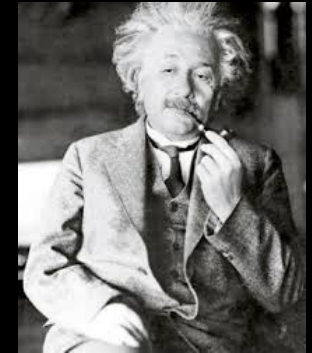


# Historia de la relatividad



Eduardo Battaner  
Universidad de Granada

Dpto. Física Teórica y del Cosmos

Y

Instituto Carlos I de Física Teórica y Computacional



Historia de la Relatividad. 2015



# Galileo, 1632

Es imposible para un observador inercial conocer su estado de movimiento o reposo mediante experimentos en mecánica.

Las leyes de la mecánica son equivalentes para todo observador inercial.

# Relatividad especial, 1905

Es imposible para un observador inercial conocer su estado de movimiento o reposo.

Las leyes  $\qquad\qquad\qquad$  son equivalentes para todo observador inercial.

# Relatividad general, 1915

Es imposible para un observador conocer su estado de movimiento o reposo.

Las leyes son equivalentes  
para todo observador.

El observador

El observador no  
existe

# El barco de Galileo

El navegante deja caer una piedra.

El del muelle verá que la piedra describe una trayectoria parabólica.

Pero ve que los pies del navegante se adelantan mientras cae la piedra.

Y la piedra le da en los pies.

Como a él que está en el muelle



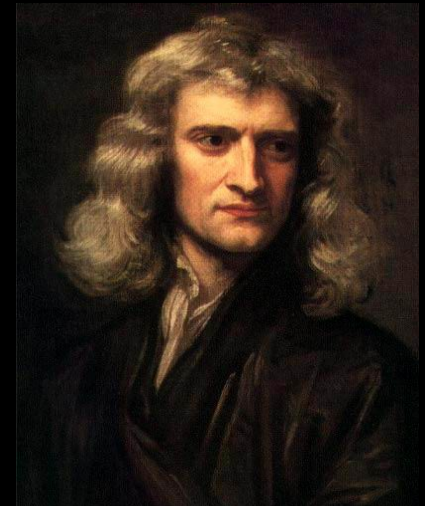
# Observador inercial

Observador inercial es aquel que se mueve con velocidad constante respecto a un observador inercial.

Observador inercial es aquel que se mueve con velocidad constante con respecto al espacio absoluto de Newton.

# Espacio y tiempo absolutos

Newton: “El tiempo absoluto, verdadero y matemático, por sí mismo y por su propia naturaleza, fluye uniformemente sin relación a nada externo. El espacio absoluto, por su propia naturaleza, sin relación con nada externo, permanece siempre semejante e inamovible”.





...pero...

Newton: “La Divinidad perdura para siempre y es omnipresente y, por existir siempre y en todas partes, Él constituye la duración y el espacio”.

El espacio y el tiempo absolutos eran como el marco del cuadro, dentro del cuál estaba el proceso físico como la pintura.

# El éter

Medio en el que se propagaba la luz.

¿Podía identificarse el éter con el espacio absoluto de Newton?

El experimento de Michelson-Morley, 1887, pretendía medir el “viento del éter”

# Interpretación

La velocidad de la luz es siempre la misma.

Pero Einstein dijo que él “ni se había enterado” del experimento de Michelson-Morley.

# Relatividad restringida

Para que las leyes sean invariantes (carácter absoluto) las magnitudes han de ser relativas.

El tiempo es relativo, el espacio es relativo, la masa es relativa... pero las leyes son absolutas para los observadores inerciales (que “son” los “buenos” ...).

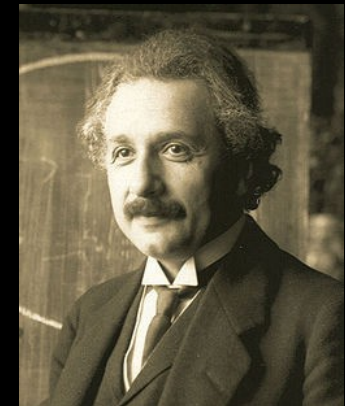
# Einstein (1879-1955)

Der Depperte

...que nunca llegaría nada

Einstein y la “ecolalia”

¿Inútil para las matemáticas? “Antes de los 15 años ya dominaba el cálculo diferencial e integral”



# Talmud y Bernstein

“Dado que todas las clases de luz resultan tener exactamente la misma velocidad, bien puede afirmarse que la ley de la constancia velocidad de la luz es la más general de todas las leyes de la naturaleza”

Minkowski: “perro perezoso. En matemáticas jamás hacía el menor esfuerzo”

# August Föppl

¿movimiento absoluto?

“Si ocurre lo mismo cuando se mueve un imán en las inmediaciones de un circuito eléctrico en reposo, que cuando es éste el que se mueve mientras está en reposo el imán...”

# Henri Poincaré

“El espacio absoluto, el tiempo absoluto, e incluso la geometría euclídea, no son condiciones que puedan imponerse a la mecánica”





# éter

Einstein (1901): “La introducción del concepto de éter en las teorías de la electricidad ha llevado a la concepción de un medio cuyo movimiento puede describirse sin que, a mi entender, se le pueda atribuir significado físico alguno”.

1899. Propuesta a Weber: Tesis: Experimento Para medir la velocidad con respecto al éter (!)... por diferencia de energías, con pilas termoeléctricas.

# Oficina de patentes

“Una carrera académica en la que una persona se ve forzada a producir escritos científicos en grandes cantidades crea el peligro de la superficialidad intelectual.”

# Academia Olimpia

Solovine, Habicht, Einstein (y Mileva)

Leían literatura: Antígona (Sócrates), El Quijote

Filosofía: Hume, Mach, Spinoza, Poincaré, ...  
en torno al positivismo.

Hume: No tiene sentido hablar del tiempo como si tuviera una existencia absoluta.

El Principio de Relatividad de Galileo y el caviar.

# Machismo

Einstein y el machismo.

Mach: Para que un concepto tenga sentido hace falta una definición operativa de él.

Mach: “...monstruosidad conceptual el espacio absoluto de Newton...”

El Principio de Mach le guiaría en su teoría de la relatividad.

# Disposición

El tío Jacob: bobinas, generadores...

Oficina de patentes...

La Torre del reloj, la estación de ferrocarriles de Berna, oficina de Correos y Telégrafos, se empleaban señales eléctricas para sincronizar relojes.

# Disposición

Un observador a la velocidad de la luz, ¿cómo vería esa luz?

- Un imán moviéndose respecto de una espira o una espira moviéndose respecto de un imán, producían la misma corriente.

# ¿Coautores?

- Su primer artículo de relatividad no contenía citas.
- Tampoco coautores (Mileva? Michele Besso?)

# Annus mirabilis 1905

Cuantos de luz

tamaño de las moléculas

movimiento browniano

modificación del espacio y el tiempo

$$E=mc^2$$



$$E=mc^2$$

# FÍSICA DE LAS NOCHES ESTRELLADAS

“La masa va aumentando según aumenta la velocidad, y depende exclusivamente de ésta. La energía del cuerpo también irá aumentando según vaya más deprisa. La energía sólo puede depender de la masa y de la velocidad, y como la masa sólo depende de la velocidad, o lo que es lo mismo, la velocidad sólo depende de la masa, la energía de un cuerpo sólo depende de su masa”.

# Celebración

Einstein a Habicht:

“Los dos estamos, ¡ay!, borrachos perdidos debajo de la mesa”



# ¿Folius mirabilis?

1916. “Sobre la teoría cuántica de la radiación”

“Descubrió” la emisión estimulada.

Sentó el fundamento teórico del láser.

Dedujo la fórmula de Planck

Introdujo los llamados “coeficientes de Einstein”

pero... introducía un elemento de azar en la emisión.

# Minkowski (1908)

El espacio-tiempo no es espacio y tiempo

Einstein: “erudición superflua”

“Desde que los matemáticos se han apoderado de la teoría de la relatividad, ni yo mismo la entiendo”

Minkowski murió ese mismo año.

# El ascensor (1907)

Si alguien corta los cables del ascensor, el hombre dentro de él no pesa sobre el ascensor.

Si deja caer una piedra está quedará flotando.

Inenarrable sensación placentera de ingravidez.

El hombre no sabría si estaba en reposo en el espacio o en caída libre.

# El “Entwurf”

Con Besso y Grossman, un “esbozo” de teoría  
1911. Desviación de la posición angular de una  
estrella al pasar rozando la superficie del Sol:  
0,83” (la mitad del valor real).

1913. Avance del perihelio de Mercurio:  
18”/siglo. Mal; el valor correcto era 43”/siglo.

El “entwurf” no era ni machista ni covariante.

# Covariancia

- Las fórmulas de la física clásica eran relaciones entre tensores. Así, eran independientes de los giros.
- Las fórmulas de la relatividad restringida eran independientes frente a los giros en el espacio-tiempo.
- Las fórmulas de la relatividad general deberían ser covariantes frente a todo tipo de transformaciones del sistema de referencia. Relaciones tensoriales en un espacio curvo.



# Inercia y gravedad

- Las fuerzas de inercia se pueden anular con una transformación de coordenadas.
- Definición: un sistema inercial es aquel en el que se han anulado las fuerzas de inercia.
- Las fuerzas de inercia no dependen de nada del objeto al que se aplican (color, forma, carga...)
- Las otras fuerzas sí, excepto... ¡la gravedad!

# Fuerzas de inercia y gravedad

- Las fuerzas de inercia y la gravedad son de la misma naturaleza.
- La diferencia es que en el caso de la gravedad, la transformación que la anula lo hace en un entorno infinitesimal.
- Geometría. La gravedad requería un espacio-tiempo curvo.

# Otra vez el ascensor cayente

El hombre en tal ascensor, deja flotando dos piedras...

Pero las piedras se irán acercando la una a la otra.

# Eclipse de 1913

Freundlich a Crimea.

Pero sobrevino la Primera Guerra Mundial y otro equipo americano tuvo nubes.

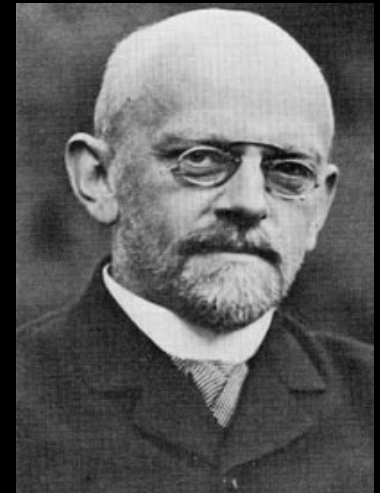
Más adelante, superado el Entwurf, dedujo los valores correctos del avance del perihelio de Mercurio y la deflexión de los rayos por el Sol.

# Einstein y Hilbert

- Einstein expuso su aún inmadura teoría en Göttingen, ante Hilbert.
- Hilbert se puso a trabajar en ello.
- Hilbert mandó a publicar su artículo el 20 de noviembre.
- Einstein dio una conferencia el 25 de noviembre.

# Hilbert, generoso

- Pero Hilbert modificó su artículo el 16 de diciembre.
- Hilbert: “Las ecuaciones diferenciales de la gravitación resultantes están, en mi opinión, en concordancia con la magnífica teoría de la relatividad general establecida por Einstein”.
- Hilbert: “Cualquier muchacho de las calles de Göttingen sabe más de geometría tetradimensional que Einstein. Pero a pesar de ello, fue Einstein quien hizo el trabajo, y no los matemáticos.



# Repercusión

Dirac: “Probablemente, el mayor descubrimiento científico jamás realizado.

Max Born: “la mayor hazaña del pensamiento humano en torno a la naturaleza, la más asombrosa combinación de penetración filosófica, intuición física y habilidad matemática”

Quizá... Besso, Grossman o Hilbert debieron haber sido coautores.

Einstein, que había menospreciado la importancia de la matemática en la física, lamentó siempre no saber más matemáticas. La relatividad general exigía más matemáticas.

# Agujeros negros

- Karl Schwarzschild (1916): Curvatura del espacio-tiempo.
- Fuera y dentro de la estrella.
- Murió una semana después.
- Wheeler acuñó el término de “agujeros negros”.
- Hoy se reconocen muchos agujeros negros en el Universo.



# 1919. Deflexión de la luz

En 1911: ¿0,85 “ ? (inglés)

Ahora el resultado era el doble: 1.7” (alemán)

Eddington dirigió la expedición de observación.

A Sobral (Brasil) y a I. Príncipe (ecuador)

“Nublado todo el rato. Esperanzado. Eddington”

Sobral: 1,98 y 0,86 ..... 1.7” !

# Repercusión

Einstein a Ehrenfest: “Por casualidad, ¿has oído algo ahí sobre la observación inglesa del eclipse?”

Real Academia Holandesa: Lorentz

Real Sociedad Geográfica: Thomson: “Uno de los mayores logros del pensamiento humano”

Einstein: “Newton, perdóname...”

# Las tres pruebas

La deflexión de la luz (1,7")

El avance del perihelio de Mercurio (43"/siglo)

Desplazamiento al rojo gravitatorio ( $z=2 \times 10^{-4}$   
en una enana blanca)

# La fama

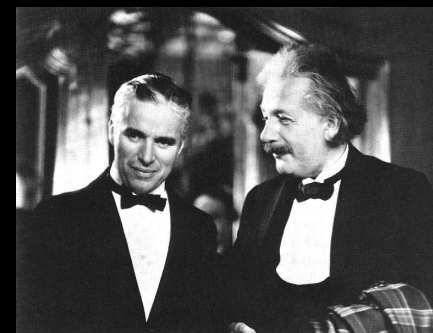
Einstein fue un héroe mediático.

Encantador, desaliñado, ocurrente...

Einstein se representaba a sí mismo.

También había detractores: Ciencia judía.

L. Durrer: “La propuesta de la relatividad fue directamente responsable de la pintura abstracta, la música atonal y la literatura informe.”



# Einstein en España



# Emilio Herrera

Conoció a Einstein en 1923.

Como vicepresidente de la Academia de Matemáticas.

Quizá el único que le entendió



# Los antirelativistas

La relatividad y el antisemitismo.

El Grupo de Estudio de los Científicos Alemanes para la Preservación de la Ciencia Pura.

Deutsche Physik. Purgar a la física alemana de las influencias judías.

Hitler: “La ciencia, antaño nuestro orgullo, es hoy enseñada por hebreos”

H. Ford: “¿Es Einstein un plagiaro?”

# Cosmología



# Cosmología

Antes de Einstein se hubiera podido creer: El Universo es infinito tanto en el espacio como en el tiempo.

Einstein: Un Universo finito pero sin bordes.

Max Born: “Esta sugerencia de un espacio finito pero ilimitado constituye una de las más grandes ideas sobre la naturaleza del mundo que jamás se hayan concebido”.



# Modelo 0 de Einstein

Conclusión: El Universo estaba en expansión.

¡Absurdo! Tenía que ser estático.

Para evitar la coalescencia, introdujo el término cosmológico

$\Gamma$

(kosmologische Gleichung) “su gran metedura de pata”

# La expansión del Universo

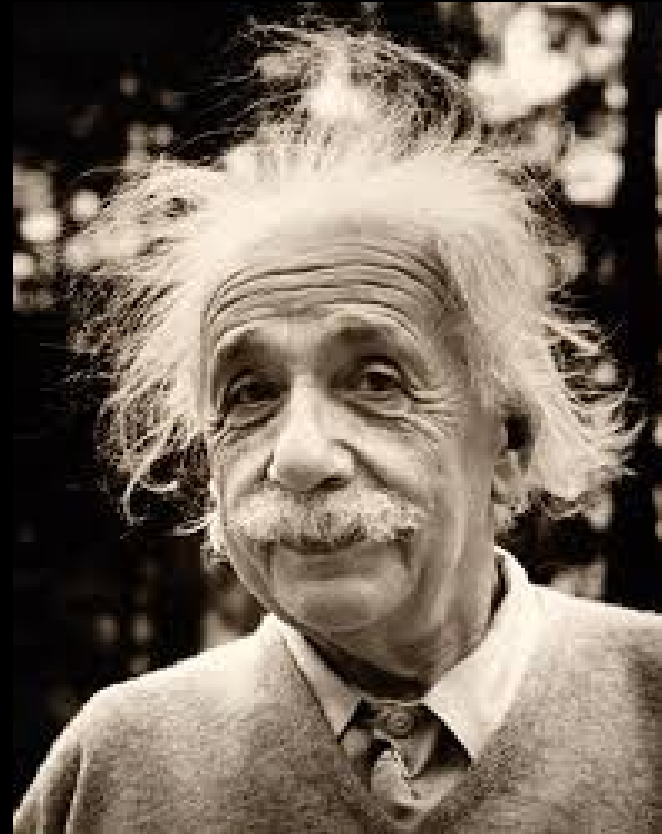
1931. Einstein acude a Mount Wilson.

Einstein: Desaliñado, regordete, antimilitarista, sencillo, sincero...

Hubble: altanero, altivo, espíritu militar, vanidoso, mentiroso...

- Einstein: Universo estático.
- Hubble: Universo dinámico.

# Einstein y Hubble



# Hubble y Einstein

Shapley: Cuando el “Mayor” Hubble iba a observar, no se sabía si iba al telescopio o a la guerra.

Einstein: “Cuando una persona puede obtener placer en marchar en formación al ritmo de la música, se le ha dado un gran cerebro por error. Con una espina dorsal hubiera sido suficiente”.

# El Big-Bang

$$v = H_0 r$$

$$Z = \frac{H_0}{c} r$$

# La ley de Hubble

Hubble tenía razón.

Einstein: Elimínese la constante cosmológica.

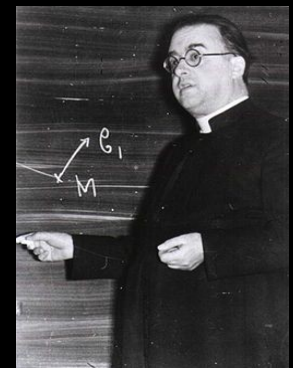
La ley de Hubble ¿es de Hubble?

# El Universo relativista

El Big-Bang: Friedman, Lemaître y de Sitter.

Los teóricos:  $z$  no es doppler; es la métrica la que se expande. Las velocidades de alejamiento son aparentes.

También Hubble hablaba de “velocidades aparentes”





# Ley de Hubble

El primero en formularla fue de Sitter.

También Lemaître. La comprobó con datos observacionales (1927).

Slipher encontró la expansión.

Humason previno a Hubble.

Hubble y Humason (1929, 1931)

Eddington a Lemaître: “Publica en inglés”.

En el MNRAS (1931), Lemaître ya no incluía la ley  $v=H_0r$

# ¿Ley de Hubble?

No.

Ley de de Sitter-Slipher-Wirtz-Lemaître-Humason-Hubble.

# No al término cosmológico

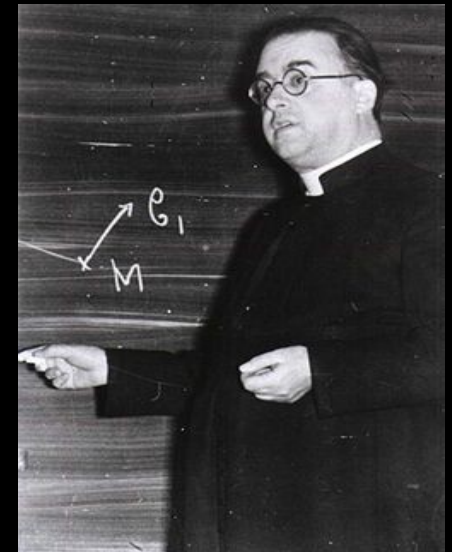
La mayor metedura de pata de Einstein.

“El término cosmológico es feo”.

Lemaître: “No; No es feo”.

El modelo de Einstein-de Sitter

...pero...



# Reaceleración

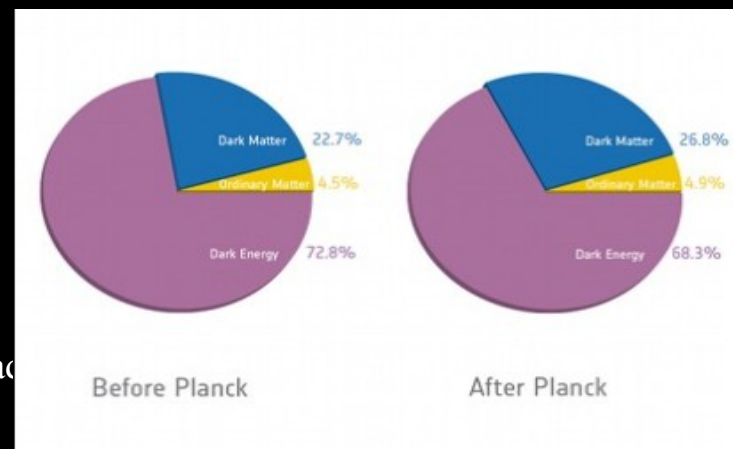
El Universo se reacelera.

Había que rescatar el término cosmológico de la papelera de Einstein.

Hoy: Término cosmológico ---> energía oscura.

Componente dominante del Universo.

Einstein: Hasta cuando se equivocaba tenía razón.



Ondas gravitacionales

# Oscilaciones de la métrica del espacio-tiempo

# Ondas gravitacionales

1936.

El período de los sistemas binarios de púlsares aumenta debido a la emisión de ondas gravitacionales (1979, Taylor, Nobel). (¡43 años después!)

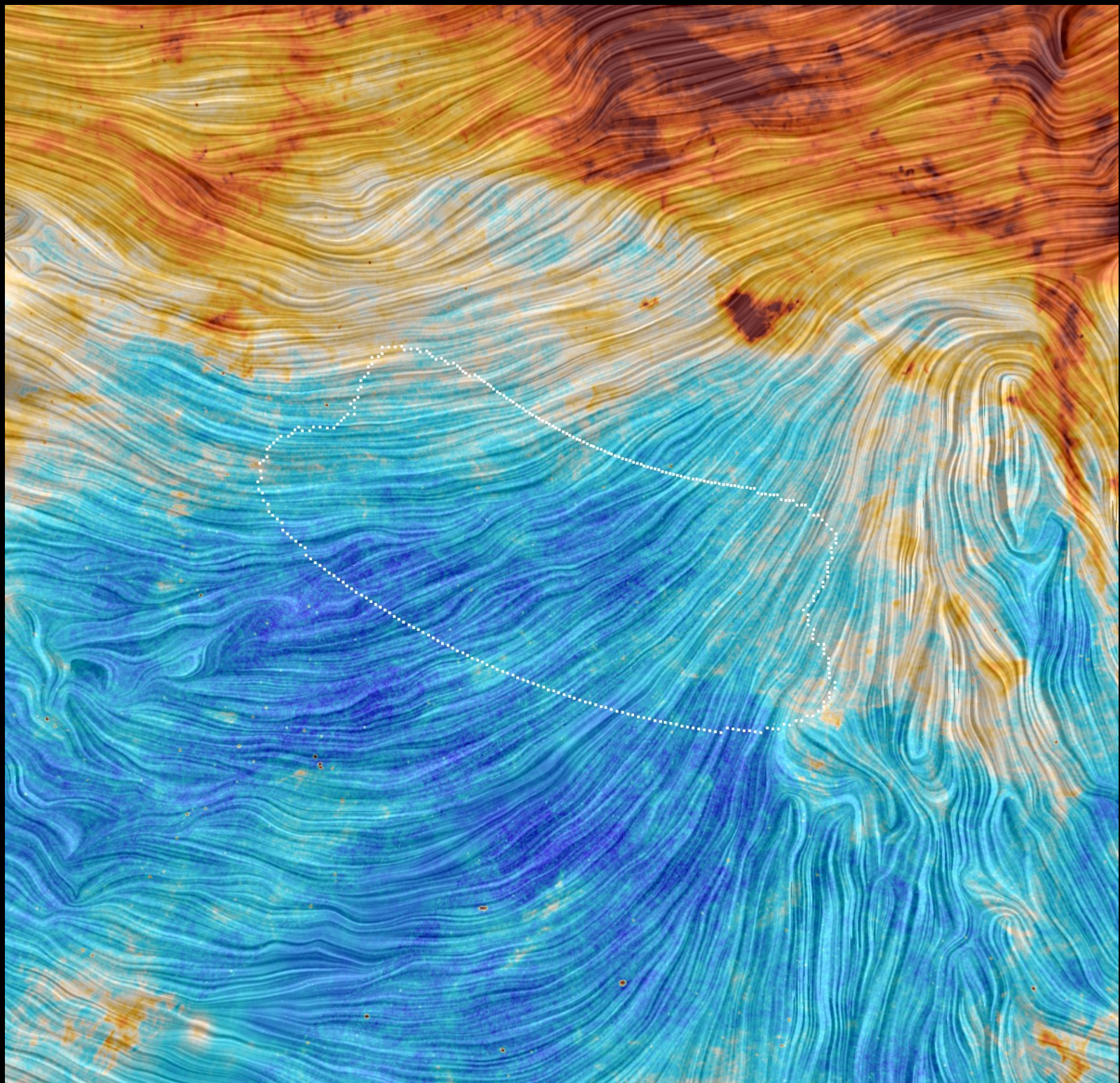
En la “Inflación” debieron producirse ondas gravitacionales.

Observables en el CMB.

2014. BICEP2 anunció haberlas encontrado.

2015. PLANCK lo puso en duda. Trabajo conjunto BICEP2-PLANCK: ¡¡¡No!!! (No se había limpiado el polvo)





# Lentes gravitacionales

1936. Podrían existir lentes gravitacionales.

Una lente estelar sería inobservable

Pero Zwicky (1937): Un cúmulo de galaxias SÍ tendría efectos observables.

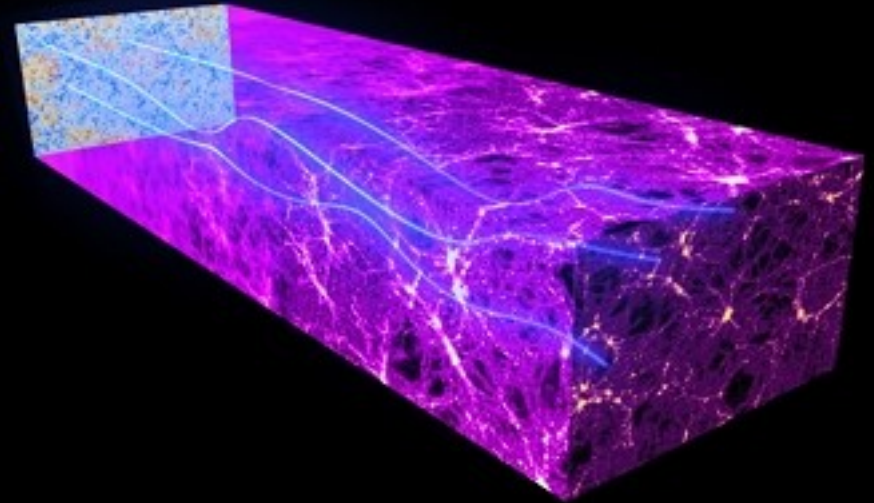
El anillo de Einstein se produce cuando objeto, lente y observador está alineados.

La primera observación de un cuásar doble fue en 1979. (¡43 años después!)

Hoy se conocen muchas lentes gravitacionales.

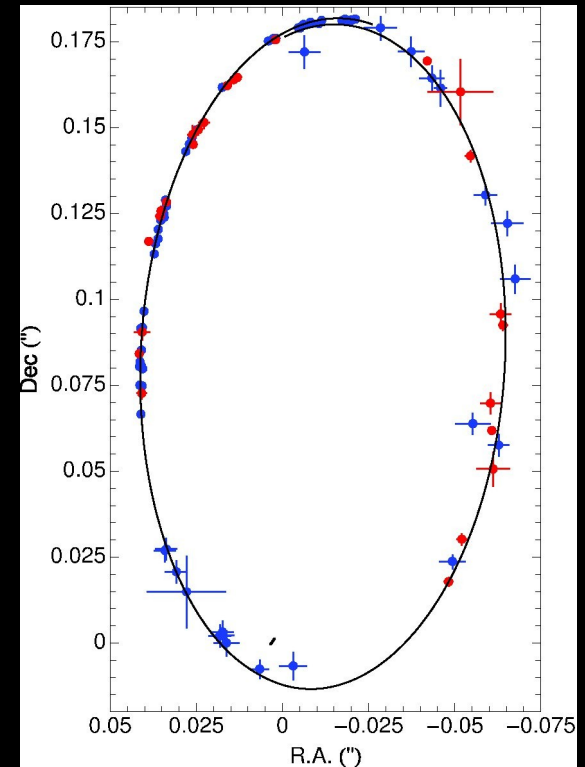


# Lentes gravitacionales



# Un gran agujero negro

- En el centro de la Vía Láctea hay un agujero negro de 4 millones de masas solares.
- Radio de Schwarzschild  $1/15$  AU
- A 24 millones de años-luz.
- SgrA\*



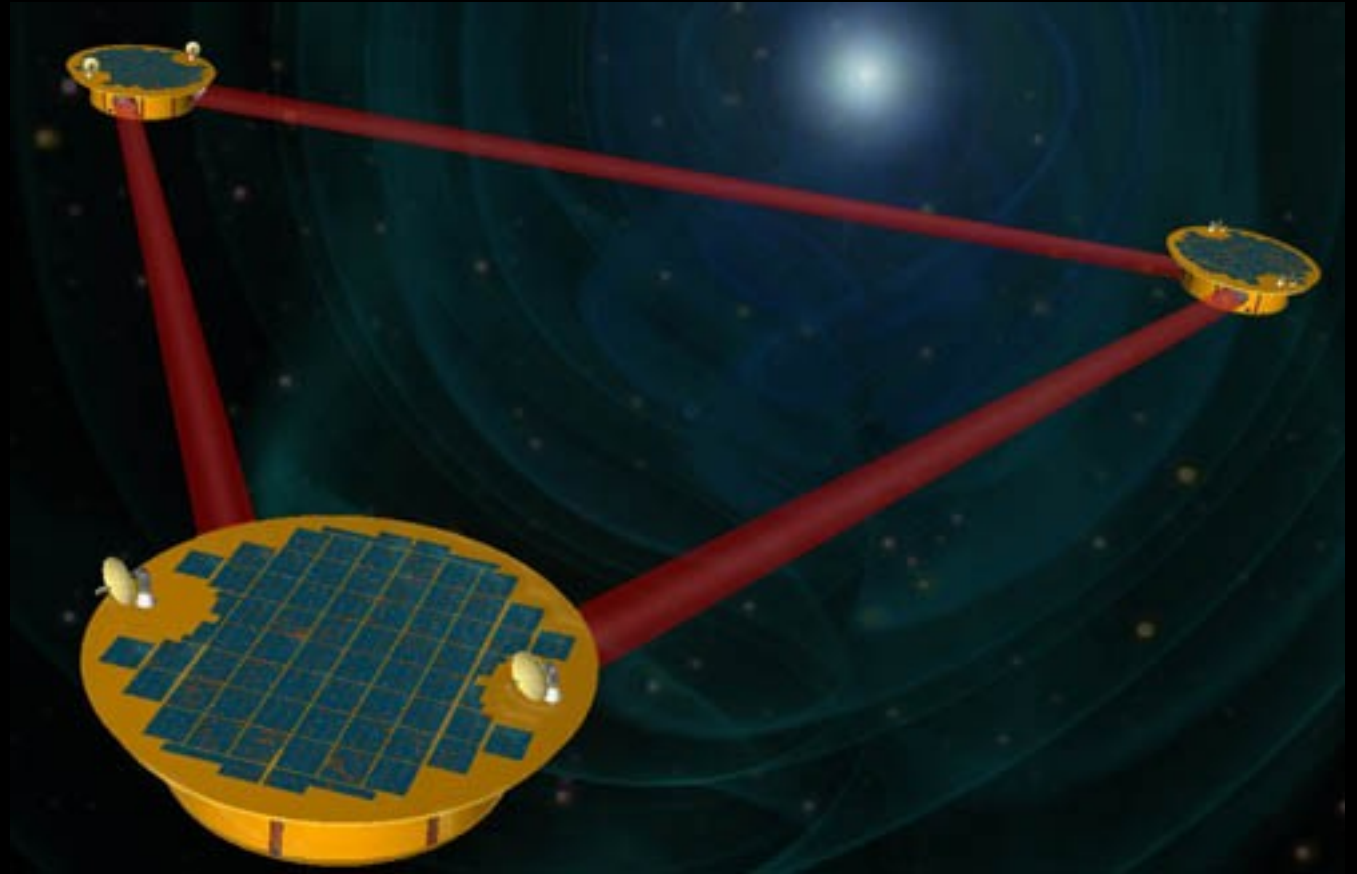
# El futuro

- EHT
- “Event Horizon Telescope” EHT.
- VLBI, ondas milimétricas
- SgrA\* El agujero negro central de la Vía Láctea.
- 15 micro segundos de arco

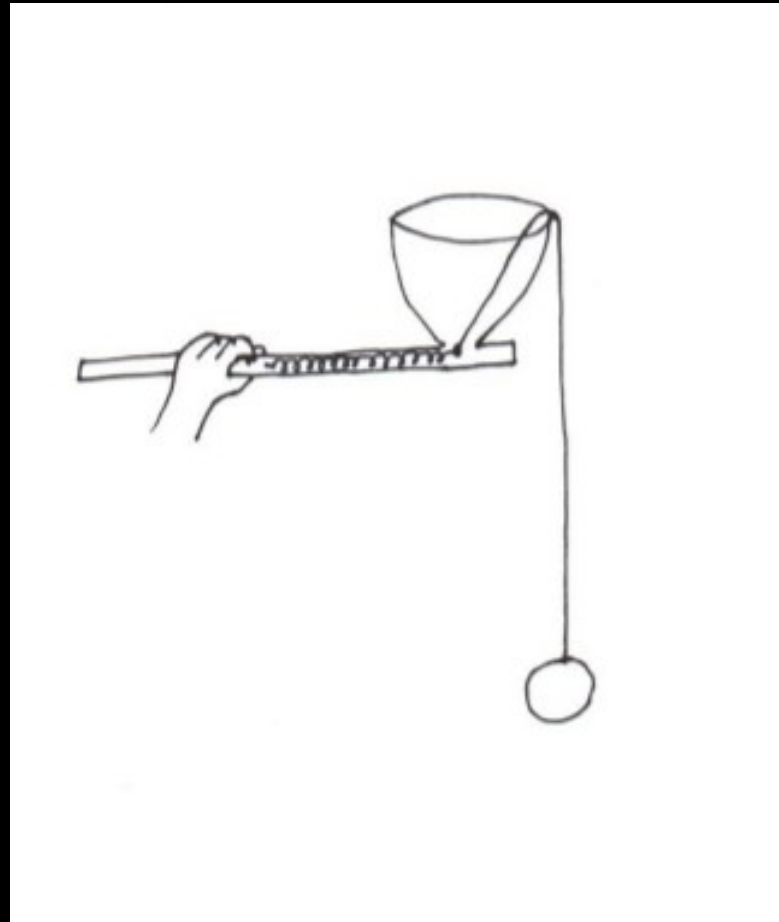


# GW

LISA



# Un juguete



- zacabau