por el universo.
- Si lo hiciera no podríamos ver las imágenes deformadas de los objetos lejanos distorsionadas por la presencia de masas.

**La geometría del universo es “curva”.**

**La gravitación es geometría.**

## LA RELATIVIDAD GENERAL

- **La teoría relativista de la gravitación.**
- Explica la **estructura del universo** nos ayuda a entender el **universo primitivo** y su **futuro** (la gravedad puede ser repulsiva).
- Predice la existencia de objetos exóticos: **los agujeros negros** (que no succionan lo que pasa por sus alrededores...)
- **Lentes gravitatorias.**
- **Ondas gravitatorias.**
- **GPS** (Si lanzamos un reloj y conservamos otro con nosotros...)
- **Relatividad y geometría:** La gravitación se explica como la curvatura del espacio-tiempo (en un sentido matemático preciso).

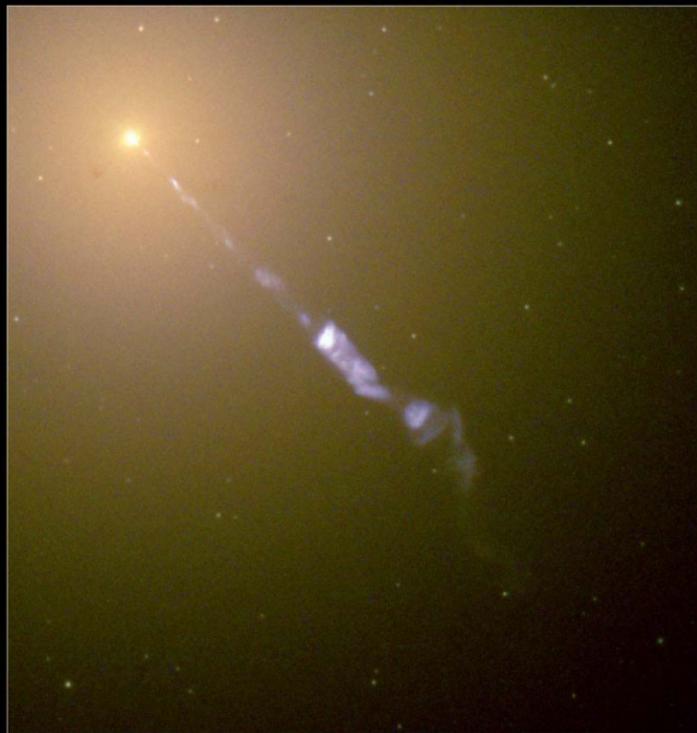
# AGUJEROS NEGROS GALÁCTICOS Y ESTELARES



**SN1994D**, Imagen: NASA/ESA, The Hubble Key Project Team, and The High-Z Supernova Search Team

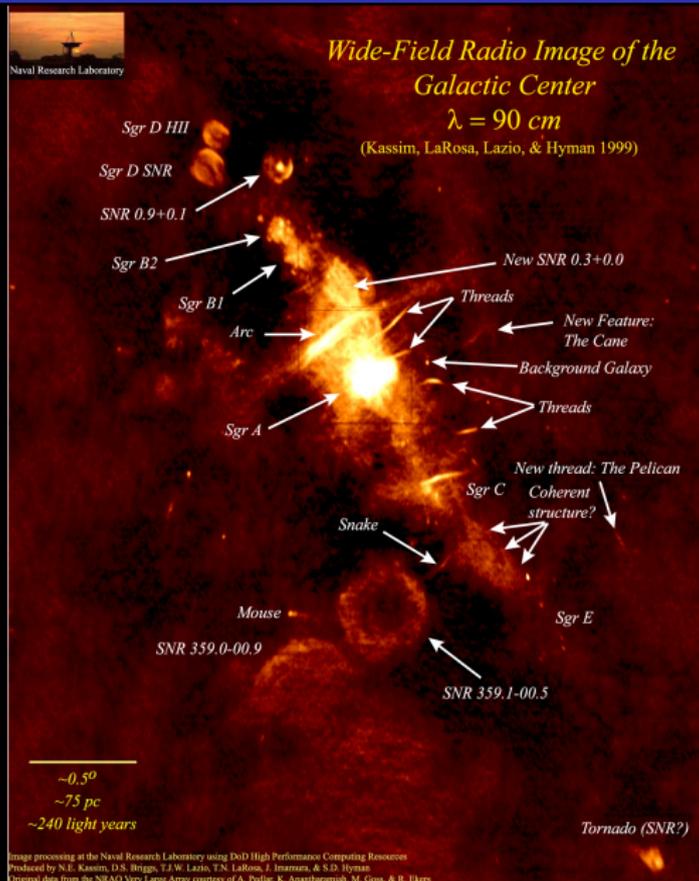
# AGUJEROS NEGROS GALÁCTICOS

The M87 Jet

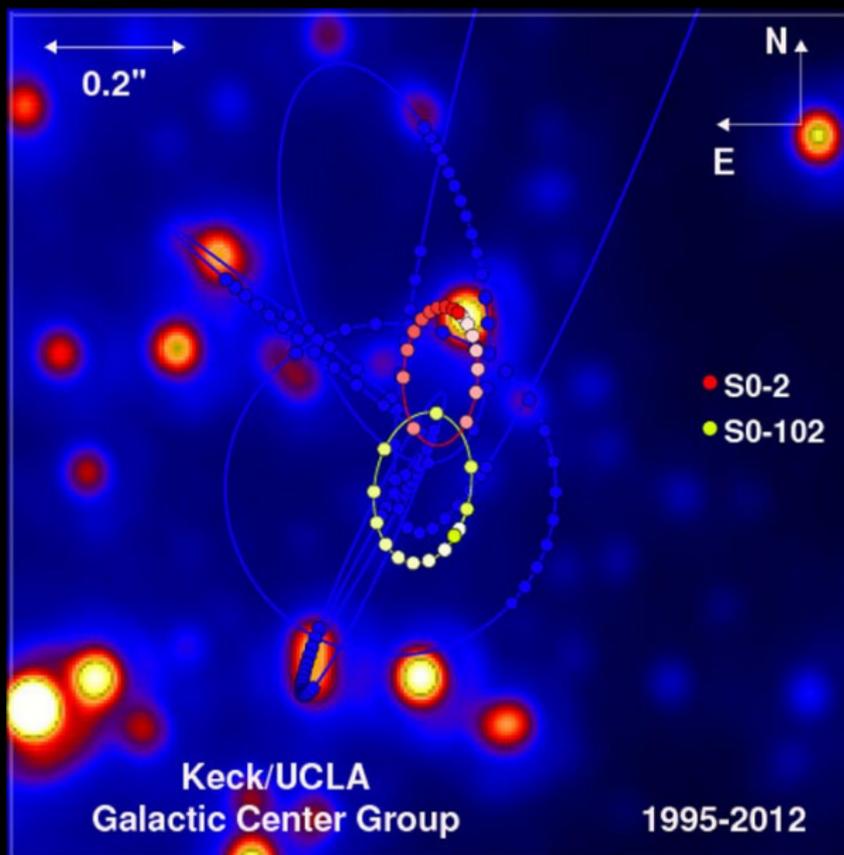


Hubble  
Heritage

# EL CENTRO DE LA VÍA LÁCTEA



# EL CENTRO DE LA VÍA LÁCTEA



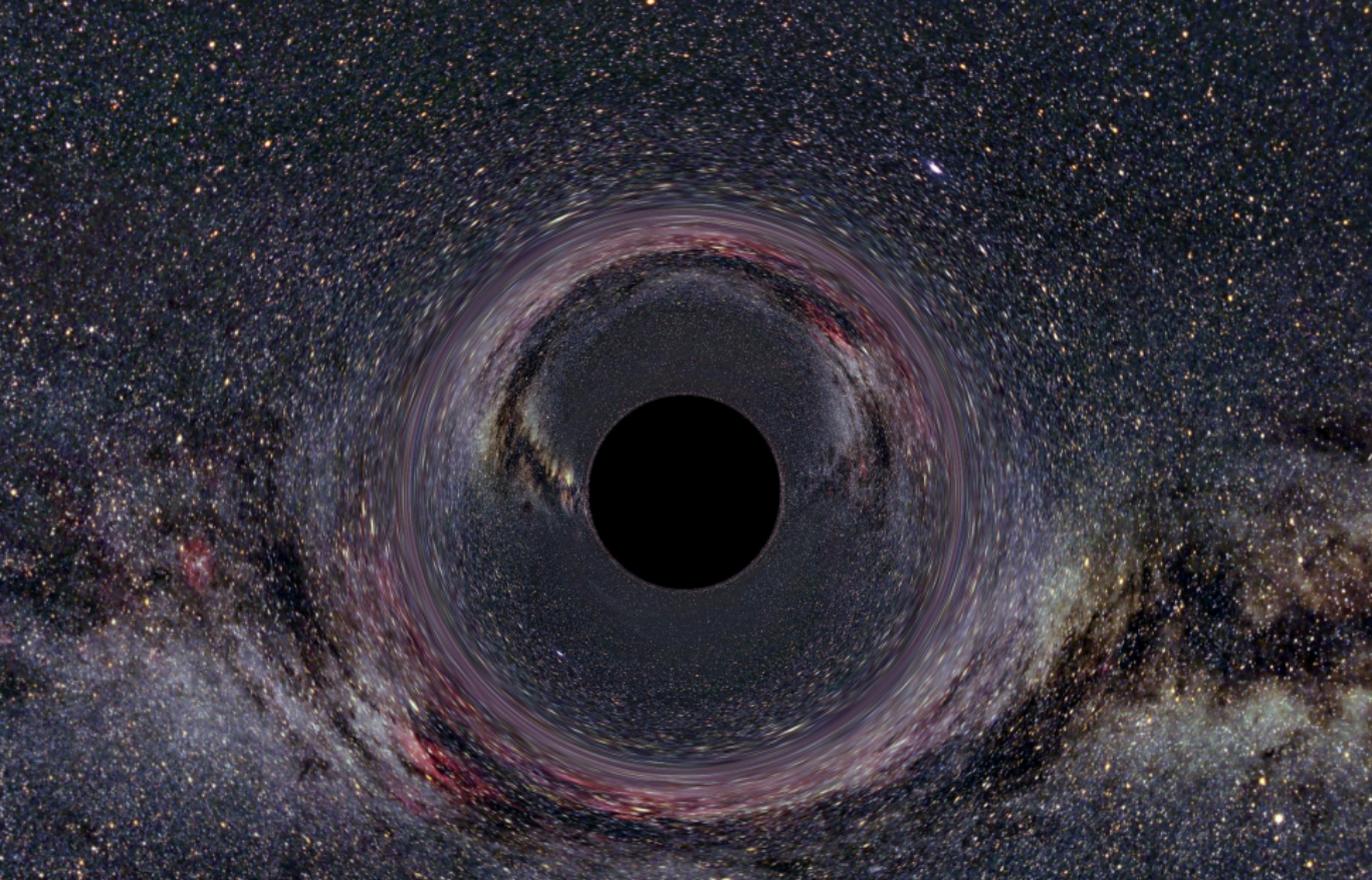
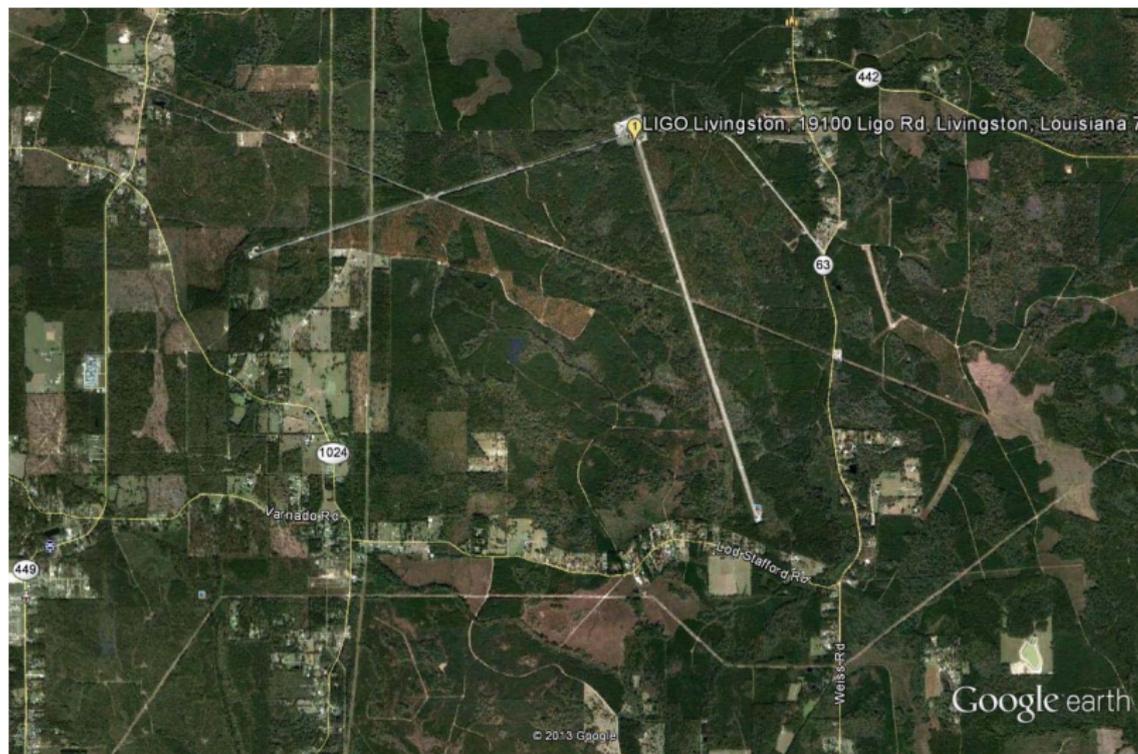


Image: Ute Kraus, physics education group (Kraus), Universität Hildesheim, Space Time Travel

(<http://www.spacetime-travel.org/>)

# DETECCIÓN DE ONDAS GRAVITATORIAS

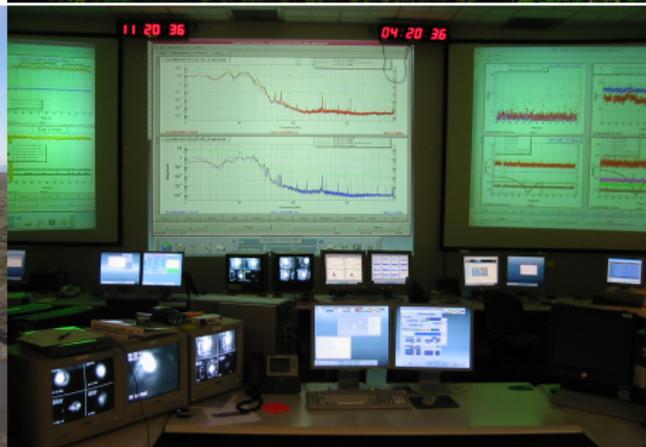
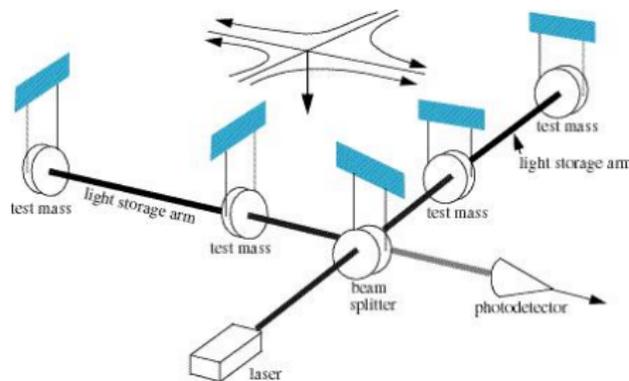


Google earth

millas 3  
km 5



# DETECCIÓN DE ONDAS GRAVITATORIAS



## ¿ES DIFÍCIL ENTENDER LA RELATIVIDAD?

- Unas partes más que otras...
- La **cinemática** de la relatividad especial es **fácil**.
- La **dinámica** tampoco es mucho más difícil.
- La **relatividad general** es harina de otro costal...

**Si os interesa...¡Intentadlo!**

Hay una bibliografía extensísima. **Una pequeña selección:**

## LIBROS BÁSICOS/DIVULGATIVOS

- H. Bondi, *Relativity and common sense*, Dover (1980).
- R. Geroch, *La relatividad general de la A a la B*, Alianza Editorial (1986).
- A. Einstein, *El significado de la relatividad*, Espasa libros. (2005).
- J. M. Sánchez Ron, *El origen y desarrollo de la relatividad*, Alianza Editorial (1983).
- R. Penrose, *El camino a la realidad: Una guía completa a las leyes del universo*, Debate (2006).
- K. S. Thorne, *Black holes and time warps: Einstein's outrageous legacy*, W. W. Norton & company (1995).