

LA RELATIVIDAD EN EL AÑO DE LA LUZ

J. Fernando Barbero G.

Instituto de Estructura de la Materia, CSIC.

Madrid, 5 de noviembre de 2015.



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

1 La propagación de la luz y el éter luminífero.

- La velocidad de la luz.
- Velocidad ¿Con respecto a qué? (El éter).
- El experimento de Michelson y Morley.

2 La relatividad especial.

- Un nuevo éter geométrico: el espacio-tiempo.
- Los rayos de luz y la definición de las magnitudes relativistas.
- Simultaneidad, longitudes, intervalos espacio-temporales...
- La dinámica relativista: equivalencia entre masa y energía.

3 La relatividad general.

- La teoría relativista de la gravitación.
- Lentes gravitatorias.
- Ondas gravitatorias.
- ...

Algunos hechos fundamentales sobre la propagación de la luz

- 1 **La luz se propaga con velocidad finita** (a la que se denota tradicionalmente como c).
- 2 La luz se propaga de un modo que **no depende del estado de movimiento del emisor** (como las ondas en un estanque).
- 3 Todos los observadores inerciales miden la misma velocidad de la luz **independientemente de su estado de movimiento**.

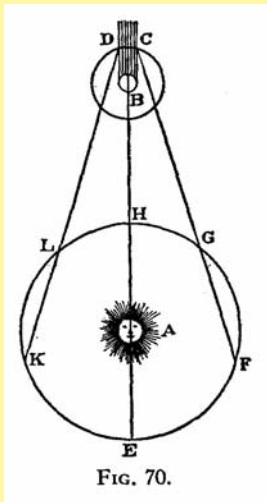
Discutiré estos tres puntos sin detenerme en una serie de cuestiones experimentales, observacionales y teóricas que tuvieron una enorme importancia en la historia de la física de la luz y el desarrollo de la relatividad. **Bradley, Young, Arago, Fresnel, Airy, Fizeau, Stokes, Fitzgerald, Lorentz, Poincaré** y otros tendrán que esperar hasta otra charla...

La velocidad de la luz: Ole Rømer



- El primer científico en aportar suficientes evidencias sobre la **finitud de la velocidad de propagación de la luz** fue el astrónomo danés Ole Rømer.
- Observando minuciosamente las ocultaciones de los satélites de Júpiter (Ío en particular) apreció un retraso que atribuyó correctamente al hecho de que **la luz se propaga con velocidad finita**.
- A partir del conocimiento aproximado que se tenía en la época sobre el tamaño de la órbita de la Tierra (la *unidad astronómica*) pudo estimar $c \approx 220\,000\text{km/s}$, una velocidad **enorme**.

La velocidad de la luz: Ole Rømer

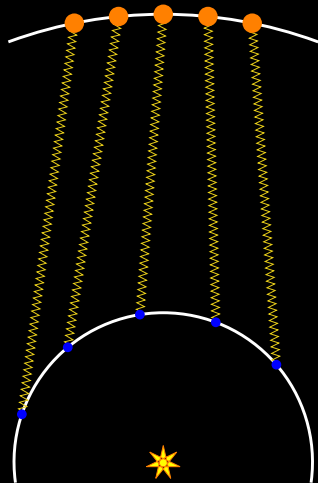


- El primer científico en aportar suficientes evidencias sobre la **finitud de la velocidad de propagación de la luz** fue el astrónomo danés Ole Rømer.
- Observando minuciosamente las ocultaciones de los satélites de Júpiter (Ío en particular) apreció un retraso que atribuyó correctamente al hecho de que **la luz se propaga con velocidad finita**.
- A partir del conocimiento aproximado que se tenía en la época sobre el tamaño de la órbita de la Tierra (la *unidad astronómica*) pudo estimar $c \approx 220\,000\text{km/s}$, una velocidad **enorme**.



(Imagen: NASA, ESA, Hubble Heritage Team)

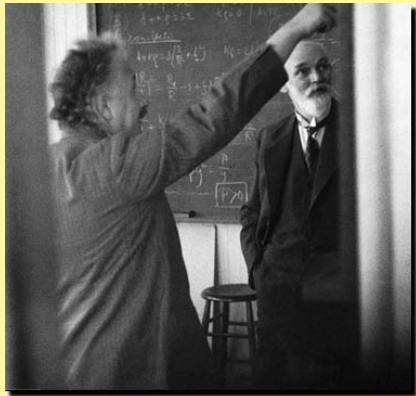
ALGO PASA CON LA LUZ...



El método de Rømer

- Si la velocidad de la luz fuera **finita** los intervalos de tiempo entre **ocultaciones sucesivas** de un satélite por Júpiter (por ejemplo Ío) **dependerían de las posiciones de Júpiter y la Tierra en sus órbitas**.
- Se observa que en algunas épocas del año el intervalo de tiempo entre ocultaciones sucesivas **experimenta cambios de hasta 15 segundos**.
- Si registramos el momento en el que se produce cada ocultación obtenemos una curva que se parece a una recta con unas **oscilaciones** superpuestas que tienen una amplitud de unos 1000 segundos: **el tiempo que tarda la luz en atravesar la órbita de la Tierra**.

c no depende del estado de movimiento del emisor

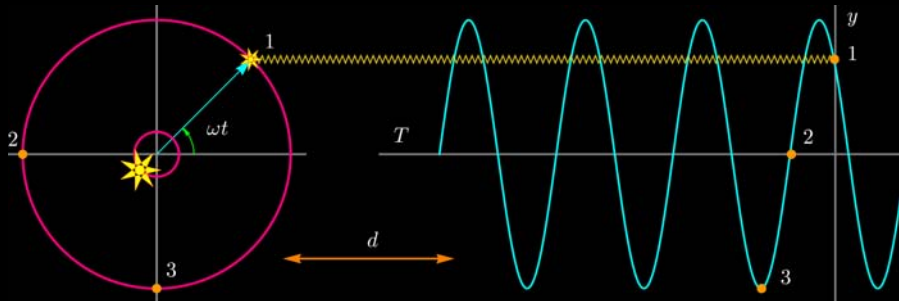


- El argumento de de Sitter.
- Las imágenes de muchos cuerpos celestes se verían **seriamente distorsionadas** si la luz no se moviera de modo independiente del emisor.
- Por ejemplo: las estrellas dobles darían lugar lugar a **imágenes múltiples**.
- Sus **espectros serían también diferentes** de los que se ven con los telescopios.

ALGO PASA CON LA LUZ...

Velocidad de la luz infinita

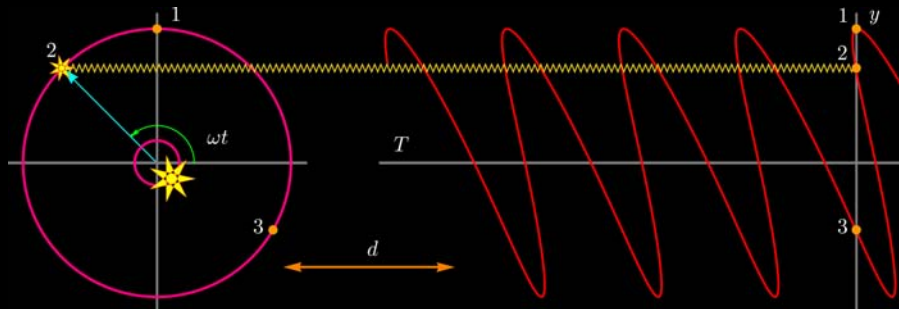
- **Estrella en órbita circular** con periodo $2\pi/\omega$ en una órbita circular cuyo plano contenga a la Tierra (la vemos de canto).
- El tiempo T de llegada a la posición y un telescopio viene determinado por las ecuaciones paramétricas $T(t) = t$, $y(t) = R \sin \omega t$ donde el parámetro t es el tiempo en el que se emite el rayo.



ALGO PASA CON LA LUZ...

Velocidad de la luz c relativa con respecto al emisor

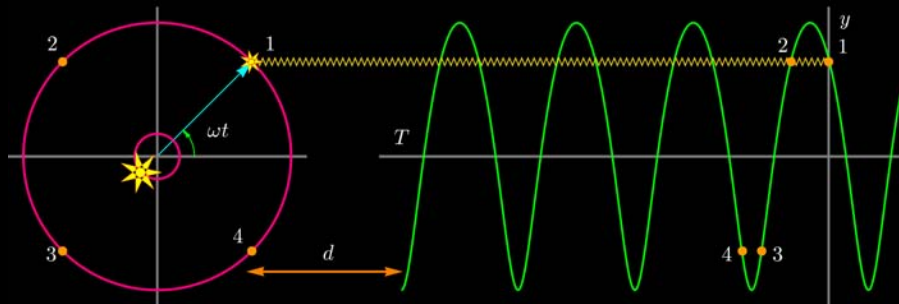
- $T(t) = t + \frac{d - R \cos \omega t}{\sqrt{c^2 - R^2 \omega^2 \cos^2 \omega t} - R \omega \sin \omega t}$ y $y(t) = R \sin \omega t$.
- Los rayos que proceden de distintas posiciones orbitales se **desplazan hacia al observador con velocidades distintas**.
- Si tienen tiempo (¡espacio!) suficiente, unos rayos adelantan a otros y se **producen imágenes múltiples**.



ALGO PASA CON LA LUZ...

c independiente del movimiento del emisor y finita

- $T(t) = t + (d - R \cos \omega t)/c$, $y(t) = R \sin \omega t$.
- La **asimetría** en la forma de la curva se debe a la **finitud de c**
- El rayo 2 se emite **más lejos y más tarde** que el 1 mientras que aunque el rayo 3 se emite más lejos **sale antes** hacia el observador.



Imágenes múltiples

- Imágenes simuladas de una estrella en órbita alrededor de un objeto compacto, con la masa del que ocupa el centro de la Vía Láctea, en función de la distancia al observador d .
- El eje mayor de la órbita mide 1200 u.a. y el periodo es 7.3 años.
- Esta observación habría sido imposible en tiempos de de Sitter (hacen falta telescopios de **gran apertura, óptica adaptativa y detectores infrarrojos**).

¿Qué se ve en realidad?

Imágenes múltiples

- Imágenes simuladas de una estrella en órbita alrededor de un objeto compacto, con la masa del que ocupa el centro de la Vía Láctea, en función de la distancia al observador d .
- El eje mayor de la órbita mide 1200 u.a. y el periodo es 7.3 años.
- Esta observación habría sido imposible en tiempos de de Sitter (hacen falta telescopios de **gran apertura, óptica adaptativa y detectores infrarrojos**).

¿Qué se ve en realidad?

Imágenes múltiples

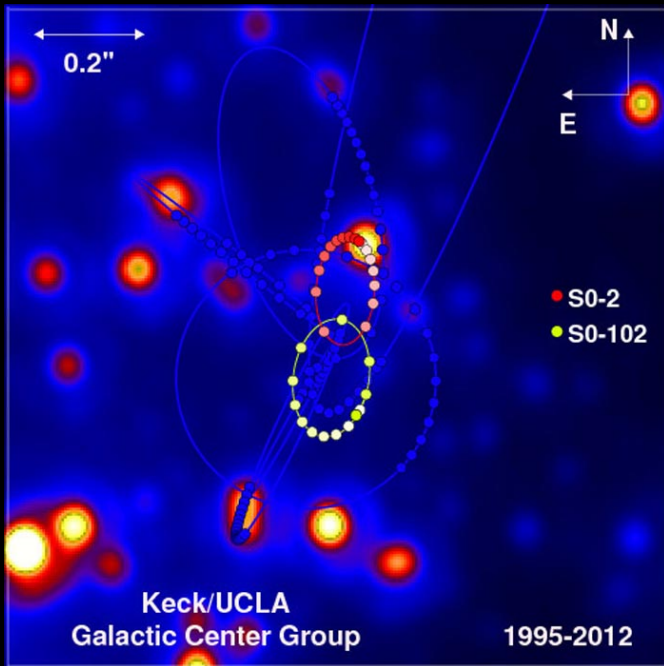
- Imágenes simuladas de una estrella en órbita alrededor de un objeto compacto, con la masa del que ocupa el centro de la Vía Láctea, en función de la distancia al observador d .
- El eje mayor de la órbita mide 1200 u.a. y el periodo es 7.3 años.
- Esta observación habría sido imposible en tiempos de de Sitter (hacen falta telescopios de **gran apertura, óptica adaptativa y detectores infrarrojos**).

¿Qué se ve en realidad?

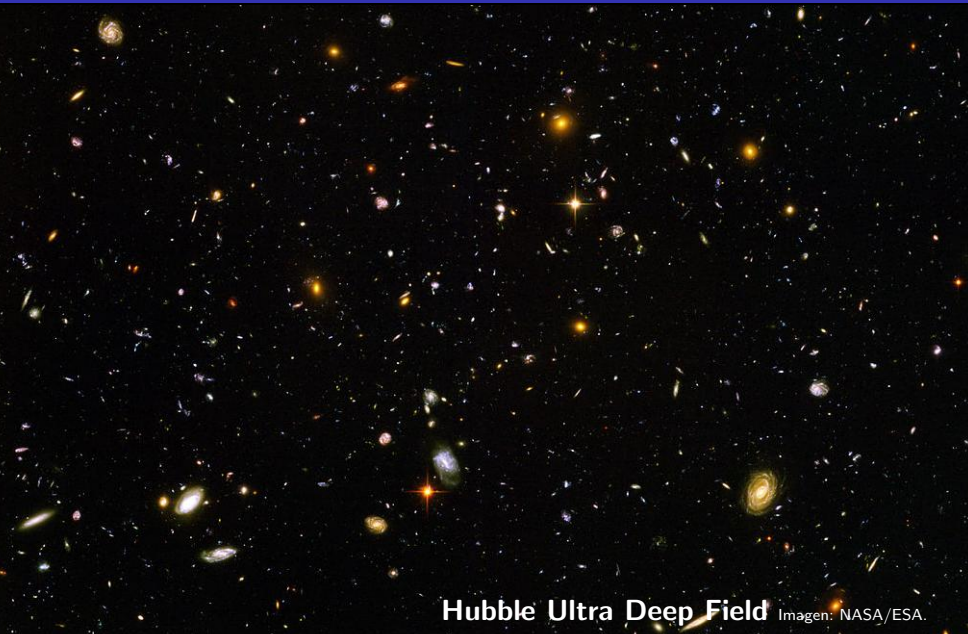
Imágenes múltiples

- Imágenes simuladas de una estrella en órbita alrededor de un objeto compacto, con la masa del que ocupa el centro de la Vía Láctea, en función de la distancia al observador d .
- El eje mayor de la órbita mide 1200 u.a. y el periodo es 7.3 años.
- Esta observación habría sido imposible en tiempos de de Sitter (hacen falta telescopios de **gran apertura, óptica adaptativa y detectores infrarrojos**).

¿Qué se ve en realidad?



LA CLARIDAD DE UN UNIVERSO MARAVILLOSO...



Hubble Ultra Deep Field Imagen: NASA/ESA.

LA CLARIDAD DE UN UNIVERSO MARAVILLOSO...



NGC 1300, Imagen: NASA/ESA.

LA LUZ: ¿ONDA ELÁSTICA?



http://en.wikipedia.org/wiki/File:2006-01-14_Surface_waves.jpg

LA LUZ: ¿ONDA ELÁSTICA?

La luz y el éter

- Las ondas en medios elásticos se propagan con una velocidad que es **independiente** de la de la **fente emisora**. Sucede lo mismo para las ondas de gravedad como la que se ve en la imagen.
- Huygens postuló la existencia de un medio elástico, **el misterioso éter luminífero**, cuyas oscilaciones mecánicas serían las ondas luminosas.

¿Propiedades del éter?

- Velocidad del sonido en distintos medios (ordenados por “rigidez”):
 - ① Aire: $\simeq 340m/s$.
 - ② Agua: $\simeq 1\,500m/s$.
 - ③ Titanio: $\simeq 6\,700m/s$.
 - ④ Acero: $\simeq 6\,000m/s$.
 - ⑤ Berilio: $\simeq 12\,890m/s$.
 - ⑥ Osmio: $\simeq 4\,940m/s$.
- La velocidad de las ondas depende de las características del medio en el que se propagan ($v^2 \propto E/\rho$).
- **¡Cuanto más rígido** (y/o menos denso) es el medio **mayor es la velocidad**, así que el éter tiene que ser tremendamente rígido (o muy poco denso o una combinación de ambas cosas)...
- ...y sin embargo **los planetas y las estrellas se mueven a través de él como si nada...**

¿Podemos detectar nuestro movimiento a través del éter?

El experimento de Michelson

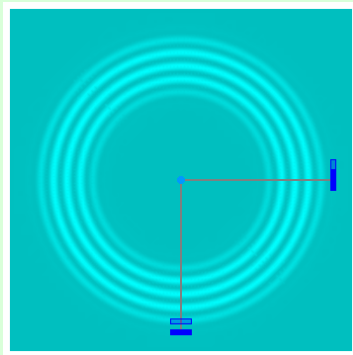


- Estudiando las ondas que se propagan en un medio elástico en **reposo absoluto** podemos medir nuestra velocidad con respecto a él.
- Haciendo medidas en distintas épocas del año podríamos detectar el **movimiento de la Tierra con respecto al éter**.
- Resultado del experimento:

No se detecta nada

- Uno de los resultados nulos más importantes de la historia de la física.

El experimento de Michelson

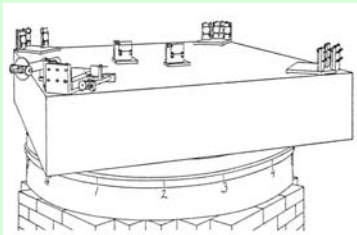


- Estudiando las ondas que se propagan en un medio elástico en **reposo absoluto** podemos medir nuestra velocidad con respecto a él.
- Haciendo medidas en distintas épocas del año podríamos detectar el **movimiento de la Tierra con respecto al éter**.
- Resultado del experimento:

No se detecta nada

- Uno de los resultados nulos más importantes de la historia de la física.

El experimento de Michelson



- Estudiando las ondas que se propagan en un medio elástico en **reposo absoluto** podemos medir nuestra velocidad con respecto a él.
- Haciendo medidas en distintas épocas del año podríamos detectar el **movimiento de la Tierra con respecto al éter**.
- Resultado del experimento:

No se detecta nada

- Uno de los resultados nulos más importantes de la historia de la física.

Soluciones parciales

- ➊ Par explicar algunas de estas observaciones y otras relacionadas (en particular relativas al **movimiento de la luz en medios transparentes**) se propusieron numerosas soluciones.
- ➋ Algunas recurrían a un **éter parcialmente arrastrado** por los medios refringentes (coeficiente de arrastre de Fresnel).
- ➌ En otras se usó una especie de **“hidrodinámica del éter”** (Stokes).
- ➍ Lorentz consiguió recuperar la idea de un éter completamente estático en el contexto de sus teorías sobre la **naturaleza eléctrica de la materia**. Destaca en este sentido su explicación semicuantitativa de la existencia de un índice de refracción en los materiales transparentes.
- ➎ La famosa **contracción de Lorentz-Fitzgerald**, muy importante en la relatividad especial, fue propuesta como una forma *ad hoc* de explicar el resultado nulo del experimento de Michelson-Morley.
- ➏ **Una situación muy compleja y poco satisfactoria.**

LA RELATIVIDAD ESPECIAL DE EINSTEIN.

Un nuevo paradigma: la teoría de la relatividad restringida

La situación cambió de forma dramática con la formulación de la **relatividad especial** basada en los siguientes **dos postulados**:



- 1 Las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas inerciales.
- 2 La velocidad de la luz en el vacío tiene el mismo valor en todos los sistemas de referencia inerciales.

La luz y sus propiedades juegan un papel central en el enunciado de los principios fundamentales de la relatividad.

Comentarios

- ❶ **No son postulados en un sentido matemático.** Por sí solos no nos permiten deducir gran cosa...
- ❷ Con respecto al comportamiento de la luz hay que reconocer que el segundo postulado es realmente hacer de la necesidad virtud...
- ❸ Para hacer que estos postulados sean realmente útiles es necesario reconsiderar con cuidado la **definición de una serie de magnitudes cinemáticas básicas**. Esta revisión, debida también a Einstein, es **tanto o más importante** que los postulados anteriores.
- ❹ Es necesario dar definiciones operacionales de lo que significa: **intervalo de tiempo propio, simultaneidad, longitud, velocidad,...**
- ❺ En las definiciones más concisas de estas magnitudes **la luz también juega un papel central**.
- ❻ A otro nivel también son importantes las hipótesis más o menos explícitas de homogeneidad e isotropía del espacio.

Algunas definiciones básicas

- ① Los relojes ideales portados por los observadores físicos miden lo que se conoce como su **tiempo propio**.
- ② **Simultaneidad:** Dos sucesos son simultáneos **con respecto a un observador inercial** Obs cuando éste puede emitir dos señales luminosas separadas por un intervalo de tiempo propio T de forma que al reflejarse en estos sucesos los pulsos de luz recibidos por Obs también estén separados por un intervalo T .
- ③ **Longitud:** La longitud de un objeto medida por un observador inercial limitado por dos sucesos simultáneos con respecto a él se obtiene como cT .

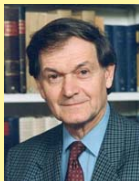
parole, parole, parole?

Minkowski y el espacio-tiempo



«El punto de vista sobre el espacio y el tiempo que voy a presentar ante ustedes ha surgido del terreno de la física experimental y de ahí procede su fortaleza. Es una visión radical. El espacio y el tiempo por sí mismos están condenados a desvanecerse en las sombras; solo un cierto tipo de unión entre ellos conservará una realidad independiente.» (Minkowski, 1909)

Una visión contemporánea: Roger Penrose



«En mi opinión, la teoría de la relatividad especial no estuvo realmente completa, pese a las maravillosas intuiciones físicas de Einstein y las profundas contribuciones de Lorentz y Poincaré, hasta que Mikowski aportó su perspectiva revolucionaria y fundamental: el concepto de espacio-tiempo.» (Penrose, 2004)

Es necesaria una **perspectiva geométrica**

Un triángulo en cuatro dimensiones

Un triángulo en cuatro dimensiones

- $A(1, 2, 4, 3), B(2, -1, 3, 2), C(0, 1, 0, -1)$.

Un triángulo en cuatro dimensiones

- $A(1, 2, 4, 3), B(2, -1, 3, 2), C(0, 1, 0, -1)$.
- $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3, v_4), \mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3, w_4)$.

$$\langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle = v_1 w_1 + \cdots + v_4 w_4$$

Un triángulo en cuatro dimensiones

- $A(1, 2, 4, 3), B(2, -1, 3, 2), C(0, 1, 0, -1)$.
- $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3, v_4), \mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3, w_4)$.

$$\langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle = v_1 w_1 + \cdots + v_4 w_4$$

- **Distancias y longitudes:**

$$d(A, B) := \langle \overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AB} \rangle^{1/2} =: \|\overrightarrow{AB}\|$$

Un triángulo en cuatro dimensiones

- $A(1, 2, 4, 3), B(2, -1, 3, 2), C(0, 1, 0, -1)$.
- $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3, v_4), \mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3, w_4)$.

$$\langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle = v_1 w_1 + \cdots + v_4 w_4$$

- **Distancias y longitudes:**

$$d(A, B) := \langle \overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AB} \rangle^{1/2} =: \|\overrightarrow{AB}\|$$

- **Ángulos:**

$$\cos(\widehat{BAC}) := \frac{\langle \overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AC} \rangle}{\|\overrightarrow{AB}\| \|\overrightarrow{AC}\|}$$

Un triángulo en cuatro dimensiones

- $A(1, 2, 4, 3), B(2, -1, 3, 2), C(0, 1, 0, -1)$.
- $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3, v_4), \mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3, w_4)$.

$$\langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle = v_1 w_1 + \cdots + v_4 w_4$$

- **Distancias y longitudes:**

$$d(A, B) := \langle \overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AB} \rangle^{1/2} =: \|\overrightarrow{AB}\|$$

- **Ángulos:**

$$\cos(\widehat{BAC}) := \frac{\langle \overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AC} \rangle}{\|\overrightarrow{AB}\| \|\overrightarrow{AC}\|}$$

- **¡Toda la geometría euclídea en 4D está aquí!**

Un triángulo en cuatro dimensiones

- $A(1, 2, 4, 3), B(2, -1, 3, 2), C(0, 1, 0, -1)$.
- $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3, v_4), \mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3, w_4)$.

$$\langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle = v_1 w_1 + \cdots + v_4 w_4$$

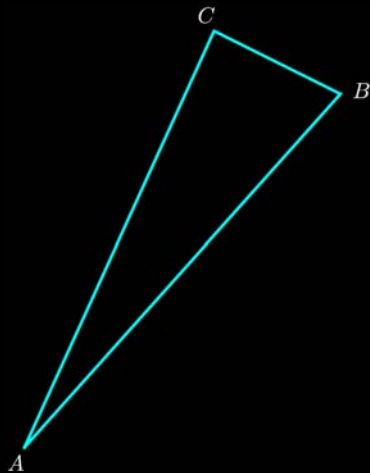
- **Distancias y longitudes:**

$$d(A, B) := \langle \overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AB} \rangle^{1/2} =: \|\overrightarrow{AB}\|$$

- **Ángulos:**

$$\cos(\widehat{BAC}) := \frac{\langle \overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AC} \rangle}{\|\overrightarrow{AB}\| \|\overrightarrow{AC}\|}$$

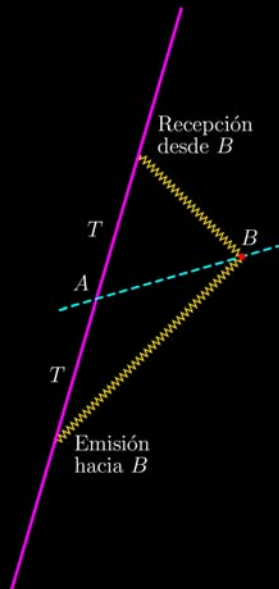
- **¡Toda la geometría euclídea en 4D está aquí!**



Simultaneidad

Consideremos un observador inercial $\mathcal{O}$ con un reloj, un suceso A sobre su línea del universo y otro B fuera de su línea del universo donde hay situado un espejo.

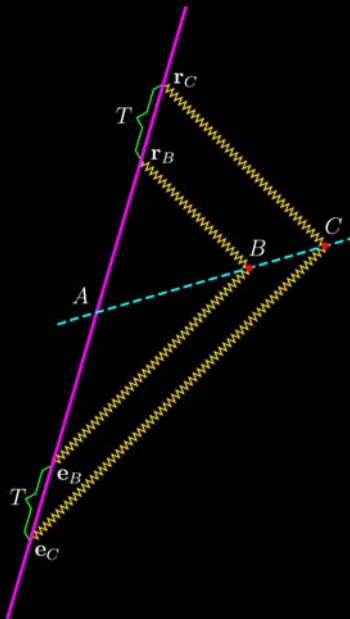
- Diremos que A y B son **simultáneos** para $\mathcal{O}$ si puede enviar un rayo de luz a B y recibirlo reflejado de manera que el intervalo medido por su reloj entre la emisión y A sea el mismo que entre A y la recepción.
- Se puede generalizar el proceso para dos sucesos B y C que no estén en la línea del universo del observador.
- Podemos definir así **(hiper)superficies de simultaneidad** asociadas al observador.



Simultaneidad

Consideremos un observador inercial con un reloj, un suceso A sobre su línea del universo y otro B fuera de su línea del universo donde hay situado un espejo.

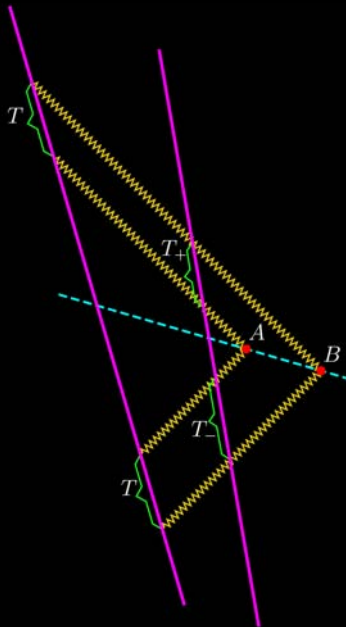
- Diremos que A y B son **simultáneos** para $\mathcal{O}$ si puede enviar un rayo de luz a B y recibirlo reflejado de manera que el intervalo medido por su reloj entre la emisión y A sea el mismo que entre A y la recepción.
- Se puede generalizar el proceso para dos sucesos B y C que no estén en la línea del universo del observador.
- Podemos definir así **(hiper)superficies de simultaneidad** asociadas al observador.



Distancias y longitudes

Podemos definir una noción de distancia entre dos sucesos independiente del observador inercial.

- Consideremos dos sucesos A y B .
- Un observador inercial Obs tal que A y B sean **simultáneos**.
- **Definimos** la distancia espacial de A a B como $\ell_{AB} = cT$ (c es un *factor de conversión*).
- ¿Puede otro observador inercial determinar esta distancia? Sí porque $T = \sqrt{T_- T_+}$ según las reglas de la geometría espaciotemporal de Minkowski.



Otros extraños fenómenos relativistas

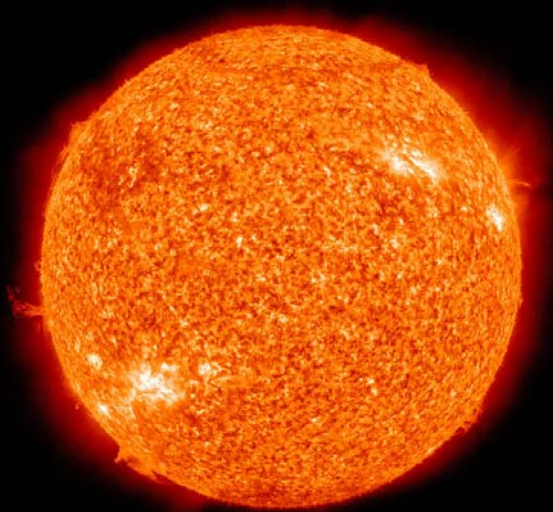
- 1 El **tiempo propio** y la “paradoja de los gemelos”.
- 2 “Relatividad de la **simultaneidad**” de sucesos.
- 3 Contracción de **longitudes** (¡recordar la contracción de Lorentz-Fitzgerald!).
- 4 La velocidad de la luz es la **máxima** posible.
- 5 Una extraña regla de **composición de velocidades**.
- 6 Deformación de imágenes. Distorsión de la bóveda del cielo (aberración estelar).
- 7 Una curiosidad: El tiempo no pasa para la luz.

Todas estas cosas **suceden 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.**
- **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 en las que se combinan núcleos de elementos ligeros (hidrógeno) para formar otros más pesados (helio).
- Creación de partículas en **aceleradores** y **procesos astrofísicos** de altas energías.



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

LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

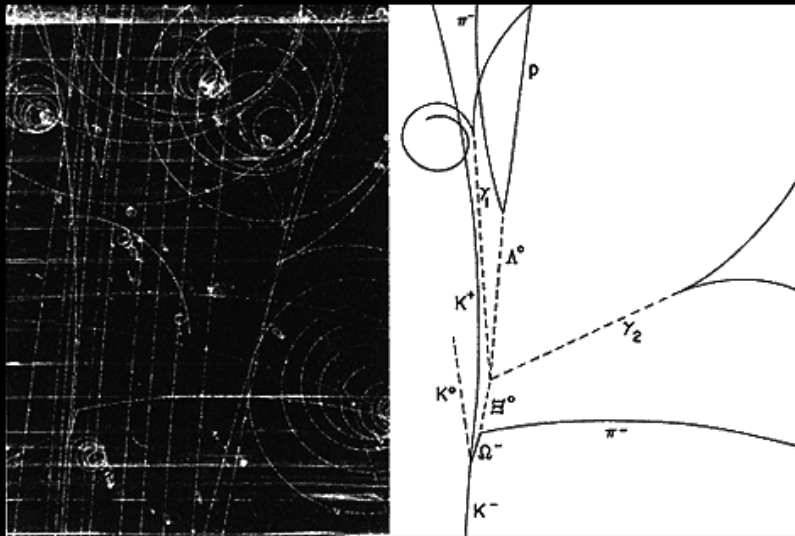
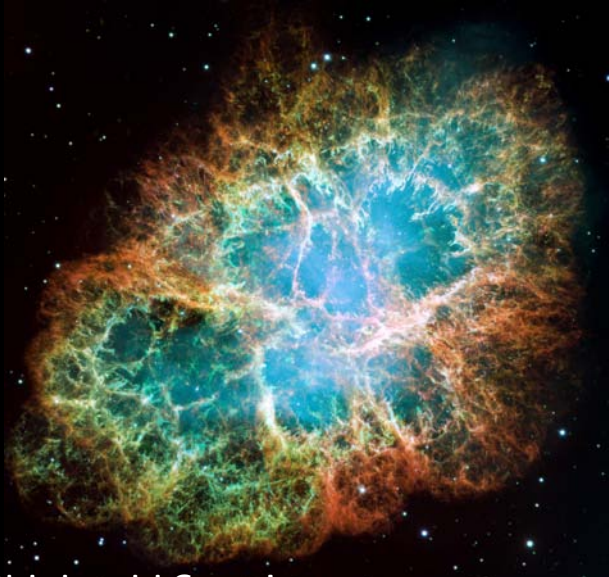


Foto: Brookhaven National Laboratory <http://www.hep.fsu.edu/wahl/satmorn/history/Omega-minus.asp.htm>



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

ESTRELLAS DE NEUTRONES

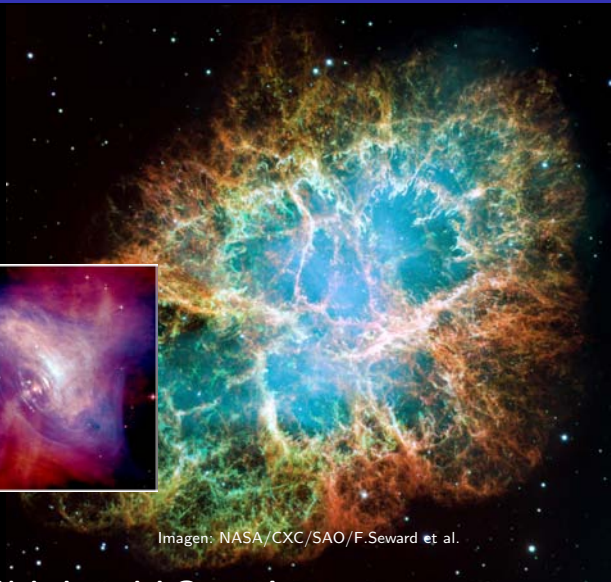


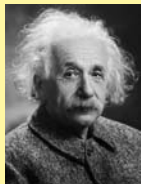
Imagen: NASA/CXC/SAO/F.Seward et al.

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.
- Ninguna información puede ser transmitida más deprisa que la luz: **no hay interacciones instantáneas**.
- Las partículas que forman la luz (los fotones) **no tienen masa**.
- El fenómeno de la **aberración estelar**. La posición aparente de las estrellas para un observador en la Tierra varía periódicamente a lo largo del año al cambiar su velocidad al desplazarse alrededor del Sol.
- Podemos estar seguros de que la Tierra se mueve alrededor del Sol (por si quedaba alguna duda...)

El centenario de la relatividad general



Este año celebramos el centenario de la relatividad general, **posiblemente la contribución más extraordinaria de Einstein a la física.**

Gravitación y relatividad

- ¿Es posible formular una **teoría de la gravitación compatible con los principios de la relatividad** (en particular la finitud de la propagación de las señales)?
- Recuérdese que en la gravitación de Newton la interacción gravitatoria **se transmite de forma instantánea** (ya que depende de la posición relativa de los objetos materiales).

¿Qué es la relatividad general?

- **La relatividad general es la teoría relativista de la gravitación.**
- Sus ecuaciones fundamentales (las ecuaciones de Einstein) relacionan entre sí la **geometría** (¡dinámica!) del espaciotiempo con su **contenido de materia y energía**.
- Explica la **estructura del universo**.
- Además nos ayuda a entender el **universo primitivo** (es uno de los ingredientes del **modelo cosmológico estándar**) y su **futuro** (¡la gravedad puede ser repulsiva!).
- Predice la existencia de fenómenos y objetos exóticos:
 - ① Lentes gravitatorias.
 - ② Ondas gravitatorias.
 - ③ Agujeros negros.
- **Es fundamental para que funcione el sistema GPS.**

Consecuencias observacionales de la relatividad general

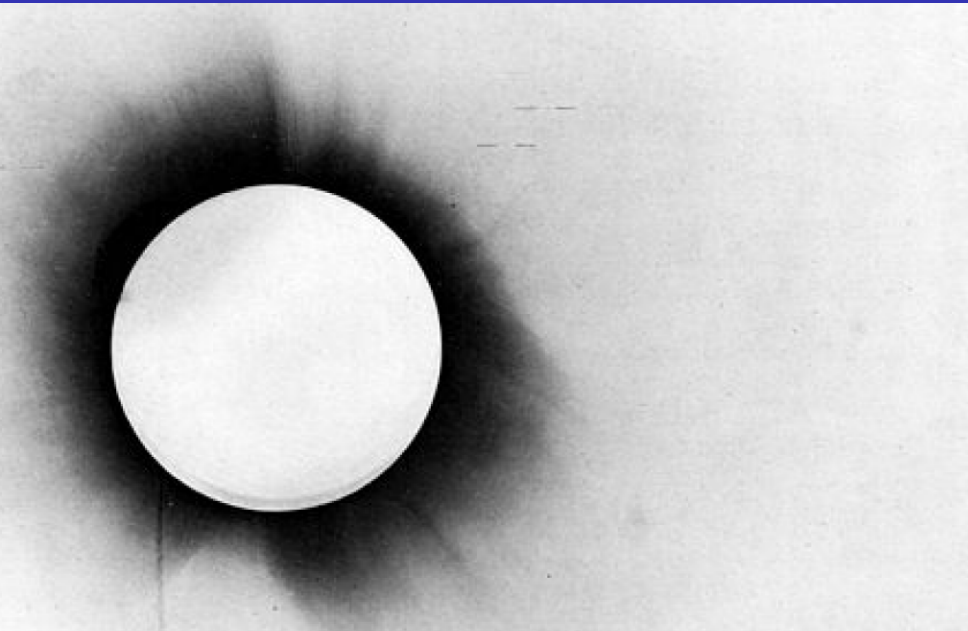
- ① Tres *tests* clásicos:
 - **Rotación anómala** del perihelio de Mercurio.
 - Corrimiento al rojo gravitatorio de la luz.
 - **Desviación de los rayos** de luz por el sol.
- ② Una de estas **comprobaciones observacionales** de la relatividad general se basa en la observación de la desviación de los rayos de luz por el sol en una cuantía **incompatible con la predicha por la gravitación newtoniana**.
- ③ Desde el punto de vista astrofísico esta desviación de la luz por los campos gravitatorios abre la puerta a:
 - **Estudios cosmológicos** (distribución de la materia en el universo).
 - Detectar **planetas extrasolares** (*microlensing*).

Desviación de rayos por el sol

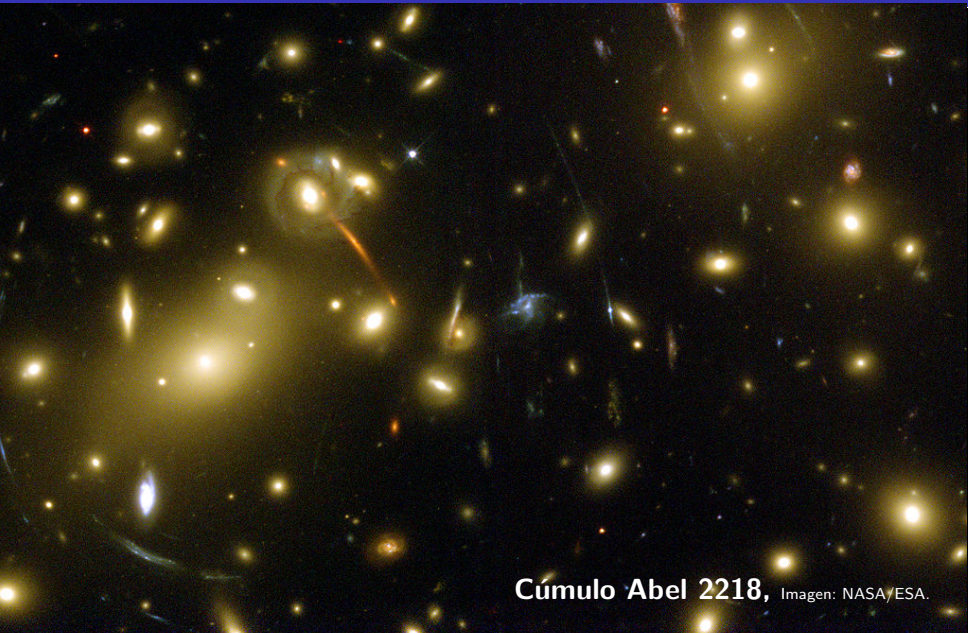
- Tanto la **gravitación newtoniana** como la **relatividad general** predicen la **desviación de los rayos de luz** procedentes de estrellas lejanas al pasar cerca del sol.
- La desviación **relativista** es el **doblo** de la newtoniana.



EL FAMOSO RESULTADO DE EDDINGTON



LENTES GRAVITATORIAS



Cúmulo Abel 2218, Imagen: NASA/ESA.

LENTES GRAVITATORIAS

Hubble Frontier Field Abell 2744

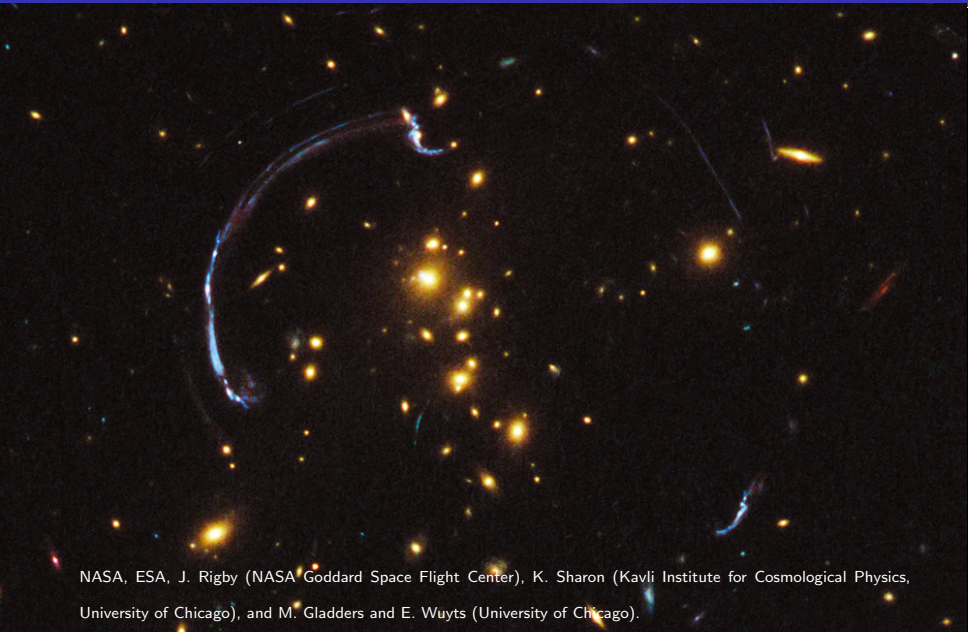
Hubble Space Telescope • ACS • WFC3



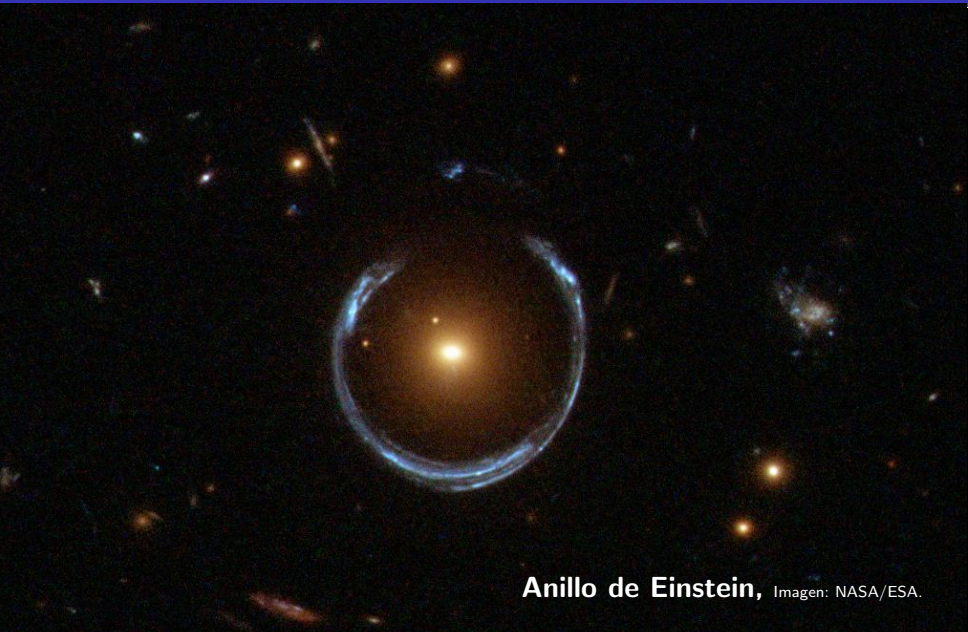
NASA and ESA

STScI-PRC14-01a

LENTESS GRAVITATORIAS

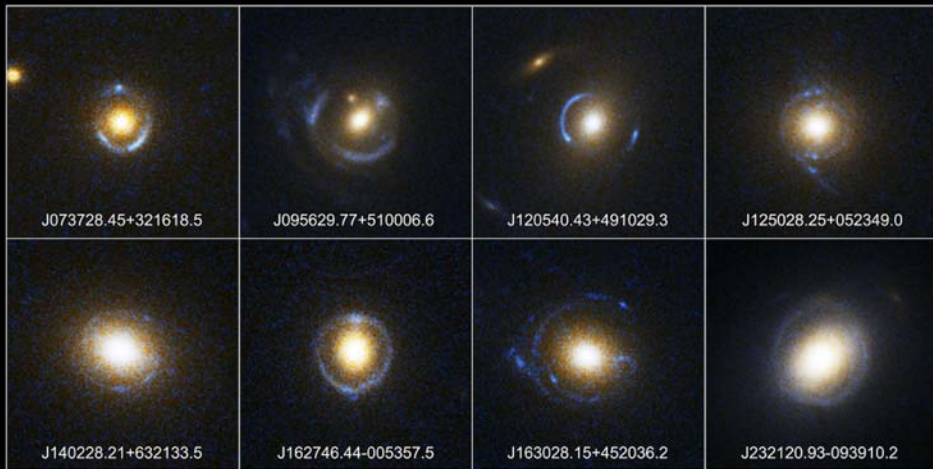


NASA, ESA, J. Rigby (NASA Goddard Space Flight Center), K. Sharon (Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago), and M. Gladders and E. Wuyts (University of Chicago).



Anillo de Einstein, Imagen: NASA/ESA.

LENTE GRAVITATORIAS



Einstein Ring Gravitational Lenses
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

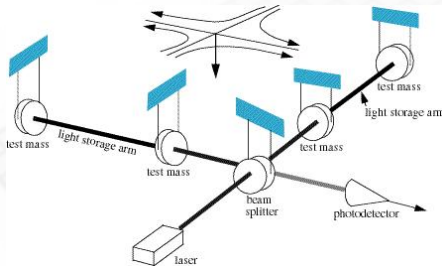
NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

STScI-PRC05-32

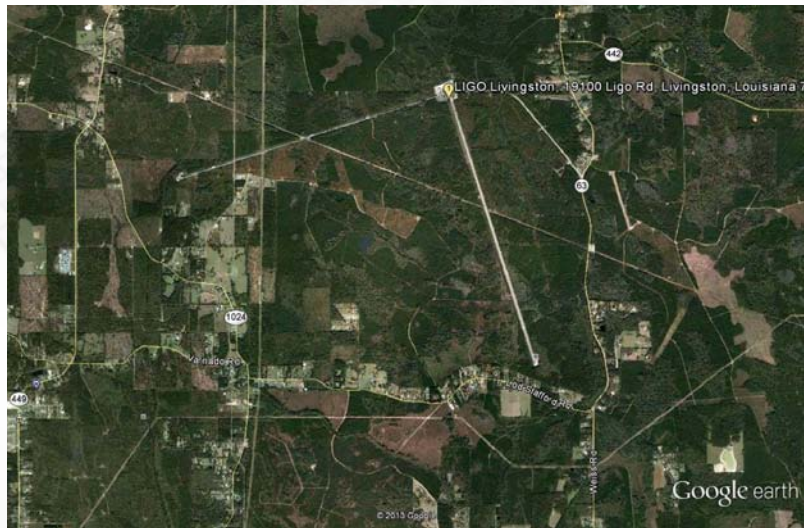
Radiación gravitacional

- 1 Del mismo modo que **las cargas eléctricas aceleradas emiten radiación electromagnética**, las **masas aceleradas emiten radiación gravitatoria**.
- 2 En principio puede ser detectada midiendo con precisión la aceleración mutua (¿definida de manera operacional apropiada!) entre masas de prueba en caída libre. También midiendo **esfuerzos y deformaciones** en un material.
- 3 Cabe esperar que este tipo de ondas se produzcan en procesos de **colapso** muy violentos. También en **sistemas binarios de objetos compactos** (con agujeros negros y/o estrellas de neutrones).
- 4 Las energías características son insignificantes a la escala de los laboratorios terrestres (es decir, no es posible fabricar un emisor de ondas gravitatorias que produzca una señal detectable).

DETECCIÓN DE ONDAS GRAVITATORIAS

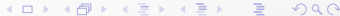


DETECCIÓN DE ONDAS GRAVITATORIAS (LIGO)



Google earth

millas
km



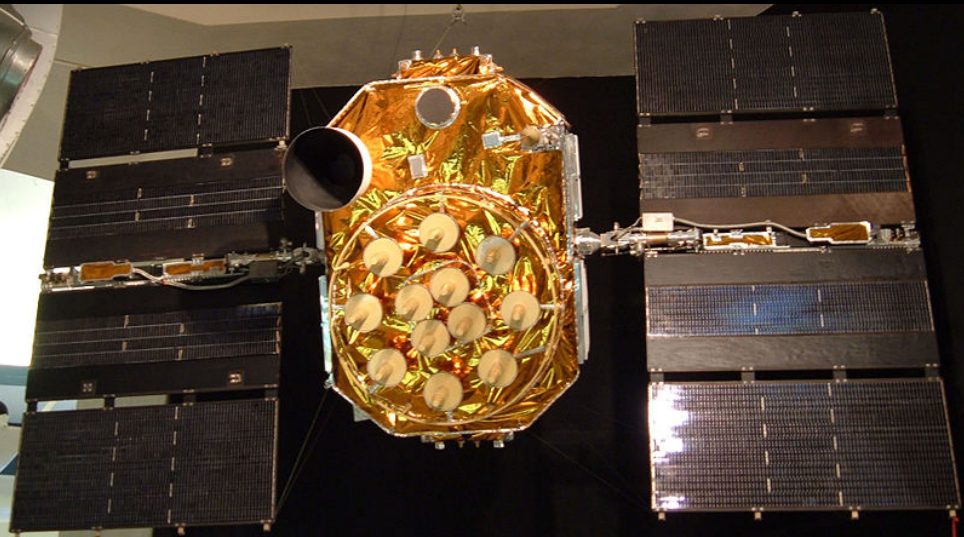
DETECCIÓN DE ONDAS GRAVITATORIAS (VIRGO)



El sistema GPS

- 1 Una constelación de satélites que llevan relojes muy precisos, **sincronizados** entre sí y con relojes en tierra.
- 2 Transmiten continuamente **su posición** y **el tiempo** que marcan sus relojes.
- 3 Con la información que recibe un receptor GPS desde los satélites puede determinar su posición y el tiempo exacto.
- 4 Es necesaria la información procedente de, al menos, **cuatro** satélites (espacio-tiempo, cuatro dimensiones...).
- 5 Para alcanzar la precisión necesaria hay que **tener en cuenta varios efectos relativistas** relacionados con el movimiento de los satélites y su posición en el campo gravitatorio de la Tierra.

EL SISTEMA GPS



¿ES DIFÍCIL ENTENDER LA RELATIVIDAD?

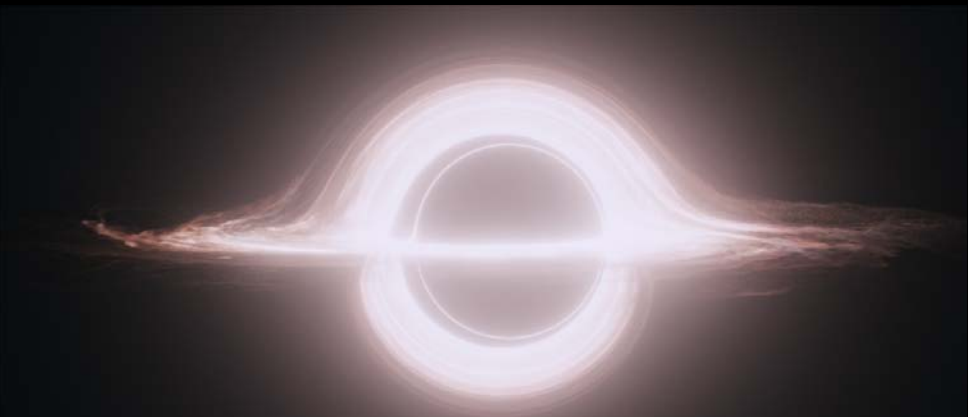
- Unas partes más que otras...
- La **cinemática** de la relatividad especial es **fácil**.
- La **dinámica** tampoco es mucho más difícil.
- La **relatividad general** es harina de otro costal...

Si les interesa...¡Inténtenlo!

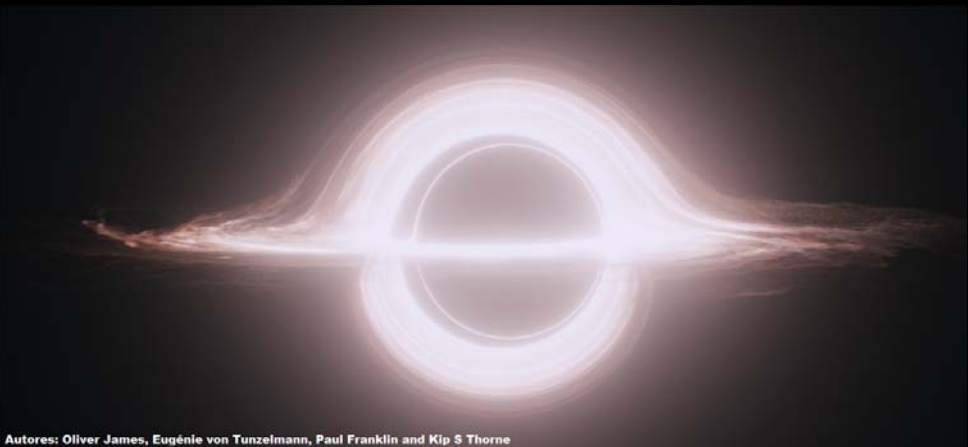
Hay una bibliografía extensísima. **Una pequeña selección:**

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, *Agujeros negros y tiempo curvo: El escandaloso legado de Einstein.*, Crítica (2000).



Autores: Oliver James, Eugénie von Tunzelmann, Paul Franklin and Kip S Thorne



¡Gracias!