



Introducción a la Relatividad Especial



Bert Janssen

Dpto. de Física Teórica y del Cosmos

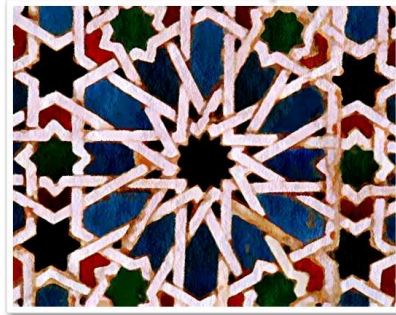
Interrumpidme cuando queráis

Las preguntas tontas no existen.
Sólo existen las respuestas tontas.



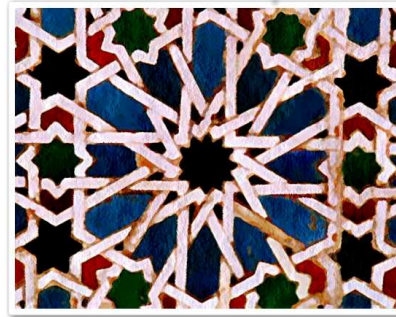
Índice

1. Simetrías:



Índice

1. Simetrías:

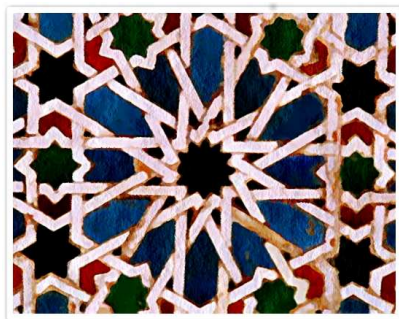


2. Principio de Relatividad:



Índice

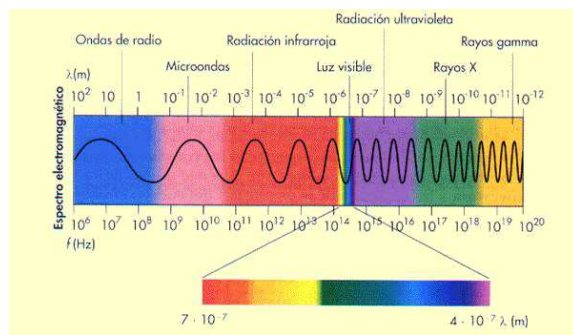
1. Simetrías:



2. Principio de Relatividad:



3. Maxwell y la velocidad de la luz



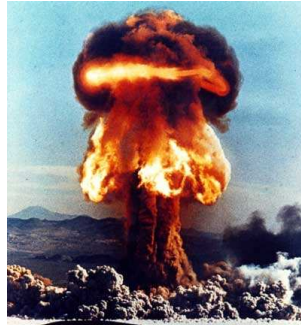
4. Teoría de la Relatividad Especial



4. Teoría de la Relatividad Especial



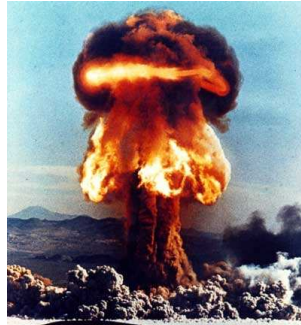
5. Consecuencias



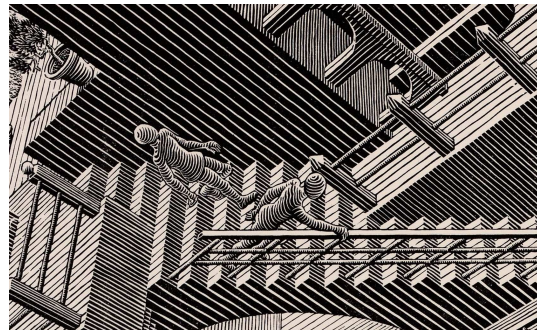
4. Teoría de la Relatividad Especial



5. Consecuencias



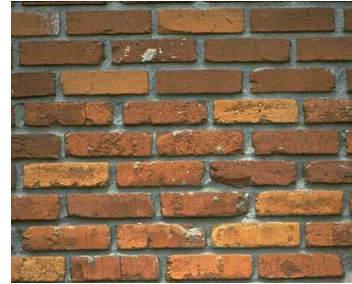
6. Resumen



1. Simetrías

Simetría = cambio, operación que deja sistema invariante

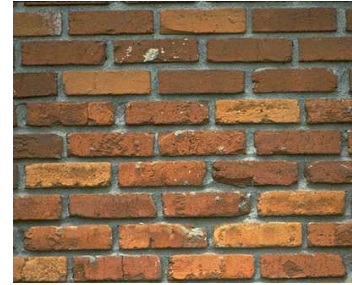
- traslaciones:



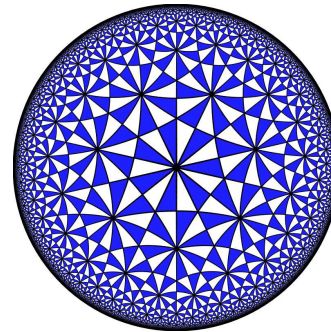
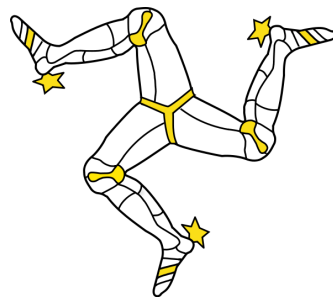
1. Simetrías

Simetría = cambio, operación que deja sistema invariante

- traslaciones:



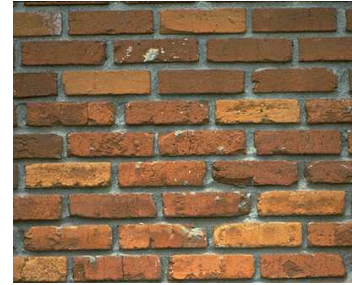
- rotaciones:



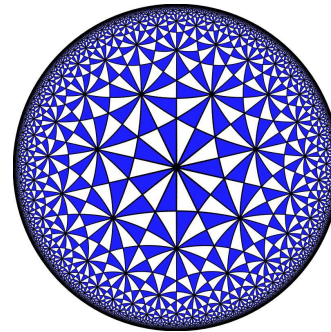
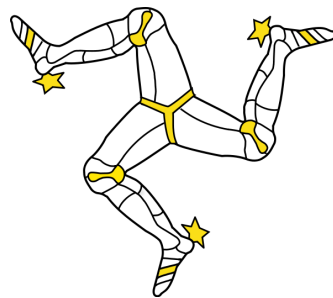
1. Simetrías

Simetría = cambio, operación que deja sistema invariante

- traslaciones:



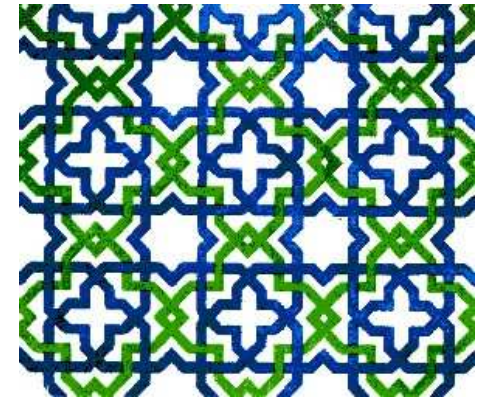
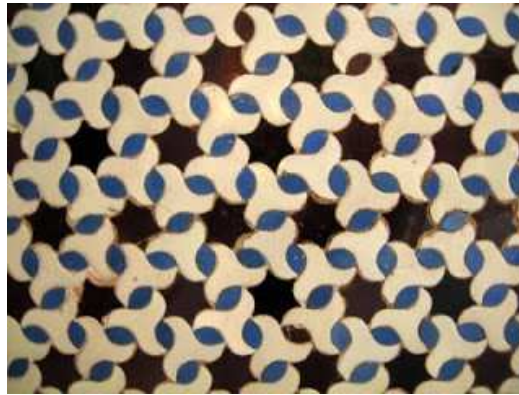
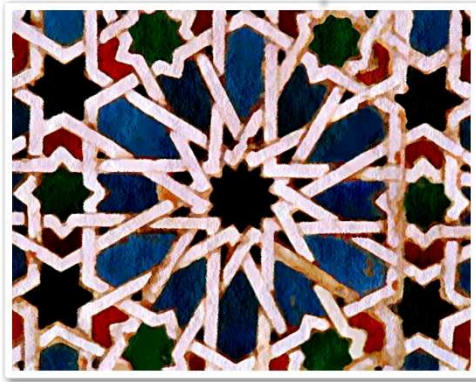
- rotaciones:



- reflexiones:

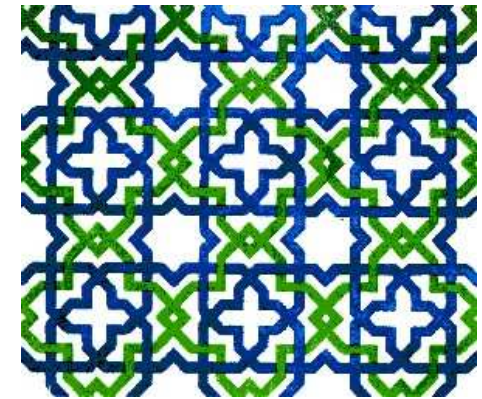
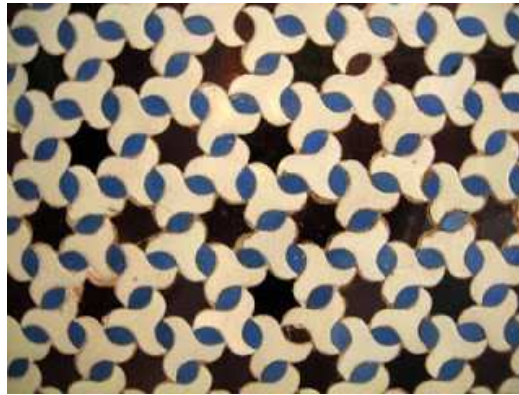
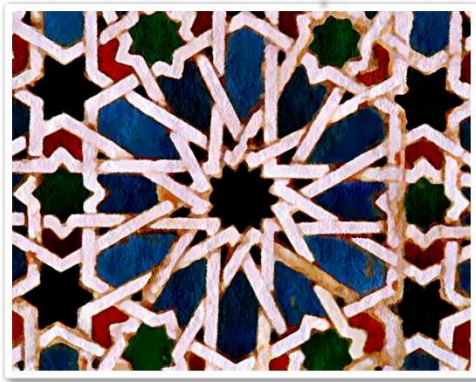


- Combinaciones:



NB: La alhambra es conocida por sus decoraciones simétricas!

- Combinaciones:



NB: La alhambra es conocida por sus decoraciones simétricas!

- Simetrías abstractas:

$$\mathcal{L} = i\hbar \bar{\psi}^A \gamma^\mu \left(\delta^A_B \partial_\mu - ig A_\mu^a (J_a)^A_B \right) \psi^B - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{\mu\nu a}$$

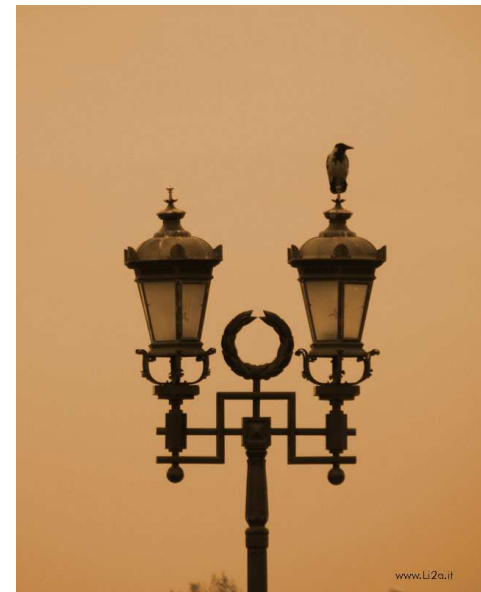
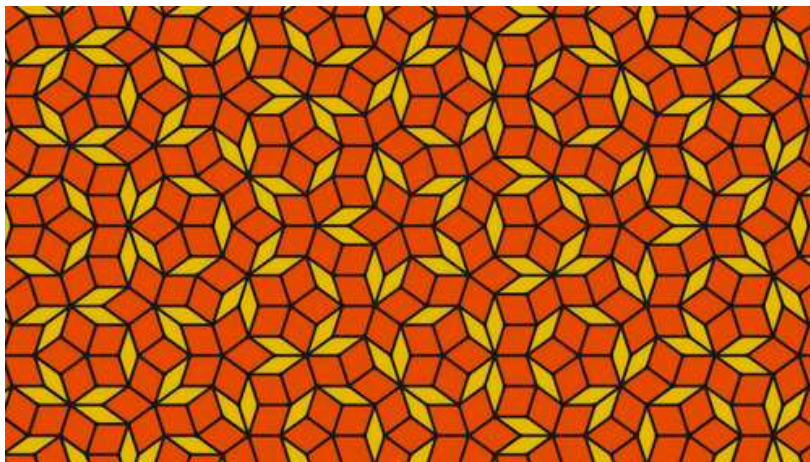
La simetría nos resulta estética y placentera...



La simetría nos resulta estética y placentera...



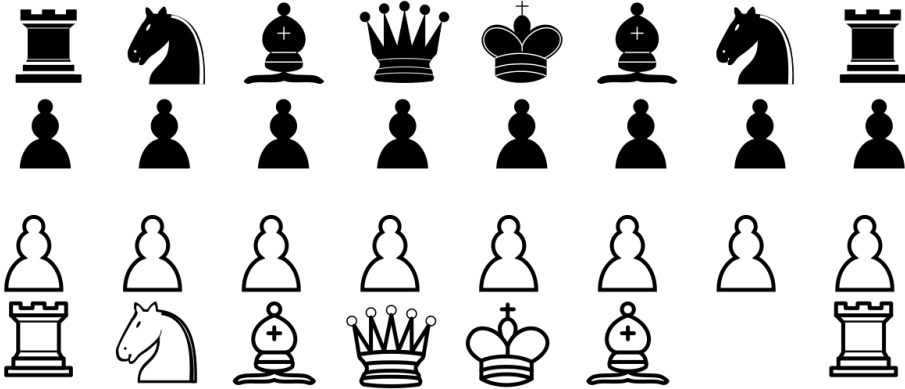
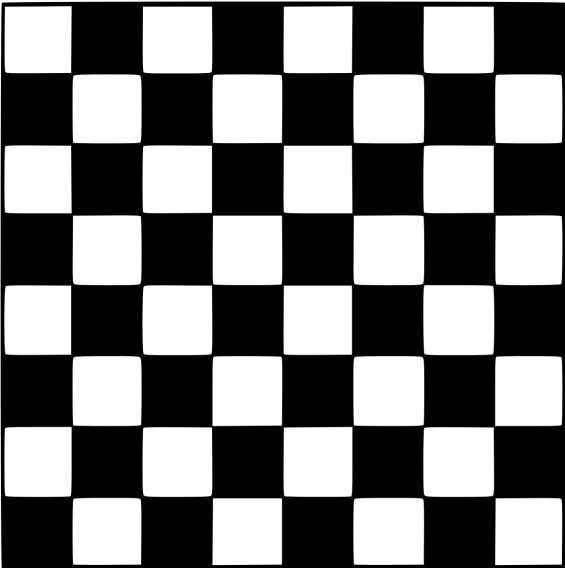
... en contraste con:



La simetría nos ayuda a completar la imagen...



La simetría nos ayuda a completar la imagen...



Ejemplo histórico: propiedades de elementos desconocidos

Tabla Periódica de los Elementos

<http://chemistry.about.com>
© 2012 Todd Helmenstine
About Chemistry

1A												8A					
1 H 1.00794 Hidrógeno											2 He 4.002602 Helio						
3 Li 6.941 Litio	4 Be 9.012182 Berilio											5 B 10.811 Boro	6 C 12.0107 Carbono	7 N 14.0067 Nitrogeno	8 O 15.9994 Oxígeno	9 F 18.9984032 Fluor	10 Ne 20.1797 Neón
11 Na 22.989769 Sodio	12 Mg 24.3050 Magnesio											13 Al 26.9815386 Aluminio	14 Si 28.0855 Silicio	15 P 30.973762 Fósforo	16 S 32.065 Azufre	17 Cl 35.453 Cloro	18 Ar 39.948 Argón
19 K 39.0983 Potasio	20 Ca 40.078 Calcio	21 Sc 44.955912 Escandio	22 Ti 47.867 Titanio	23 V 50.9415 Vanadio	24 Cr 51.9961 Cromo	25 Mn 54.938045 Manganeso	26 Fe 55.845 Hierro	27 Co 58.933195 Cobalto	28 Ni 58.6934 Níquel	29 Cu 63.546 Cobre	30 Zn 65.38 Zinc	31 Ga 69.723 Galio	32 Ge 72.64 Germanio	33 As 74.92160 Arsénico	34 Se 78.96 Selenio	35 Br 79.904 Bromo	36 Kr 83.798 Kriptón
37 Rb 85.4678 Rubidio	38 Sr 87.62 Estroncio	39 Y 88.90585 Itrio	40 Zr 91.224 Zirconio	41 Nb 92.90638 Niobio	42 Mo 95.96 Molibdeno	43 Tc [98] Tecnecio	44 Ru 101.07 Rutenio	45 Rh 102.90550 Rodio	46 Pd 106.42 Paladio	47 Ag 107.8682 Plata	48 Cd 112.411 Cadmio	49 In 114.818 Indio	50 Sn 118.710 Estaño	51 Sb 121.760 Antimonio	52 Te 127.60 Telurio	53 I 126.90447 Yodo	54 Xe 131.293 Xenón
55 Cs 132.9054519 Cesio	56 Ba 137.327 Bario	57-71 Lantánidos	72 Hf 178.49 Hafnio	73 Ta 180.94788 Tantalio	74 W 183.84 Wolframio	75 Re 186.207 Renio	76 Os 190.23 Osmio	77 Ir 192.217 Indio	78 Pt 195.084 Platino	79 Au 196.966569 Oro	80 Hg 200.59 Mercurio	81 Tl 204.3833 Talio	82 Pb 207.2 Plomo	83 Bi 208.98040 Bismuto	84 Po [209] Polonio	85 At [210] Astatio	86 Rn [222] Radón
87 Fr [223] Francio	88 Ra [226] Radio	89-103 Actínidos	104 Rf [267] Rutherfordio	105 Db [268] Dubnio	106 Sg [271] Seaborgio	107 Bh [272] Bohrio	108 Hs [270] Hassio	109 Mt [276] Meitnerio	110 Ds [281] Darmstadtio	111 Rg [280] Roentgenio	112 Cn [285] Copernicio	113 Uut [284] Ununtrio	114 Fl [289] Flerovio	115 Uup [288] Ununpentio	116 Lv [293] Livermorio	117 Uus [294] Ununseptio	118 Uuo [294] Ununoctio

Lantánidos	57 La 138.90547 Lantano	58 Ce 140.116 Cerio	59 Pr 140.90765 Praseodimio	60 Nd 144.242 Neodimio	61 Pm [145] Prometio	62 Sm 150.36 Samario	63 Eu 151.964 Europio	64 Gd 157.25 Gadolinio	65 Tb 158.92535 Terbio	66 Dy 162.500 Disprobio	67 Ho 164.93032 Holmio	68 Er 167.259 Erbio	69 Tm 168.93421 Tulio	70 Yb 173.054 Iterbio	71 Lu 174.9668 Lutecio
Actínidos	89 Ac [227] Actinio	90 Th 232.03806 Torio	91 Pa 231.03588 Protactinio	92 U 238.02891 Uranio	93 Np [237] Neptunio	94 Pu [244] Plutonio	95 Am [243] Americio	96 Cm [247] Curio	97 Bk [247] Berkelio	98 Cf [251] Californio	99 Es [252] Einstenio	100 Fm [257] Fermio	101 Md [258] Mendelevio	102 No [259] Nobelio	103 Lr [262] Laurencio

Alcalino	Alcalinotérreo	Metales del bloque p	Halógeno	Gas noble
No metal	Metal de transición	Metaloides	Lantánidos	Actínidos

Hoy vamos a hablar de una simetría particular:

Simetría entre reposo y movimiento uniforme rectilíneo



Hoy vamos a hablar de una simetría particular:
Simetría entre reposo y movimiento uniforme rectilíneo



¿Cómo podemos saber si estamos en reposo o en movimiento?



← ?



? →



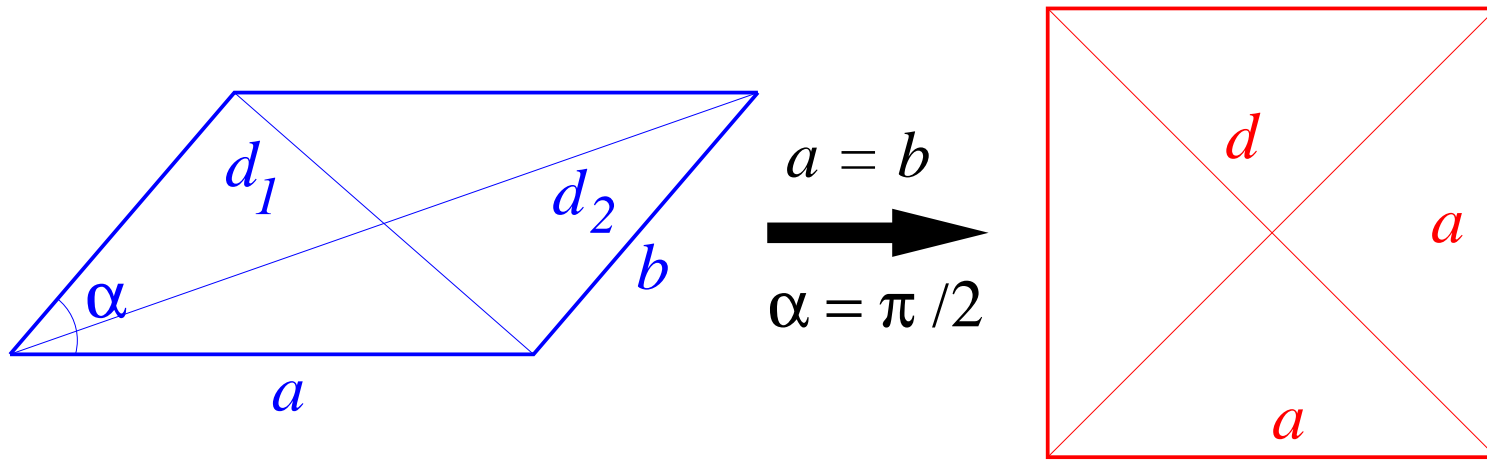
NB: La simetría sólo es entre reposo y movimiento uniforme rectilíneo
Las aceleraciones son fácilmente detectables



→ Hoy sólo consideraremos movimiento uniforme rectilíneo...
...sino deberíamos recurrir a la [Relatividad General](#)

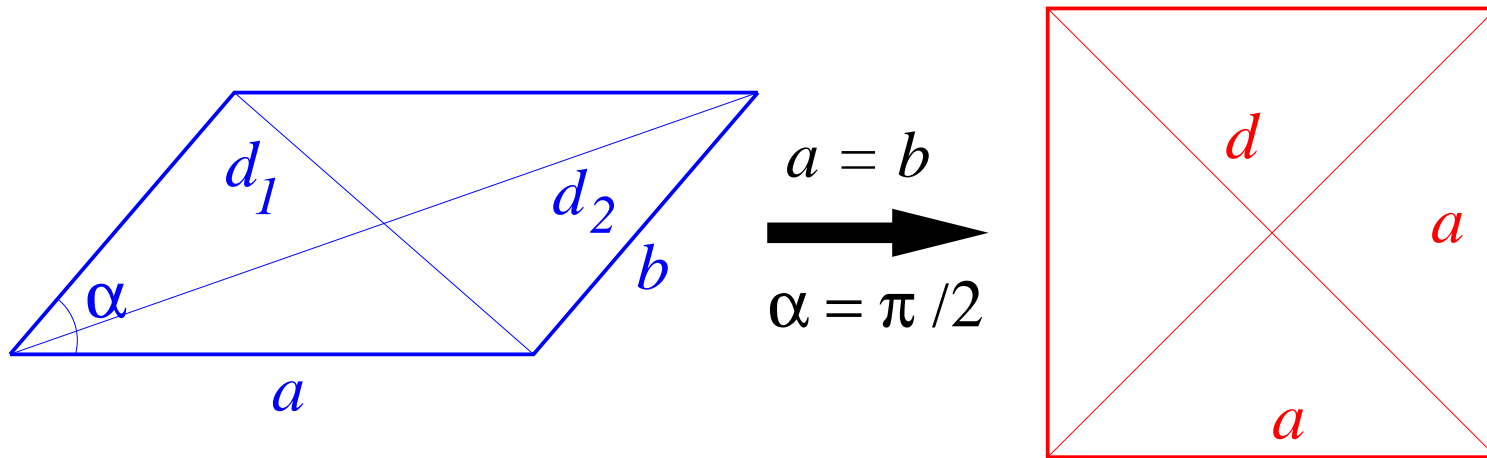
Por cierto: **Relatividad General** es más complicada que **Relatividad Especial**

Cfr: Cuadrado como caso especial de un paralelogramo



Por cierto: **Relatividad General** es más complicada que **Relatividad Especial**

Cfr: Cuadrado como caso especial de un paralelogramo



$$C = 2(a + b)$$

→

$$C = 4a$$

$$A = ab \sin \alpha$$

→

$$A = a^2$$

$$d_1 = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha}$$

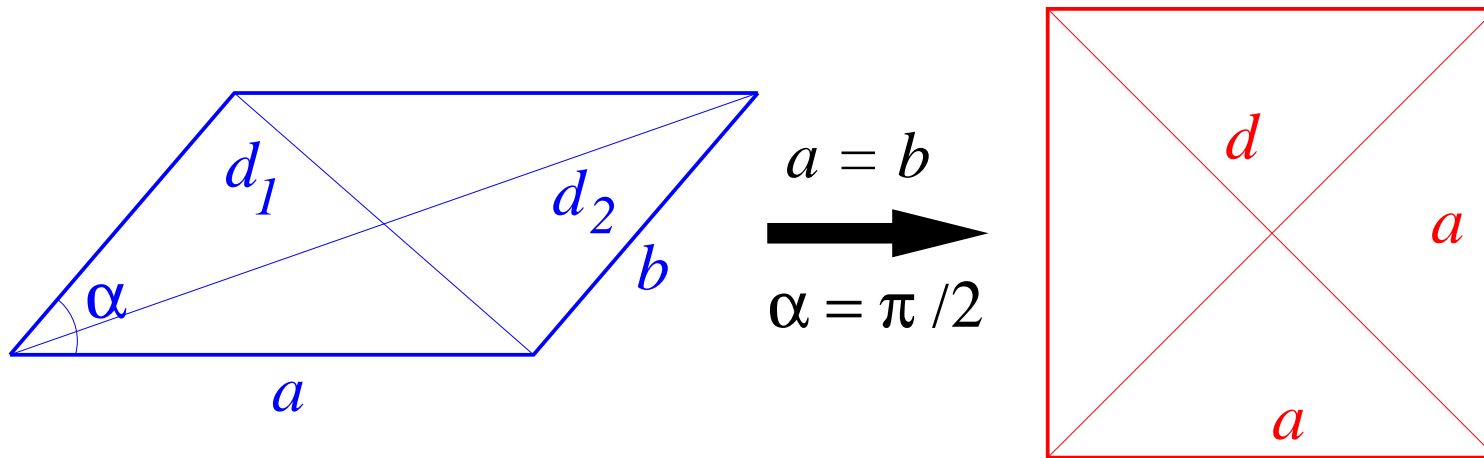
→

$$d = \sqrt{2} a$$

$$d_2 = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos \alpha}$$

Por cierto: **Relatividad General** es más complicada que **Relatividad Especial**

Cfr: Cuadrado como caso especial de un paralelogramo



$$C = 2(a + b)$$

→

$$C = 4a$$

$$A = ab \sin \alpha$$

→

$$A = a^2$$

$$d_1 = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha}$$

→

$$d = \sqrt{2} a$$

$$d_2 = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos \alpha}$$

Relatividad Especial = caso especial donde la **velocidad es constante**

Relatividad General = movimiento general \implies **más complicado**

2. Principio de la Relatividad



Es imposible determinar a base de experimentos físicos si un sistema de referencia está en reposo o en movimiento uniforme rectilíneo.

Galileo Galilei, ca. 1600



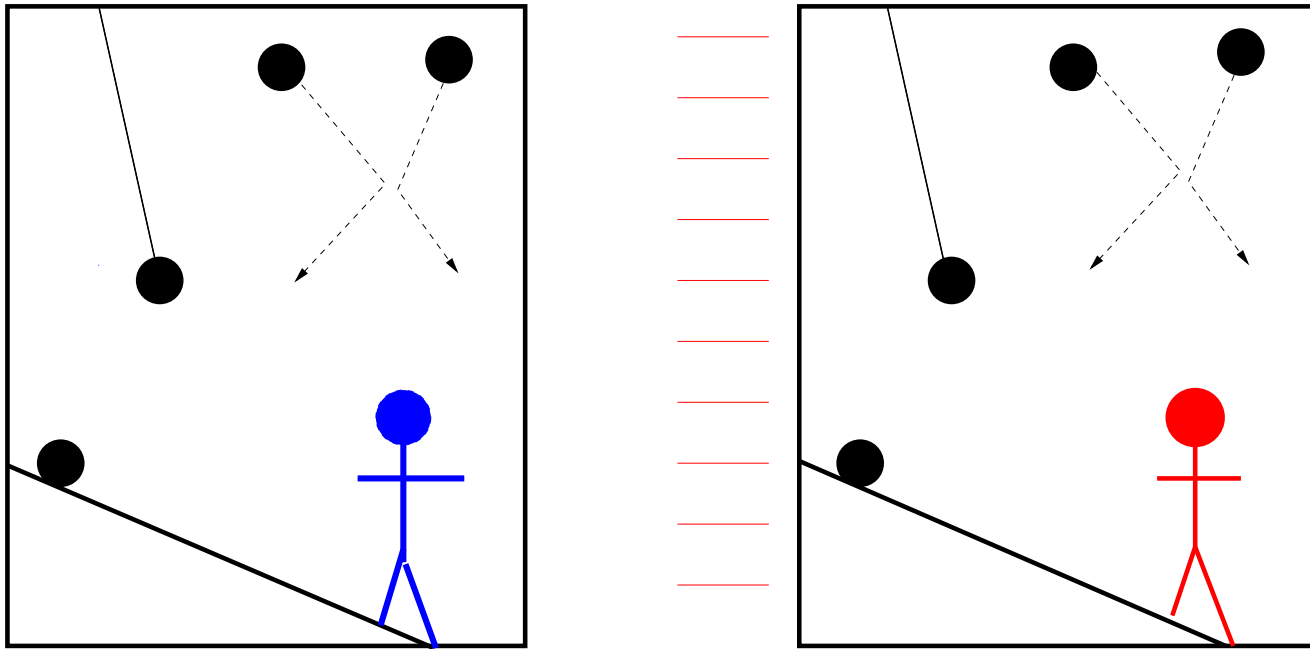
← ?



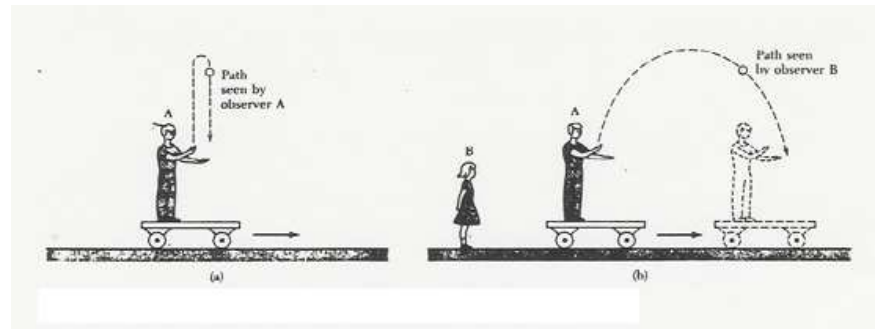
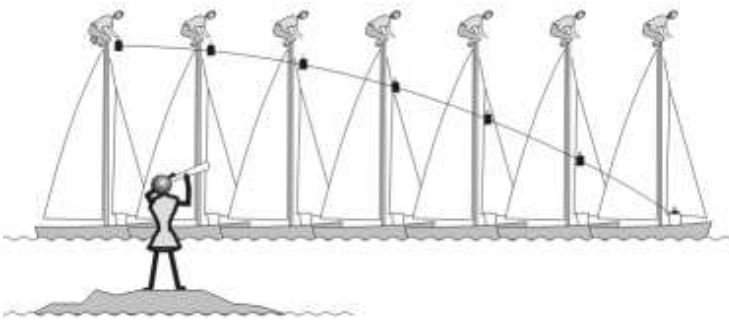
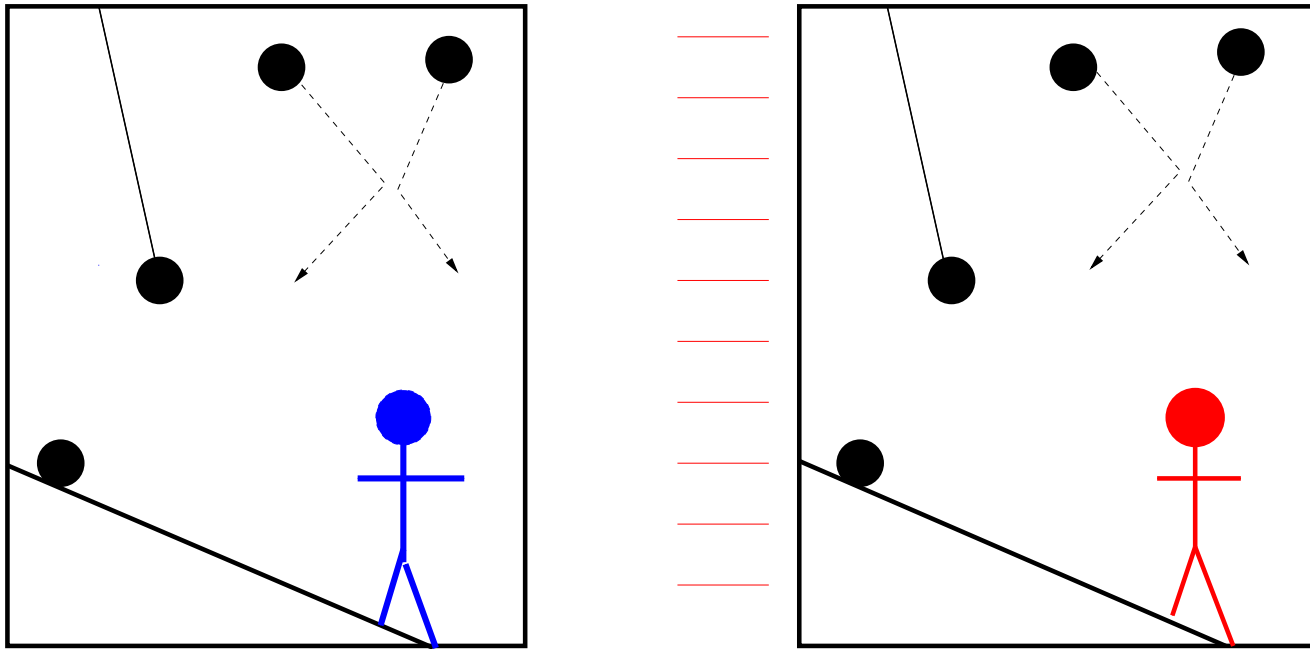
? →



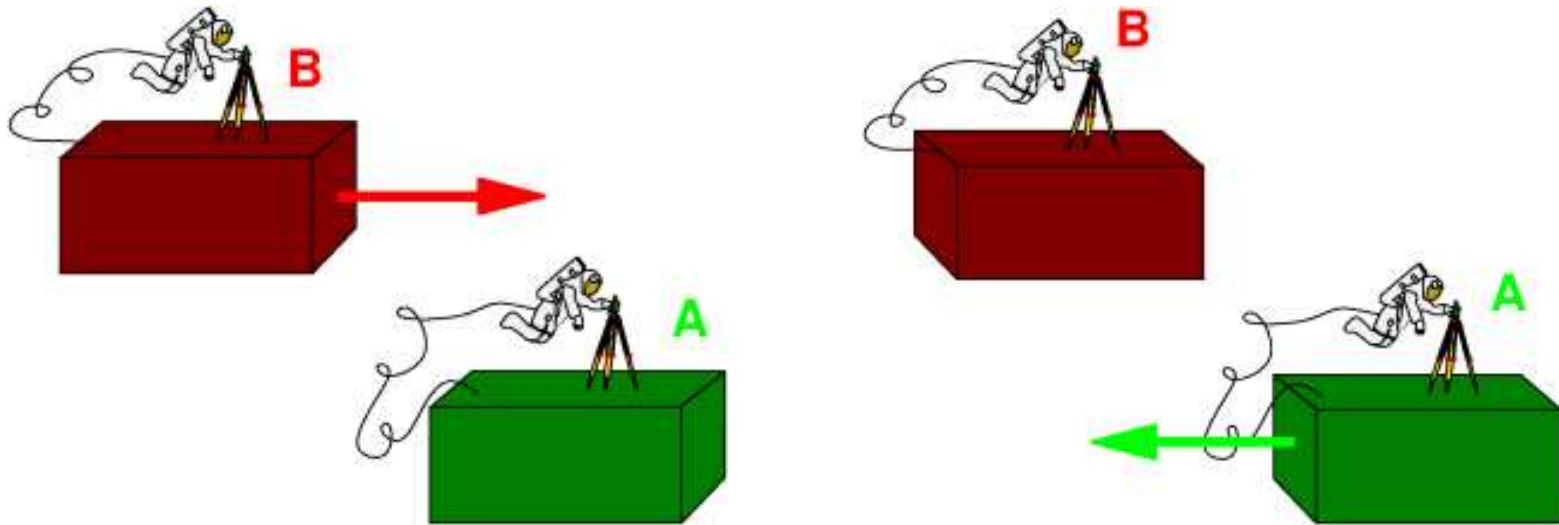
—> Los **resultados experimentales son idénticos** en reposo o en movimiento uniforme rectilíneo



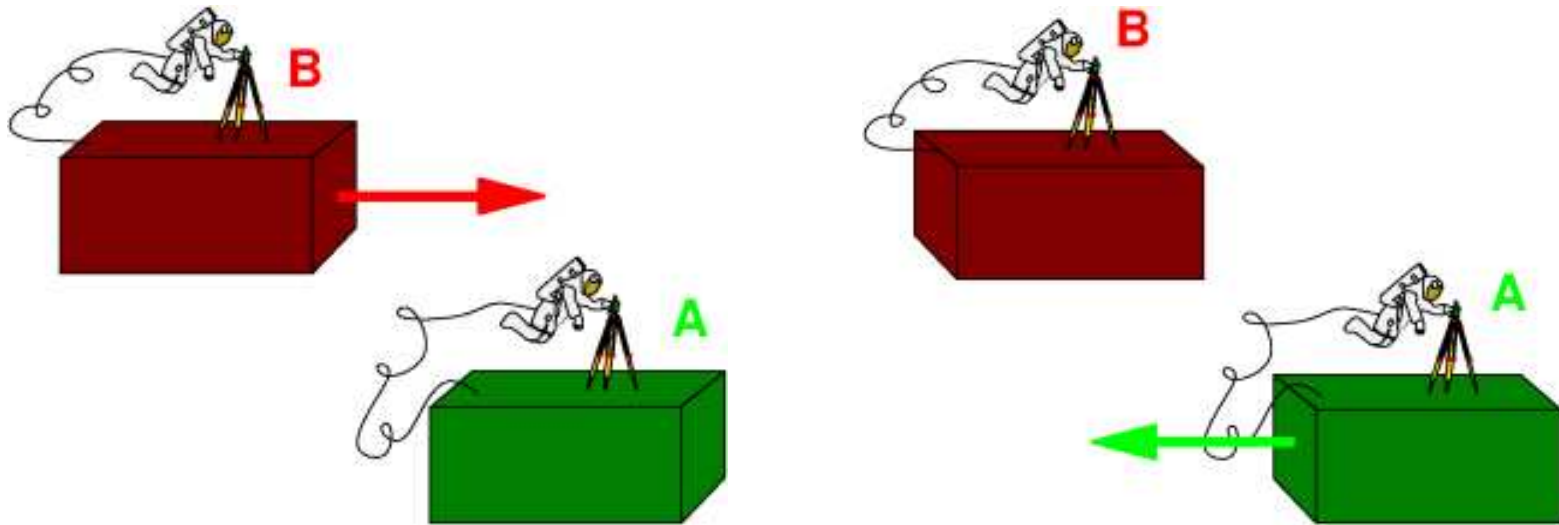
→ Los **resultados experimentales son idénticos** en reposo o en movimiento uniforme rectilíneo



—→ Si no hay manera de medir la diferencia, es que **no hay diferencia**



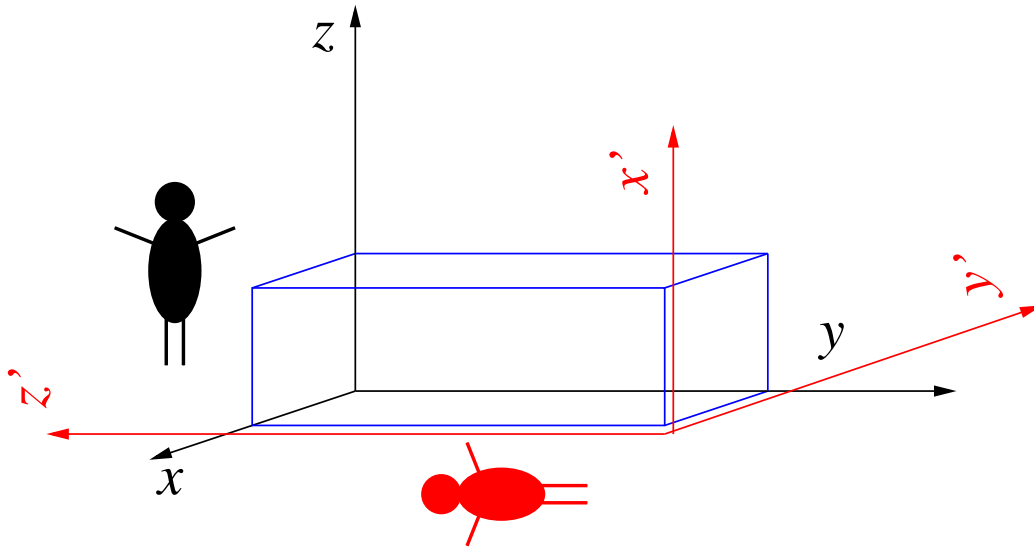
—→ Si no hay manera de medir la diferencia, es que **no hay diferencia**



—→ Reposo absoluto y movimiento absoluto no existen
Sólo existe reposo relativo y movimiento relativo



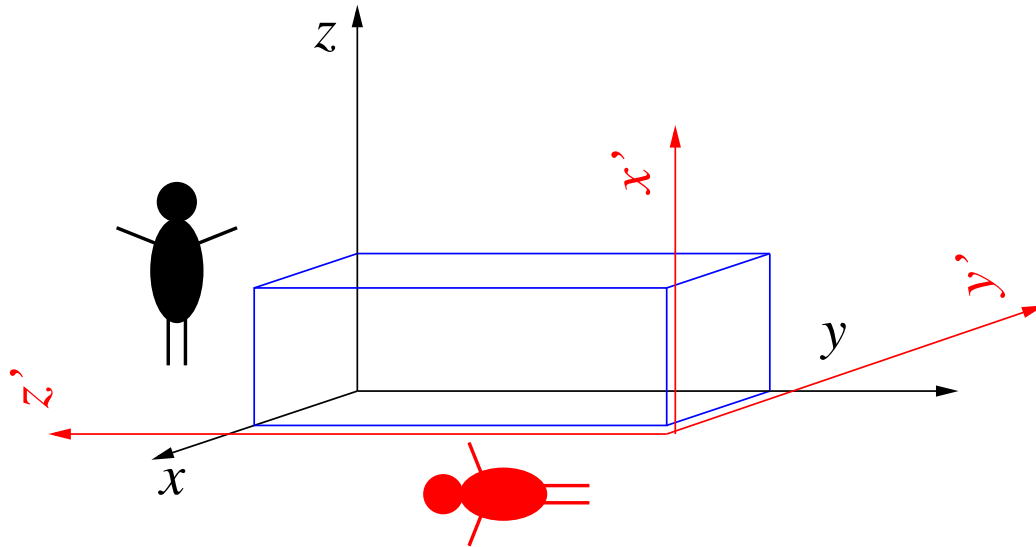
Muy similar a una rotación:



Observador negro: caja es más ancha que alta

Observador rojo: caja es más alta que ancha

Muy similar a una rotación:



Observador negro: caja es más ancha que alta

Observador rojo: caja es más alta que ancha

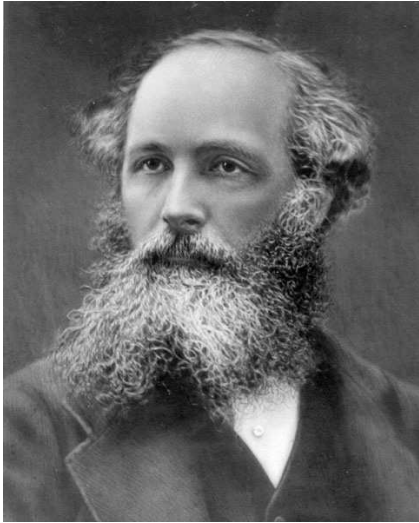


delante y detras, arriba y abajo, izquierda y derecha son **conceptos relativos**

—→ Reposo absoluto y movimiento absoluto no existen
Sólo existe reposo relativo y movimiento relativo



3. Maxwell y la velocidad de la luz



Maxwell (1865):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

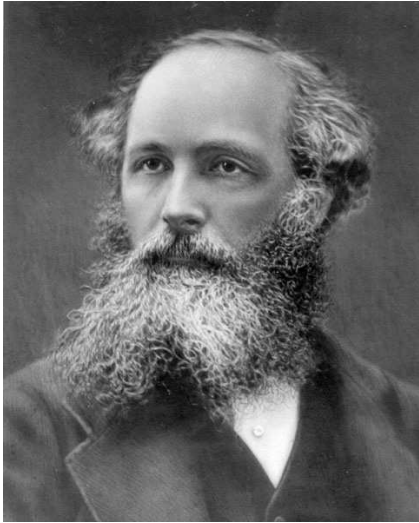
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \partial_t \vec{B}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c} \partial_t \vec{E}$$

donde $c = 300\,000 \text{ km/s} = \text{velocidad de la luz}$

3. Maxwell y la velocidad de la luz



Maxwell (1865):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

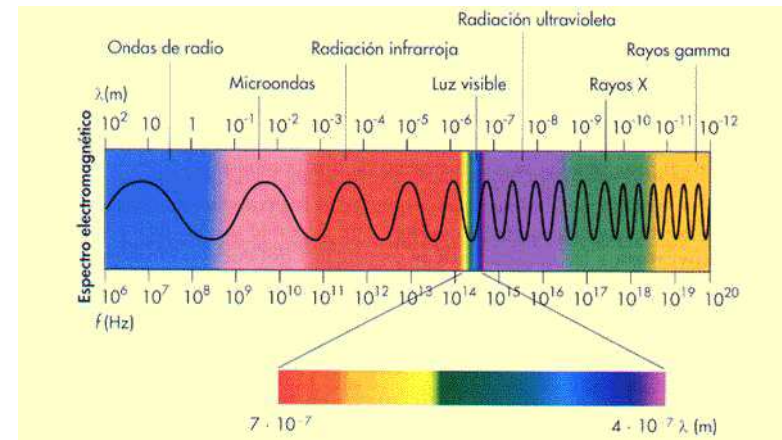
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \partial_t \vec{B}$$

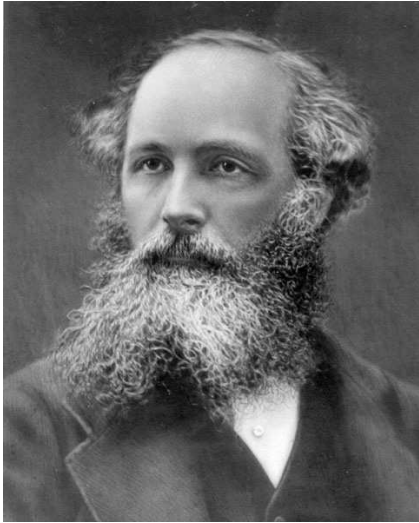
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c} \partial_t \vec{E}$$

donde $c = 300\,000 \text{ km/s} = \text{velocidad de la luz}$

Luz = ondas electromagnéticas
= paquetes de campo electromagnético
que se mueven por el espacio
a $300\,000 \text{ km/s}$



3. Maxwell y la velocidad de la luz



Maxwell (1865):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

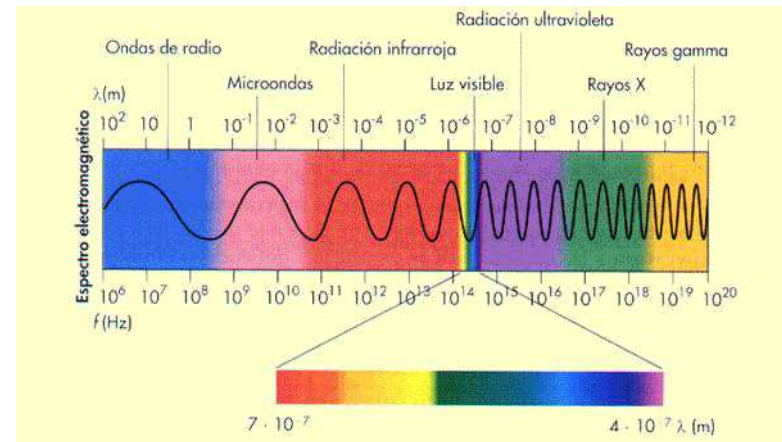
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \partial_t \vec{B}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c} \partial_t \vec{E}$$

donde $c = 300\,000 \text{ km/s} = \text{velocidad de la luz}$

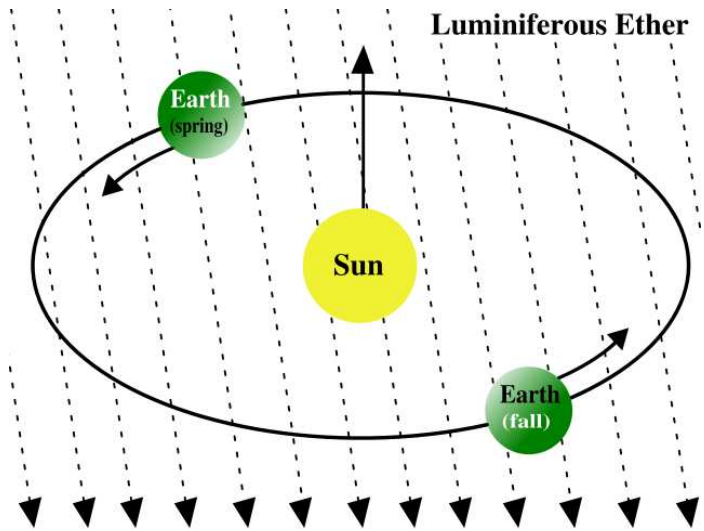
Luz = ondas electromagnéticas
= paquetes de campo electromagnético
que se mueven por el espacio
a $300\,000 \text{ km/s}$



→ “ $300\,000 \text{ km/s}$ ¿Con respecto a QUÉ?” (hubiera dicho Galilei...)

Respuesta del Siglo XIX: “con respecto al aether luminifero...”

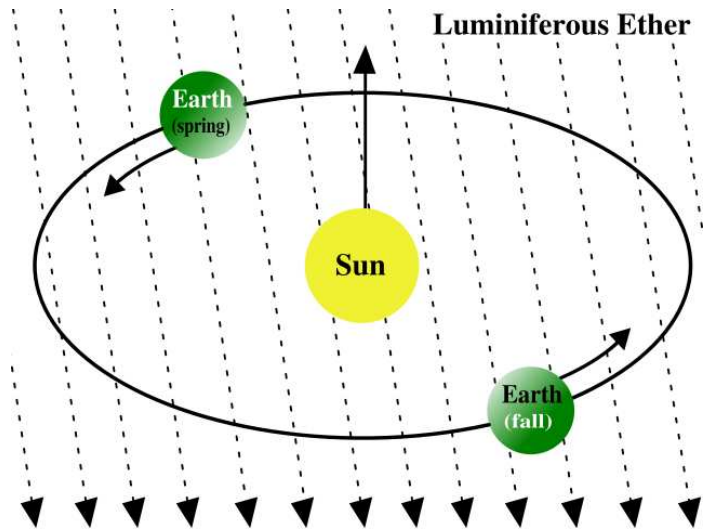
Aether = medio en que se propagan las ondas electromagnéticas



- omnipresente y uniformemente distribuido
- muy ligero: no hay rozamiento con objetos materiales
- muy denso y muy rígido: soportar velocidades y frecuencias muy altas
- ...

Respuesta del Siglo XIX: “con respecto al aether luminifero...”

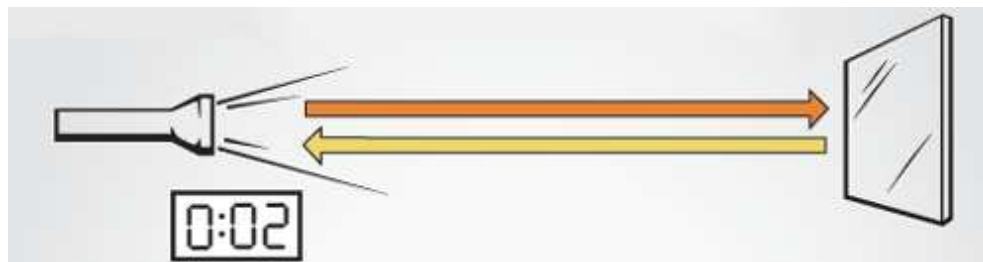
Aether = medio en que se propagan las ondas electromagnéticas



- omnipresente y uniformemente distribuido
- muy ligero: no hay rozamiento con objetos materiales
- muy denso y muy rígido: soportar velocidades y frecuencias muy altas
- ...

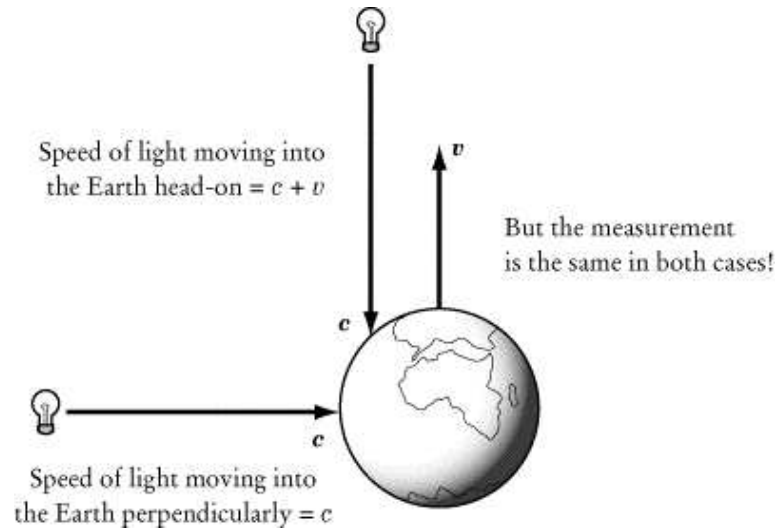
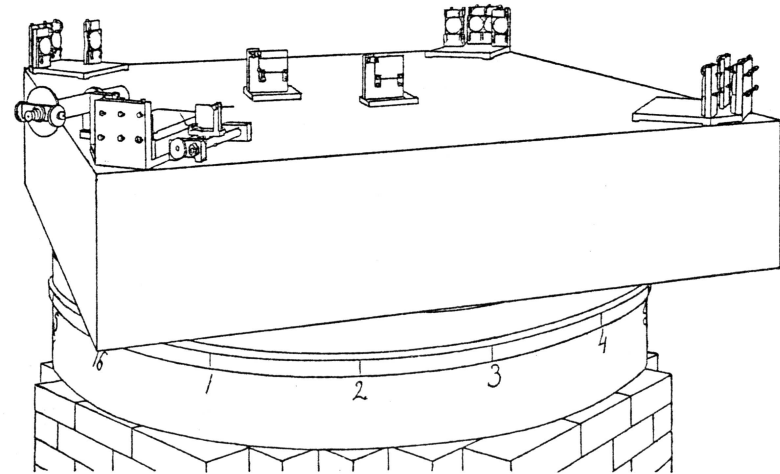
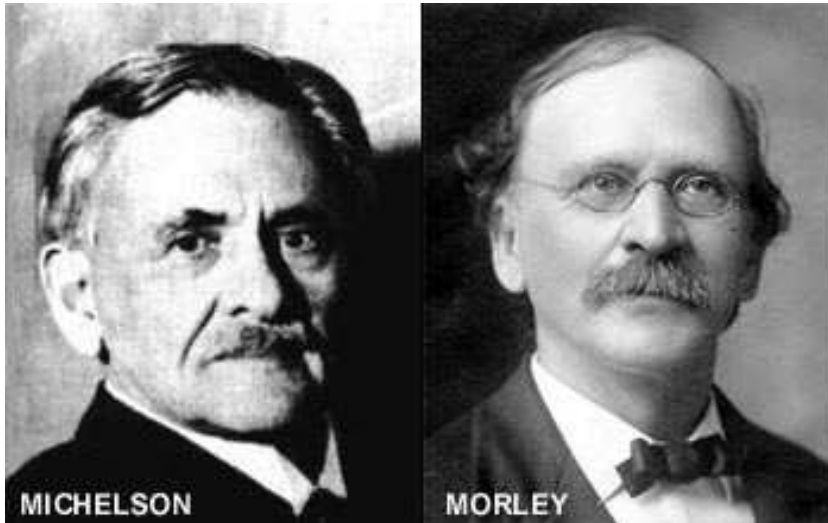
→ Detectar movimiento con respecto al aether!

¿Qué veo en un espejo a la velocidad de la luz?



→ ¡¡Incompatible con el Principio de la Relatividad!!

El frustrado experimento de Michelson & Morley (1887):



→ No hay resultado medible! ¿¿??

4. La teoría de la Relatividad Especial



Einstein (1905):

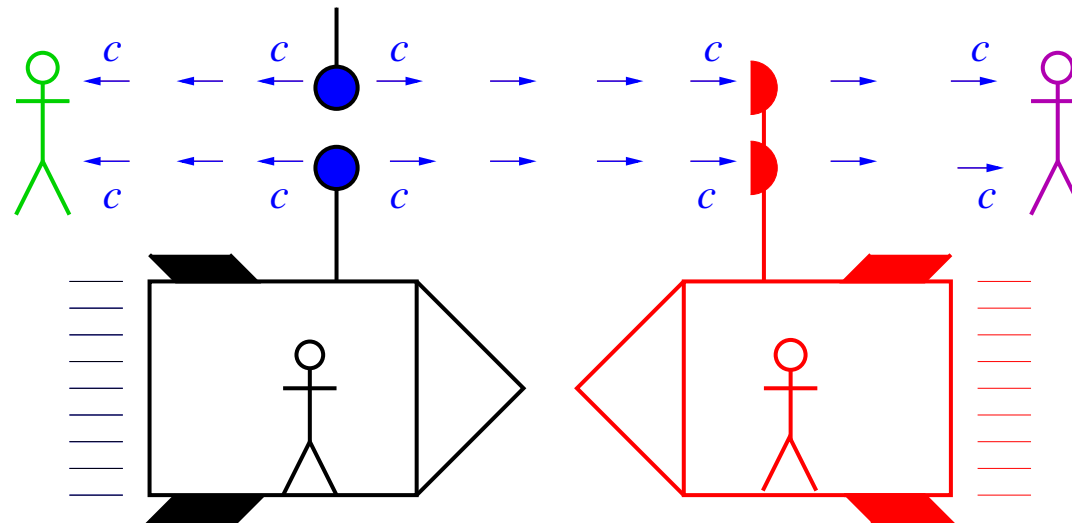
- Todos los observadores inerciales son equivalentes
- La velocidad de la luz es constante, independientemente del estado de movimiento de la fuente o del detector

4. La teoría de la Relatividad Especial



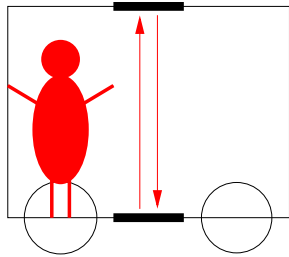
Einstein (1905):

- Todos los observadores inerciales son equivalentes
- La velocidad de la luz es constante, independientemente del estado de movimiento de la fuente o del detector

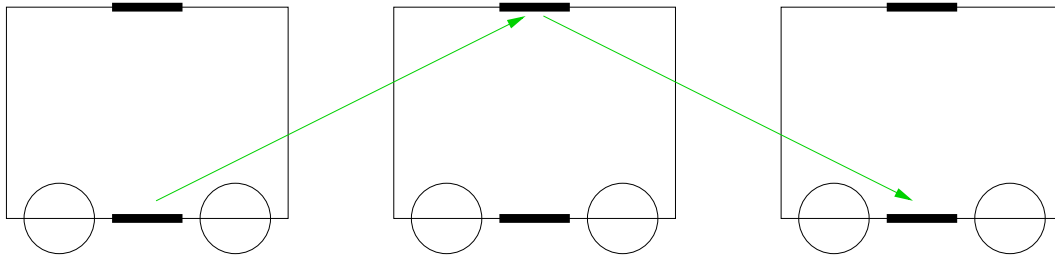
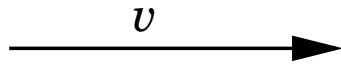


—→ muy extraño, pero no inconsistente...

El tiempo no fluye igual para todo el mundo



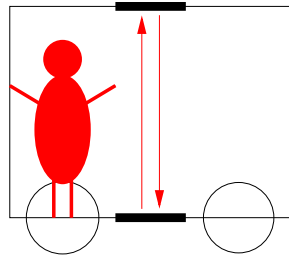
$$c = \Delta s' / \Delta t'$$



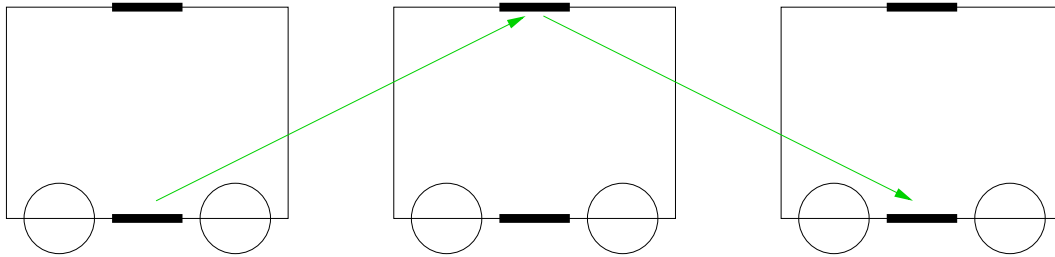
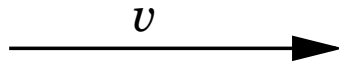
$$c = \Delta s / \Delta t$$



El tiempo no fluye igual para todo el mundo



$$c = \Delta s' / \Delta t'$$



$$c = \Delta s / \Delta t$$



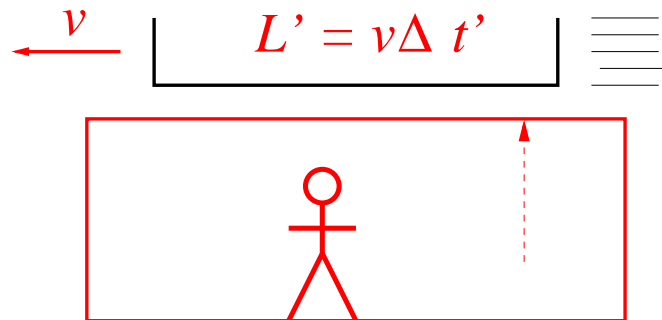
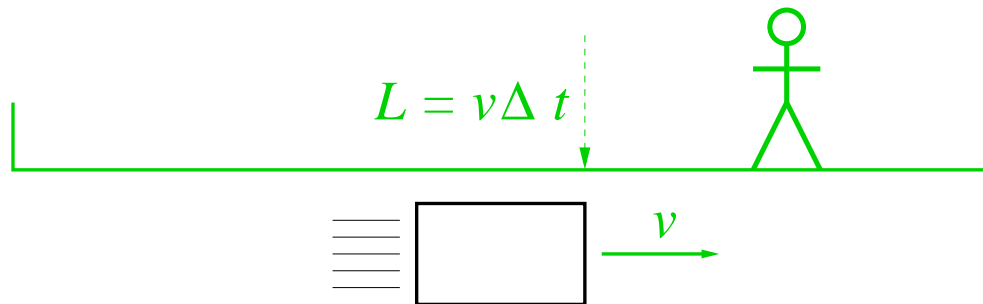
$$\left. \begin{array}{l} c = c \\ \Delta s' < \Delta s \end{array} \right\} \implies \Delta t' < \Delta t$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

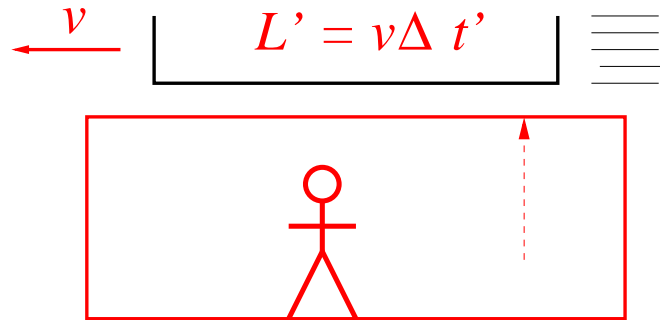
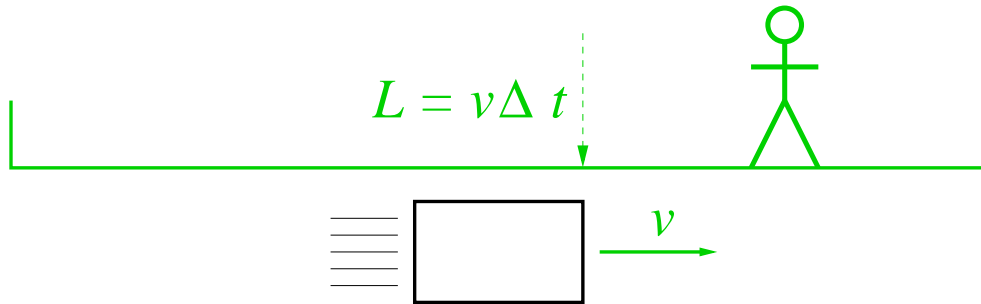
Ha pasado más tiempo para el jefe de estación que para el maquinista

→ Dilatación temporal

→ Los objetos no son iguales de largos para todo el mundo



—> Los objetos no son iguales de largos para todo el mundo



$$\left. \begin{array}{l} v = v \\ \Delta t' < \Delta t \end{array} \right\} \implies L' < L \qquad L' = L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

El andén es más corto para el **maquinista** que para el **jefe de estación**

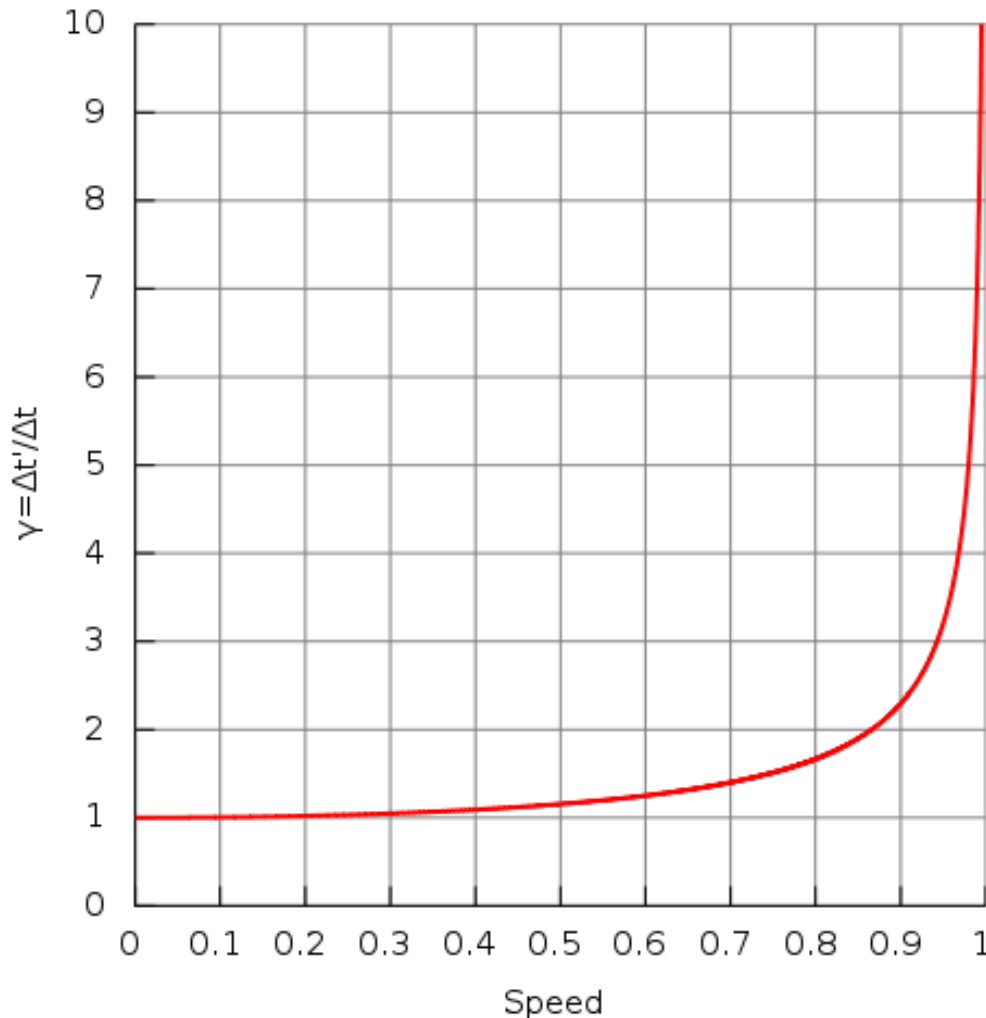
—> Contracción de Lorentz

Dilatación temporal:

el tiempo corre más lento para los observadores en movimiento

Contracción de Lorentz:

las distancias son más cortas para los observadores en movimiento



$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$L' = L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$v \ll c: t' \approx t, \quad L' \approx L$$

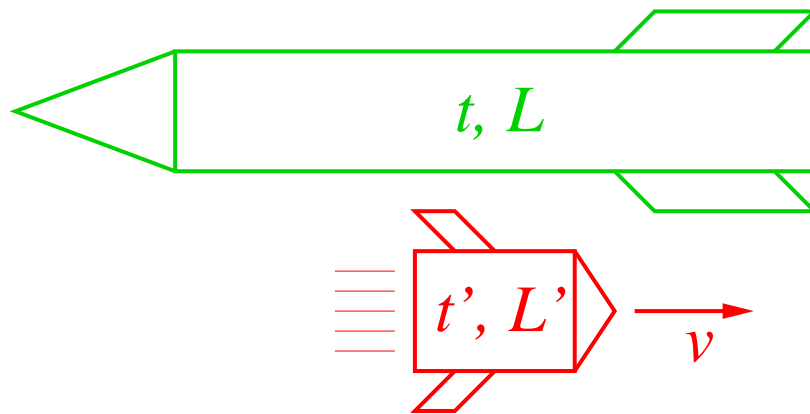
$$v \approx c: t' \gg t, \quad L' \ll L$$

¿Quién realmente está en reposo y quién realmente se mueve?

→ El movimiento es relativo

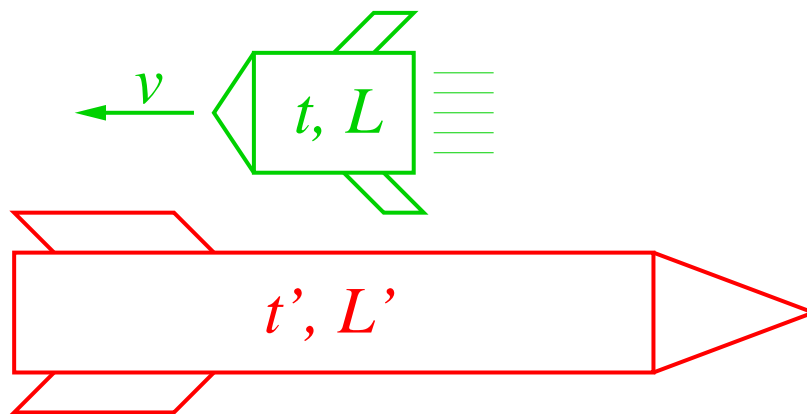
¿Quién realmente está en reposo y quién realmente se mueve?

- El movimiento es relativo
- El tiempo es relativo
- Las distancias son relativas



$$L > L'$$

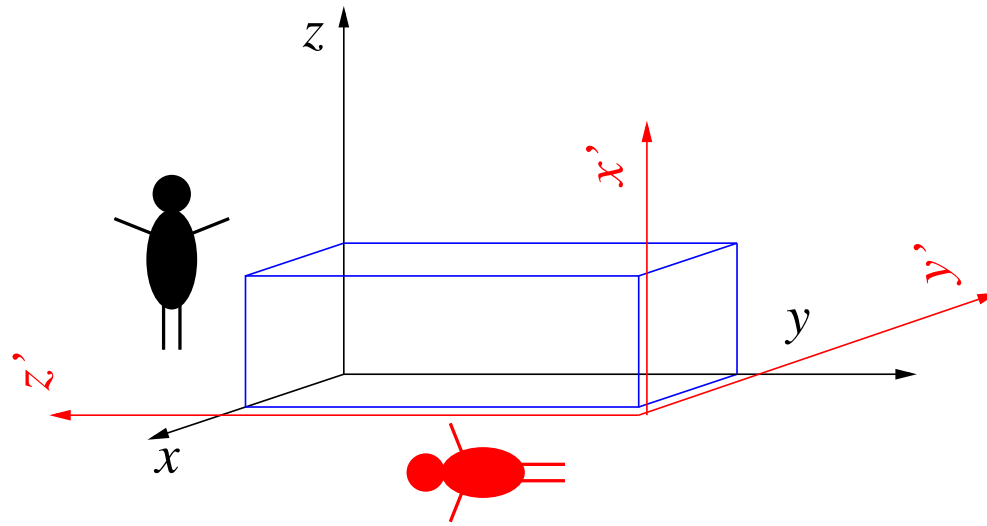
$$t < t'$$



$$L < L'$$

$$t > t'$$

Recuerda:

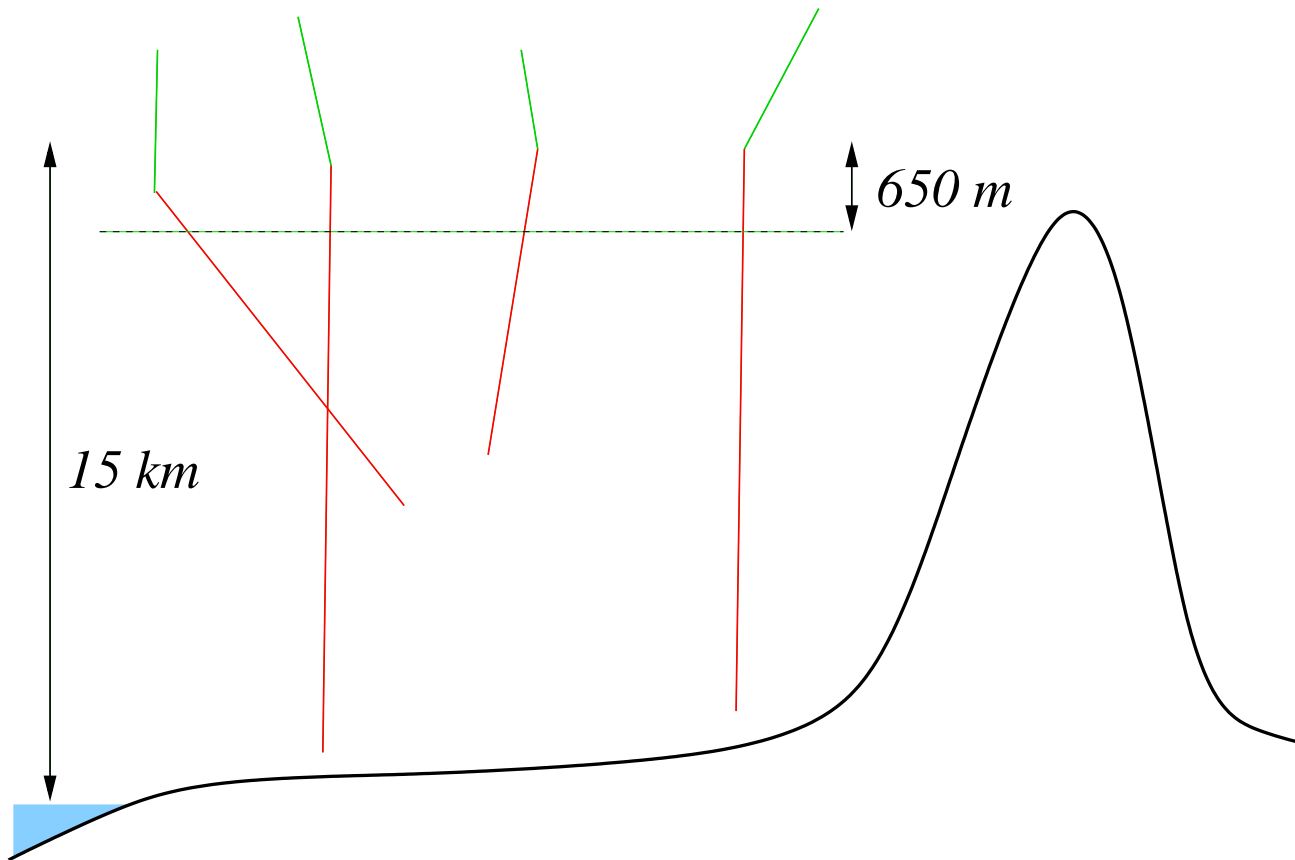


Delante y detras, arriba y abajo, izquierda y derecha son conceptos relativos

→ Intervalos de tiempo y longitud de objetos también...

Experimento de los muones: (visto por nosotros)

Los muones se crean a altura de 15 km y se mueven a $0,99 c$



Vida media de un muón (en reposo): $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

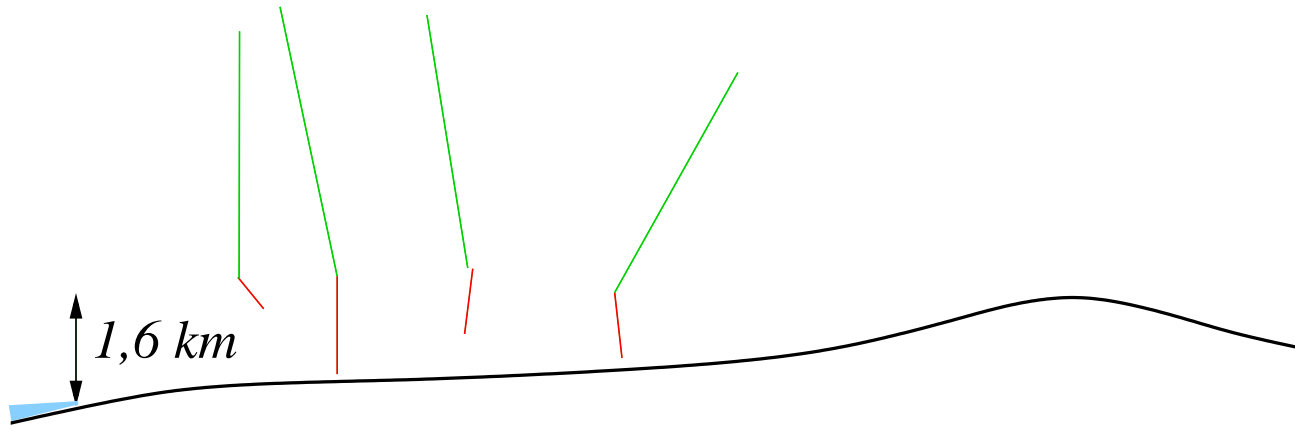
Distancia recorrido en este tiempo: 650 m

A $v = 0,99 c$, viven 9 veces más largo

Logran a recorrer más distancia \longrightarrow detección a nivel del mar

Experimento de los muones: (visto por los muones)

La Tierra se mueve a $0,99c$ \longrightarrow contracción de Lorentz



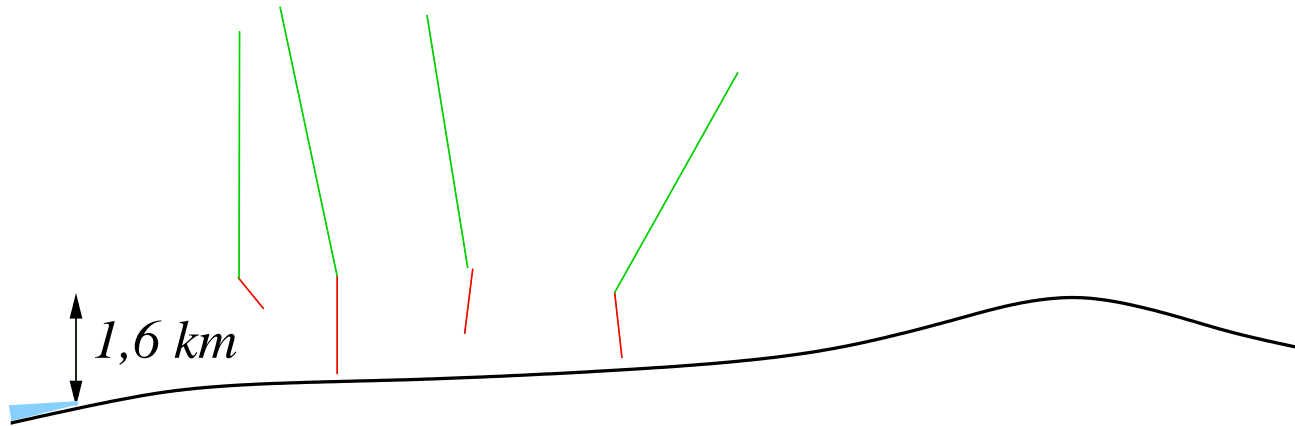
Vida media de un muón (en reposo): $2,2 \cdot 10^{-6} s$

Distancia recorrido en este tiempo: $650 m$

Los muones se crean a altura de $1,65 km$ \longrightarrow detección a nivel del mar

Experimento de los muones: (visto por los muones)

La Tierra se mueve a $0,99c$ \longrightarrow contracción de Lorentz



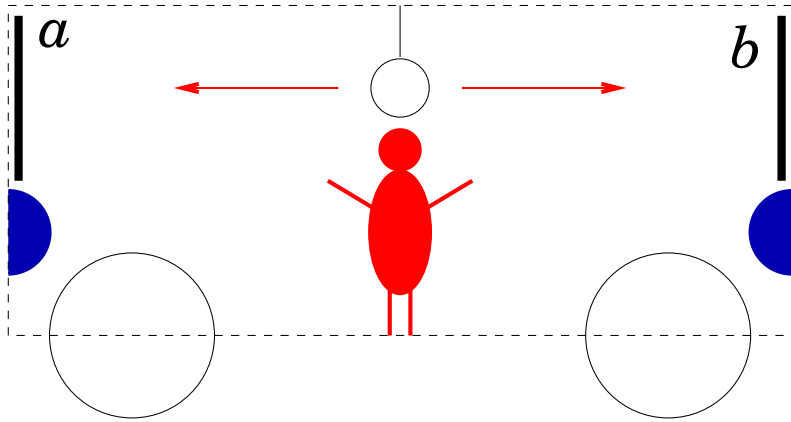
Vida media de un muón (en reposo): $2,2 \cdot 10^{-6} s$

Distancia recorrido en este tiempo: $650 m$

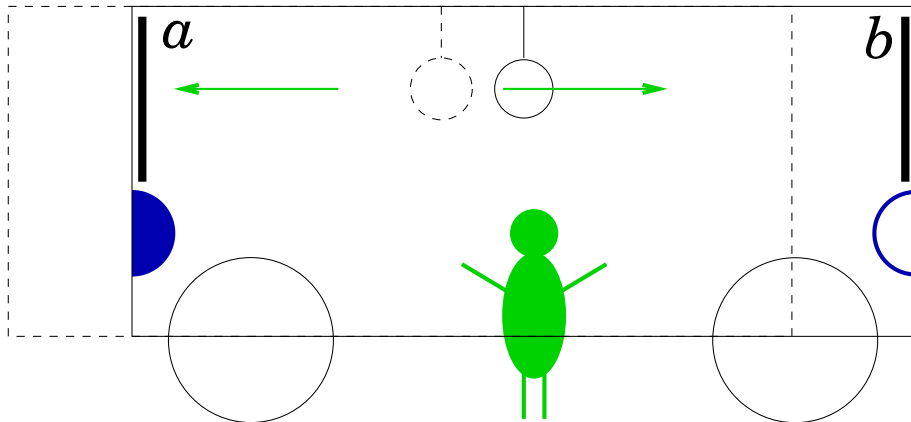
Los muones se crean a altura de $1,65 km$ \longrightarrow detección a nivel del mar

Dilatación del tiempo y contracción de Lorentz
conspiran para dar una imagen consistente

El orden cronológico no es igual para todo el mundo

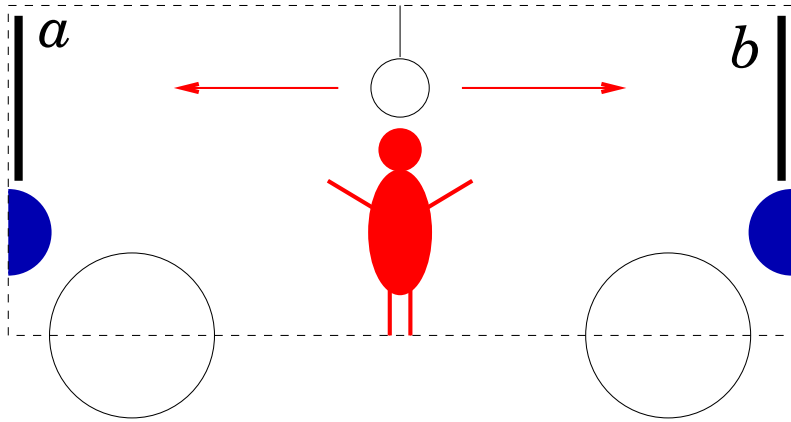


Las dos señales
llegan a la vez

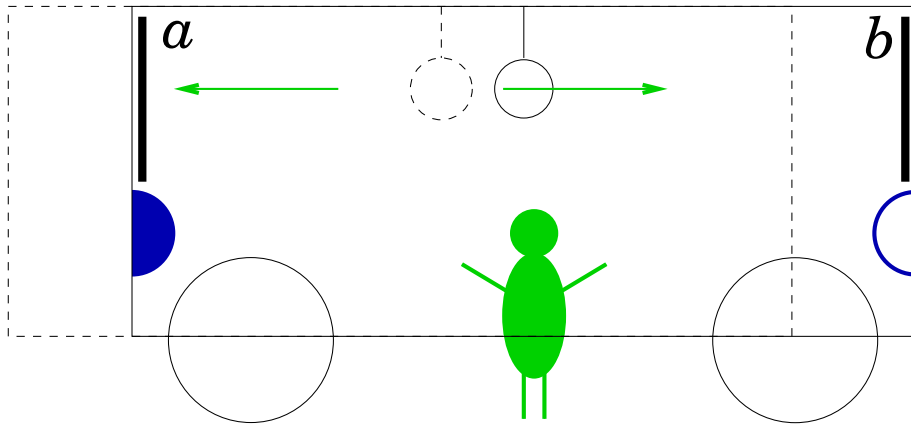


Señal llega primero
en a y después en b

El orden cronológico no es igual para todo el mundo



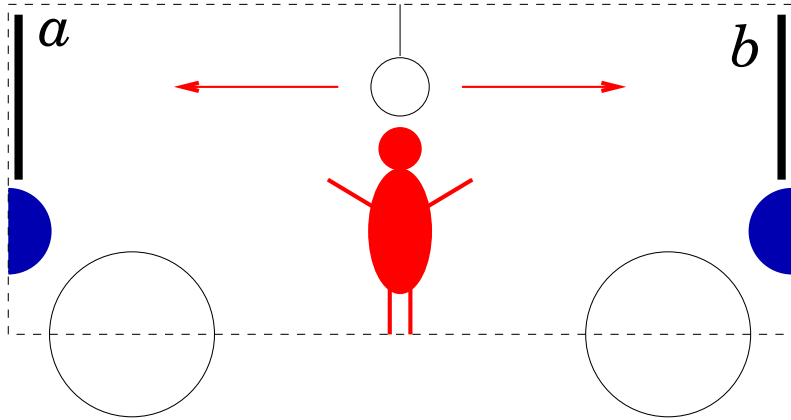
Las dos señales
llegan a la vez



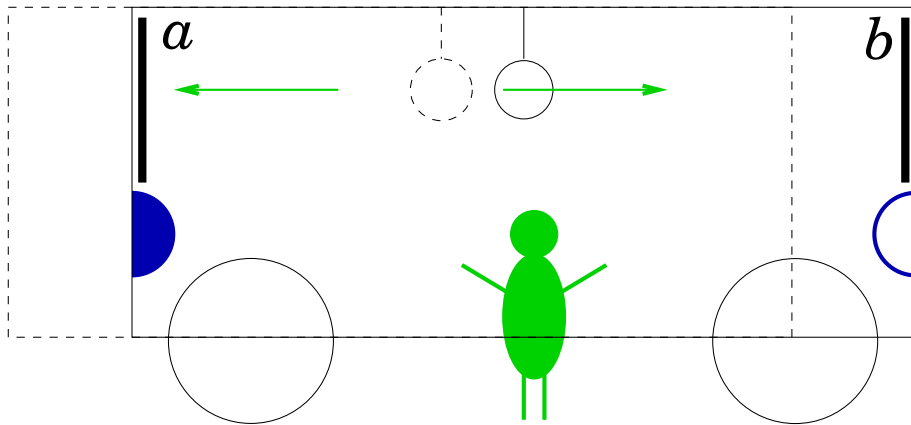
Señal llega primero
en a y después en b

→ Lo que es simultáneo para un observador, no lo es para otro

El orden cronológico no es igual para todo el mundo



Las dos señales
llegan a la vez



Señal llega primero
en a y después en b

→ Lo que es simultáneo para un observador, no lo es para otro

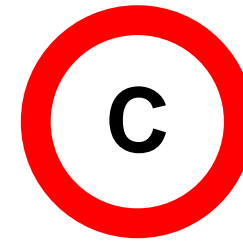
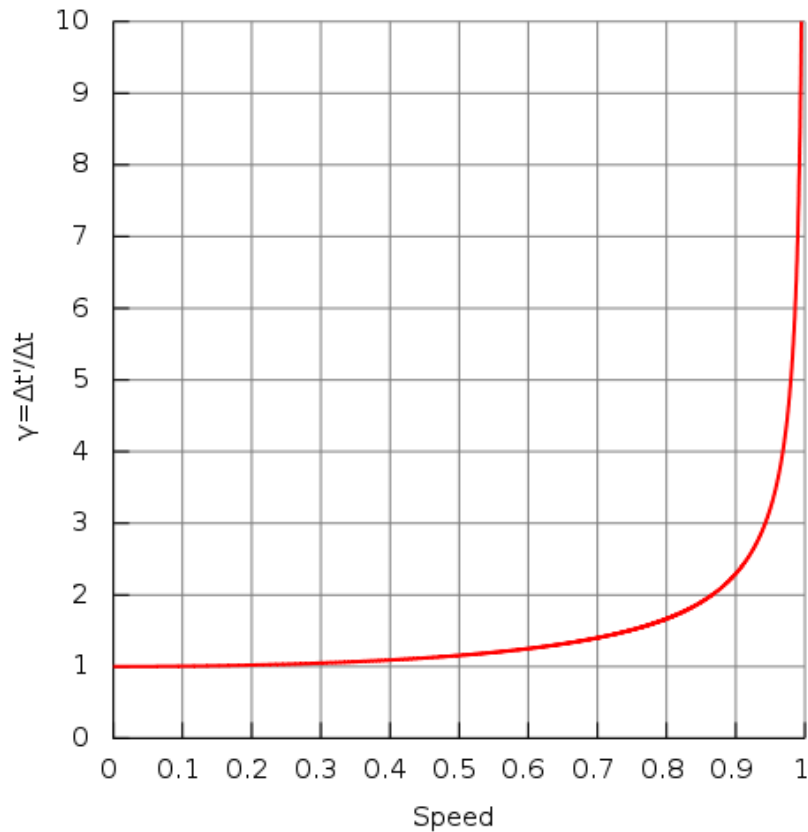
¿Qué evento *realmente* ocurrió antes?

Delante y detrás, arriba y abajo, izquierda y derecha son conceptos relativos

→ Intervalos de tiempo y longitud de objetos también...

5. Consecuencias

A. Velocidad de la luz es velocidad máxima



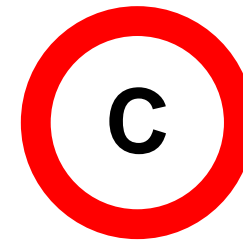
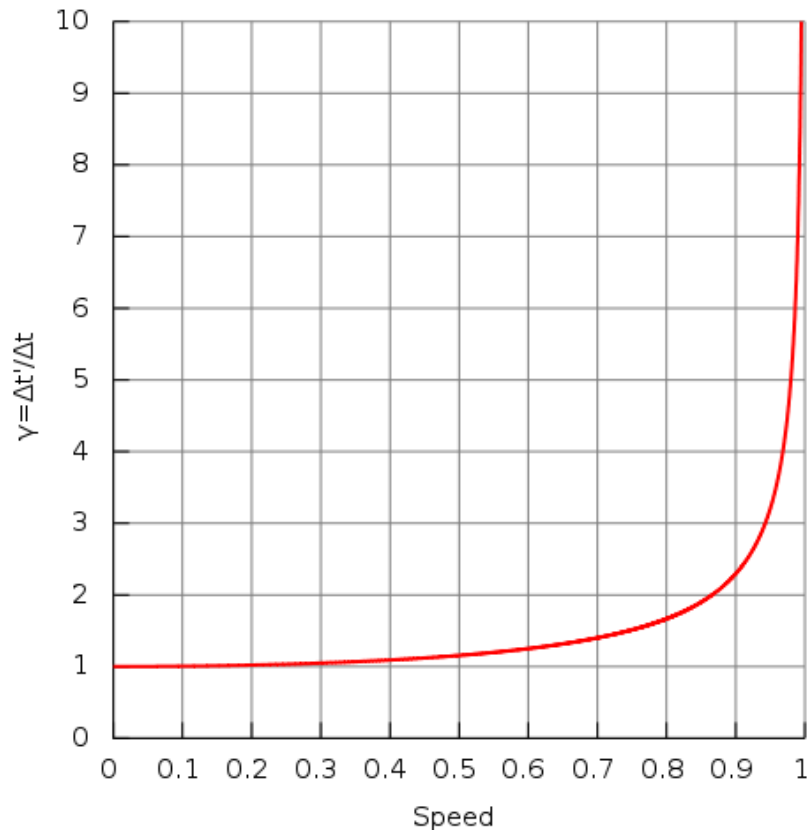
300 000 km/s

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

- Sólo partículas **sin masa viajan a c**
- Partículas **con masa viajan a $v < c$**

5. Consecuencias

A. Velocidad de la luz es velocidad máxima



300 000 km/s

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

- Sólo partículas **sin masa viajan a c**
- Partículas **con masa viajan a $v < c$**

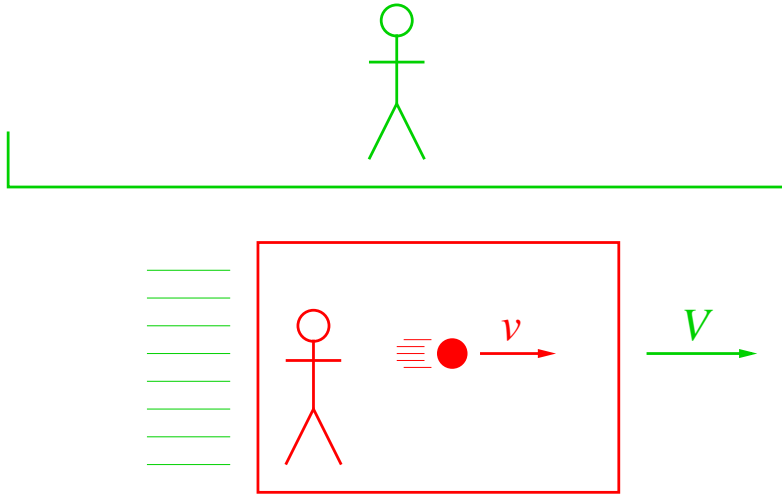
→ Telescopios miran al pasado...

→ Viajes interestelares son lentos...

→ Experimento de neutrinos superlumínicos (2011)...



C. Regla sumatoria de velocidades

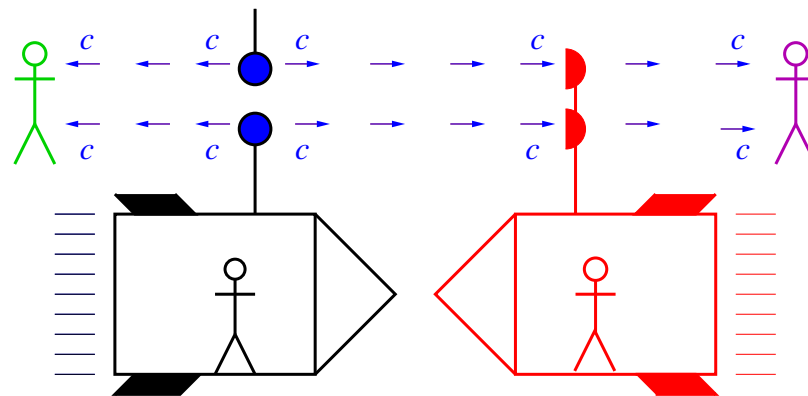


Velocidades no pueden superar la velocidad de la luz:

$$V' = \frac{v + V}{1 + \frac{vV}{c^2}}$$

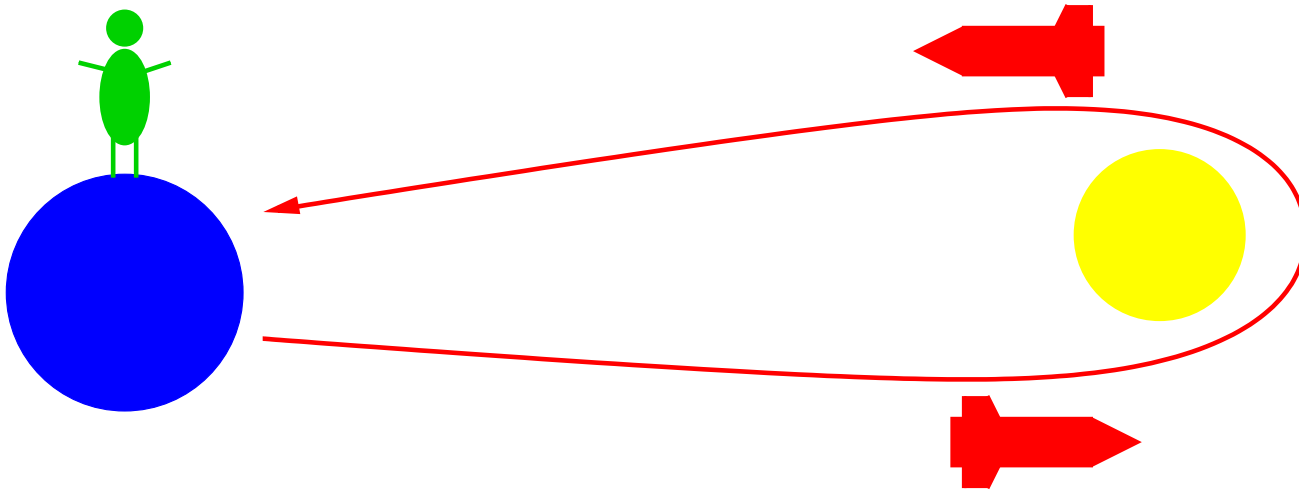
siempre menor que c

Recuerda:



C. Paradoja de los gemelos

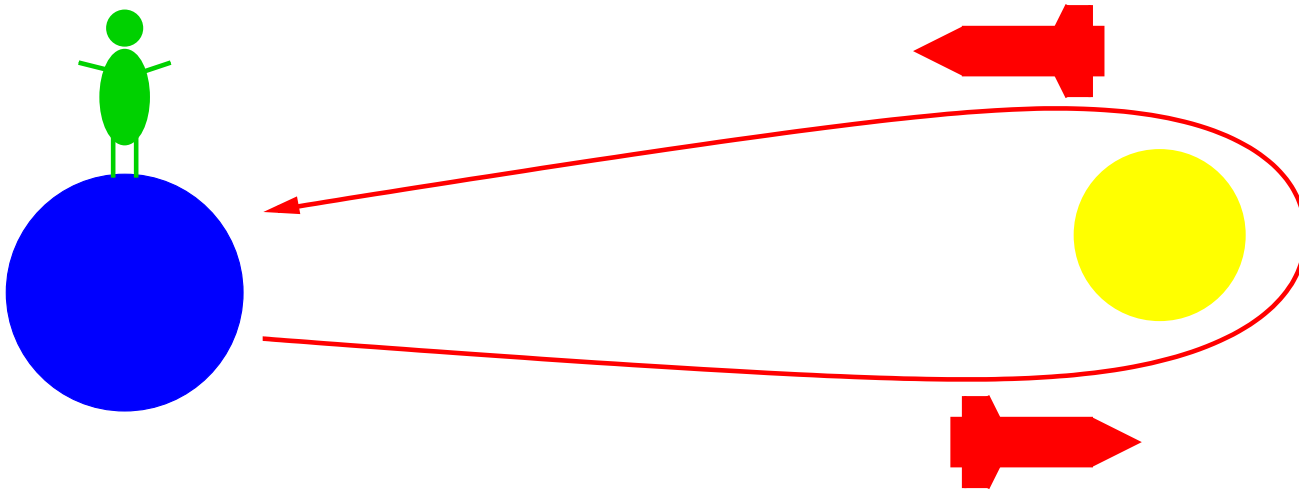
Dos gemelos viajando: ¿cuál es más viejo?



Cada uno cree que él está en reposo y el otro viajando.
¿Cada uno cree que el otro es más joven?

C. Paradoja de los gemelos

Dos gemelos viajando: ¿cuál es más viejo?

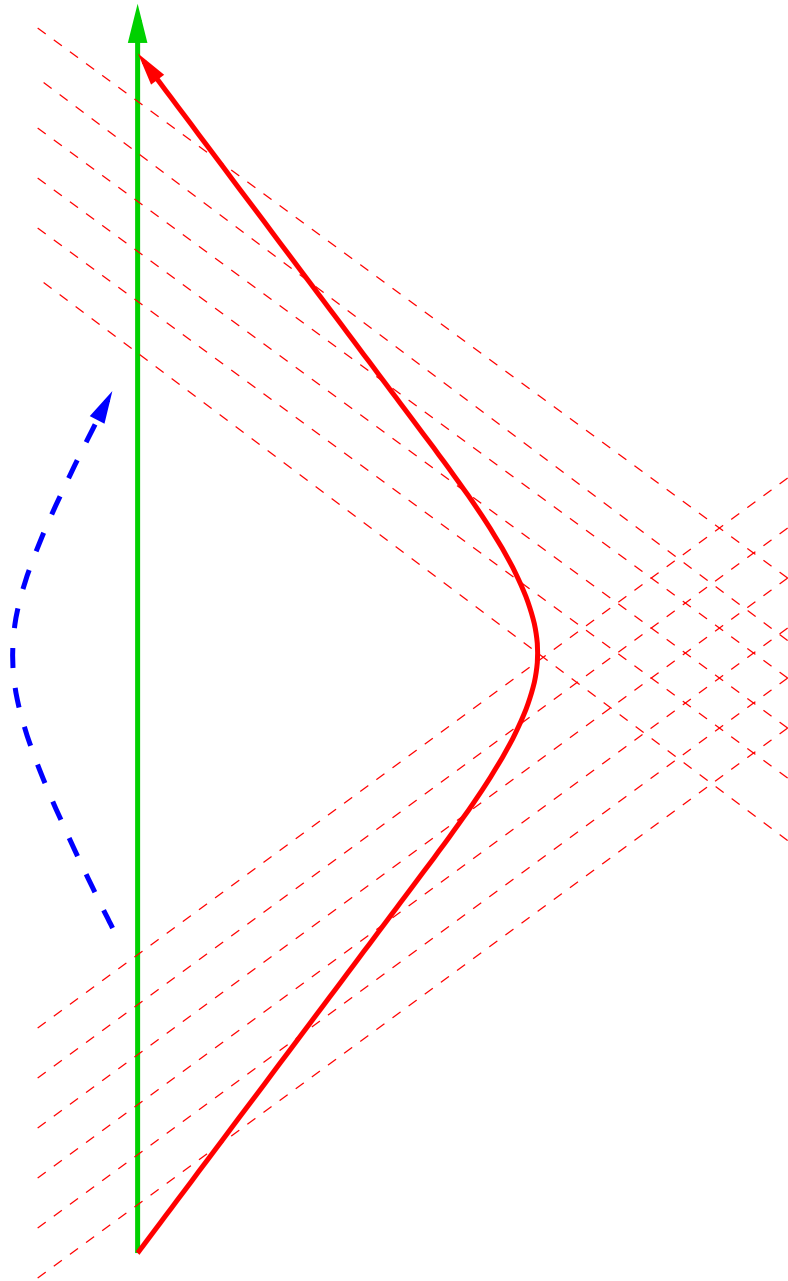


Cada uno cree que él está en reposo y el otro viajando.

¿Cada uno cree que el otro es más joven?

La situación no es simétrica: el viajero nota aceleraciones

→ El viajero es más joven



Dilatación temporal cuando viaja de
manera uniforme y rectilíneo
Deceleración y aceleración causan
asimetría y envejecimiento del
gemelo terrestre

→ Una máquina del tiempo que funciona en una dirección

Viaje a **Sirio** (8,5 años-luz) a $v = 0,99c$ ($\gamma^{-1} = 0,02$):

- Gemelo en la Tierra: $t = 19 \text{ años-luz} / 0,99c = 19,2 \text{ años}$
- Gemelo viajero: $t' = \gamma^{-1}t = 0,02 \cdot 19,2 \text{ años} = 0,38 \text{ años} = 4,5 \text{ meses}$

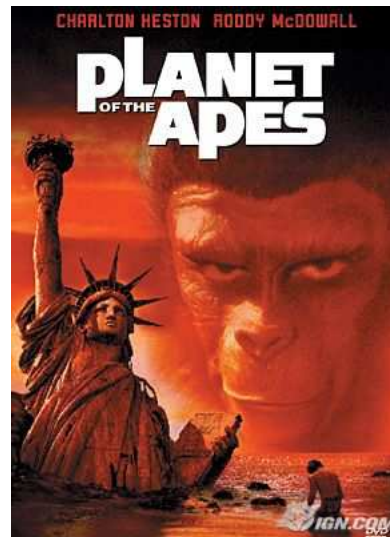
—→ Una maquina del tiempo que funciona en una dirección

Viaje a **Sirio** (8,5 años-luz) a $v = 0,99c$ ($\gamma^{-1} = 0,02$):

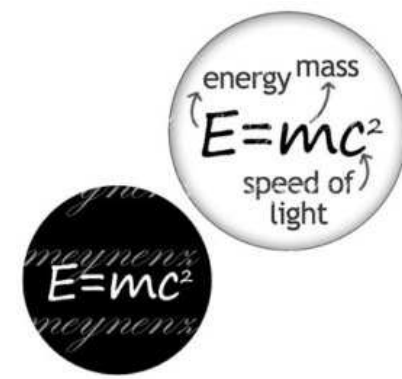
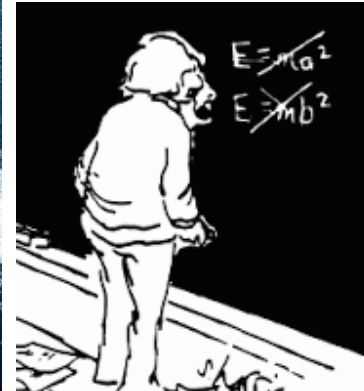
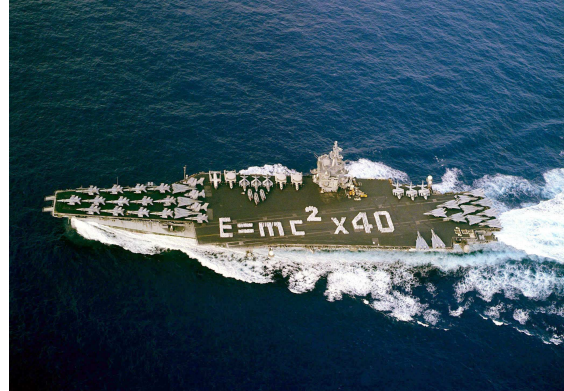
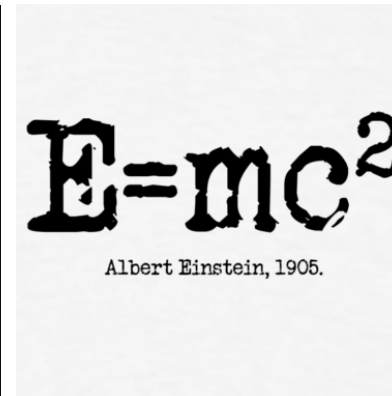
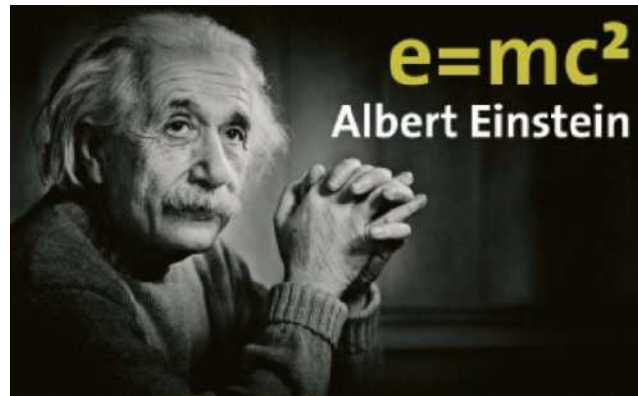
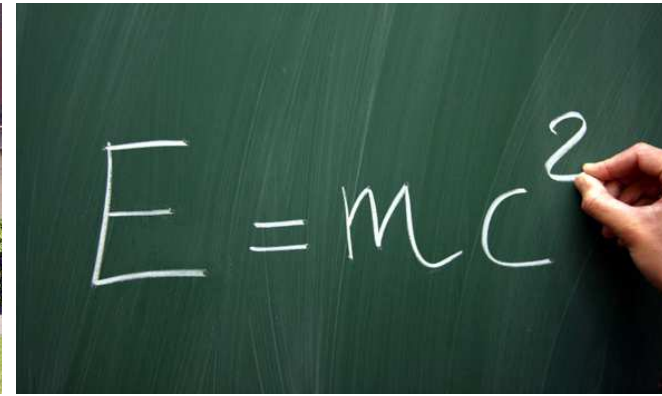
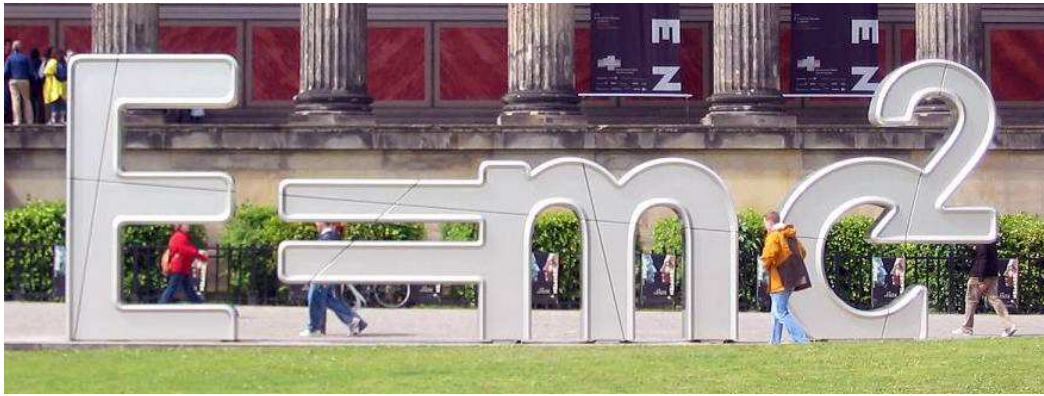
- Gemelo en la Tierra: $t = 19 \text{ años-luz} / 0,99c = 19,2 \text{ años}$
- Gemelo viajero: $t' = \gamma^{-1}t = 0,02 \cdot 19,2 \text{ años} = 0,38 \text{ años} = 4,5 \text{ meses}$

Viaje a la **Estrella Polar** (270 años-luz) a $v = 0,999c$ ($\gamma^{-1} = 0,002$):

- Gemelo en la Tierra: $t = 540 \text{ años-luz} / 0,999c = 540,5 \text{ años}$
- Gemelo viajero: $t' = \gamma^{-1}t = 0,002 \cdot 540,5 \text{ años} = 1,08 \text{ años}$



D. Equivalencia de masa y energía



Masa y energía **no se conservan por separado**

Masa y energía **son transformables una en otra**

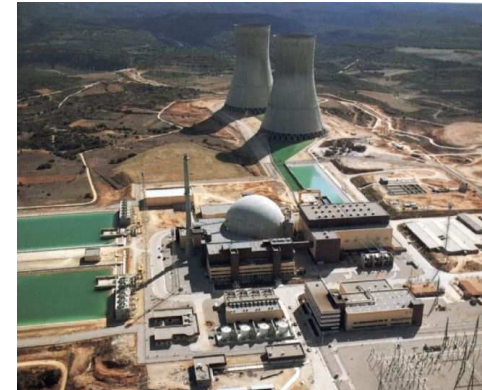
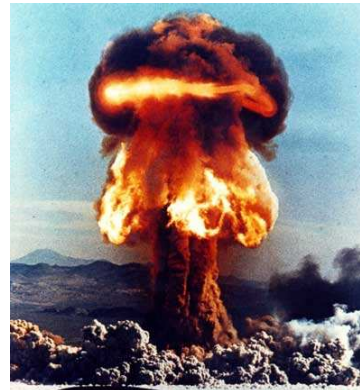
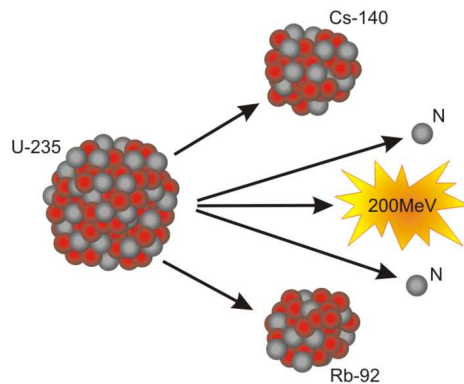
→ 1 g de materia = 2 500 000 ℓ de gasolina

Masa y energía **no se conservan por separado**

Masa y energía **son transformables una en otra**

→ 1 g de materia = 2 500 000 ℓ de gasolina

Fisión nuclear: $m(U) > m(Cs) + m(Rb)$

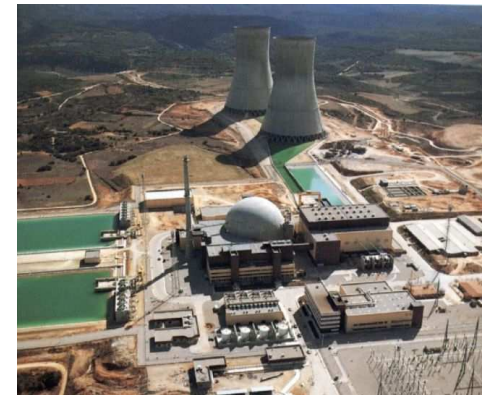
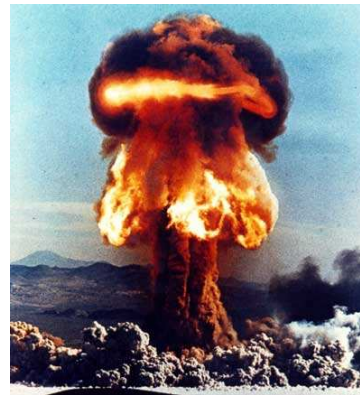
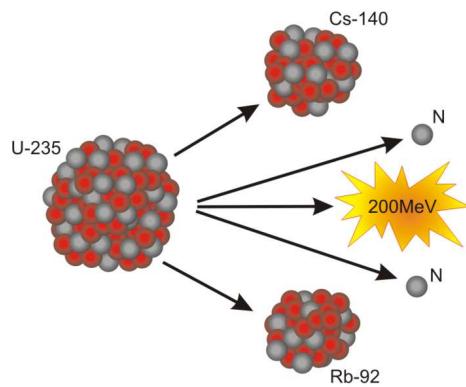


Masa y energía **no se conservan por separado**

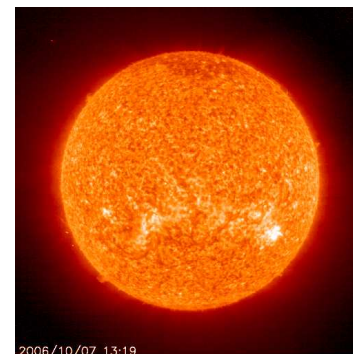
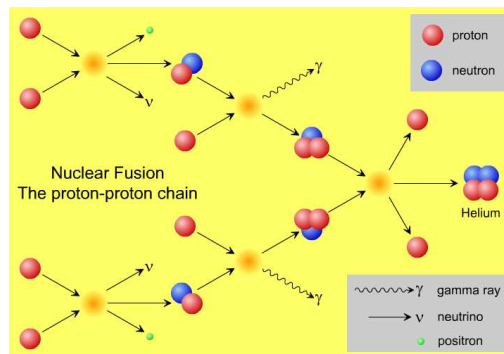
Masa y energía **son transformables una en otra**

→ 1 g de materia = 2 500 000 ℓ de gasolina

Fisión nuclear: $m(U) > m(Cs) + m(Rb)$

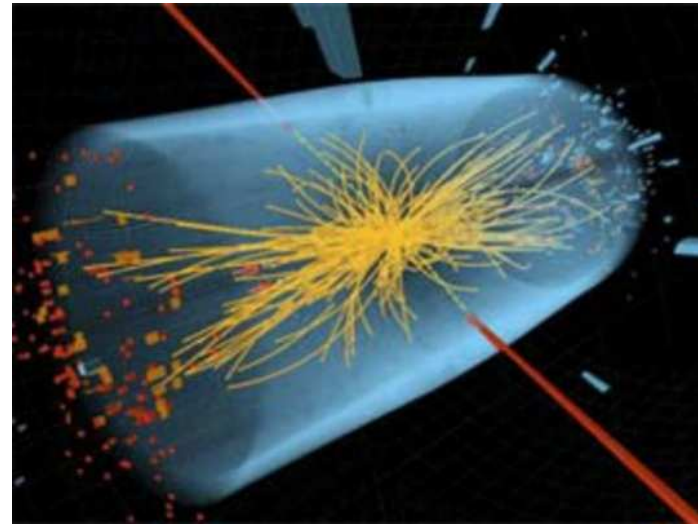
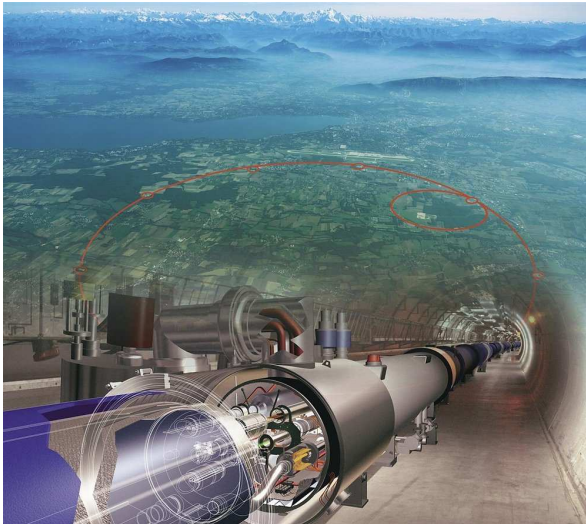


Fusión nuclear: $4m(p) > m(^4He)$



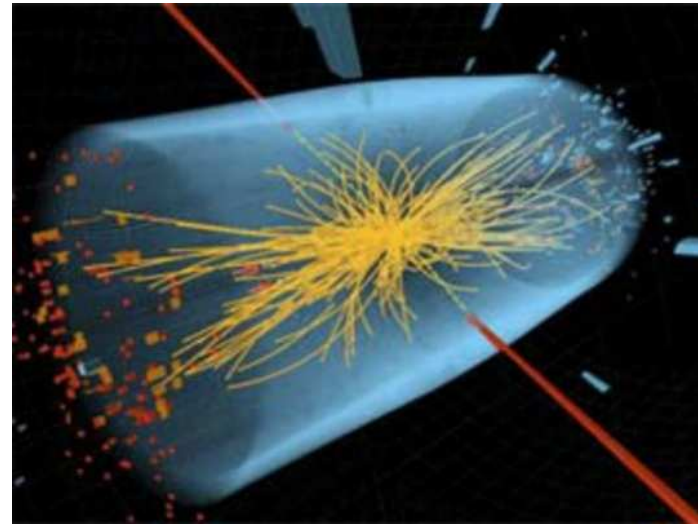
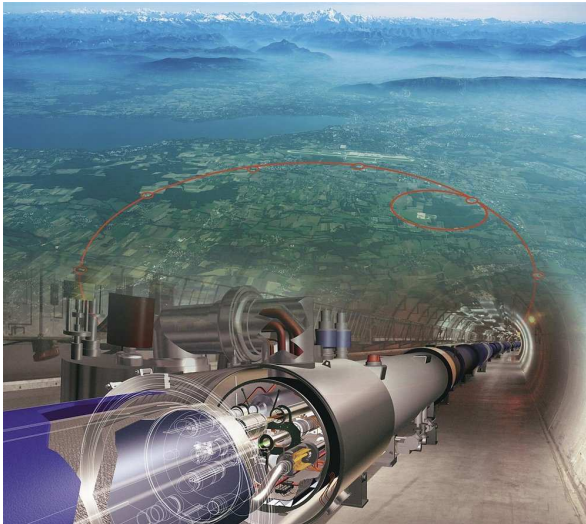
→ Sol pierde 4 300 000 000 kg/s en masa (~ Gran Pirámide de Giza)

Aceleradores de partículas: Convertir energía cinética en partículas nuevas



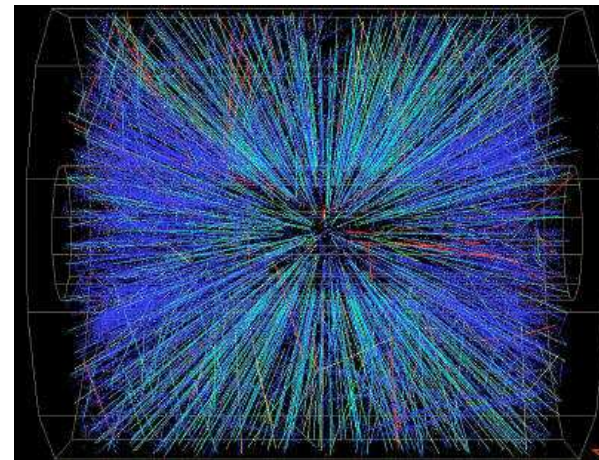
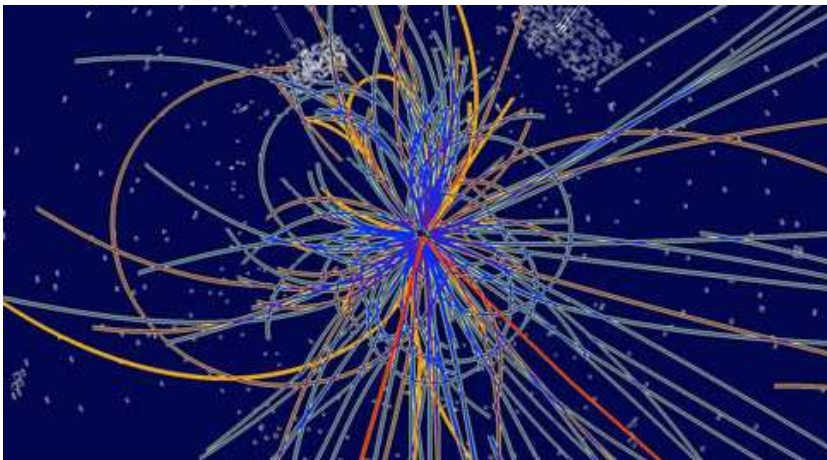
—→ protones a 99,9999991 % de la velocidad de la luz
con energía 7000 veces mayor que su energía en reposo

Aceleradores de partículas: Convertir energía cinética en partículas nuevas



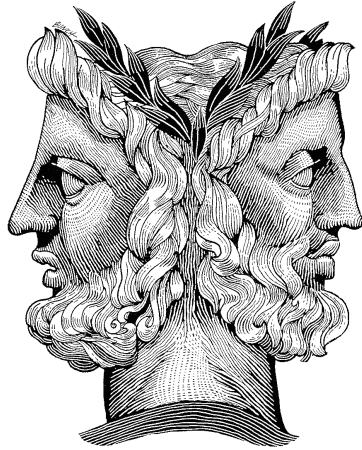
→ protones a 99,9999991 % de la velocidad de la luz
con energía 7000 veces mayor que su energía en reposo

Choque : **creación de partículas!!**



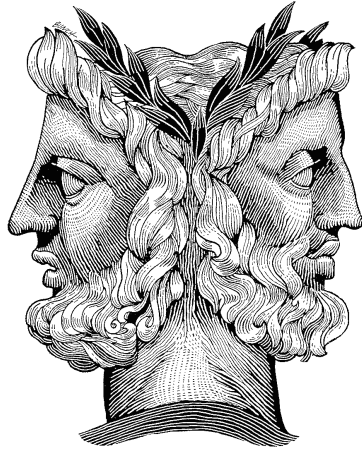
6. Resumen

- Sabíamos que izquierda y derecha, delante y detras, arriba y abajo son **conceptos relativos**



6. Resumen

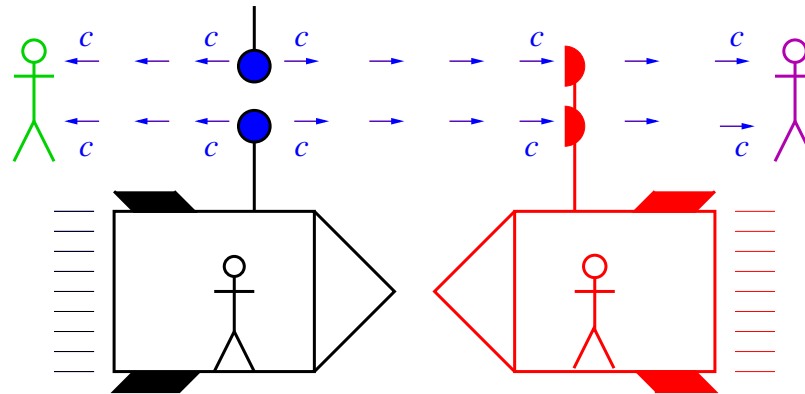
- Sabíamos que izquierda y derecha, delante y detras, arriba y abajo son **conceptos relativos**



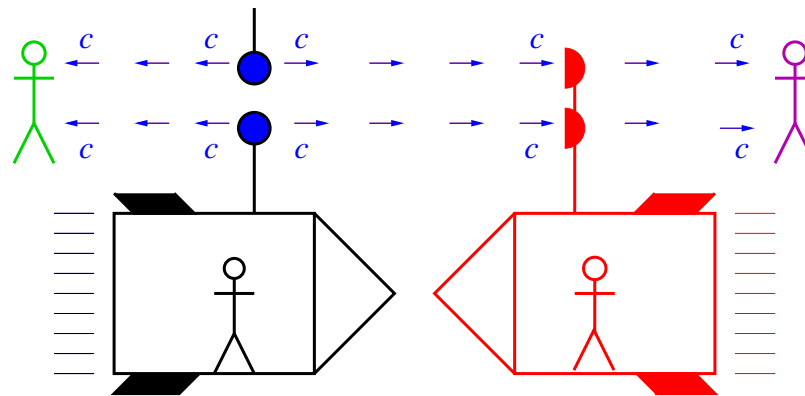
- Hemos visto que **reposo y movimiento uniforme rectilíneo** también



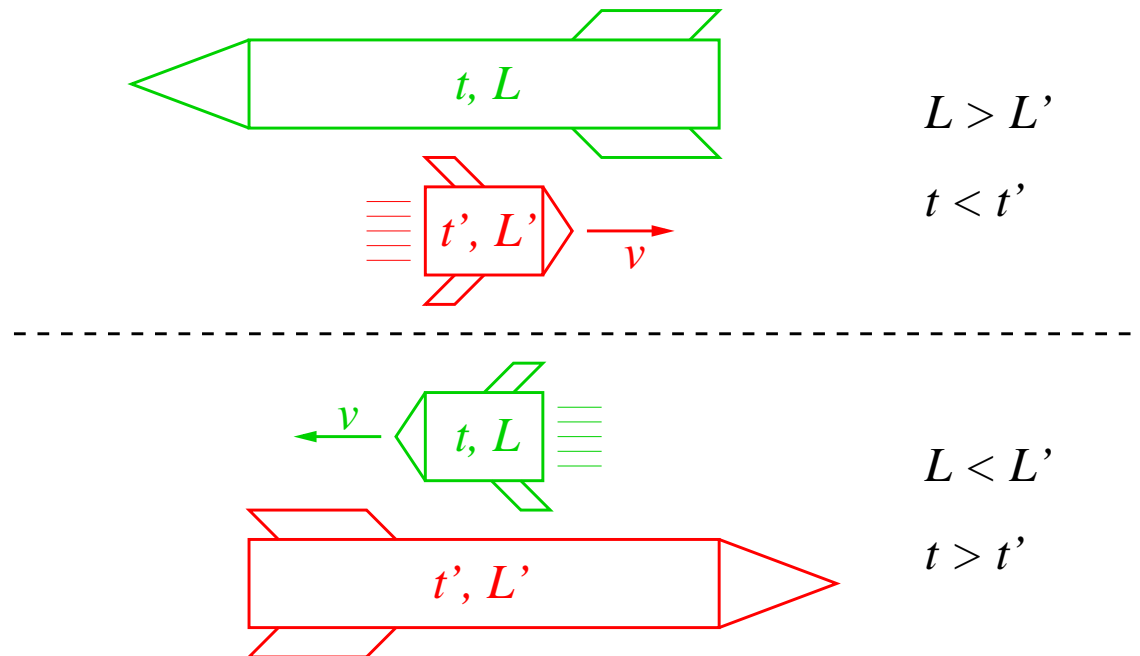
- **Velocidad de la luz** es la misma para todos



- **Velocidad de la luz** es la misma para todos



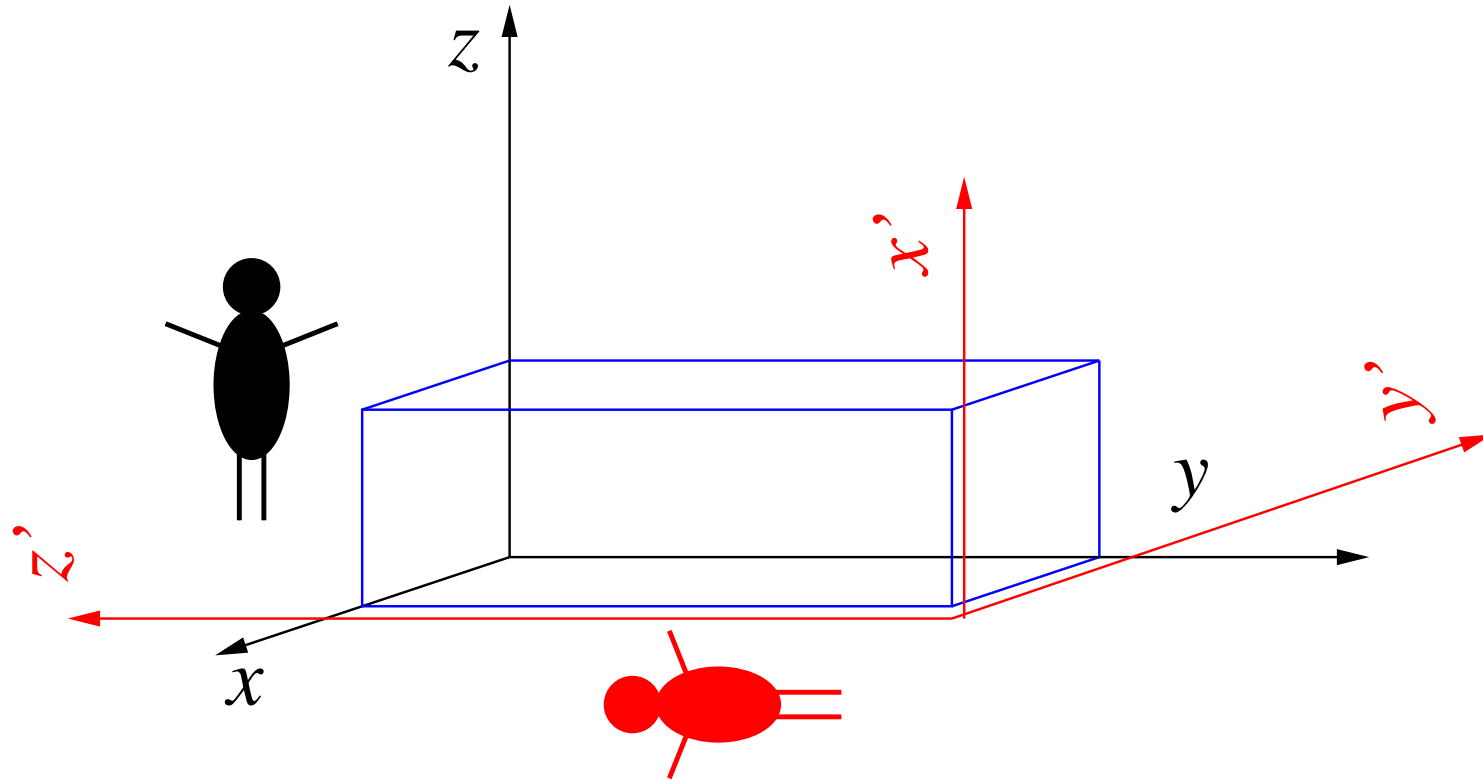
- El **tiempo** y las **longitudes** también se vuelven **relativos**



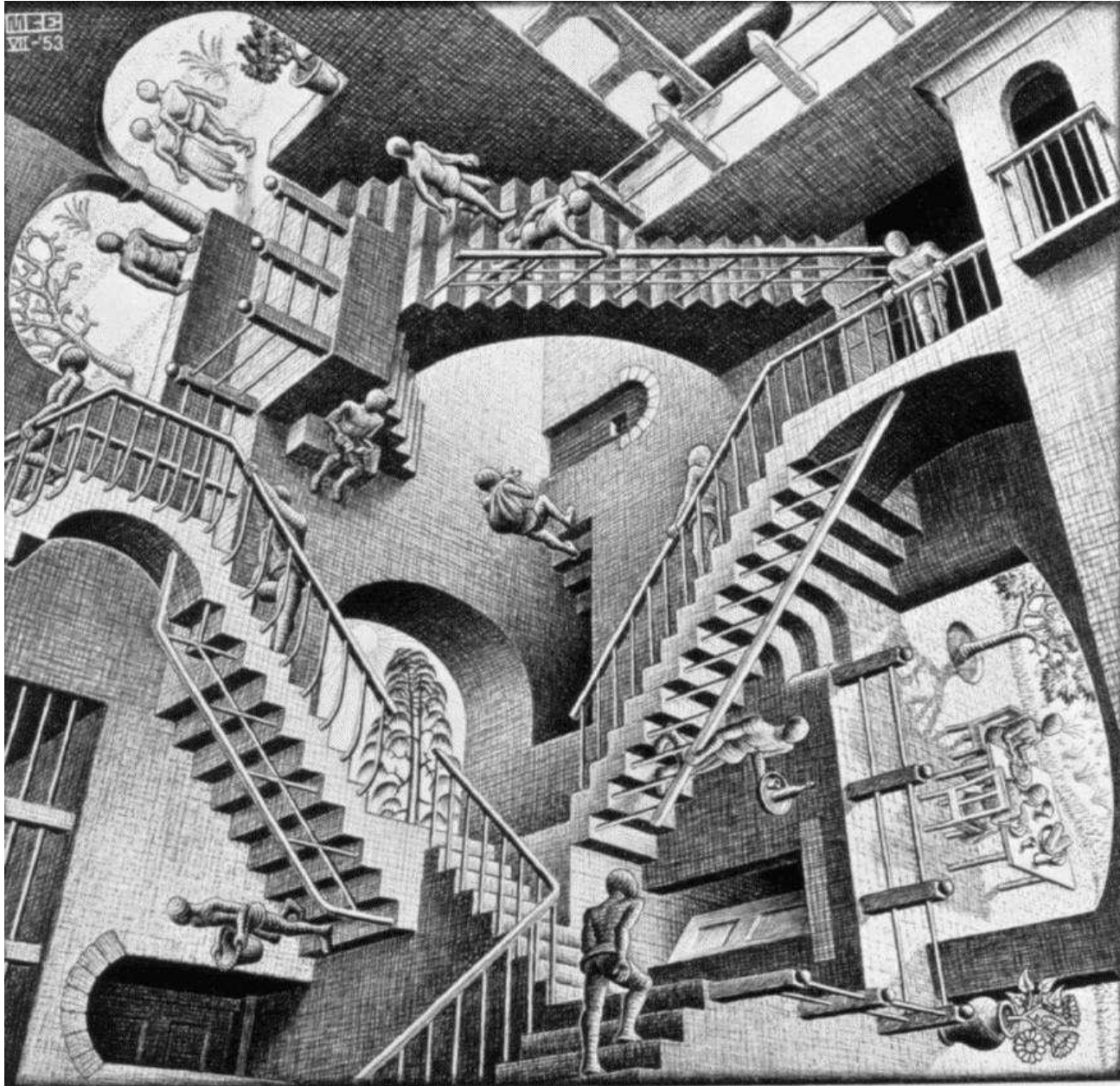
Gran lección de la Teoría de la Relatividad:

Nuestra visión depende de nuestro sistema de referencia

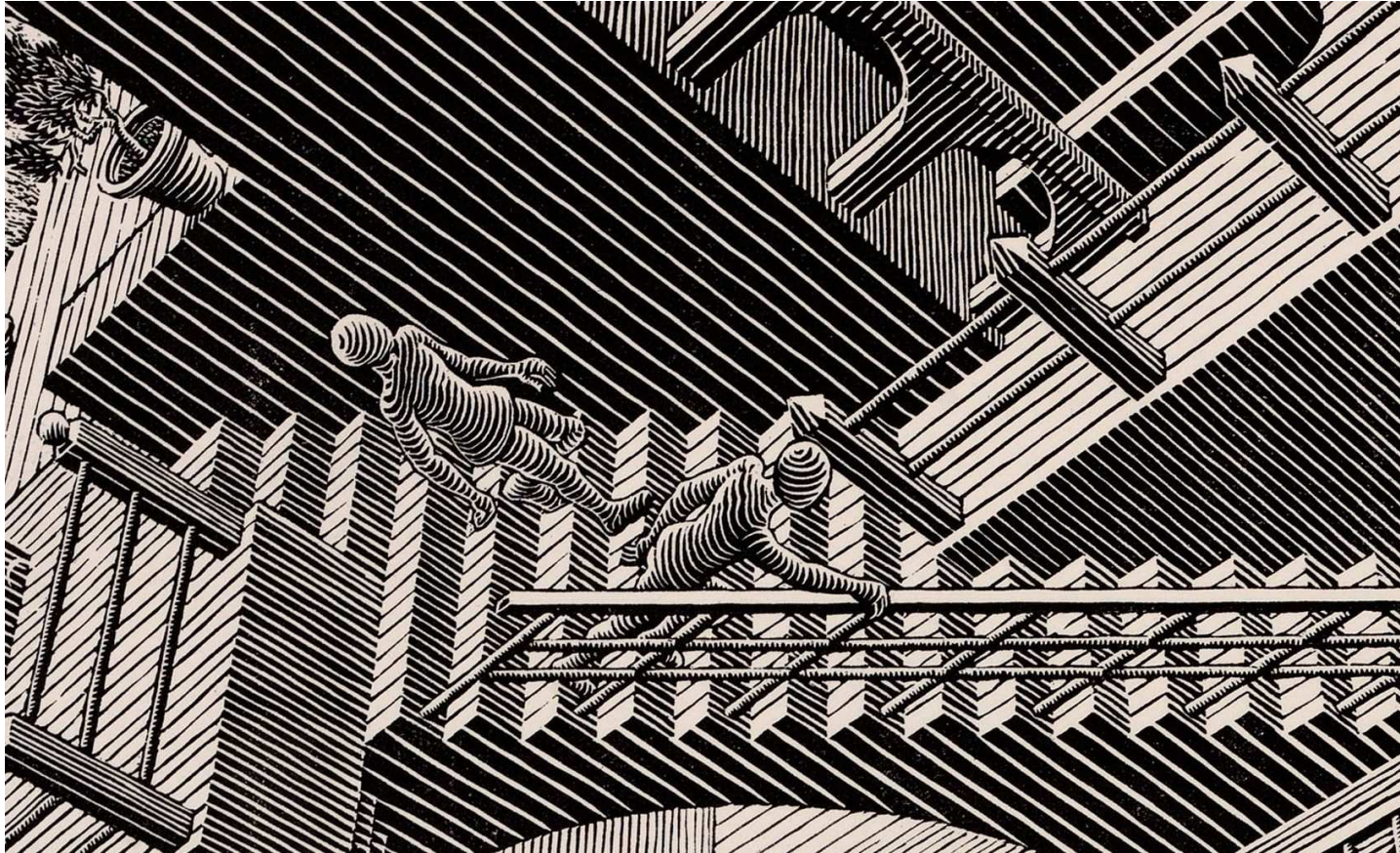
Hay que intentar ver la realidad objetiva de manera independiente de observadores particulares



→ El armario *realmente* es más ancho que alto?



M.E.C. Escher: *Relatividad* (1953)

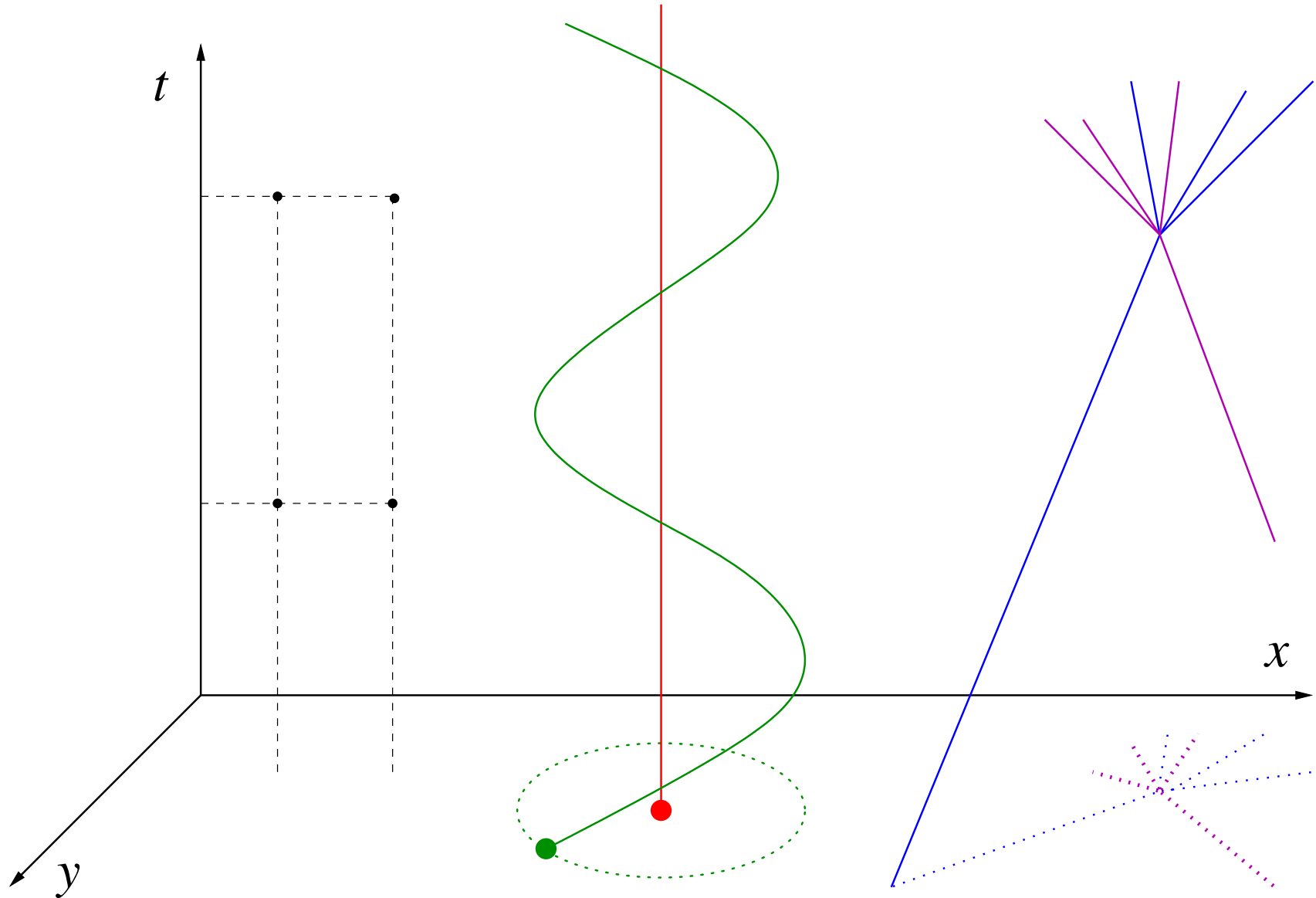


A. Einstein: *La relatividad nos enseña la conexión entre las diferentes descripciones de la misma realidad.*

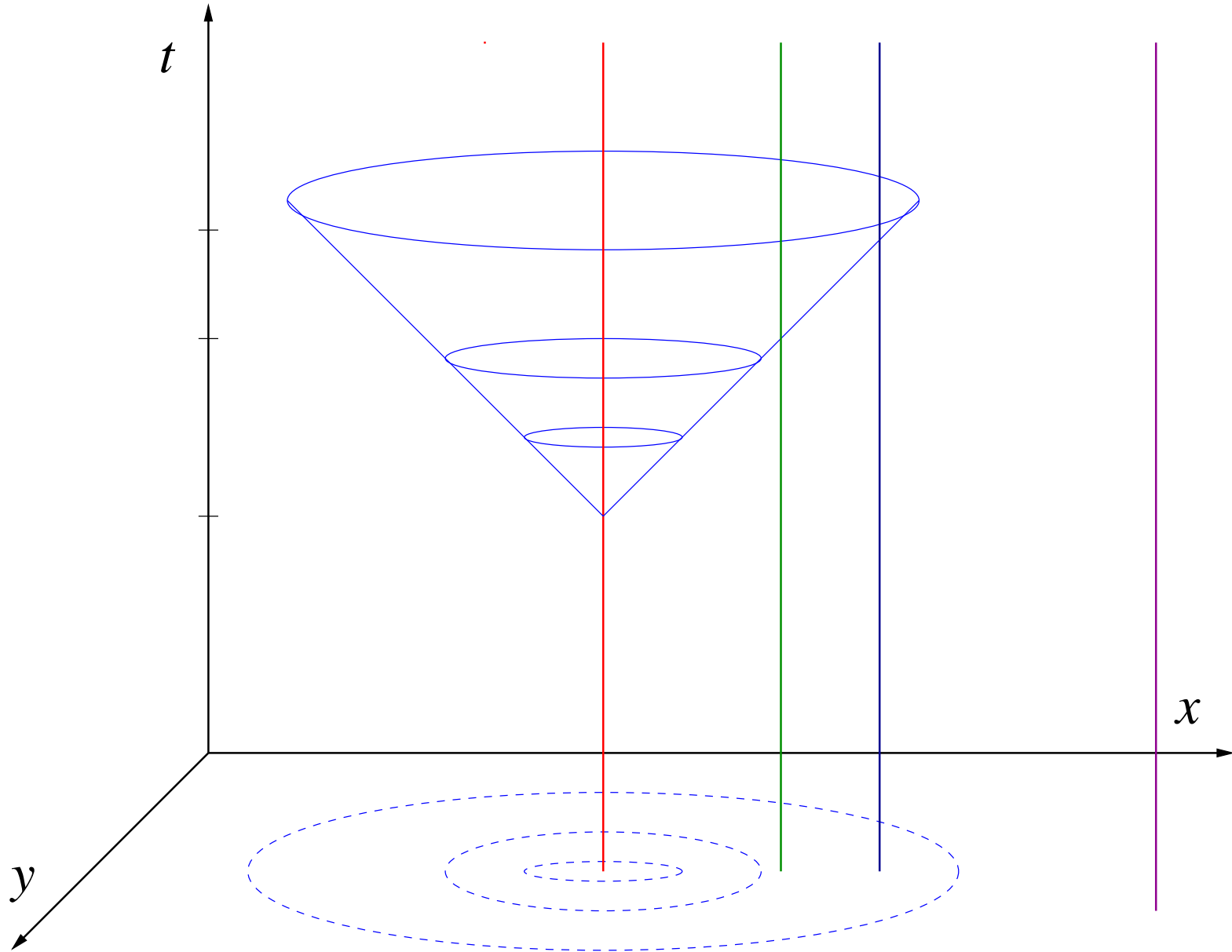
¡Gracias por vuestra atención!

Evento = suceso en cierto momento y en cierto lugar

Lineas de universo = película de las trayectorias de las partículas

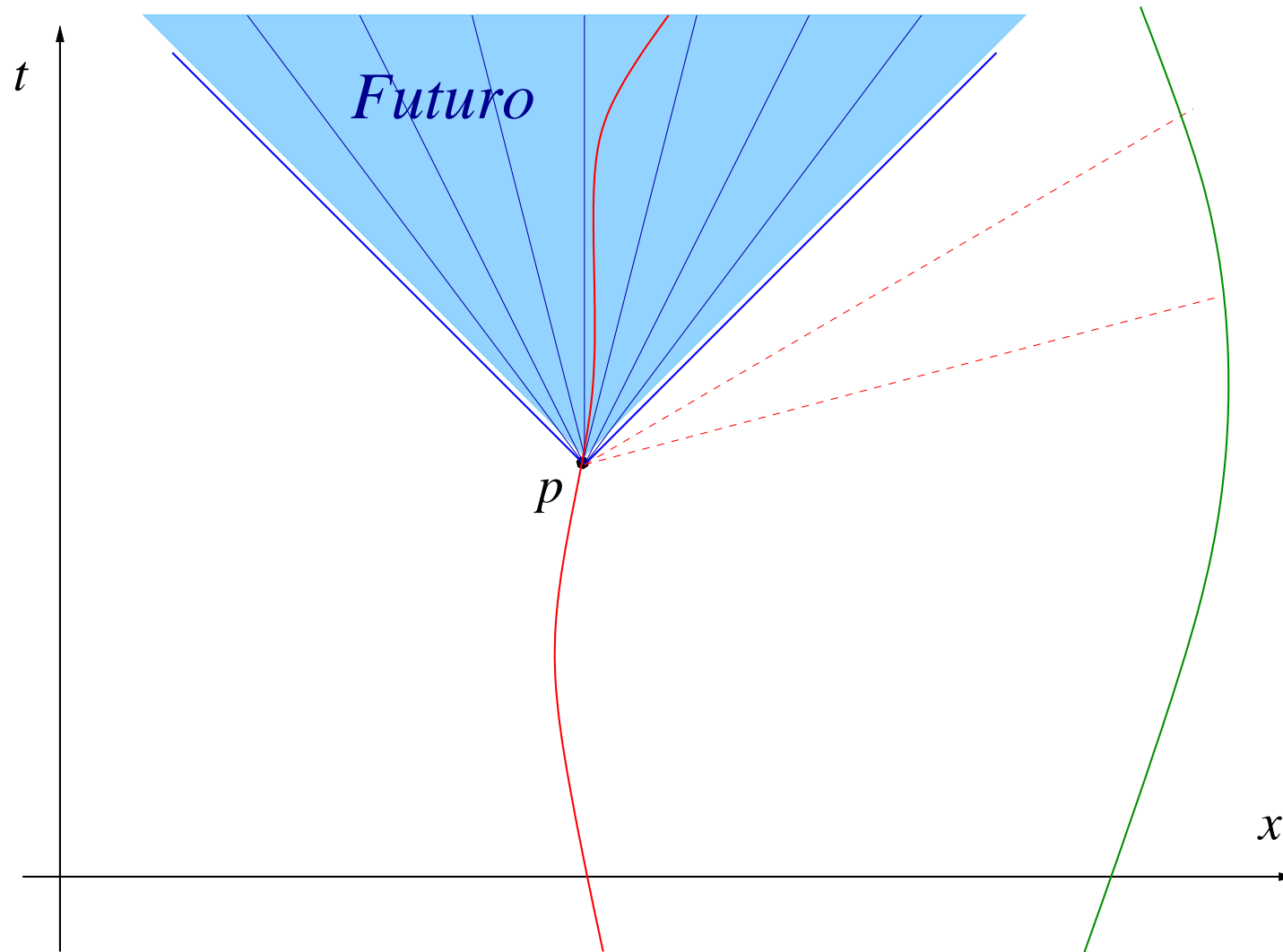


Cono de luz = película de las trayectorias de la luz



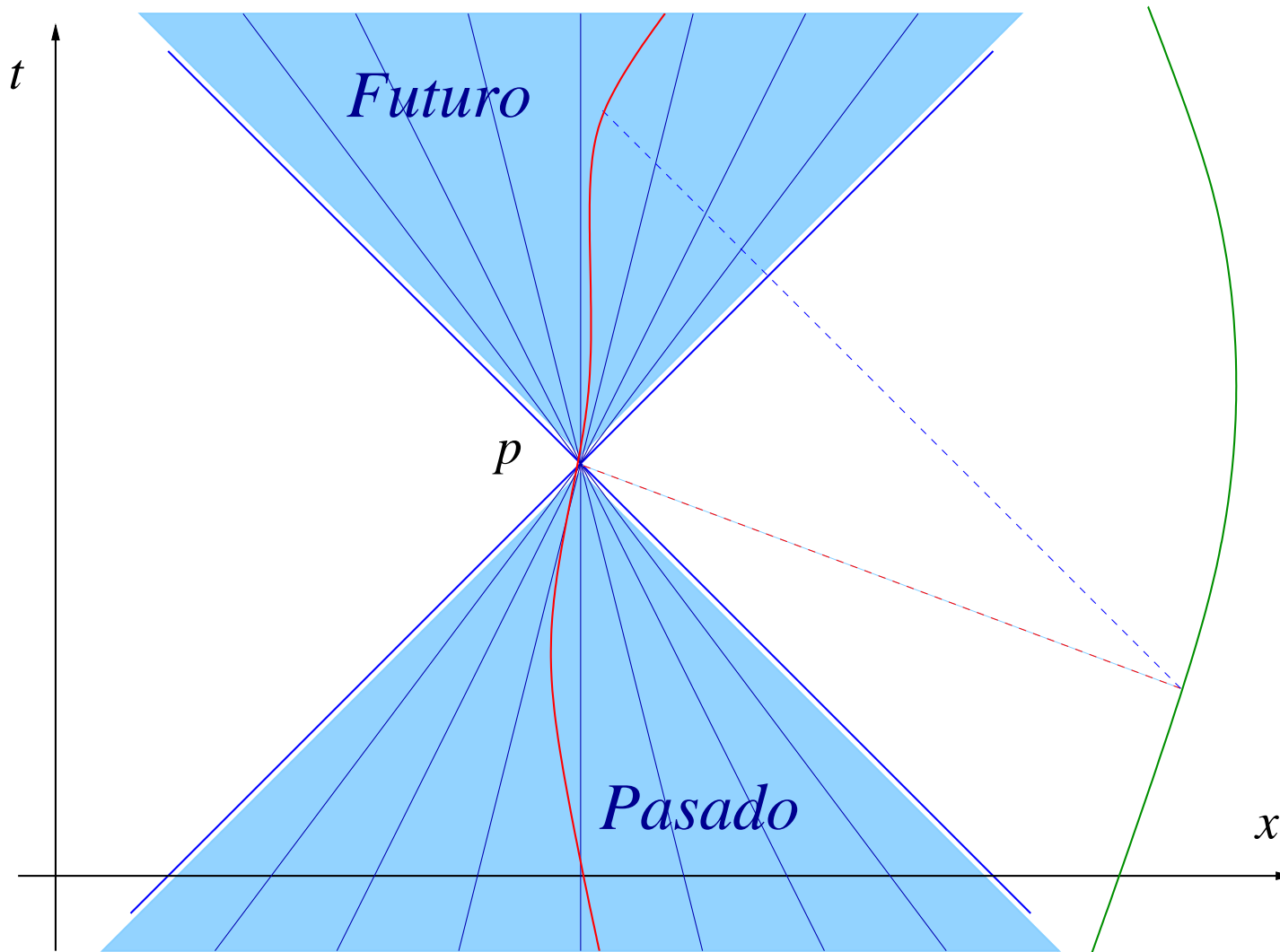
Velocidad de la luz = **velocidad máxima permitida**

Cono de luz \longrightarrow relaciones causales entre **eventos**

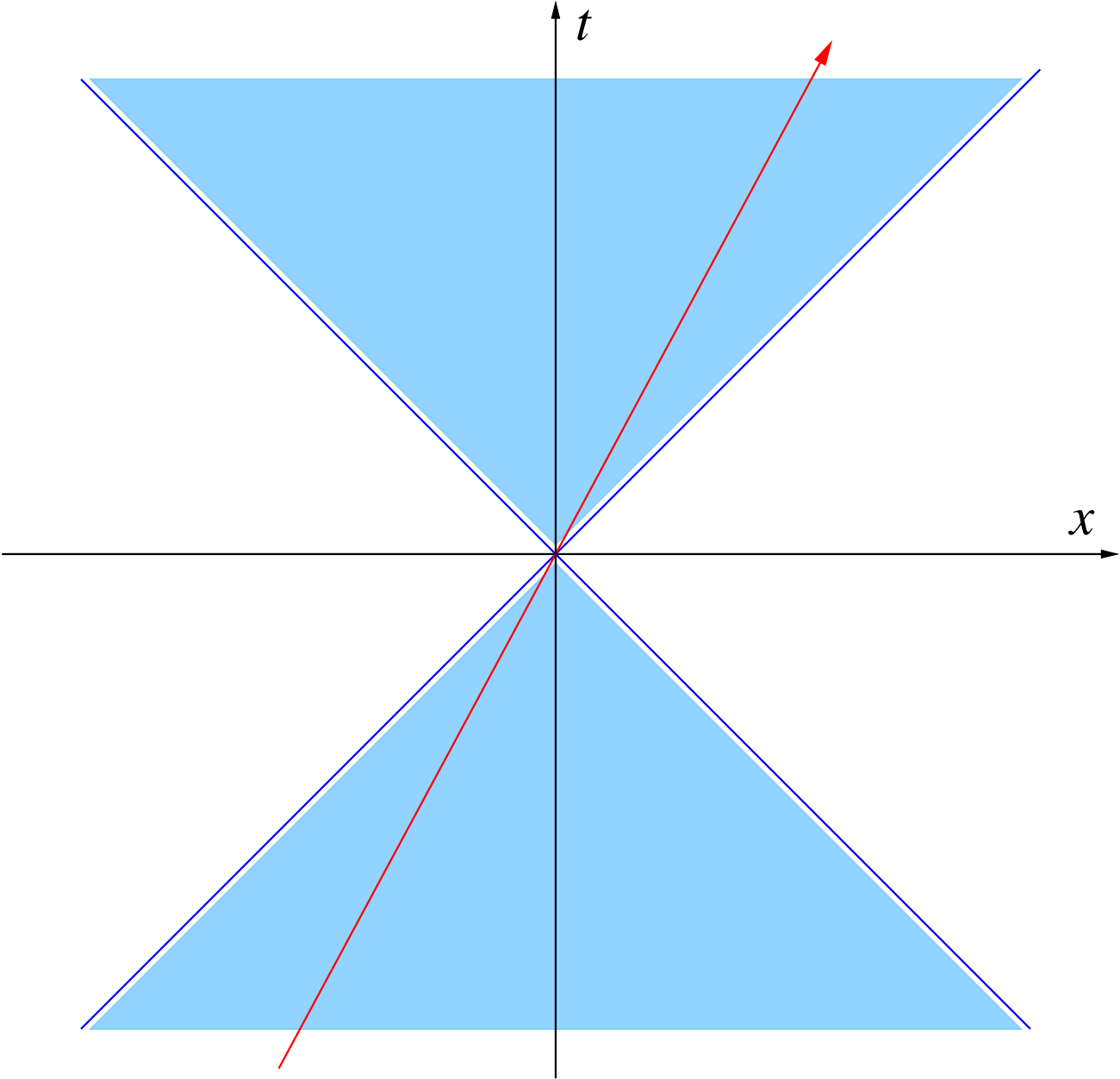


Velocidad de la luz = **velocidad máxima permitida**

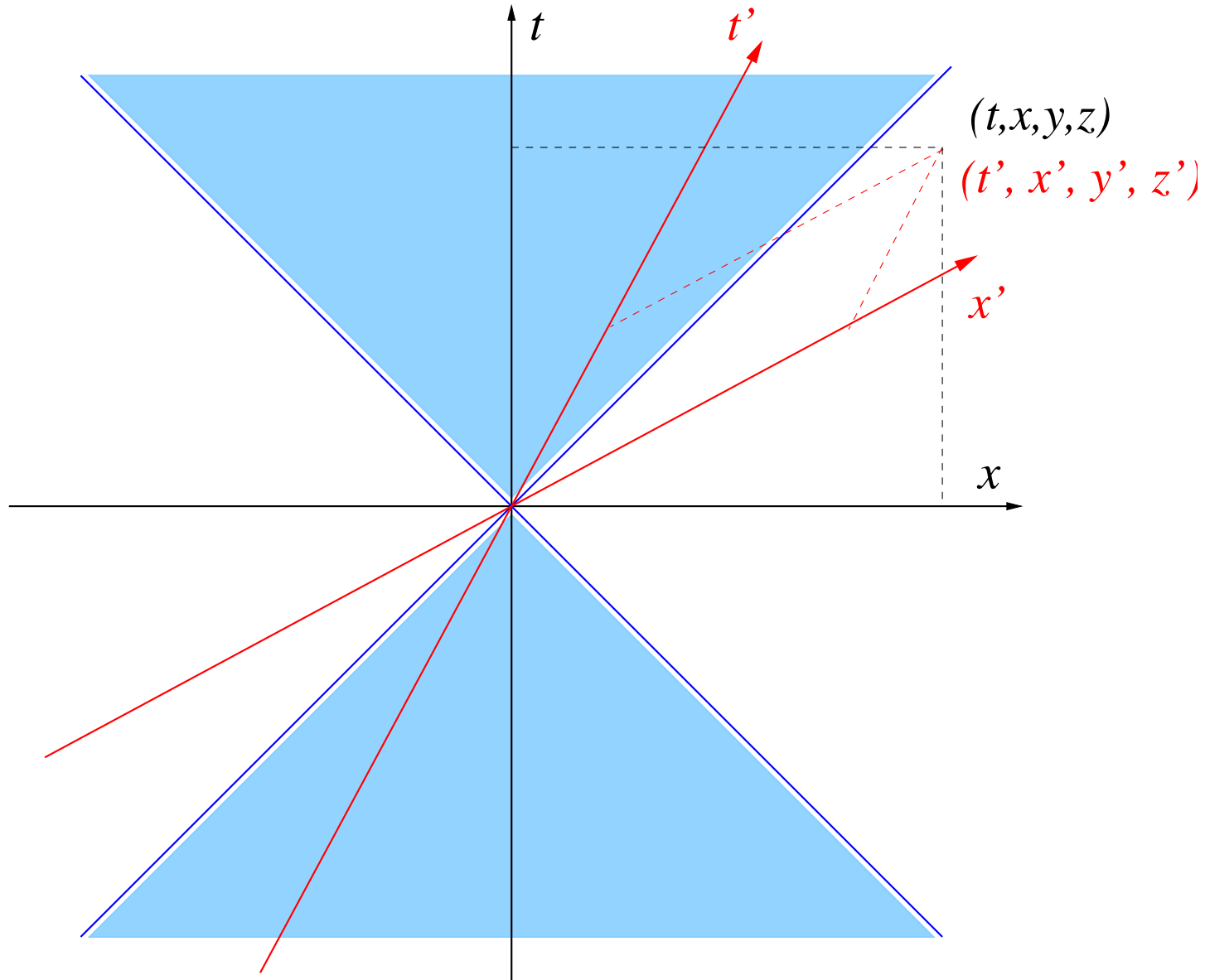
Cono de luz \longrightarrow relaciones causales entre **eventos**



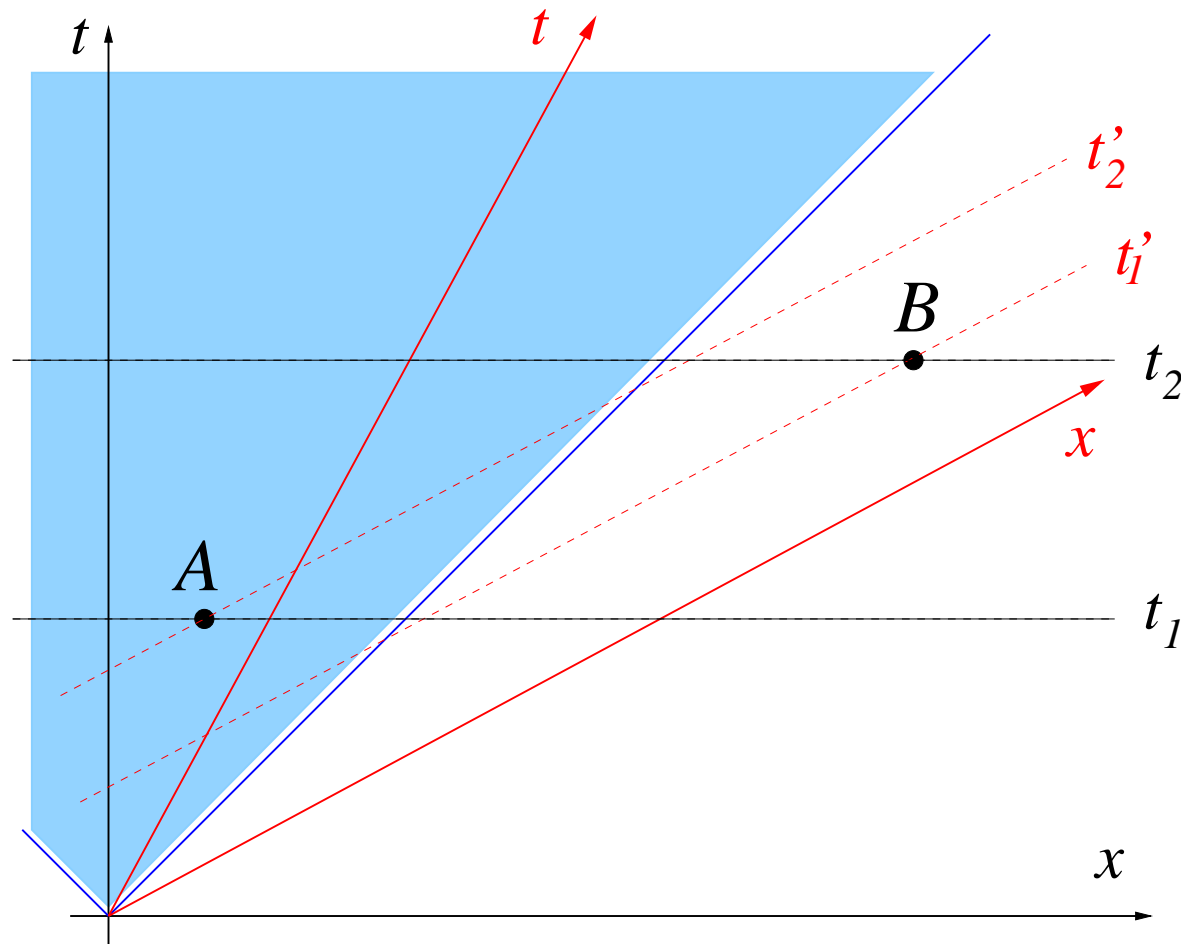
Observador negro ve pasar un obseravador rojo:



Observador negro y observador rojo son ambos observadores válidos



Dos eventos A y B visto por ambos observadores

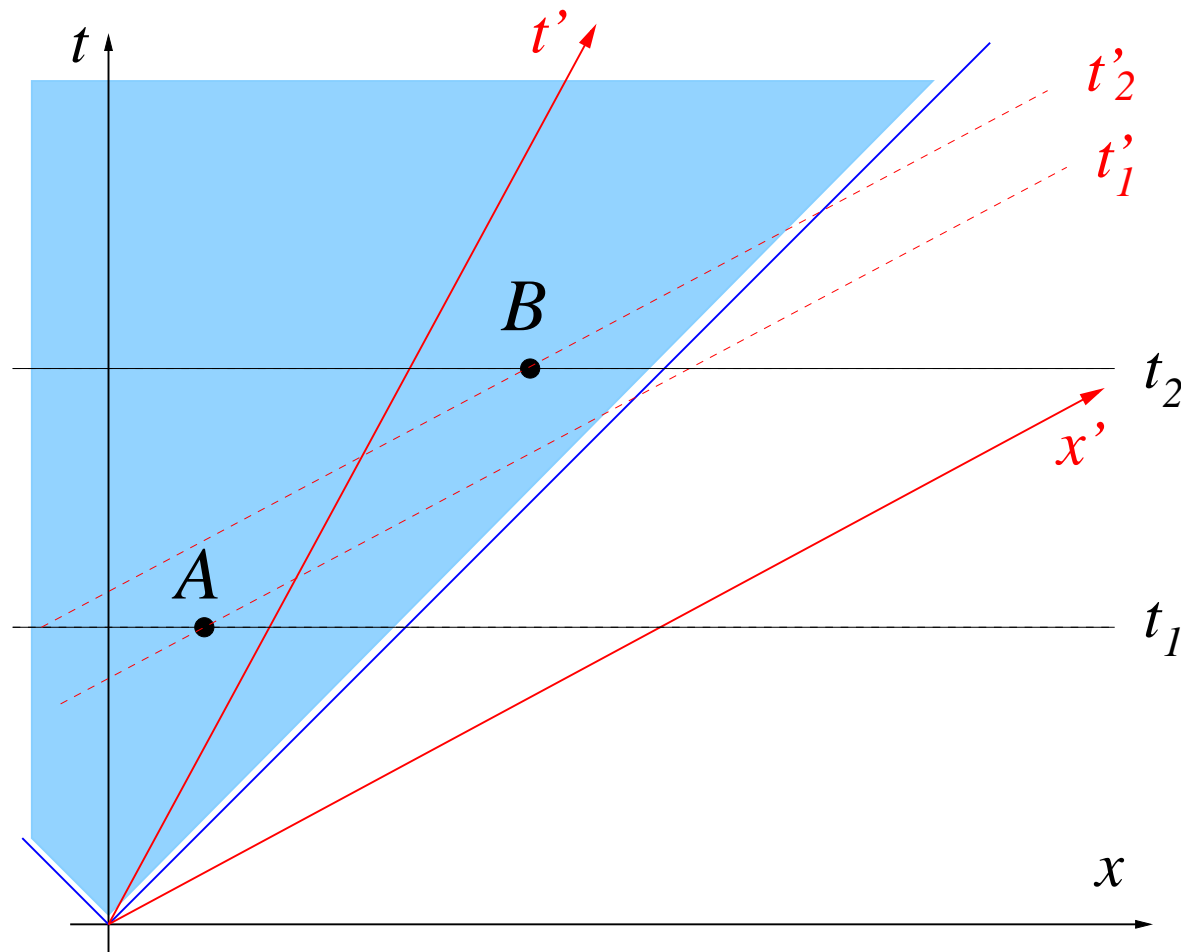


Observador negro: A pasa antes que B

Observador rojo: B pasa antes que A

→ ¿Problemas con causalidad?

Dos eventos A y B visto por ambos observadores



Observador negro: A pasa antes que B

Observador rojo: A pasa antes que B

→ **Cronología fijada si hay relación causal**