

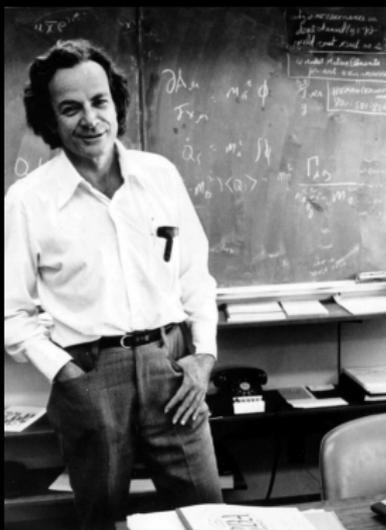
XI Semana de la Ciencia
18 de noviembre de 2011

¿FÍSICA CUÁNTICA O RELATIVIDAD GENERAL?

TRIBULACIONES DE UN ESTUDIANTE DE TESIS

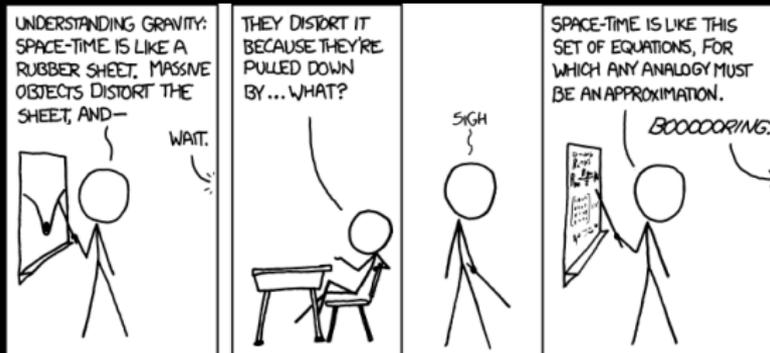
Mikel Fernández Méndez
Instituto de Estructura de la Materia (IEM), CSIC





Todo el que viene a una conferencia científica sabe que no la va a entender, pero quizá el conferenciante tenga una bonita y colorida corbata a la que mirar. ¡Pues no es el caso!

Richard Feynman



- Entender la gravedad: el espacio-tiempo es como una lámina de goma. Los objetos pesados la deforman y...
- Un momento. La deforman porque... ¿Qué es lo que los empuja hacia abajo?
- Ains...
- (...)
- El espacio tiempo es como este conjunto de ecuaciones, para las que cualquier analogía no puede ser más que una aproximación.
- ¡Me abuuuurroooo!

Introducción

En donde las cosas todavía son «normales»

LEY DE INERCIA

Un cuerpo en movimiento sobre una superficie horizontal continuará en la misma dirección y con velocidad constante a menos que sea perturbado.



Galileo Galilei (1564–1642)

LEY DE INERCIA

Un cuerpo en movimiento sobre una superficie horizontal continuará en la misma dirección y con velocidad constante a menos que sea perturbado. ✓

Vale, pero...
¡eso no es muy intuitivo!

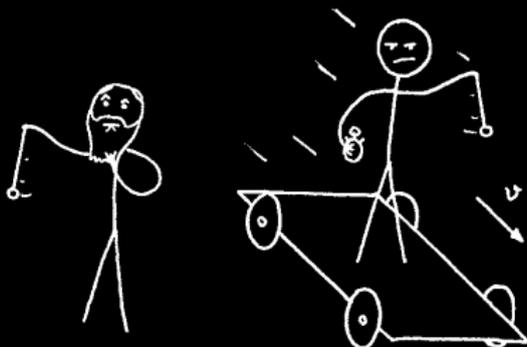


Galileo Galilei (1564–1642)

RELATIVIDAD GALILEANA

Un observador moviéndose «con velocidad constante» debe ver las mismas leyes de la Física que un observador «en reposo».

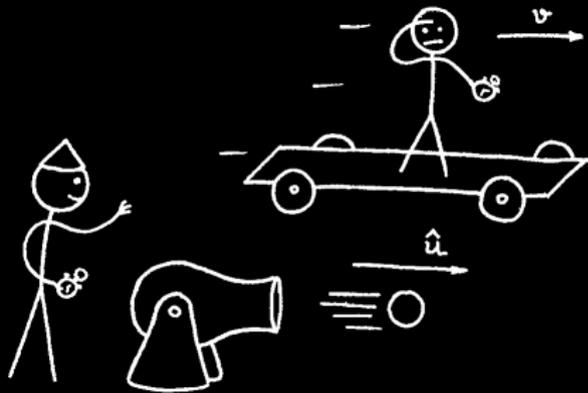
Los dos tipos de observadores se denominan *inerciales*. Todos los observadores inerciales son equivalentes y, por tanto, no existe el reposo absoluto.



REGLA DE ADICIÓN DE VELOCIDADES

¿Cómo se relacionan las velocidades que miden dos observadores en movimiento relativo?

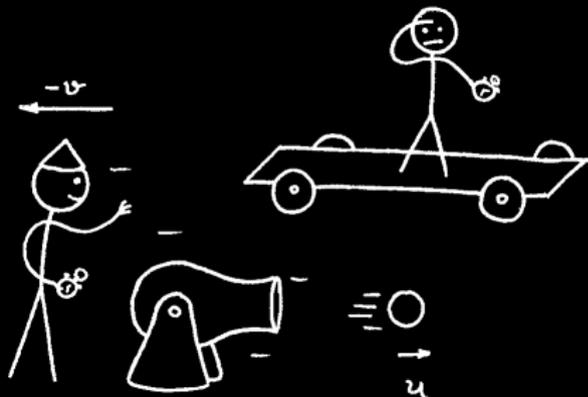
$$\hat{u} = u + v.$$



REGLA DE ADICIÓN DE VELOCIDADES

¿Cómo se relacionan las velocidades que miden dos observadores en movimiento relativo?

$$\hat{u} = u + v.$$



REGLA DE ADICIÓN DE VELOCIDADES

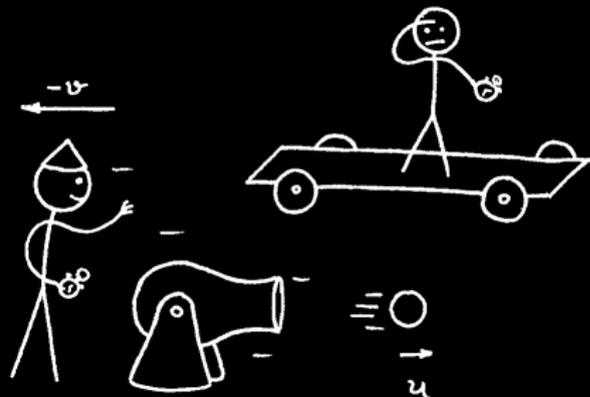
¿Cómo se relacionan las velocidades que miden dos observadores en movimiento relativo?

$$\hat{u} = u + v.$$

¿Y las aceleraciones?

$$\hat{a} = \frac{d\hat{v}}{dt} = a + \frac{dv}{dt}.$$

Si v es constante, $\hat{a} = a$.



Pero si v varía, aparece una aceleración extra,
la misma para todas las partículas.

LEYES DE NEWTON

1. Ley de Inercia

2. Segunda ley:

fuerza = masa \times aceleración

$$\vec{F} = m \times \vec{a}$$

(en la forma de Euler).

3. Ley de Acción y Reacción:

*Con toda acción
ocurre siempre una reacción
igual y opuesta.*



Isaac Newton (1643–1727)

Las tres leyes de [PhD Comics](#)
(en inglés):

1. [Ley de Inercia](#)
2. [Segunda ley](#)
3. [Ley de Acción y Distracción](#)

LEY DE LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL

Dos cuerpos de masas m_1 y m_2 se atraen con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

G es la *constante de Newton*.

Esta fuerza explica al mismo tiempo la caída de las manzanas y el movimiento de los planetas.

PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA DÉBIL

¿Qué aceleración provoca la fuerza gravitatoria?

$$a_1 = \frac{F}{m_1} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \times \frac{1}{m_1} = G \frac{m_2}{r^2}$$

La aceleración que experimenta la partícula 1 es **independiente de su masa**. Esto es lo que se conoce como *Principio de Equivalencia Débil*.

PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA DÉBIL

¿Qué aceleración provoca la fuerza gravitatoria?

$$a_1 = \frac{F}{m_1} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \times \frac{1}{m_1} = G \frac{m_2}{r^2}$$

La aceleración que experimenta la partícula 1 es **independiente de su masa**. Esto es lo que se conoce como *Principio de Equivalencia Débil*.

...Volveremos sobre esto.

No sé lo que puedo parecer al mundo, pero yo creo haber sido sólo como un niño jugando en la orilla del mar, divirtiéndose al encontrar de vez en cuando un guijarro más liso o una concha más bonita de lo normal, mientras el gran océano de la verdad permanecía sin descubrir frente a mí.



*Isaac Newton
(1643–1727)*

Relatividad Especial

No todo podía ser tan fácil...

LO QUE NO ES LA RELATIVIDAD



Sara Montiel (1928)

*Como dijo Einstein,
todo es relativo.*

LO QUE NO ES LA RELATIVIDAD



Sara Montiel (1928)

*Como dijo Einstein,
todo es relativo. X*

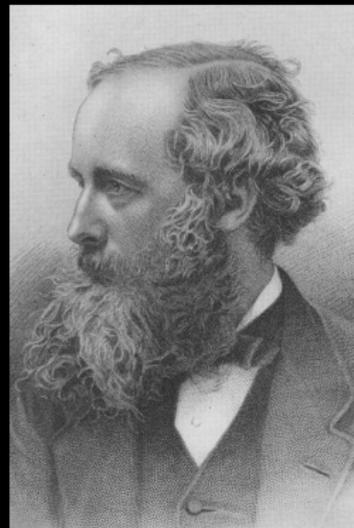
¡No! ¡No todo!

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Cuando Maxwell codificó las leyes del electromagnetismo en sus famosas ecuaciones, predijo la existencia de ondas electromagnéticas, que debían propagarse a la velocidad... de la luz.

De hecho, pronto quedó claro que **la luz es una onda electromagnética.**

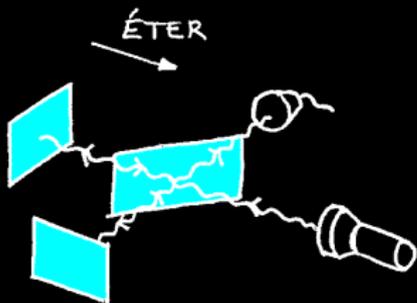
Como no se entendía que una onda pudiera propagarse en el vacío, se postuló la existencia de un medio, **el éter**, prácticamente indetectable, pero que llenaba todo.



James Clerk Maxwell
(1831–1879)

EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY

La luz se movería *a la velocidad de la luz* precisamente respecto a ese misterioso medio, el éter.

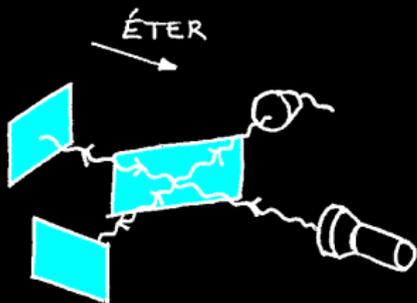


En su movimiento de traslación, la Tierra debería moverse con respecto al éter, por lo que podrían detectarse pequeñas variaciones en la velocidad de la luz según la dirección.

Sin embargo, Michelson y Morley probaron que no era ese el caso.

EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY

La luz se movería a la velocidad de la luz precisamente respecto a ese misterioso medio, el éter.



En su movimiento de traslación, la Tierra debería moverse con respecto al éter, por lo que podrían detectarse pequeñas variaciones en la velocidad de la luz según la dirección.

Sin embargo, Michelson y Morley probaron que no era ese el caso.

¡No puede haber éter!

PRINCIPIO DE RELATIVIDAD

Einstein argumentó que, de acuerdo con el principio de relatividad, si las leyes del electromagnetismo son ciertas, deben serlo en cualquier sistema inercial.

Por tanto, *la luz se mueve a la velocidad de la luz en todos los sistemas inerciales*... por paradójico que pueda parecer.

¿Qué implica esto?

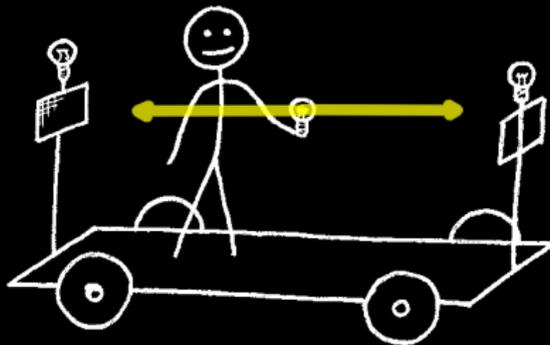


Albert Einstein (1879–1955)

RELATIVIDAD DE LA SIMULTANEIDAD

Imaginemos un experimento con dos observadores:

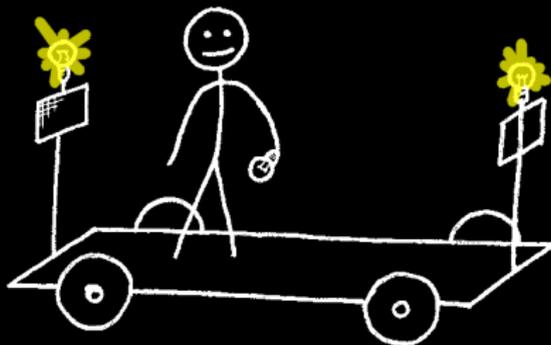
El estudiante del carro enciende una lámpara. Cuando la luz de la lámpara es detectada en los extremos del carro, se encienden sendas lámparas. El estudiante comprueba que las dos lámparas se encienden a la vez.



RELATIVIDAD DE LA SIMULTANEIDAD

Imaginemos un experimento con dos observadores:

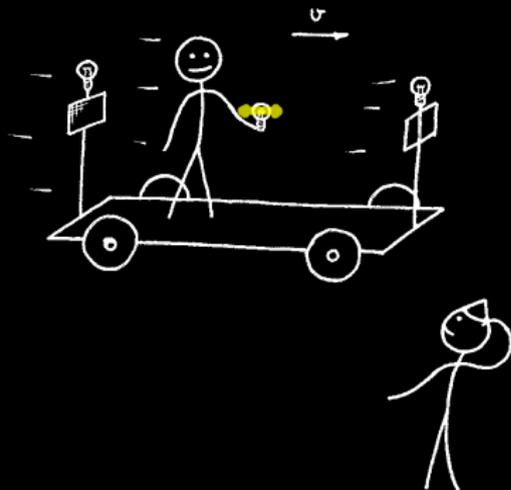
El estudiante del carro enciende una lámpara. Cuando la luz de la lámpara es detectada en los extremos del carro, se encienden sendas lámparas. El estudiante comprueba que las dos lámparas se encienden a la vez.



RELATIVIDAD DE LA SIMULTANEIDAD

Imaginemos un experimento con dos observadores:

Por otra parte, para el estudiante que ve el carro moviéndose, la lámpara trasera se enciende antes que la delantera, puesto que se mueve hacia el rayo de luz.



RELATIVIDAD DE LA SIMULTANEIDAD

Imaginemos un experimento con dos observadores:

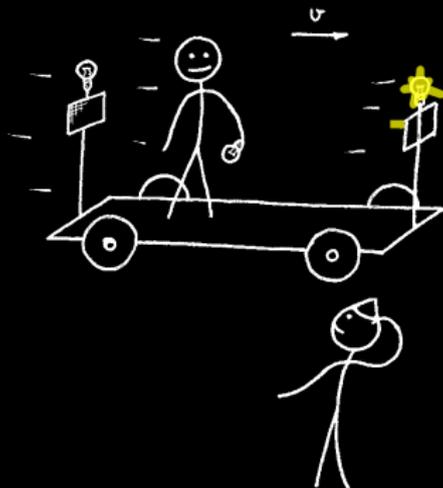
Por otra parte, para el estudiante que ve el carro moviéndose, la lámpara trasera se enciende antes que la delantera, puesto que se mueve hacia el rayo de luz.



RELATIVIDAD DE LA SIMULTANEIDAD

Imaginemos un experimento con dos observadores:

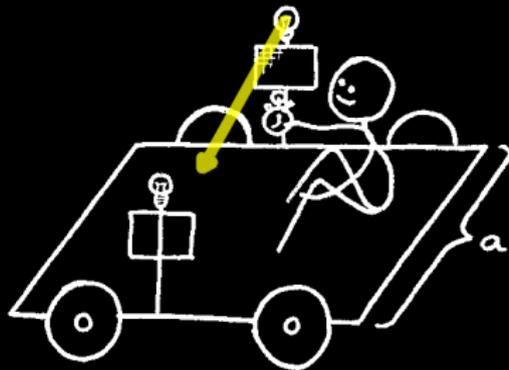
Por otra parte, para el estudiante que ve el carro moviéndose, la lámpara trasera se enciende antes que la delantera, puesto que se mueve hacia el rayo de luz.



DILATACIÓN DEL TIEMPO

El estudiante del carro ha construido un reloj con las lámparas. Para él, el tiempo que pasa entre dos fogonazos de la misma lámpara es

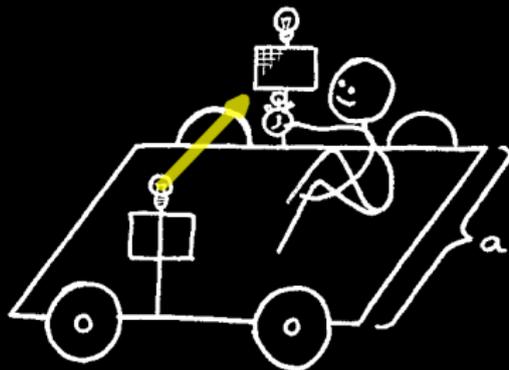
$$T = \frac{\text{distancia}}{\text{velocidad}} = \frac{2a}{c}.$$



DILATACIÓN DEL TIEMPO

El estudiante del carro ha construido un reloj con las lámparas. Para él, el tiempo que pasa entre dos fogonazos de la misma lámpara es

$$T = \frac{\text{distancia}}{\text{velocidad}} = \frac{2a}{c}.$$



DILATACIÓN DEL TIEMPO

Para su compañero, la luz tiene que recorrer una distancia mayor, pero **a la misma velocidad**.
¿Cuánto tiempo transcurre entre dos fogonazos?

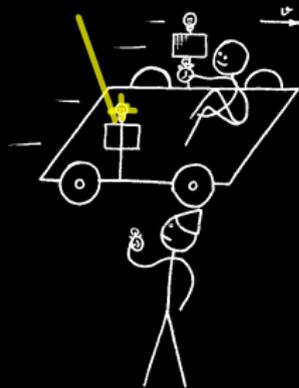
$$\hat{T}^2 = \frac{2^2(a^2 + v^2\hat{T}^2)}{c^2} \rightarrow \hat{T} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{2a}{c} = \frac{T}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > T.$$



DILATACIÓN DEL TIEMPO

Para su compañero, la luz tiene que recorrer una distancia mayor, pero **a la misma velocidad**.
¿Cuánto tiempo transcurre entre dos fogonazos?

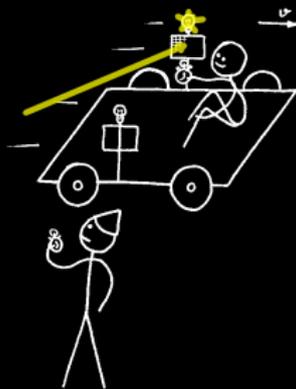
$$\hat{T}^2 = \frac{2^2(a^2 + v^2\hat{T}^2)}{c^2} \rightarrow \hat{T} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{2a}{c} = \frac{T}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > T.$$



DILATACIÓN DEL TIEMPO

Para su compañero, la luz tiene que recorrer una distancia mayor, pero **a la misma velocidad**.
¿Cuánto tiempo transcurre entre dos fogonazos?

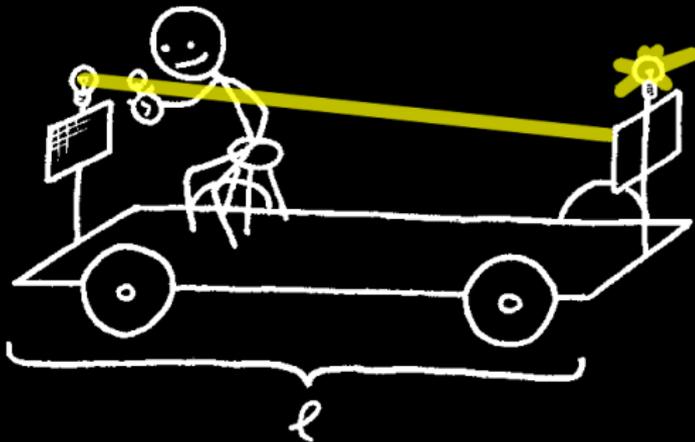
$$\hat{T}^2 = \frac{2^2(a^2 + v^2\hat{T}^2)}{c^2} \rightarrow \hat{T} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{2a}{c} = \frac{T}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > T.$$



CONTRACCIÓN DE LAS LONGITUDES

Repitamos el experimento colocando las dos lámparas en la dirección del movimiento. Para el estudiante en el carro, la lámpara trasera emite fogonazos con un periodo

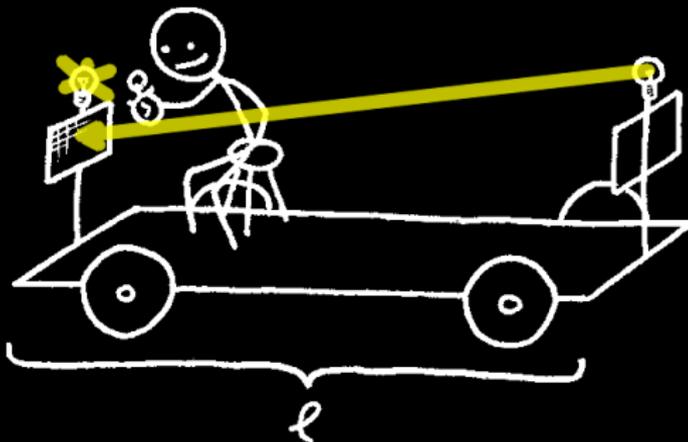
$$T = \frac{2l}{c}.$$



CONTRACCIÓN DE LAS LONGITUDES

Repitamos el experimento colocando las dos lámparas en la dirección del movimiento. Para el estudiante en el carro, la lámpara trasera emite fogonazos con un periodo

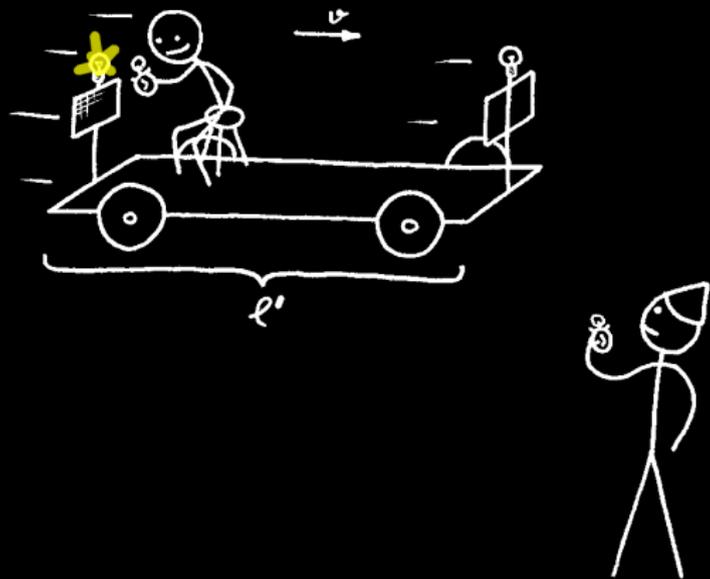
$$T = \frac{2l}{c}.$$



CONTRACCIÓN DE LAS LONGITUDES

El estudiante en tierra, en cambio, mide un periodo

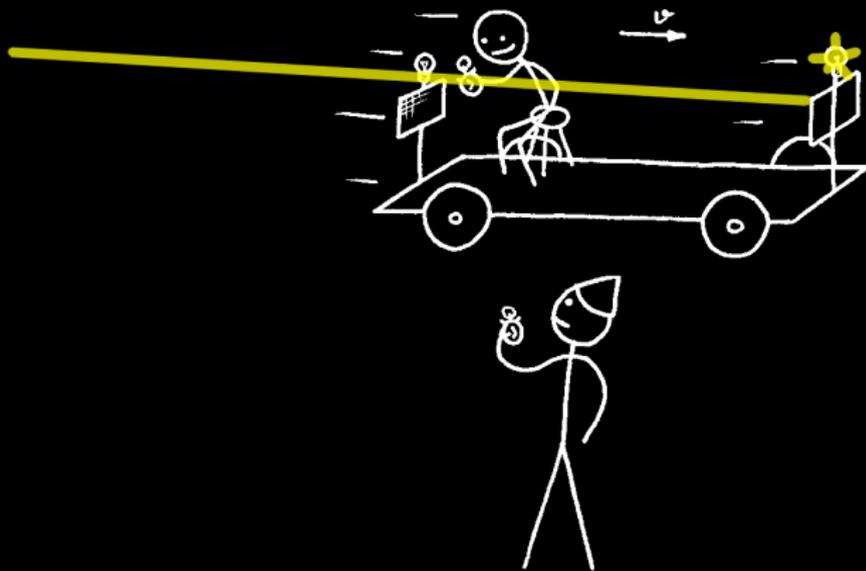
$$\hat{T} = \frac{\hat{l}}{c-v} + \frac{\hat{l}}{c+v} = \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} \frac{2\hat{l}}{c}.$$



CONTRACCIÓN DE LAS LONGITUDES

El estudiante en tierra, en cambio, mide un periodo

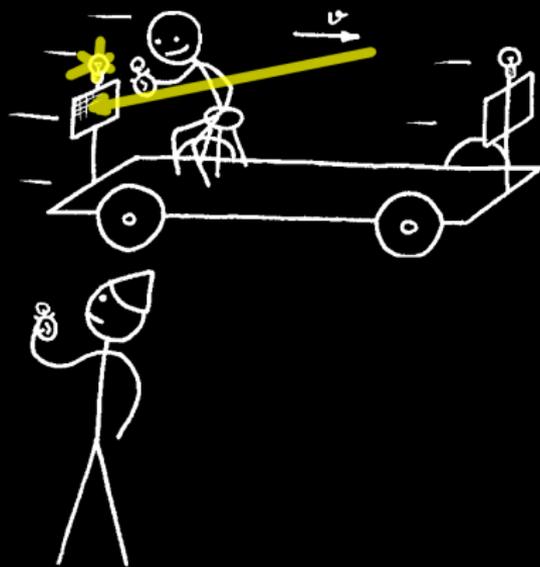
$$\hat{T} = \frac{\hat{l}}{c-v} + \frac{\hat{l}}{c+v} = \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} \frac{2\hat{l}}{c}.$$



CONTRACCIÓN DE LAS LONGITUDES

El estudiante en tierra, en cambio, mide un periodo

$$\hat{T} = \frac{\hat{l}}{c-v} + \frac{\hat{l}}{c+v} = \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} \frac{2\hat{l}}{c}.$$



CONTRACCIÓN DE LAS LONGITUDES

El estudiante en tierra, en cambio, mide un periodo

$$\hat{T} = \frac{\hat{l}}{c-v} + \frac{\hat{l}}{c+v} = \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} \frac{2\hat{l}}{c}.$$

Utilicemos la relación entre T y \hat{T} que acabamos de deducir:

$$\hat{T} = \frac{T}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

CONTRACCIÓN DE LAS LONGITUDES

El estudiante en tierra, en cambio, mide un periodo

$$\hat{T} = \frac{\hat{l}}{c-v} + \frac{\hat{l}}{c+v} = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \frac{2\hat{l}}{c}.$$

Utilicemos la relación entre T y \hat{T} que acabamos de deducir:

$$\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \frac{2\hat{l}}{c} = \hat{T} = \frac{T}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{2l}{c}.$$

Por tanto,

$$\hat{l} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} l < l$$

ESPACIO-TIEMPO

¿Qué nos enseñan todos estos efectos inesperados?

En el marco galileano, el tiempo es absoluto, aunque no el espacio. Pero entonces, la velocidad de la luz tiene que ser relativa, ¡y eso es incompatible con las leyes del electromagnetismo!

Ahora **tampoco el tiempo es absoluto**: depende del observador. Tiempo y espacio están en pie de igualdad, y se entremezclan dando lugar al...

...espacio-tiempo.

Veamos el espacio-tiempo en movimiento \leadsto [Video](#)

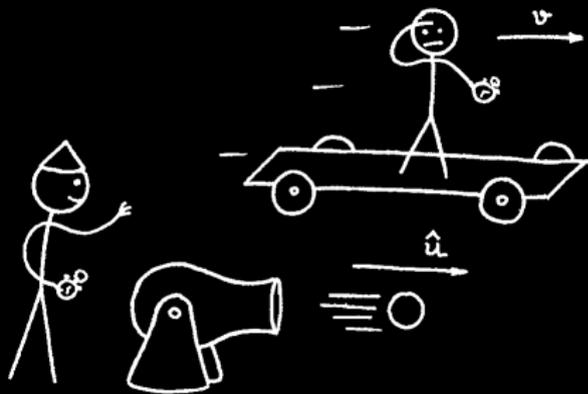
REGLA DE ADICIÓN DE VELOCIDADES

Nueva regla de adición
de velocidades:

$$\hat{u} = \frac{u + v}{1 + \frac{u \cdot v}{c^2}}$$

Para un rayo de luz, $u = c$,
luego

$$\hat{c} = \frac{c + v}{1 + \frac{c \cdot v}{c^2}}$$



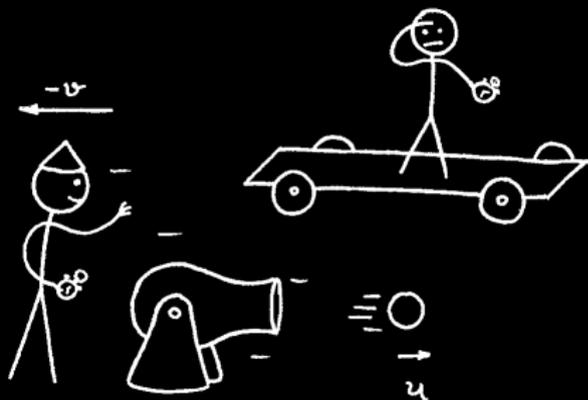
REGLA DE ADICIÓN DE VELOCIDADES

Nueva regla de adición
de velocidades:

$$\hat{u} = \frac{u + v}{1 + \frac{u \cdot v}{c^2}}$$

Para un rayo de luz, $u = c$,
luego

$$\hat{c} = \frac{c + v}{1 + \frac{c \cdot v}{c^2}}$$



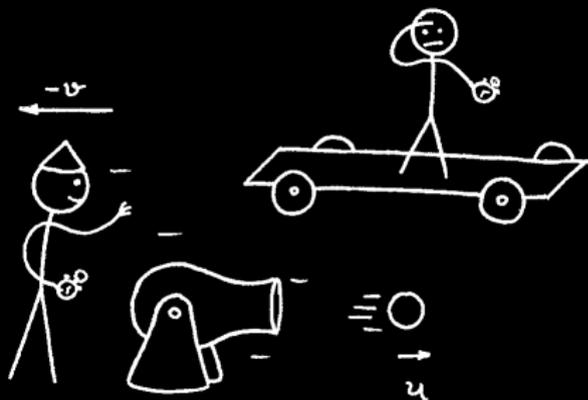
REGLA DE ADICIÓN DE VELOCIDADES

Nueva regla de adición
de velocidades:

$$\hat{u} = \frac{u + v}{1 + \frac{u \cdot v}{c^2}}$$

Para un rayo de luz, $u = c$,
luego

$$\hat{c} = \frac{c + v}{1 + \frac{c \cdot v}{c^2}} = c. \quad \checkmark$$



¡Todo encaja!

REGLA DE ADICIÓN DE VELOCIDADES

Nueva regla de adición
de velocidades:

$$\hat{u} = \frac{u + v}{1 + \frac{u \cdot v}{c^2}}$$

Para un rayo de luz, $u = c$,
luego

$$\hat{c} = \frac{c + v}{1 + \frac{c \cdot v}{c^2}} = c. \quad \checkmark$$

¡Todo encaja!



No se puede transmitir
información a velocidad
superior a la de la luz.

Relatividad General

Porque nos gustan las curvas

PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA DE EINSTEIN

Recordemos:

- La aceleración que experimenta una partícula en un campo gravitatorio es independiente de su masa.
- Para un observador acelerado, una partícula libre parece sufrir una aceleración independiente de su masa.

PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA DE EINSTEIN

Recordemos:

- La aceleración que experimenta una partícula en un campo gravitatorio es independiente de su masa.
- Para un observador acelerado, una partícula libre parece sufrir una aceleración independiente de su masa.

¿No será que las dos situaciones son equivalentes?

PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA DE EINSTEIN

Recordemos:

- La aceleración que experimenta una partícula en un campo gravitatorio es independiente de su masa.
- Para un observador acelerado, una partícula libre parece sufrir una aceleración independiente de su masa.

¿No será que las dos situaciones son equivalentes?

Un campo gravitatorio equivale a un sistema de referencia acelerado.

Entonces... ¡dejarse caer equivale a estar en un sistema de referencia inercial!

DILATACIÓN DEL TIEMPO

Exploremos el alcance del PEE con otro experimento imaginario:

En una nave que acelera a $1g$, una lámpara en el techo emite un fotonazo **cada segundo**.

Como la velocidad de la nave es cada vez mayor, los fotonazos tardan cada vez menos tiempo en llegar al suelo.

El estudiante en el suelo ve los fotonazos espaciados **menos de un segundo**.



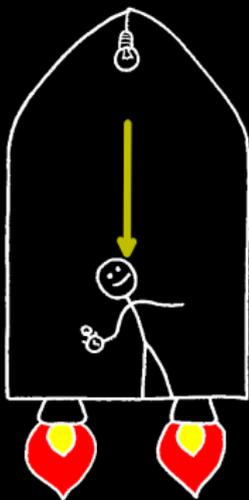
DILATACIÓN DEL TIEMPO

Exploremos el alcance del PEE con otro experimento imaginario:

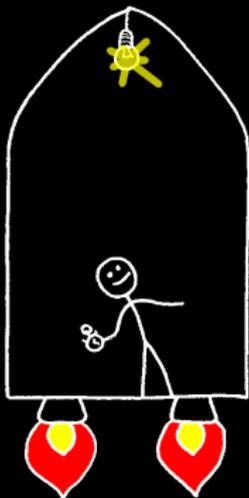
En una nave que acelera a $1g$, una lámpara en el techo emite un fogonazo **cada segundo**.

Como la velocidad de la nave es cada vez mayor, los fogonazos tardan cada vez menos tiempo en llegar al suelo.

El estudiante en el suelo ve los fogonazos espaciados **menos de un segundo**.



DILATACIÓN DEL TIEMPO



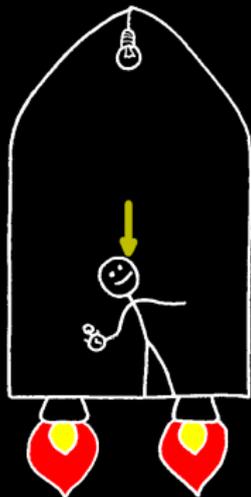
Exploremos el alcance del PEE con otro experimento imaginario:

En una nave que acelera a $1g$, una lámpara en el techo emite un fogonazo **cada segundo**.

Como la velocidad de la nave es cada vez mayor, los fogonazos tardan cada vez menos tiempo en llegar al suelo.

El estudiante en el suelo ve los fogonazos espaciados **menos de un segundo**.

DILATACIÓN DEL TIEMPO



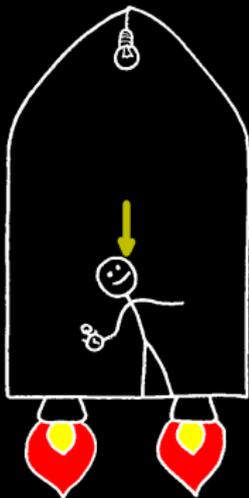
Exploremos el alcance del PEE con otro experimento imaginario:

En una nave que acelera a $1g$, una lámpara en el techo emite un fogonazo **cada segundo**.

Como la velocidad de la nave es cada vez mayor, los fogonazos tardan cada vez menos tiempo en llegar al suelo.

El estudiante en el suelo ve los fogonazos espaciados **menos de un segundo**.

DILATACIÓN DEL TIEMPO



Exploremos el alcance del PEE con otro experimento imaginario:

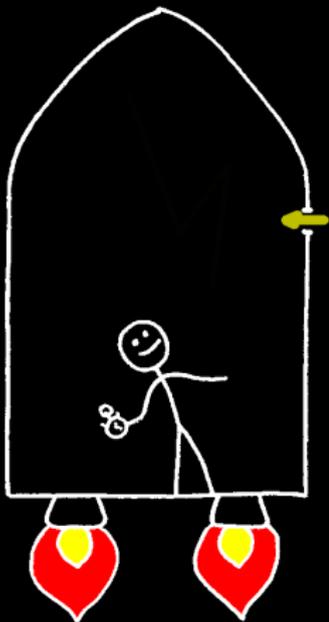
En una nave que acelera a $1g$, una lámpara en el techo emite un fogonazo cada segundo.

Como la velocidad de la nave es cada vez mayor, los fogonazos tardan cada vez menos tiempo en llegar al suelo.

El estudiante en el suelo ve los fogonazos espaciados menos de un segundo.

Según el PEE, **si la nave estuviera en reposo en la superficie de la Tierra, se produciría el mismo efecto.**

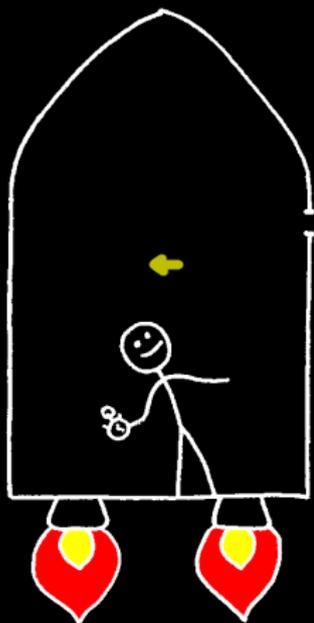
DESVIACIÓN DE LOS RAYOS DE LUZ



Imaginemos ahora que un rayo de luz se cuela por un ojo de buey de la nave.

Debido a la aceleración, el estudiante en la nave observará cómo **el rayo se curva**.

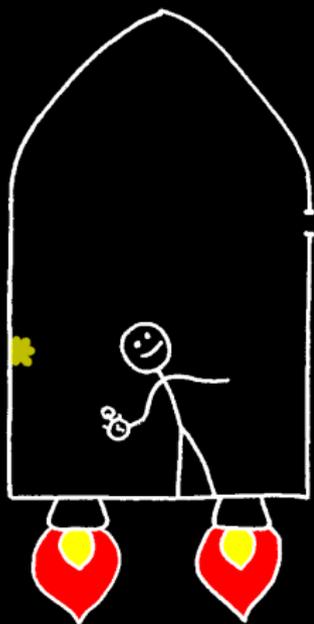
DESVIACIÓN DE LOS RAYOS DE LUZ



Imaginemos ahora que un rayo de luz se cuela por un ojo de buey de la nave.

Debido a la aceleración, el estudiante en la nave observará cómo **el rayo se curva**.

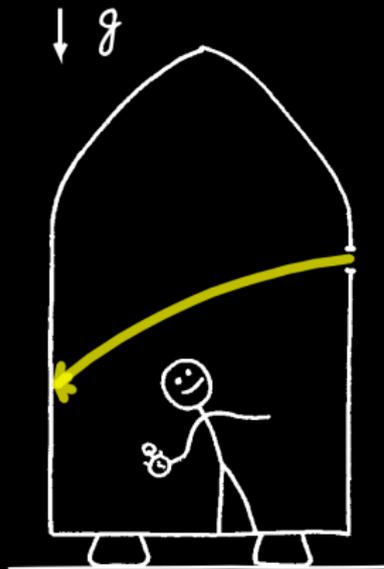
DESVIACIÓN DE LOS RAYOS DE LUZ



Imaginemos ahora que un rayo de luz se cuela por un ojo de buey de la nave.

Debido a la aceleración, el estudiante en la nave observará cómo **el rayo se curva**.

DESVIACIÓN DE LOS RAYOS DE LUZ



Imaginemos ahora que un rayo de luz se cuela por un ojo de buey de la nave.

Debido a la aceleración, el estudiante en la nave observará cómo **el rayo se curva**.

Lo mismo ocurriría si la nave estuviera aparcada en la superficie de la Tierra.

¡La luz «pesa»!

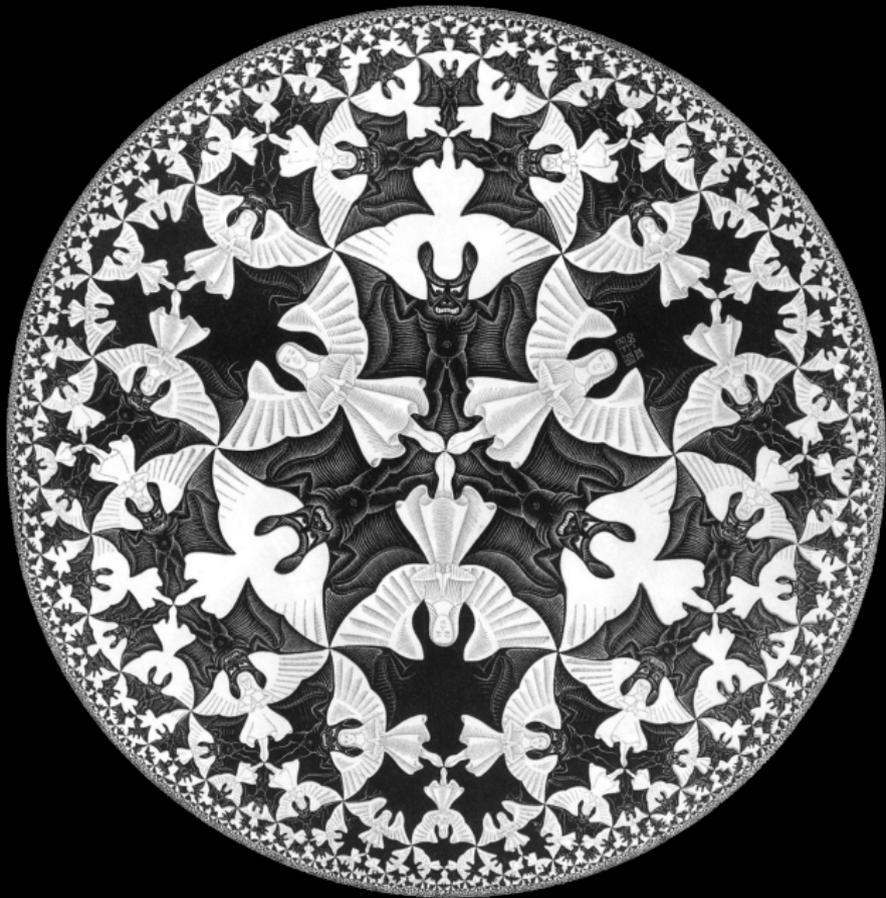
LA GRAVEDAD ES GEOMETRÍA

En un campo gravitatorio uniforme (aproximadamente), como el de los ejemplos, podemos eliminar todos los efectos gravitatorios dejándonos caer. Al hacerlo, veremos que los rayos de luz son rectos.

¿Y si el campo gravitatorio no es uniforme?

Entonces, al caer, seguiremos viendo curvos los rayos de luz, aunque, en nuestras proximidades, parecerán enderezarse.

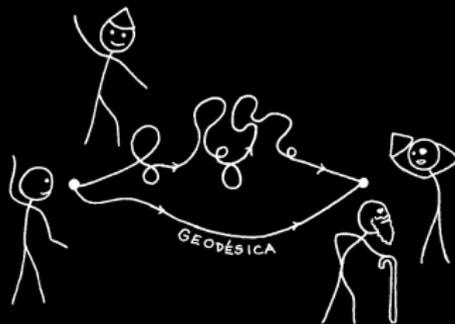
Lo que aprendemos de esto es que **el campo gravitatorio curva la geometría del espacio-tiempo.**



GEODÉSICAS

En el espacio tiempo, las partículas libres y los rayos de luz se mueven siguiendo geodésicas.
Las partículas con masa, geodésicas temporales.
La luz, geodésicas nulas.

Las geodésicas temporales son las curvas que hacen máximo el tiempo propio.



Así, en palabras de Wheeler,

El espacio le dice a la materia cómo moverse.

ECUACIONES DE EINSTEIN

Sólo nos falta un ingrediente de la Relatividad General:
las ecuaciones de Einstein.

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Geometría

Materia

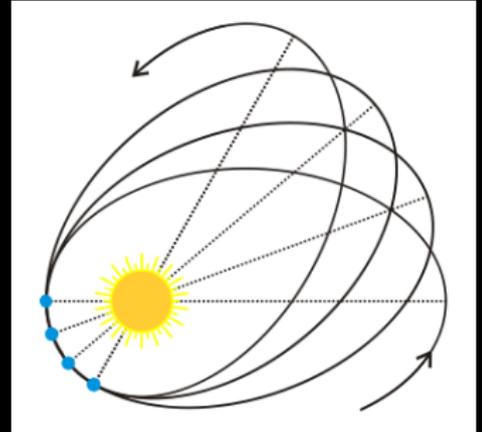
Estas ecuaciones nos dicen cómo el espacio se curva debido a su contenido.

Completando la famosa cita de Wheeler,

*La materia le dice al espacio cómo curvarse,
el espacio le dice a la materia cómo moverse.*

EVIDENCIAS EXPERIMENTALES

1915 **Einstein**: Precesión
del perihelio de Mercurio.



EVIDENCIAS EXPERIMENTALES

1915 **Einstein**: Precesión
del perihelio de Mercurio.

1919 **Eddington**: Desviación
de los rayos de luz.



EVIDENCIAS EXPERIMENTALES

- 1915 **Einstein**: Precesión del perihelio de Mercurio.
- 1919 **Eddington**: Desviación de los rayos de luz.
- 1959 **Pound y Rebka**: Corrimiento al rojo gravitatorio.

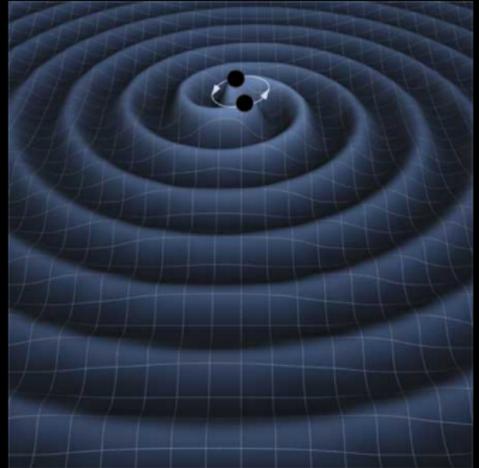


(...)



EVIDENCIAS EXPERIMENTALES

- 1915 **Einstein**: Precesión del perihelio de Mercurio.
- 1919 **Eddington**: Desviación de los rayos de luz.
- 1959 **Pound y Rebka**: Corrimiento al rojo gravitatorio.
- 1974 **Hulse y Taylor**: Decaimiento orbital de un púlsar binario (**ondas gravitatorias**).



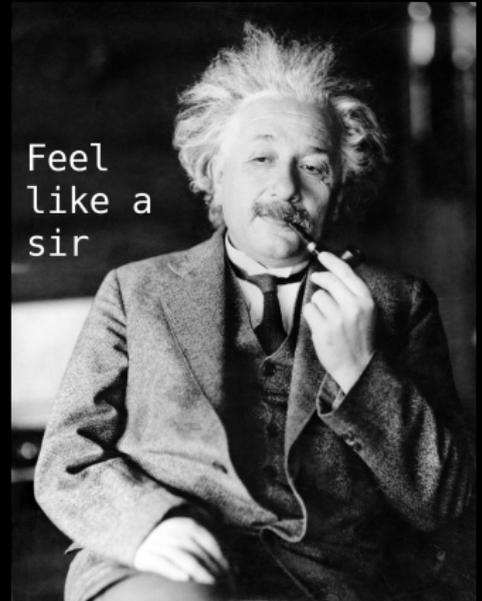
EVIDENCIAS EXPERIMENTALES

- 1915 **Einstein**: Precesión del perihelio de Mercurio.
- 1919 **Eddington**: Desviación de los rayos de luz.
- 1959 **Pound y Rebka**: Corrimiento al rojo gravitatorio.
- 1974 **Hulse y Taylor**: Decaimiento orbital de un púlsar binario (**ondas gravitatorias**).
- 2011 **Gravity Probe B**: Precesión Geodésica.

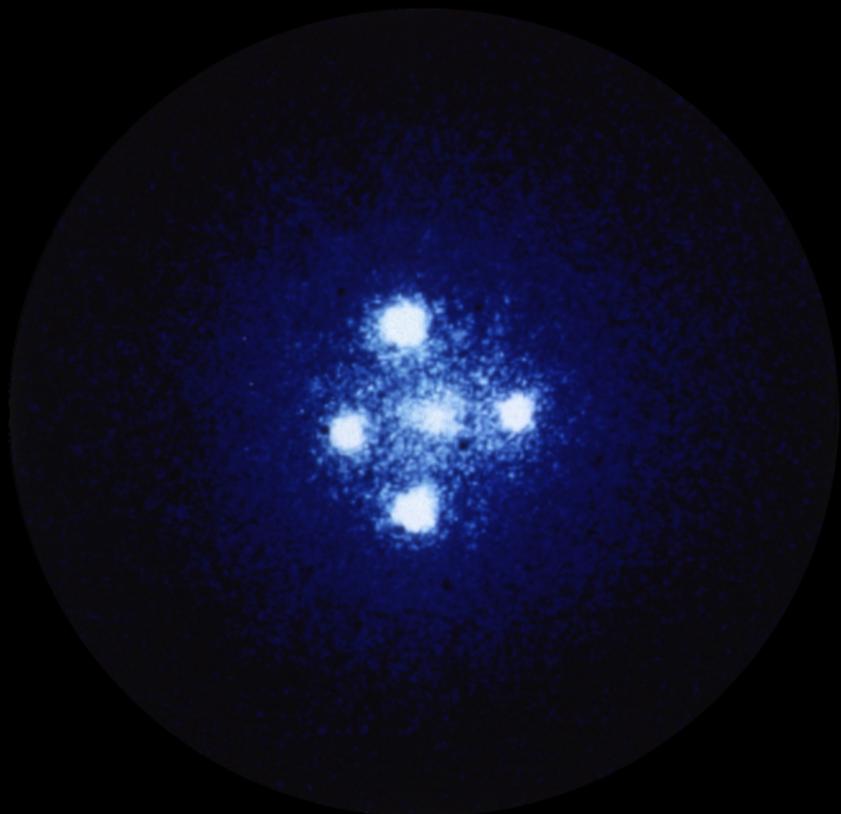


EVIDENCIAS EXPERIMENTALES

- 1915 **Einstein**: Precesión del perihelio de Mercurio.
- 1919 **Eddington**: Desviación de los rayos de luz.
- 1959 **Pound y Rebka**: Corrimiento al rojo gravitatorio.
- 1974 **Hulse y Taylor**: Decaimiento orbital de un púlsar binario (**ondas gravitatorias**).
- 2011 **Gravity Probe B**: Precesión Geodésica.



De hecho, cada vez que usamos un GPS, ¡estamos comprobando la Relatividad General!



Cruz de Einstein

Física Cuántica

Cuando todo es ya endiabladamente raro

ANTES DE NADA...

Nadie entiende la Mecánica Cuántica.

Richard Feynman



EXPERIMENTO DE YOUNG



Thomas Young (1773–1829)

Durante los siglos XVII y XVIII, la naturaleza de la luz fue objeto de acaloradas discusiones. Unos defendían que estaba compuesta por diminutas **partículas**, mientras que otros pensaban que era una **onda**.

Young resolvió el problema comprobando que al realizar el **experimento de la doble rendija** con luz se obtenía un **patrón de interferencia**.

[Vídeo](#)

Quedó claro entonces que **la luz es una onda**.

EXPERIMENTO DE YOUNG



Thomas Young (1773–1829)

Durante los siglos XVII y XVIII, la naturaleza de la luz fue objeto de acaloradas discusiones. Unos defendían que estaba compuesta por diminutas partículas, mientras que otros pensaban que era una onda.

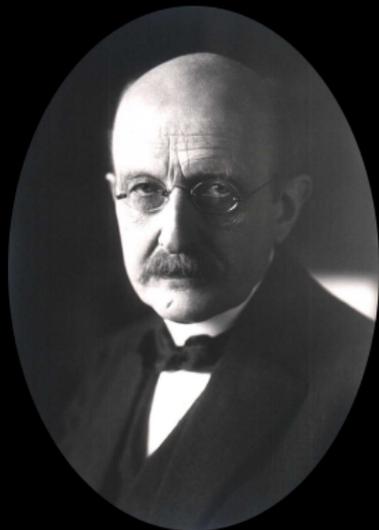
Young resolvió el problema comprobando que al realizar el **experimento de la doble rendija** con luz se obtenía un **patrón de interferencia**.

[Vídeo](#)

Quedó claro entonces que **la luz es una onda...**
o, al menos, quedó claro del **hasta un siglo después...**

AVANZANDO EN LAS TINIEBLAS

1900 **Planck** explica el espectro de cuerpo negro asumiendo que la radiación se emite en forma de **cuantos**.



Max Planck (1858–1947)

AVANZANDO EN LAS TINIEBLAS

1900 **Planck** explica el espectro de cuerpo negro asumiendo que la radiación se emite en forma de cuantos.

1905 **Einstein** publica su explicación para el efecto fotoeléctrico a partir de **fotones**.



Albert Einstein (1879–1955)
y Niels Bohr (1885–1962)

AVANZANDO EN LAS TINIEBLAS

- 1900 **Planck** explica el espectro de cuerpo negro asumiendo que la radiación se emite en forma de cuantos.
- 1905 **Einstein** publica su explicación para el efecto fotoeléctrico a partir de fotones.
- 1913 **Bohr** postula un modelo atómico en el que la energía de las órbitas está **cuantizada**.



Albert Einstein (1879–1955)
y Niels Bohr (1885–1962)

AVANZANDO EN LAS TINIEBLAS

- 1900 **Planck** explica el espectro de cuerpo negro asumiendo que la radiación se emite en forma de cuantos.
- 1905 **Einstein** publica su explicación para el efecto fotoeléctrico a partir de fotones.
- 1913 **Bohr** postula un modelo atómico en el que la energía de las órbitas está cuantizada.
- 1924 **De Broglie** propone que **todas las partículas tienen una onda asociada**, con $\lambda = h/p$.



Louis De Broglie (1892–1987)

AVANZANDO EN LAS TINIEBLAS

- 1900 **Planck** explica el espectro de cuerpo negro asumiendo que la radiación se emite en forma de cuantos.
- 1905 **Einstein** publica su explicación para el efecto fotoeléctrico a partir de fotones.
- 1913 **Bohr** postula un modelo atómico en el que la energía de las órbitas está cuantizada.
- 1924 **De Broglie** propone que todas las partículas tienen una onda asociada, con $\lambda = h/p$.

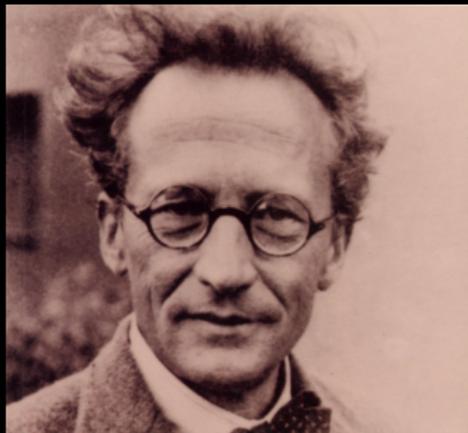


Louis De Broglie (1892–1987)

Pero... ¿puede ser esto cierto? ~ [Video](#)

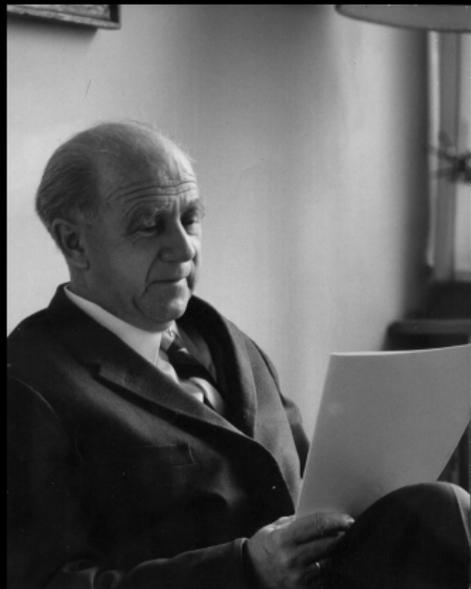
LOS PADRES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

1926 Schrödinger propone una **ecuación de onda** para el electrón, que servirá de base para su mecánica cuántica ondulatoria.



Erwin Schrödinger
(1887–1961)

LOS PADRES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA



Werner Heisenberg
(1901–1976)

1926 Schrödinger propone una **ecuación de onda** para el electrón, que servirá de base para su mecánica cuántica ondulatoria.

1927 Heisenberg deduce el **principio de Indeterminación** de su mecánica cuántica matricial.

LOS PADRES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA



Paul Dirac (1902–1984)

- 1926 Schrödinger propone una **ecuación de onda** para el electrón, que servirá de base para su mecánica cuántica ondulatoria.
- 1927 Heisenberg deduce el **principio de Indeterminación** de su mecánica cuántica matricial.
- 1928 Dirac obtiene una **ecuación de onda relativista** para el electrón.

LOS PADRES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

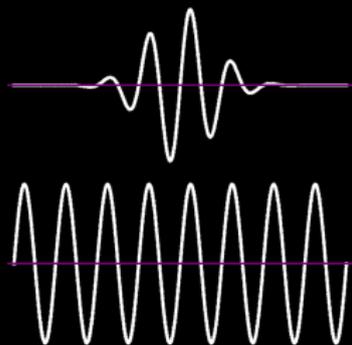


Paul Dirac (1902–1984)

- 1926 Schrödinger propone una **ecuación de onda** para el electrón, que servirá de base para su mecánica cuántica ondulatoria.
- 1927 Heisenberg deduce el **principio de Indeterminación** de su mecánica cuántica matricial.
- 1928 Dirac obtiene una **ecuación de onda relativista** para el electrón.
- 1930 Dirac demuestra que las formulaciones de Heisenberg y Schrödinger son equivalentes.

PRINCIPIO DE INDETERMINACIÓN

Es imposible determinar al mismo tiempo la posición y el momento de una partícula con absoluta precisión (no importa lo precisos que sean nuestros instrumentos).



Podemos entender esto heurísticamente pensando en «paquetes de onda»:

- Un paquete muy concentrado en el espacio tendrá una longitud de onda (momento) mal definida.
- En cambio, si la longitud de onda está muy bien definida, la posición no lo estará.

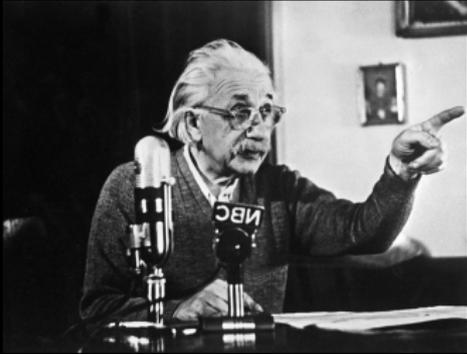
INTERPRETACIÓN DE COPENHAGUE

Según la interpretación de Copenhague, no tiene sentido preguntarse por qué rendija ha pasado el electrón... a menos que se conozca la respuesta.

En un sistema cuántico, el valor de una magnitud **no está definido necesariamente** antes de medirla. Un estado cuántico general puede expresarse como una **superposición** de estados asociados a los posibles resultados de la medida.

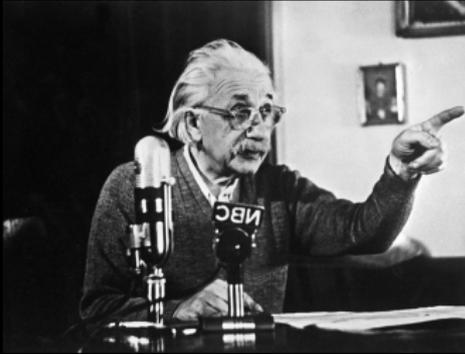
El resultado de una medición es fruto del **azar**, aunque, si conocemos el estado previo, podemos determinar las **probabilidades** de obtener cada resultado posible.

Mientras no sea perturbado desde el exterior, **la evolución del sistema es totalmente determinista.**



Dios no juega a los dados.

Albert Einstein

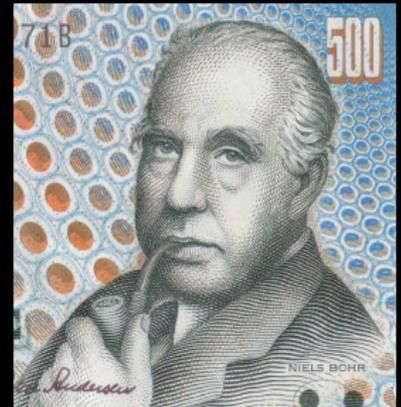


Dios no juega a los dados.

Albert Einstein

*Einstein, deja de decirle a Dios
cómo hacer las cosas.*

Niels Bohr



EL GATO DE SCHRÖDINGER

Metamos a un gato en una caja, junto a una ampolla de un gas tóxico que se liberará si un átomo radiactivo se desintegra. La probabilidad de que el átomo se desintegre en un minuto es del 50%. Tras un minuto, nos disponemos a comprobar la suerte del gato.

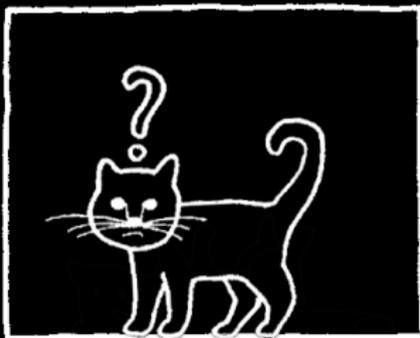
Antes de abrir la caja, el gato está...

EL GATO DE SCHRÖDINGER

Metamos a un gato en una caja, junto a una ampolla de un gas tóxico que se liberará si un átomo radiactivo se desintegra. La probabilidad de que el átomo se desintegre en un minuto es del 50%. Tras un minuto, nos disponemos a comprobar la suerte del gato.

Antes de abrir la caja, el gato está...

¿vivo?

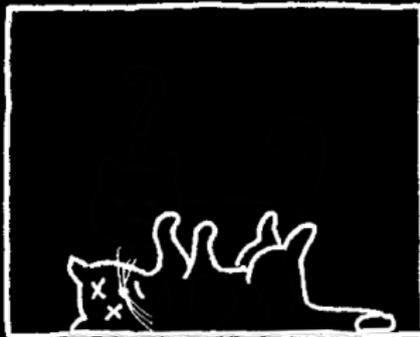


EL GATO DE SCHRÖDINGER

Metamos a un gato en una caja, junto a una ampolla de un gas tóxico que se liberará si un átomo radiactivo se desintegra. La probabilidad de que el átomo se desintegre en un minuto es del 50%. Tras un minuto, nos disponemos a comprobar la suerte del gato.

Antes de abrir la caja, el gato está...

¿muerto?



EL GATO DE SCHRÖDINGER

Metamos a un gato en una caja, junto a una ampolla de un gas tóxico que se liberará si un átomo radiactivo se desintegra. La probabilidad de que el átomo se desintegre en un minuto es del 50%. Tras un minuto, nos disponemos a comprobar la suerte del gato.

Antes de abrir la caja, el gato está...

¿¿las dos cosas a la vez??



Llegados a este punto, ¡ya deberíamos poder entender algunos chistes frikis sobre Relatividad y Física Cuántica! Como por ejemplo, estos de **Futurama**:

[Vídeo](#)

The background features several glowing green particle tracks or paths against a black background. These tracks are composed of numerous small, bright green dots connected by thin, faint lines, suggesting a complex, interconnected network or a series of discrete events. The tracks are most prominent in the upper right and lower left quadrants, with some tracks appearing to curve or loop. The overall effect is reminiscent of a particle detector or a visualization of quantum phenomena.

¿Gravedad Cuántica?

...y más allá

ESTADO ACTUAL

Por extraña que pueda parecer, la Relatividad es una teoría clásica: no es tan rara como la Física Cuántica. Es determinista, no tiene ningún límite teórico sobre la precisión con que puede conocerse una magnitud...

Sin embargo, la Relatividad Especial y la Mecánica Cuántica han podido armonizarse, dando lugar a la **Teoría Cuántica de Campos**. Dos ejemplos: la **Electrodinámica Cuántica** y el **Modelo Estándar**.

También se han hecho progresos a la hora de tratar **teorías cuánticas de campos en espacios curvos** que obedecen la Relatividad General.

...Pero todavía no tenemos una teoría cuántica de la gravedad.

CANDIDATOS

Existen varios candidatos a teoría cuántica de la gravedad:

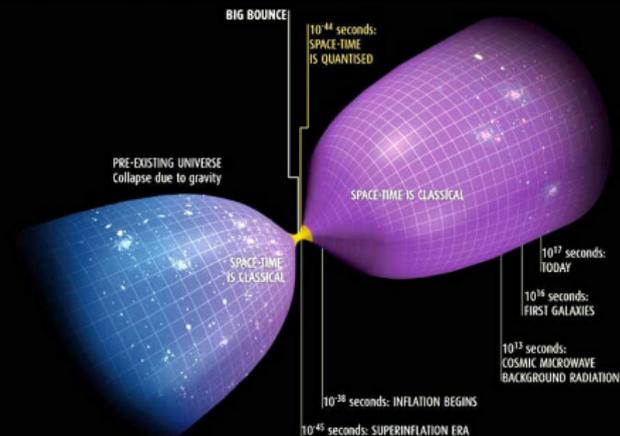
- La más famosa es la **teoría de Cuerdas** intenta unificar todas las interacciones de la naturaleza, y, de paso, explicar la gravedad.
- Su principal rival es la **Gravedad Cuántica de Lazos** (GCL), que «simplemente» intenta cuantizar la Relatividad General. Trata con una geometría cuántica, en la que las áreas están cuantizadas.
- ¡Pero no son las únicas!

¿Por qué es tan difícil contrastar experimentalmente estas teorías? Porque sus efectos sólo serían importantes en situaciones límite, donde la Relatividad General fracasa: en la **Gran Explosión** y en los **agujeros negros**.

COSMOLOGÍA CUÁNTICA DE LAZOS

La Cosmología Cuántica de Lazos (CCL) es una versión simplificada de la Gravedad Cuántica de Lazos que intenta poner a prueba su validez.

En diversos escenarios cosmológicos, la CCL permite evitar la singularidad inicial de la Gran Explosión, sustituyéndola por un *Big Bounce* (Gran Rebote).



*Si pudiéramos comprender una sola flor
sabríamos quiénes somos y qué es el mundo.*

Jorge Luis Borges

