



Viajes en el tiempo:

Relatividad y ficción



Bert Janssen

Dpto. de Física Teórica y del Cosmos

San Agustín de Hipona (354 - 430):

¿Qué pues es el tiempo?

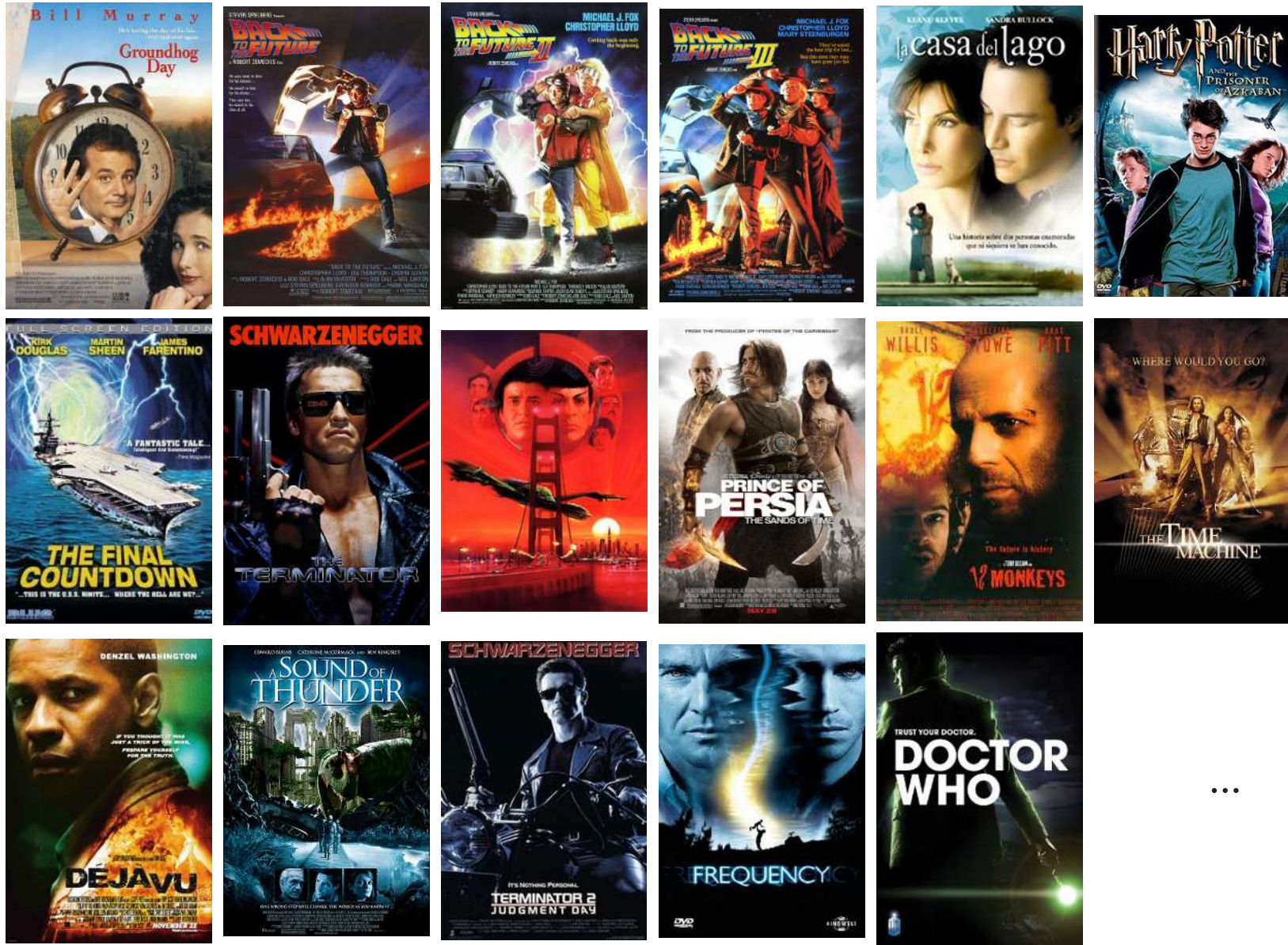
Si nadie me pregunta, sé lo que es.

Si deseo explicárselo a aquel que me lo pregunta, no lo sé...



- 700 A.C - 400 D.C.: Majabhárata: épica hindú
- 1895: H.G. Wells: La máquina del tiempo

- 700 A.C - 400 D.C.: Majabhárata: épica hindú
- 1895: H.G. Wells: La máquina del tiempo



...

1. Problema con viajar en el tiempo: Creación de paradojas temporales

- Paradoja del abuelo:

1. Problema con viajar en el tiempo: Creación de paradojas temporales

- Paradoja del abuelo:

Viajas al pasado y matas a tu abuelo antes de nacer tu padre...

⇒ tú no naces y no puedes viajar al pasado

⇒ tu abuelo no muere y tu puedes nacer

⇒ Viajas al pasado y matas a tu abuelo

⇒ ...

1. Problema con viajar en el tiempo: Creación de paradojas temporales

- Paradoja del abuelo:

Viajas al pasado y matas a tu abuelo antes de nacer tu padre...

⇒ tú no naces y no puedes viajar al pasado

⇒ tu abuelo no muere y tu puedes nacer

⇒ Viajas al pasado y matas a tu abuelo

⇒ ...

- Paradoja de causalidad:

1. Problema con viajar en el tiempo: Creación de paradojas temporales

■ Paradoja del abuelo:

Viajas al pasado y matas a tu abuelo antes de nacer tu padre...

- ⇒ tú no naces y no puedes viajar al pasado
- ⇒ tu abuelo no muere y tu puedes nacer
- ⇒ Viajas al pasado y matas a tu abuelo
- ⇒ ...

■ Paradoja de causalidad:

- Vuelves la pasado y tienes un hijo con una chica que resulta ser tu propia madre
 - ⇒ tú eres tu propio padre, abuelo, bisabuelo, ...
 - ⇒ tu material genético paterno no tiene origen

1. Problema con viajar en el tiempo: Creación de paradojas temporales

■ Paradoja del abuelo:

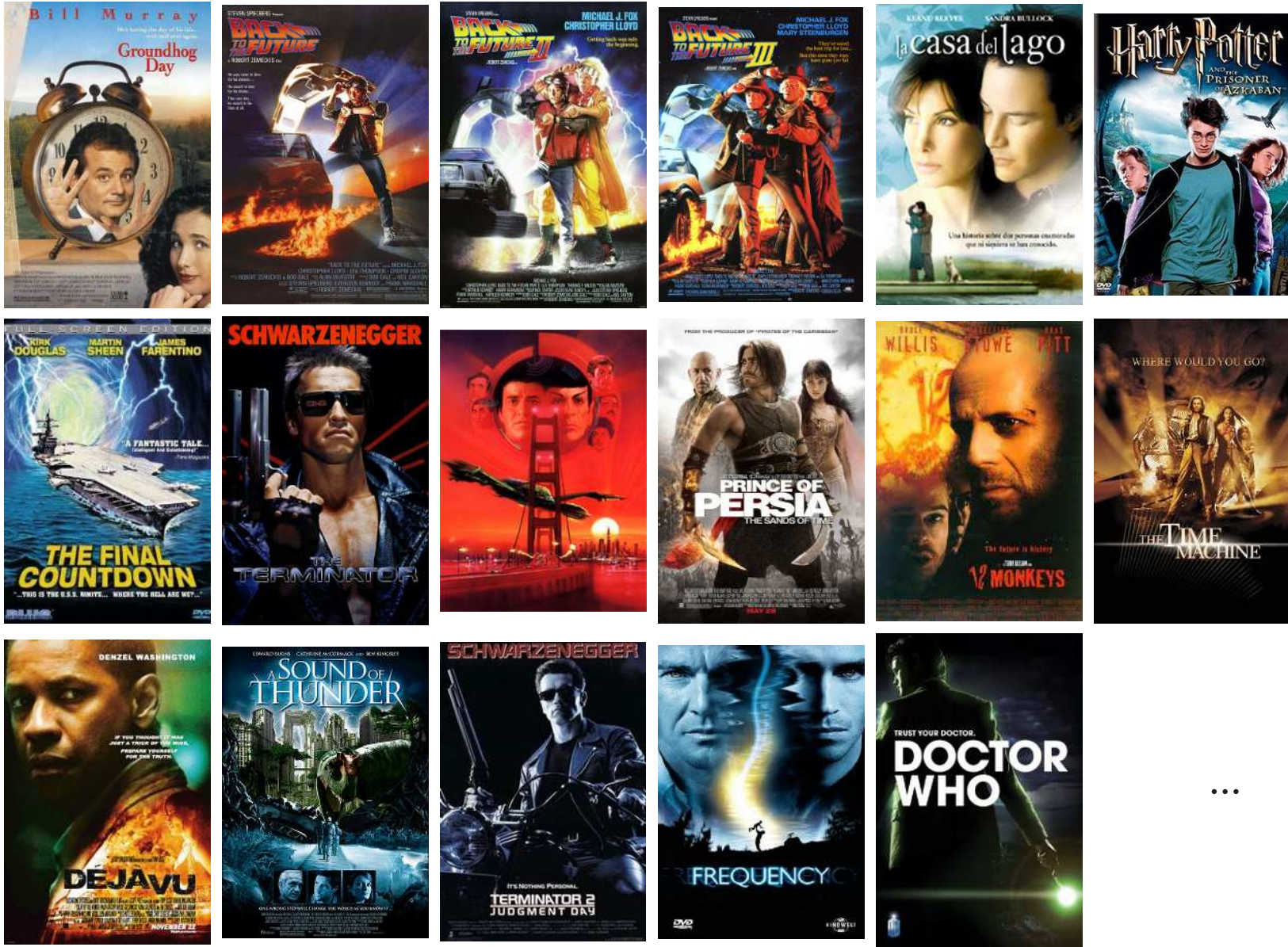
Viajas al pasado y matas a tu abuelo antes de nacer tu padre...

- ⇒ tú no naces y no puedes viajar al pasado
- ⇒ tu abuelo no muere y tu puedes nacer
- ⇒ Viajas al pasado y matas a tu abuelo
- ⇒ ...

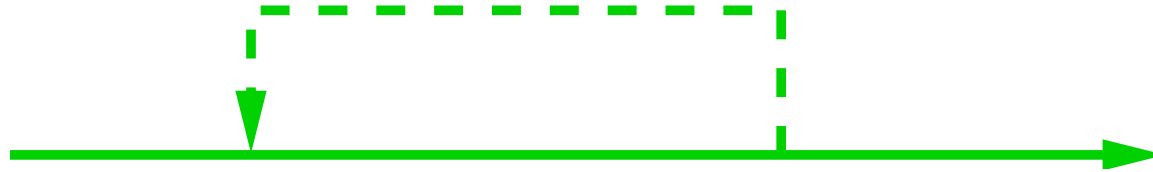
■ Paradoja de causalidad:

- Vuelves la pasado y tienes un hijo con una chica que resulta ser tu propia madre
 - ⇒ tú eres tu propio padre, abuelo, bisabuelo, ...
 - ⇒ tu material genético paterno no tiene origen
- Recibes la visita de tu yo futuro que te entrega los planes de una máquina del tiempo
 - ⇒ ¿quién ha diseñado la máquina del tiempo?

Posibles soluciones: (de Hollywood)

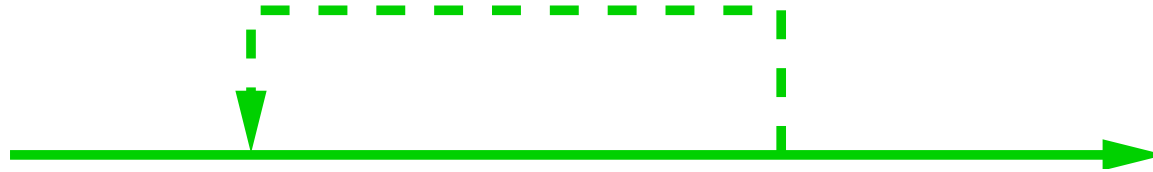


- **La historia inflexible:** todo lo que un viajero temporal hace en el pasado es parte de una única historia, que no puedes cambiar.

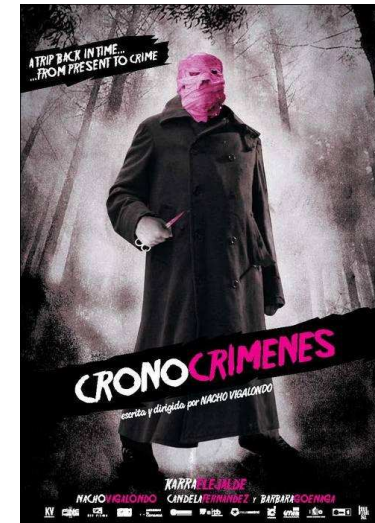
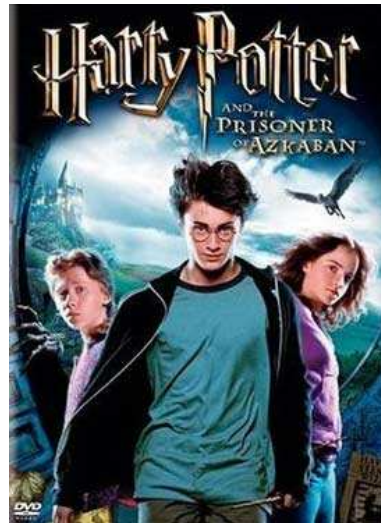
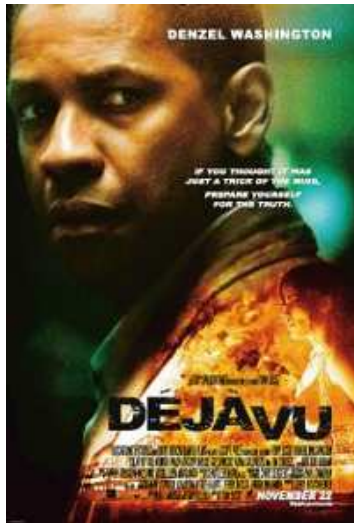


—→ fracasarás en matar a tu abuelo, aunque lo intentas

- **La historia inflexible:** todo lo que un viajero temporal hace en el pasado es parte de una única historia, que no puedes cambiar.



—→ fracasarás en matar a tu abuelo, aunque lo intentas



—→ la historia es inalterable, ¿existe el libre albedrío?

- El tiempo autocorrector:

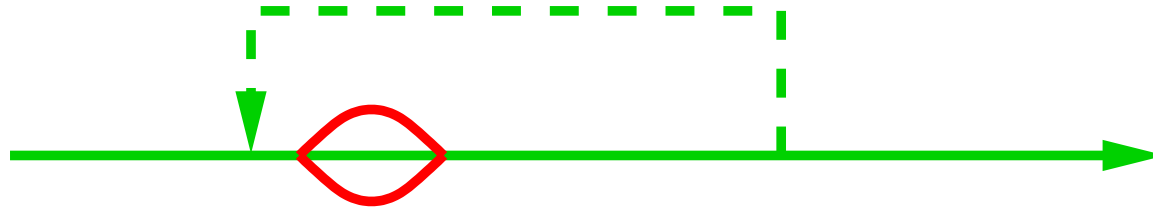
Si cambias el pasado, otras cosas pasan tal que el presente es idéntico.



—→ no logras encontrar a tu abuelo hasta que haya nacido tu padre

- El tiempo autocorrector:

Si cambias el pasado, otras cosas pasan tal que el presente es idéntico.



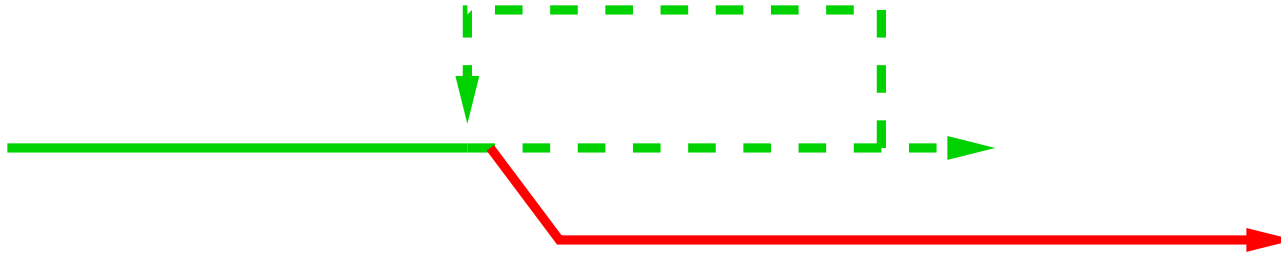
—→ no logras encontrar a tu abuelo hasta que haya nacido tu padre



—→ la historia no está fijada, el destino sí

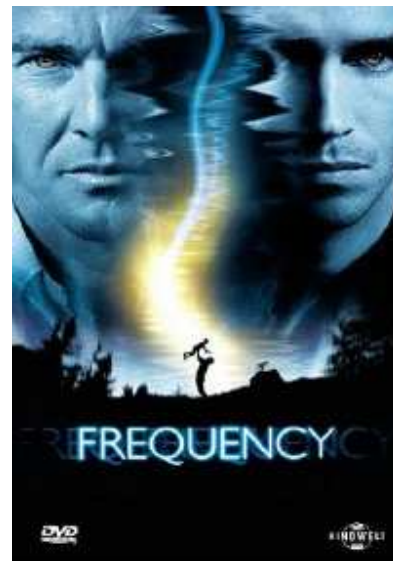
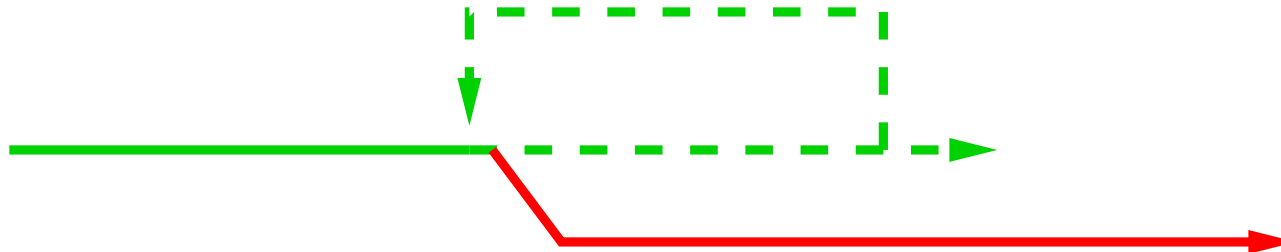
- El tiempo flexible:

Toda la historia cambia desde el momento que hay un cambio en el pasado



- El tiempo flexible:

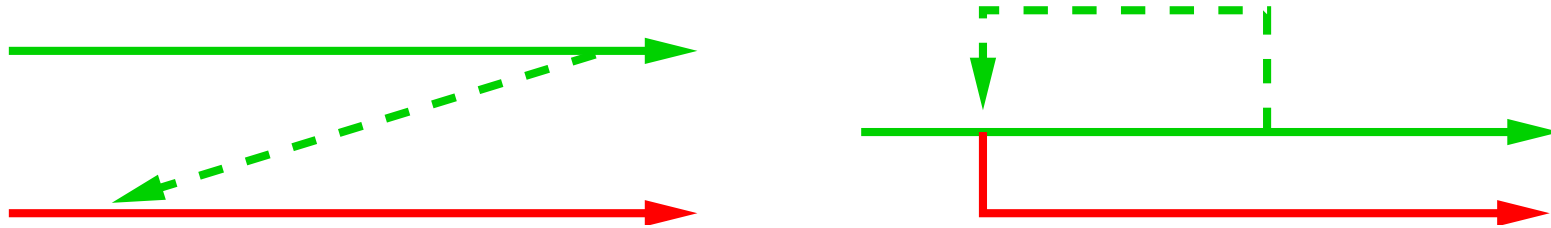
Toda la historia cambia desde el momento que hay un cambio en el pasado



—> el futuro no está escrito

- Múltiples universos (ramificando o no):

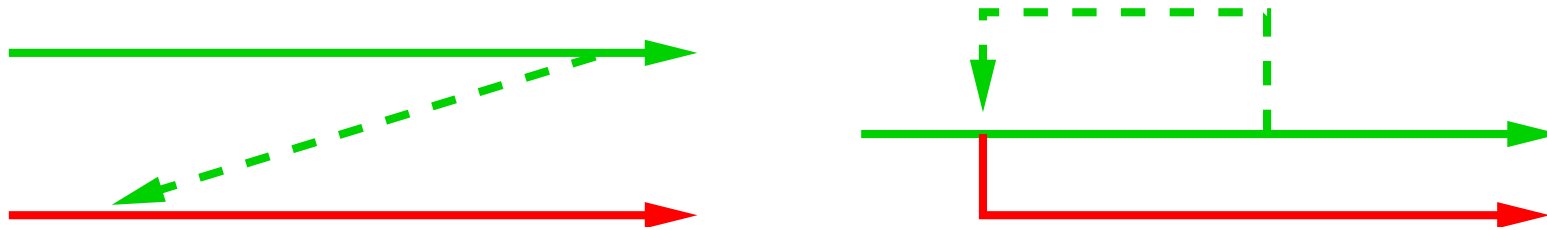
No vuelves al pasado de tu propio universo, sino de otro paralelo



→ matas al abuelo del universo paralelo, no el del tuyo

- Múltiples universos (ramificando o no):

No vuelves al pasado de tu propio universo, sino de otro paralelo



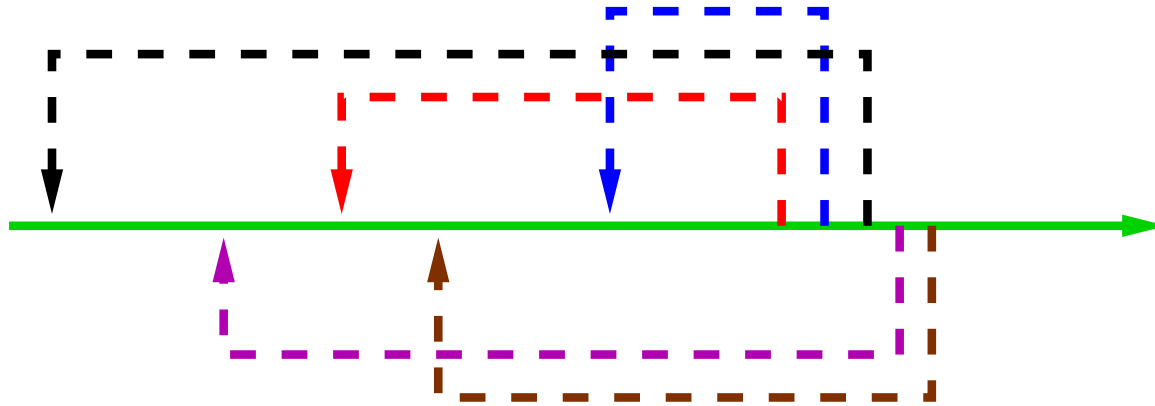
→ matas al abuelo del universo paralelo, no el del tuyo



→ ¿Cuántos universos paralelos hay?

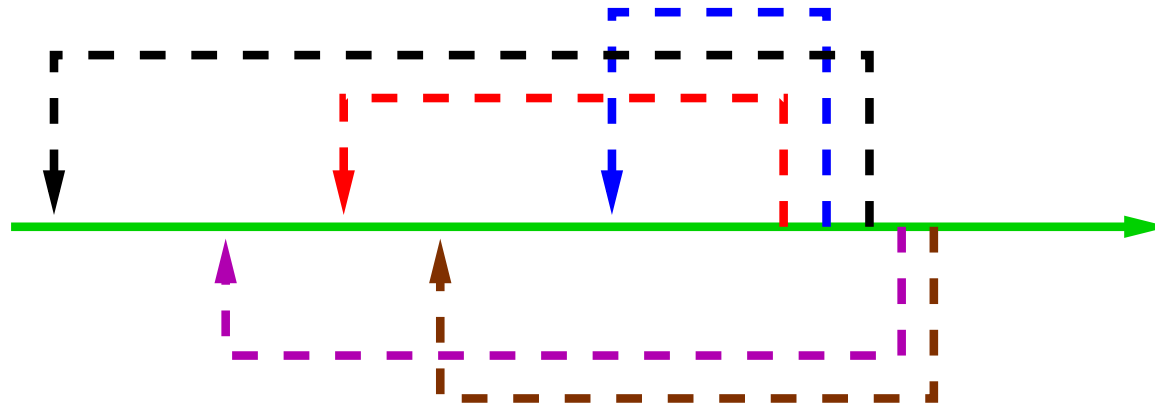
- No se puede porque no ha ocurrido:

Si fuera posible crear una máquina del tiempo, hubieran venido a visitarnos

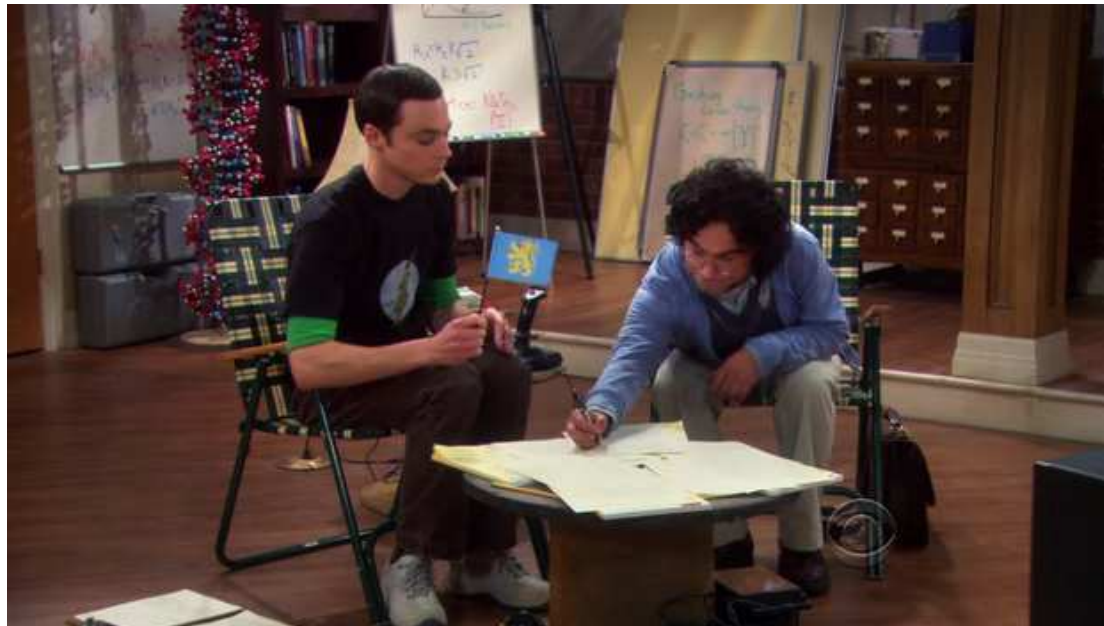


- No se puede porque no ha ocurrido:

Si fuera posible crear una máquina del tiempo, hubieran venido a visitarnos



Hawking: ¿Dónde están los turistas del futuro?



2. La flecha del tiempo

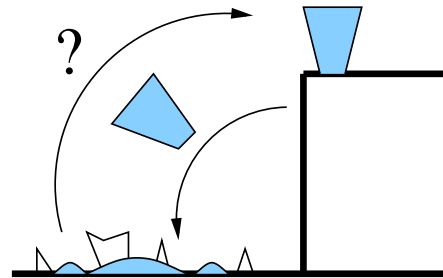
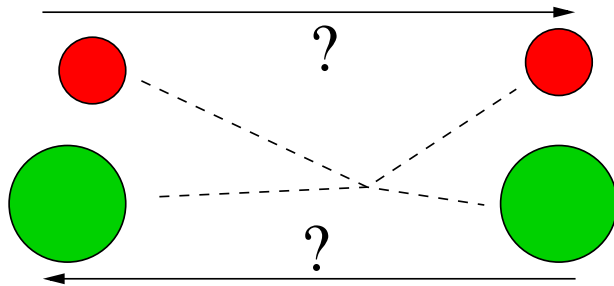
El tiempo fluye en una dirección, no nos podemos parar
—→ clara distinción entre pasado y futuro

2. La flecha del tiempo

El tiempo fluye en una dirección, no nos podemos parar
→ clara distinción entre pasado y futuro



Las leyes de la física son invariantes bajo inversión temporal: $t \rightarrow -t$

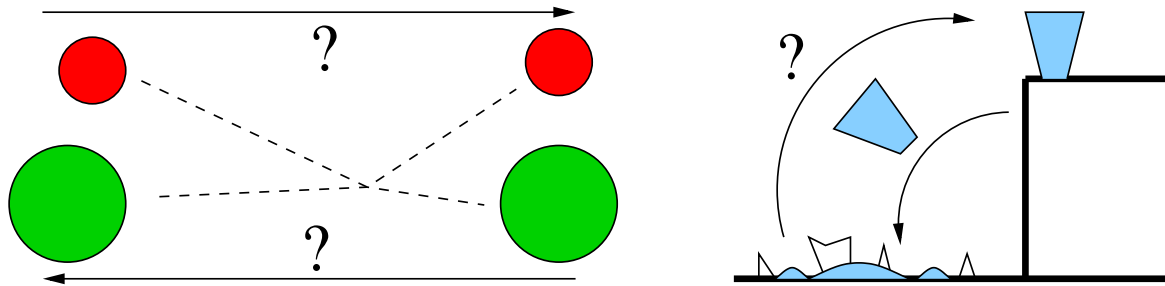


2. La flecha del tiempo

El tiempo fluye en una dirección, no nos podemos parar
→ clara distinción entre pasado y futuro



Las leyes de la física son invariantes bajo inversión temporal: $t \rightarrow -t$



Microscópico: las leyes fundamentales son invariantes bajo $t \rightarrow -t$.

Macroscópico: config desordenadas son más probables que config ordenadas.

→ universo tiende a aumentar la entropía

→ flecha del tiempo macroscópica y estadística

3. El tiempo en Relatividad Especial (Einstein, 1905)



Einstein (1905): Estudio de observadores en movimiento uniforme rectilíneo:

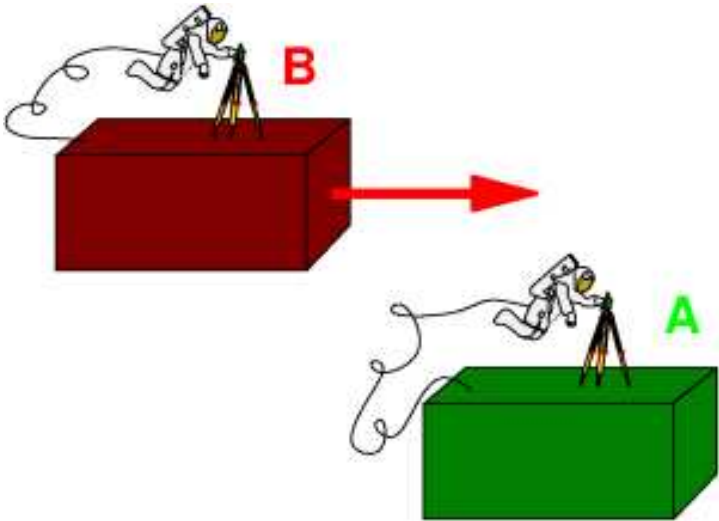
—→ efectos raros con el tiempo y las distancias

3. El tiempo en Relatividad Especial (Einstein, 1905)



Einstein (1905): Estudio de observadores en movimiento uniforme rectilíneo:

—> efectos raros con el tiempo y las distancias

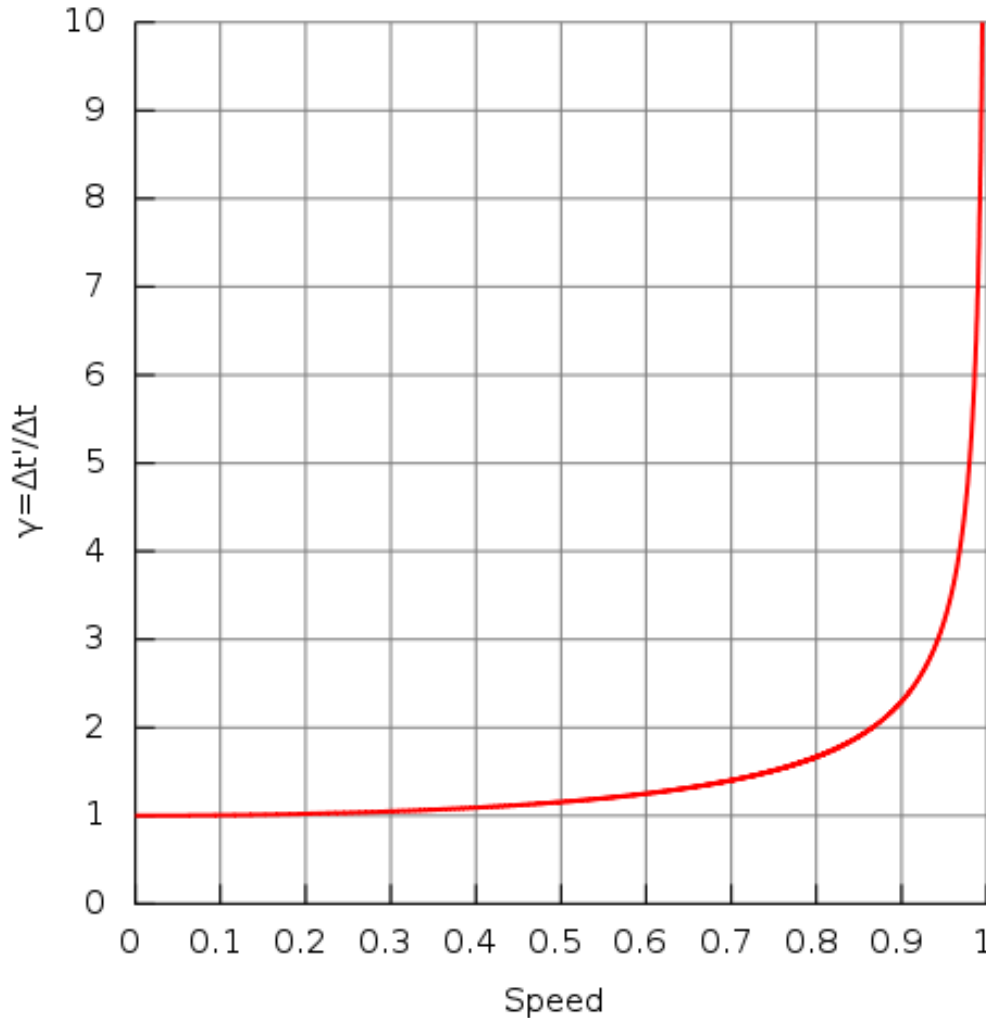


Dilatación temporal: el tiempo corre más lento para los observadores en movimiento

Contracción de Lorentz: las distancias son más cortas para los observadores en movimiento

Importante: No es un efecto óptico, es real!

Dilatación temporal y contracción de Lorentz sólo se aprecian a velocidades cercanas a la velocidad de la luz (300.000 km/s)



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

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

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

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

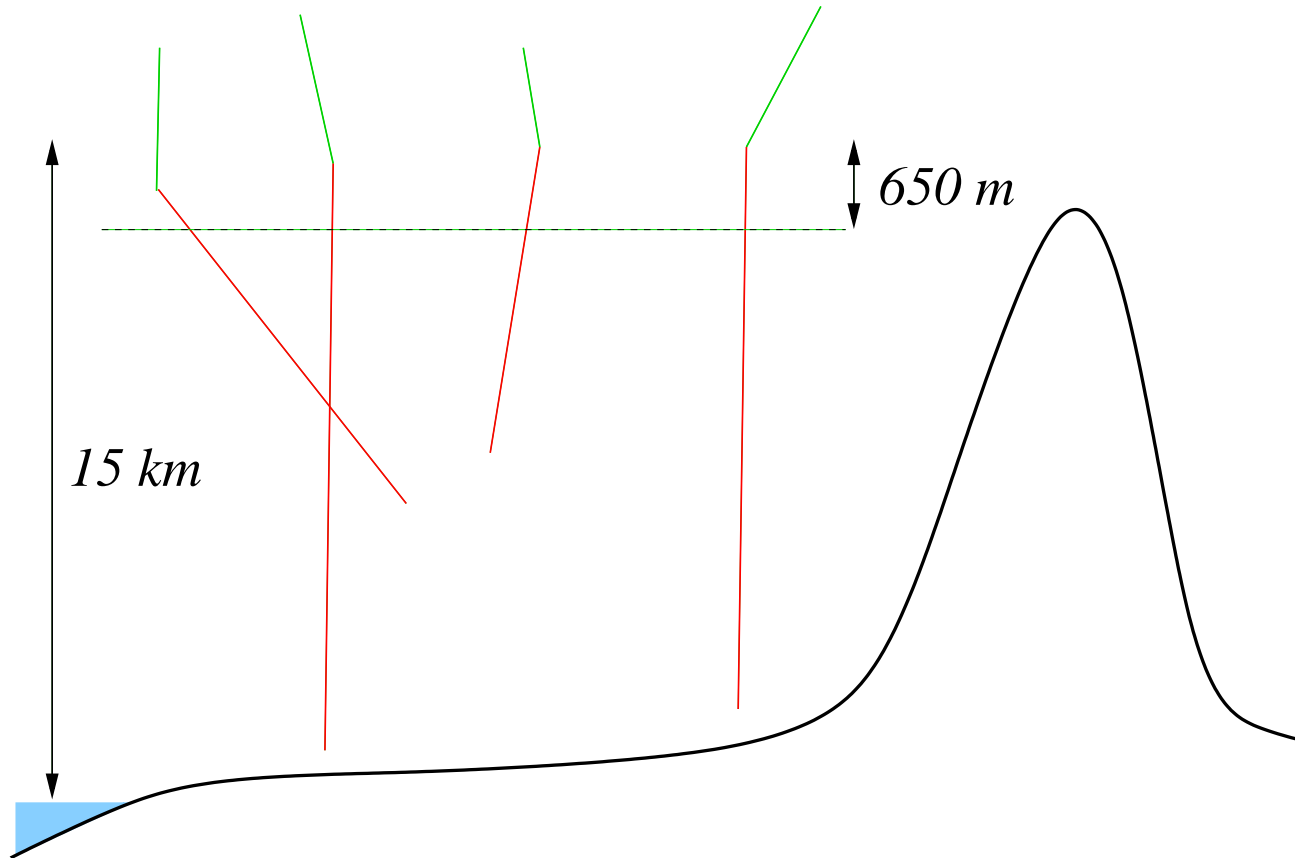
Importante: No es un efecto óptico, es real!

Detección de muones:

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

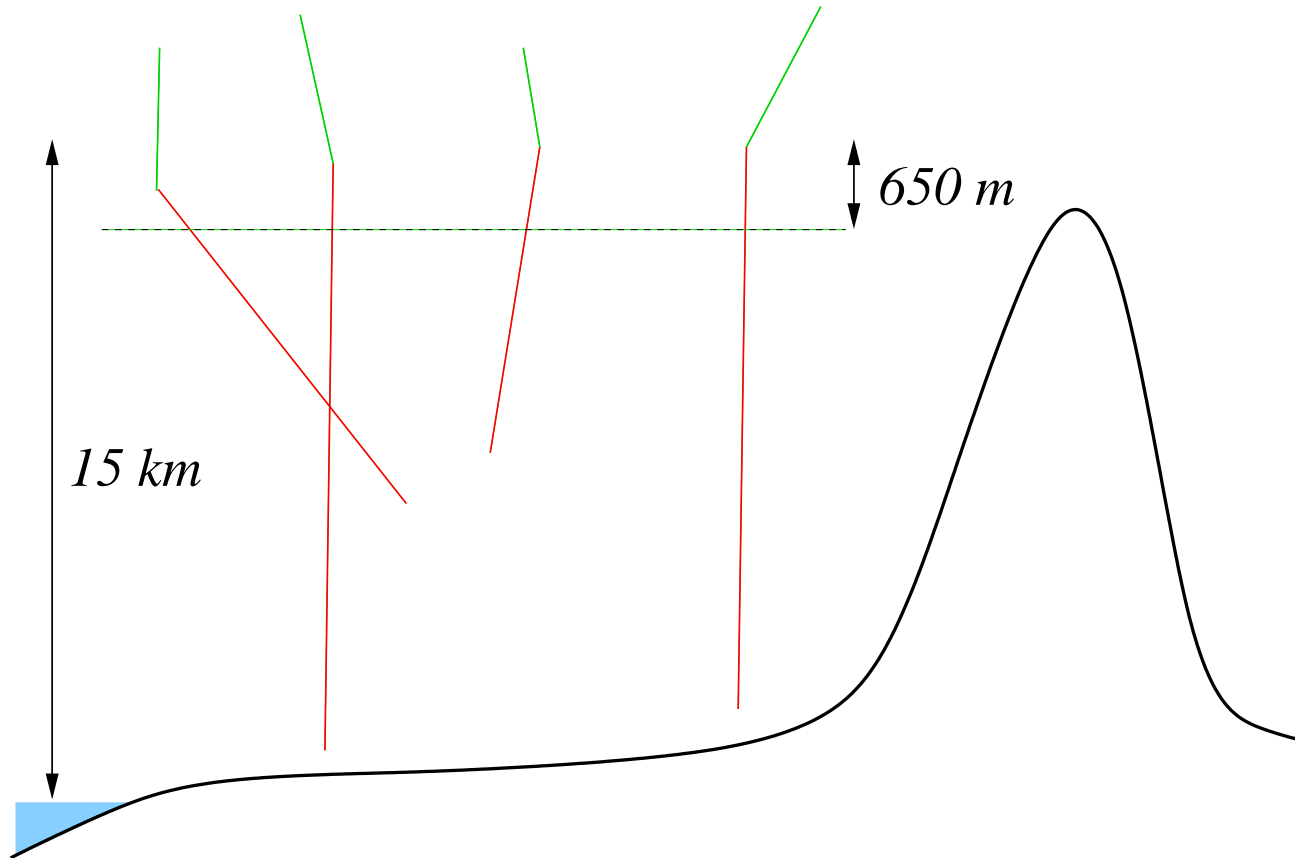


Detección de muones:

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

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

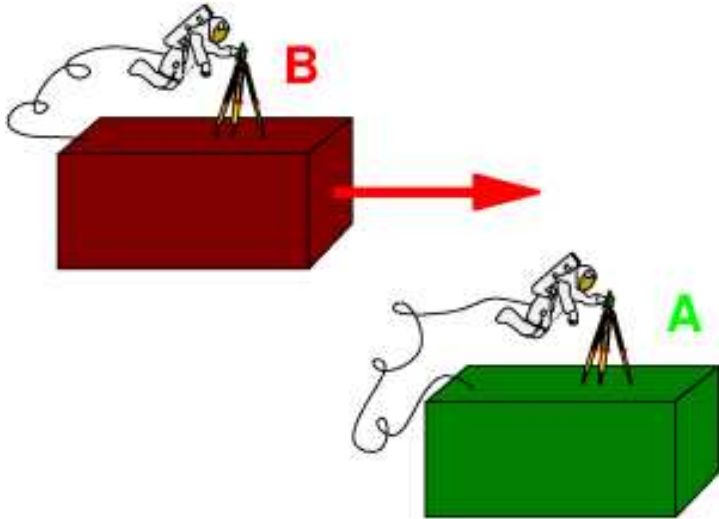
Distancia recorrido en este tiempo: 650 m



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

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

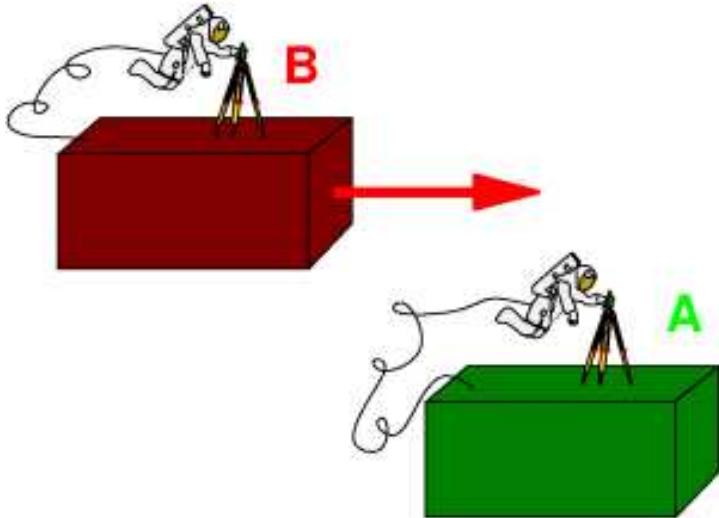
¿Quién realmente está en reposo y quién realmente se mueve?



Desde punto de vista de *A*:

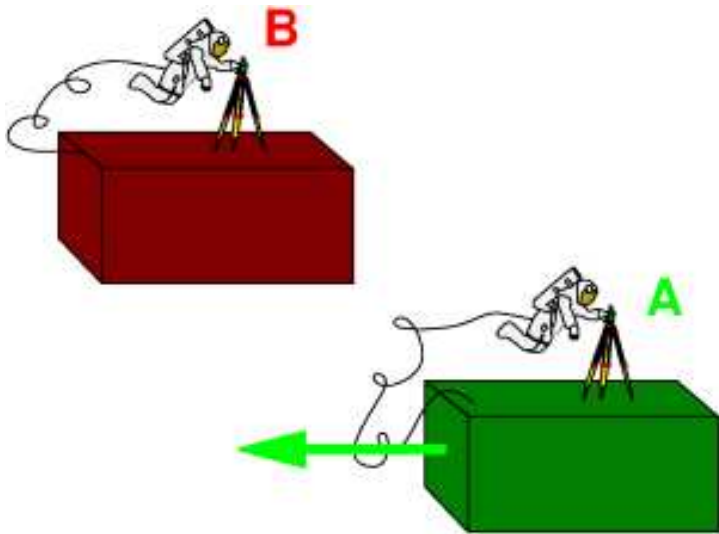
- el reloj de *B* corre más lento
- La nave de *B* es más corta

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



Desde punto de vista de *A*:

- el reloj de *B* corre más lento
- La nave de *B* es más corta



Desde punto de vista de *B*:

- el reloj de *A* corre más lento
- La nave de *A* es más corta

→ ¿Quién tiene razón?

El tiempo es la cuarta dimensión

Dimensiones \approx direcciones en que te puedes mover



0-dim



1-dim



2-dim



3-dim

El tiempo es la cuarta dimensión

Dimensiones \approx direcciones en que te puedes mover



0-dim



1-dim



2-dim



3-dim

En la vida cotidiana (\approx física newtoniana): 3 dimensiones

3 coordenadas (x, y, z) para especificar una **posición**:

→ alto, largo, ancho

El tiempo es la cuarta dimensión

Dimensiones \approx direcciones en que te puedes mover



0-dim

1-dim

2-dim

3-dim

En la vida cotidiana (\approx física newtoniana): 3 dimensiones

3 coordenadas (x, y, z) para especificar una **posición**:

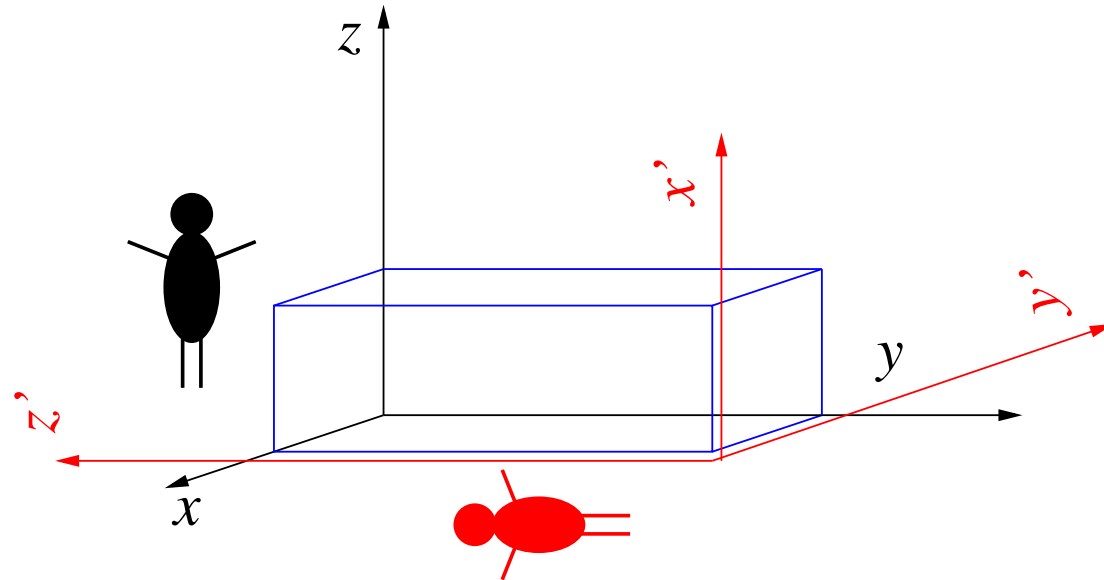
→ **alto, largo, ancho**

En la relatividad especial (Einstein, 1905):

4 coordenadas (t, x, y, z) para especificar un **evento**:

→ **alto, largo, ancho, y momento en que ocurre**

Alto, largo, ancho son conceptos relativos:



Observador negro: caja es más ancha que alta

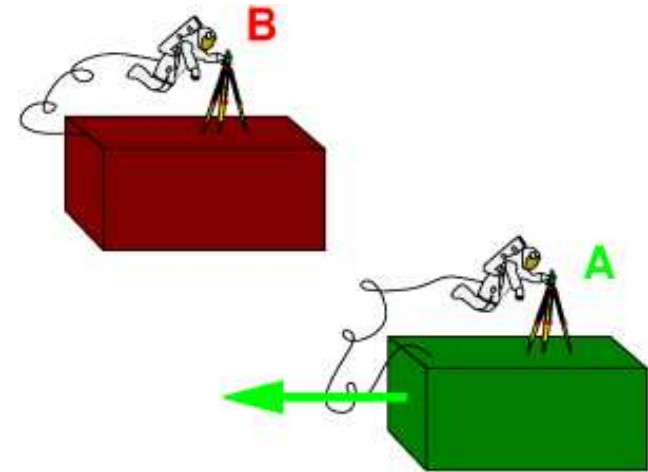
Observador rojo: caja es más alta que ancha

El pase del tiempo también:

Observador A : el reloj de B corre más lento

Observador B : el reloj de A corre más lento

Relatividad: todo depende del punto de vista

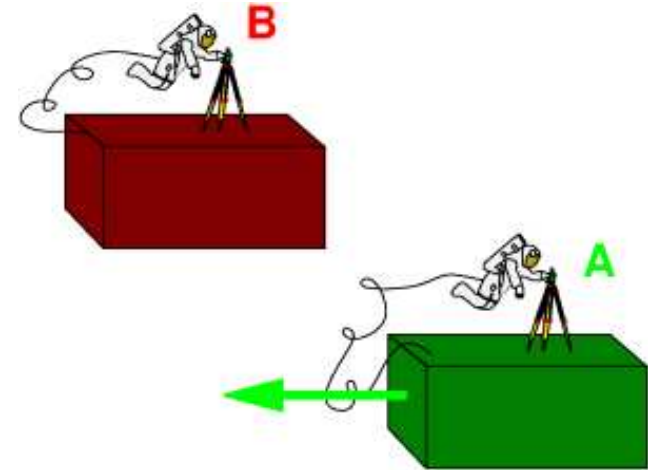


El pase del tiempo también:

Observador A : el reloj de B corre más lento

Observador B : el reloj de A corre más lento

Relatividad: todo depende del punto de vista

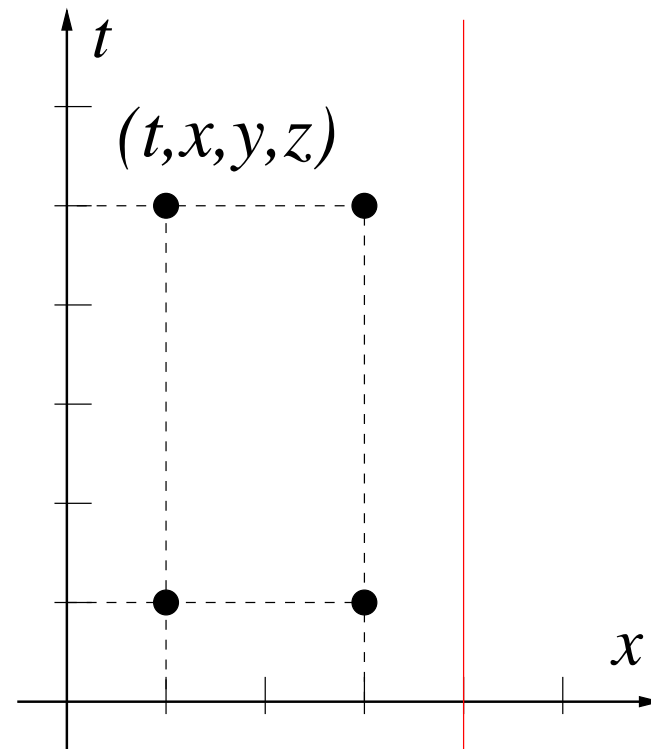


Intuitivamente: muy raro

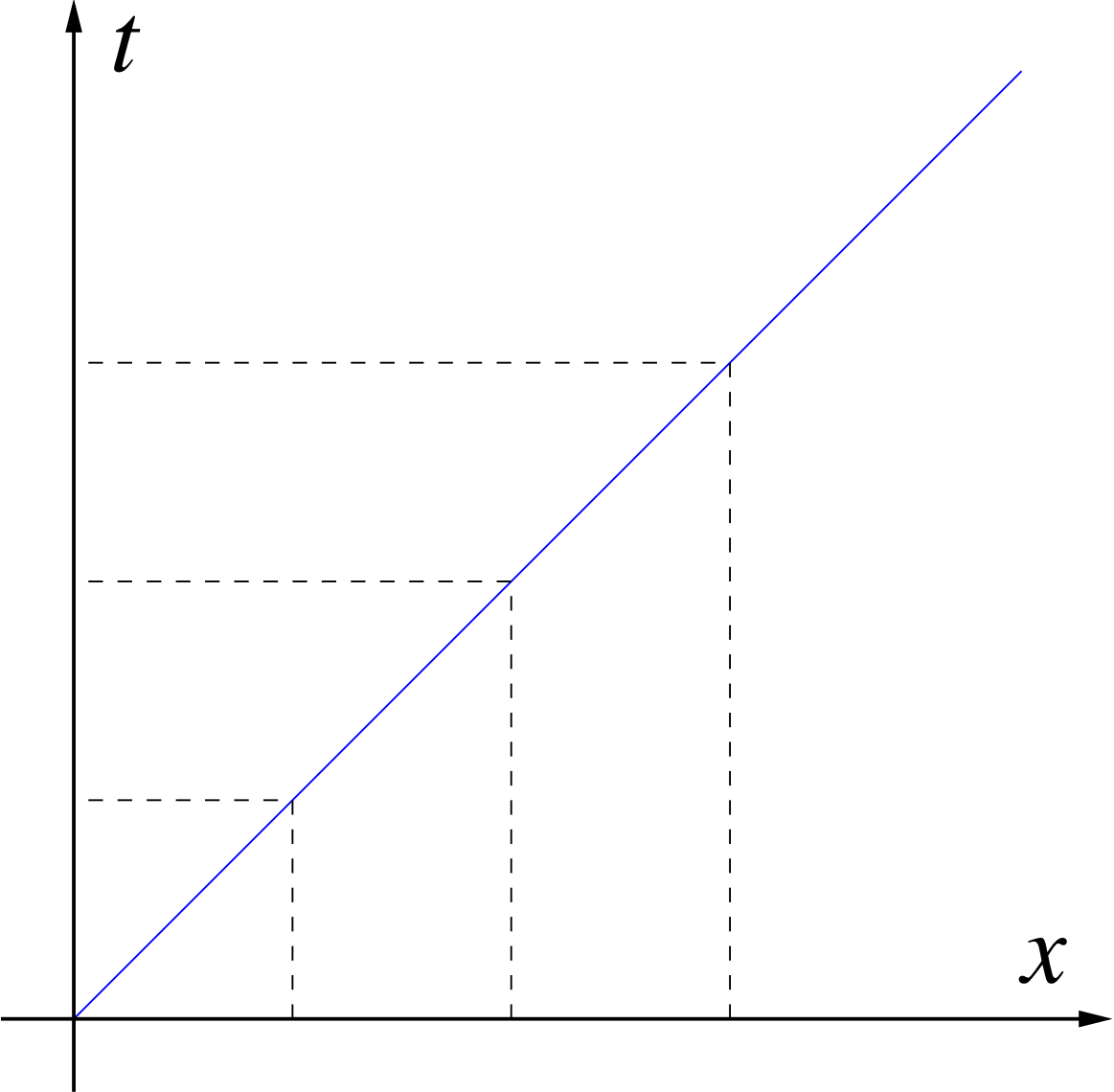
Matemáticamente: muy sencillo

Diagramas de espaciotiempo:

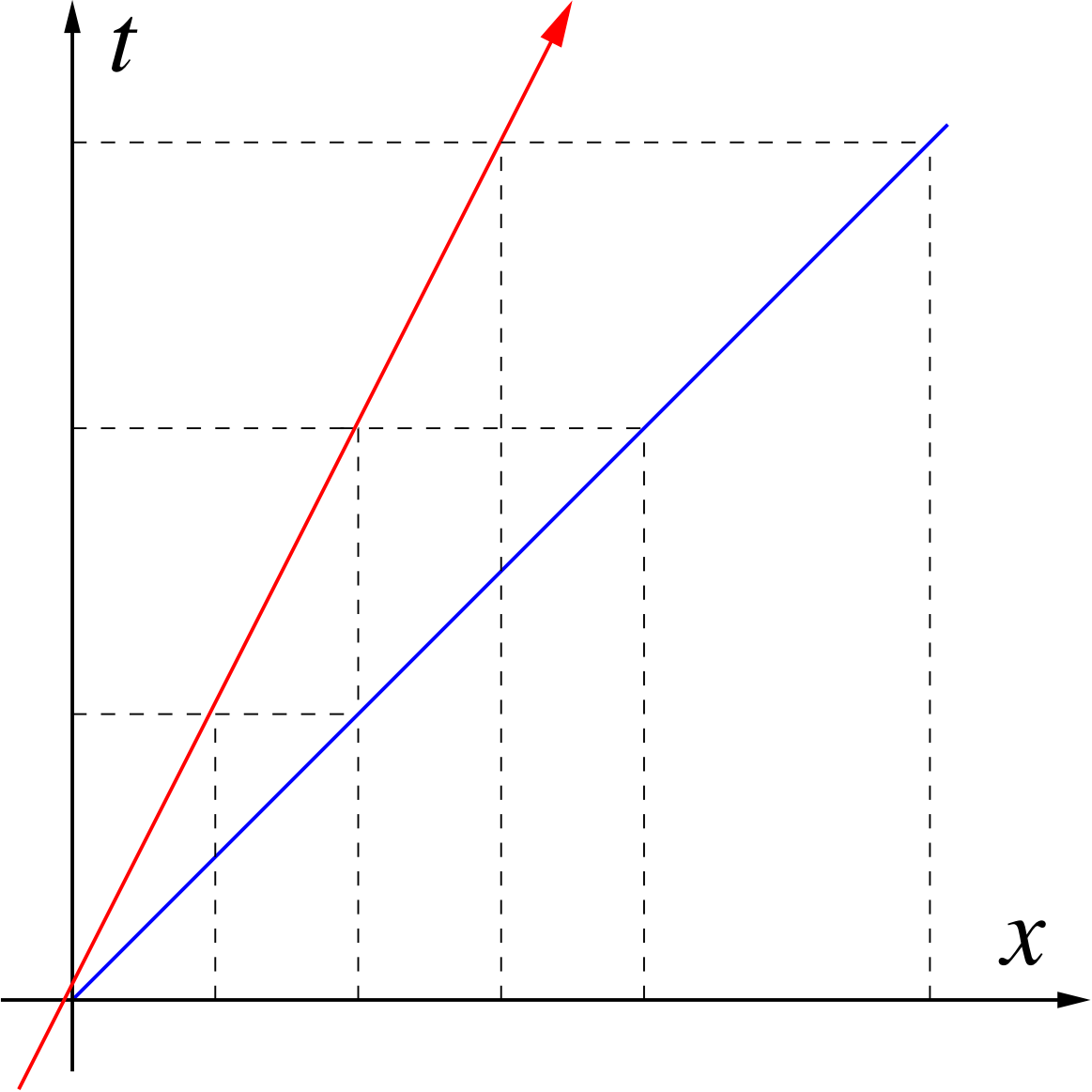
Evento: (t, x, y, z)



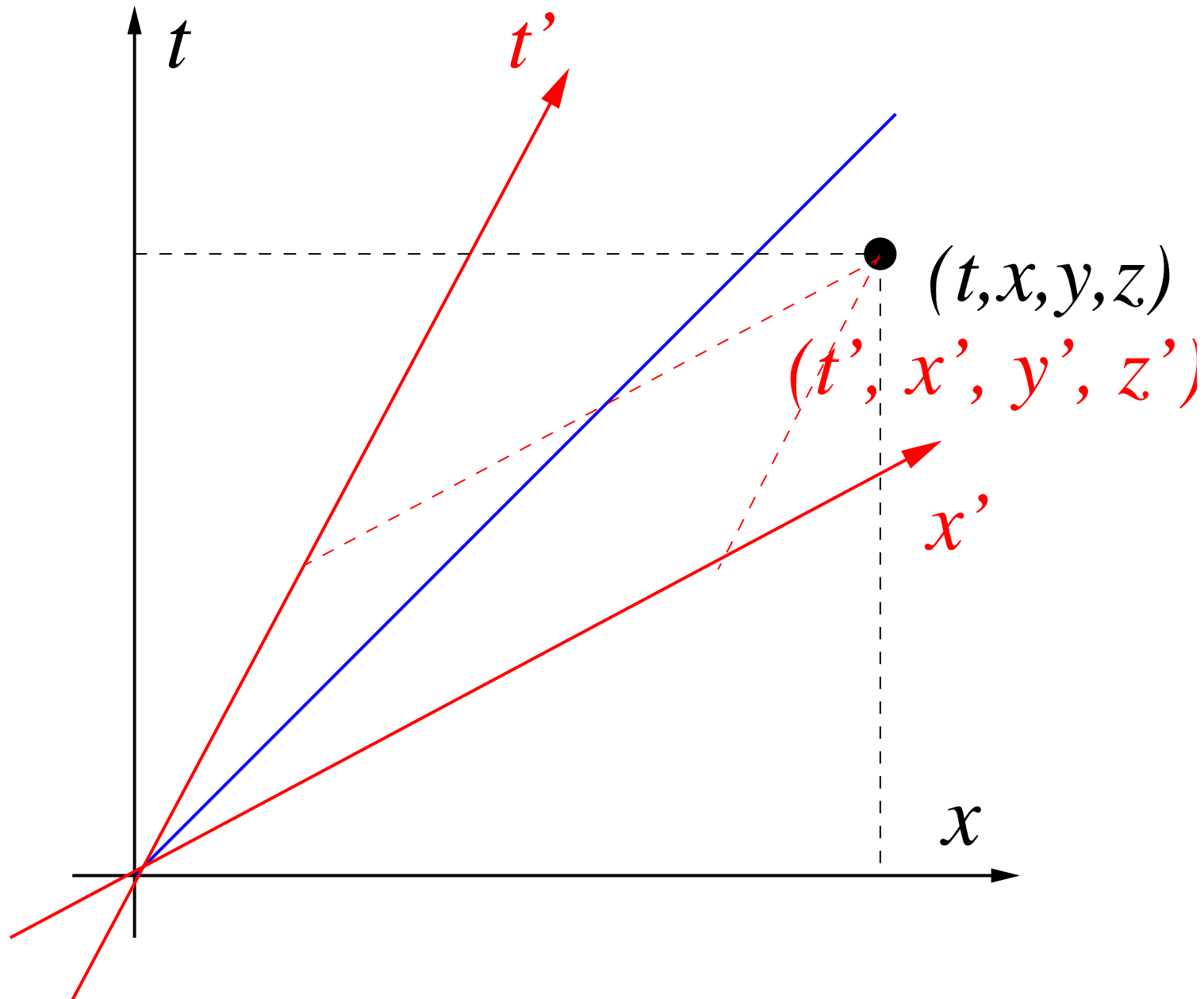
Observador negro emite un rayo de luz:



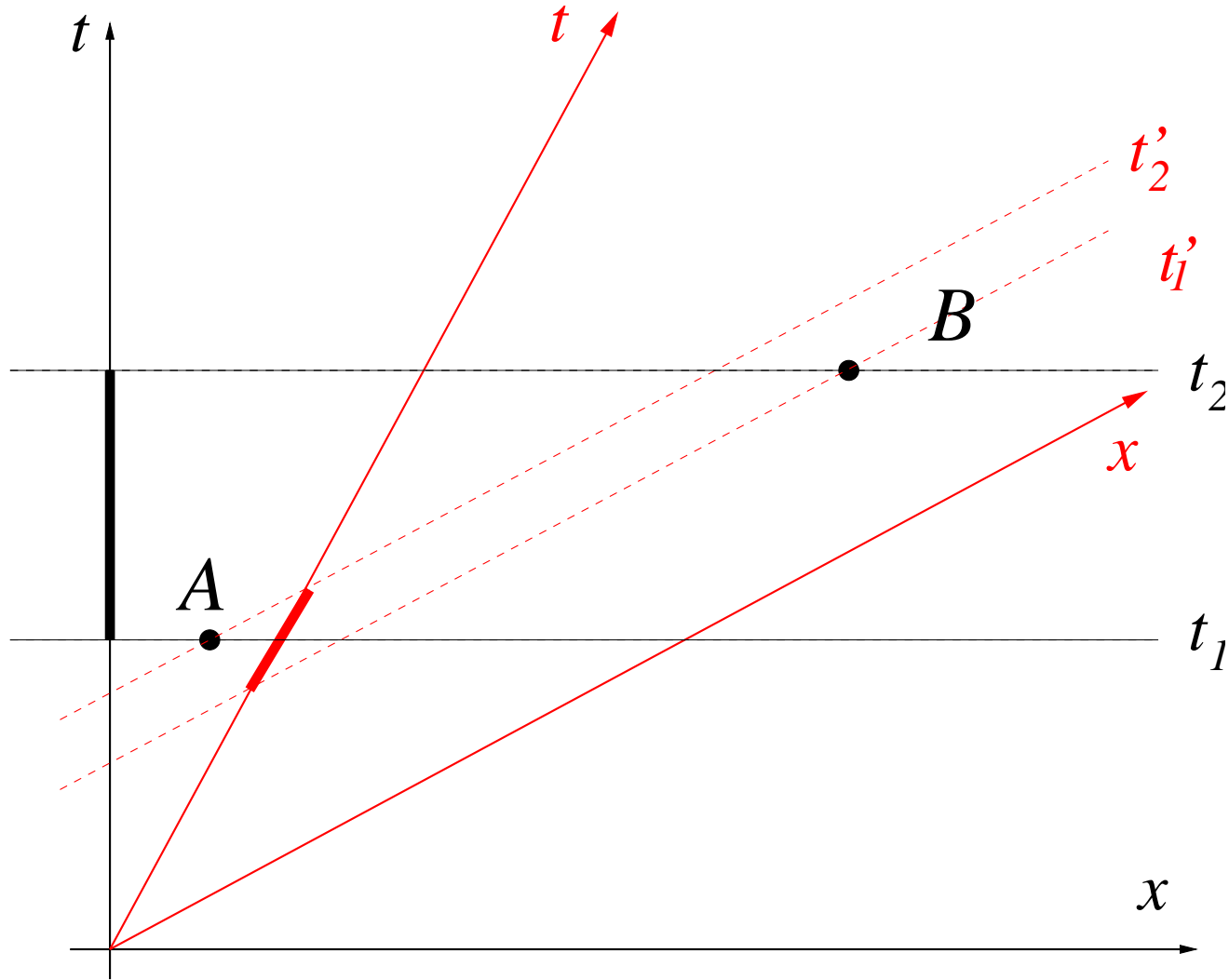
Observador negro ve pasar un obseravador rojo:



Observador negro y observador rojo son ambos observadores válidos



Dos eventos A y B vistos por ambos observadores

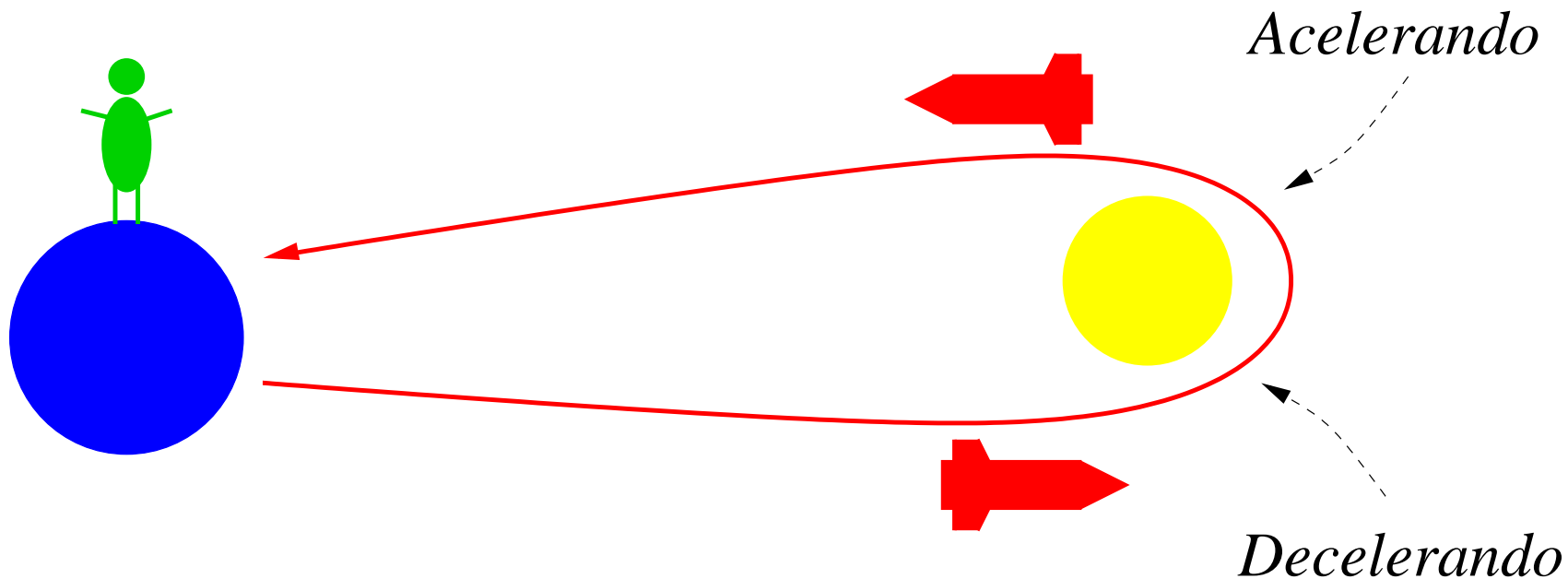


Observador negro: A pasa antes que B

Observador rojo: B pasa antes que A

Paradoja de los gemelos

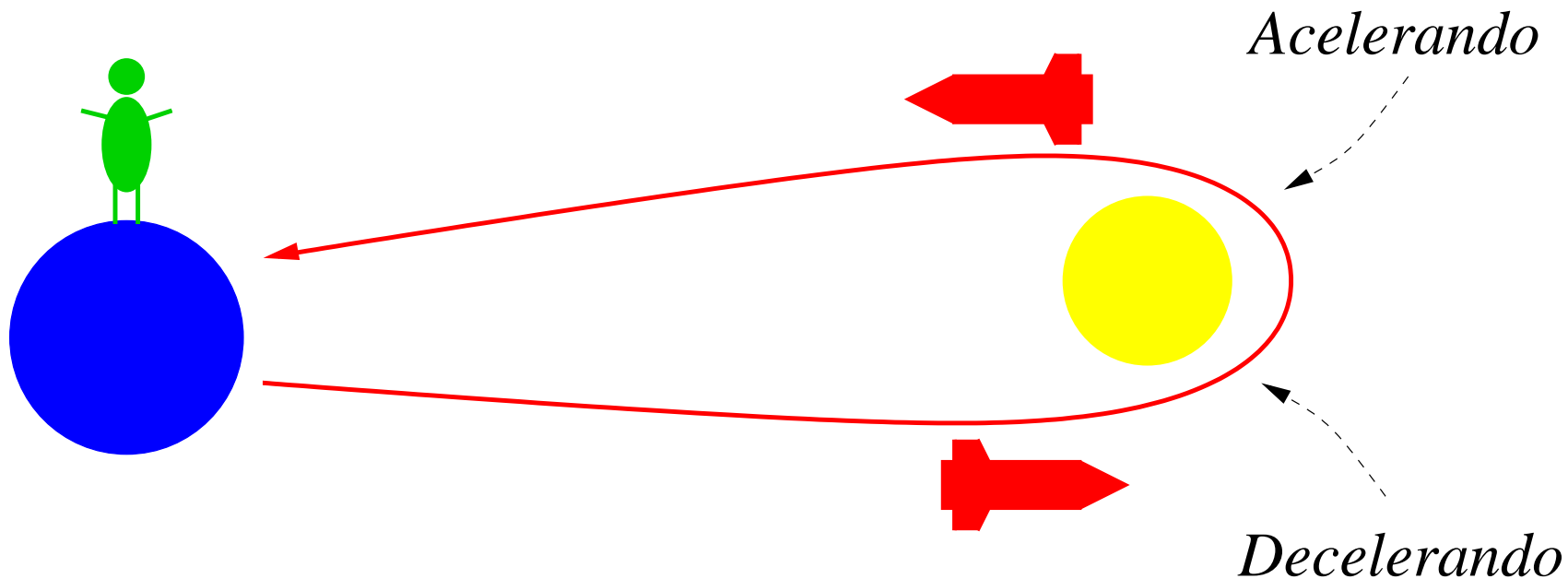
Dos gemelos viajando: ¿cuál es más viejo?



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

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

—→ 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: $t' = \gamma^{-1}t = 0,02 \cdot 19,2 \text{ años} = 0,38 \text{ años} = 4,5 \text{ meses}$

—→ 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: $t' = \gamma^{-1}t = 0,002 \cdot 540,5 \text{ años} = 1,08 \text{ años}$

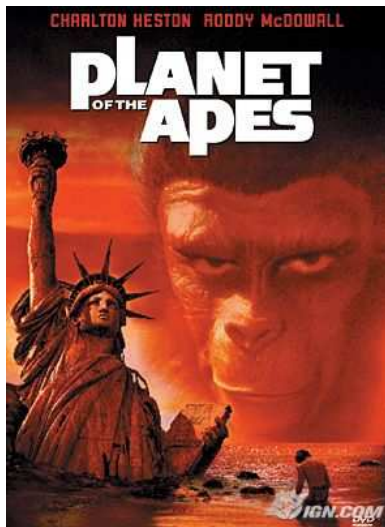
→ Una maquina del tiempo que funciona en una dirección

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: $t' = \gamma^{-1}t = 0,02 \cdot 19,2 \text{ años} = 0,38 \text{ años} = 4,5 \text{ meses}$

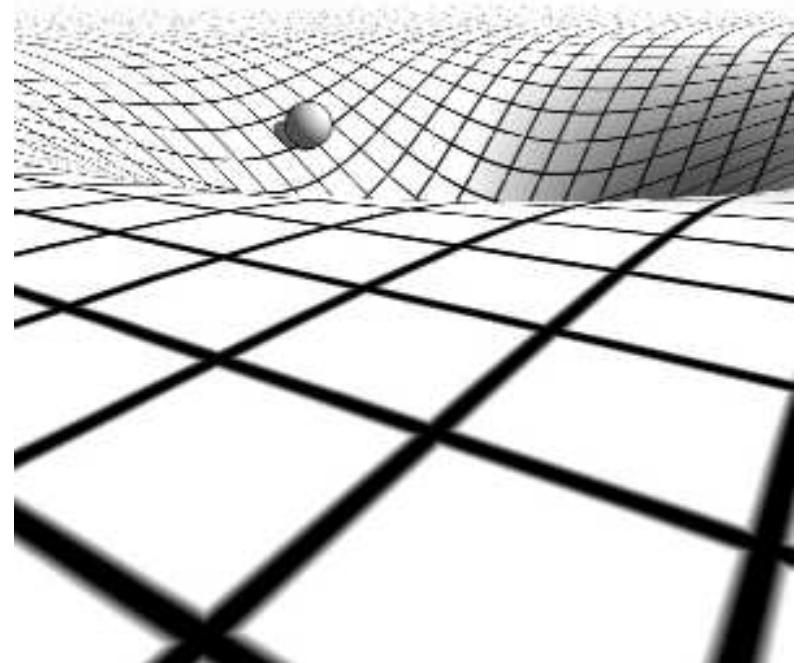
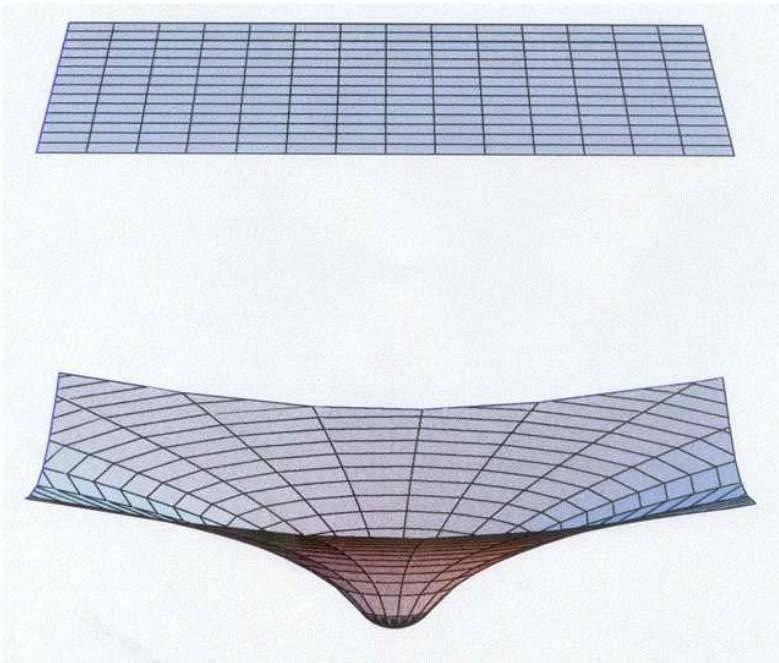
Viaje a la **Estrella Polar** (270 años-luz) a $v = 0,999c$ ($\gamma^{-1} = 0,002$):

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



4. El tiempo en la relatividad general

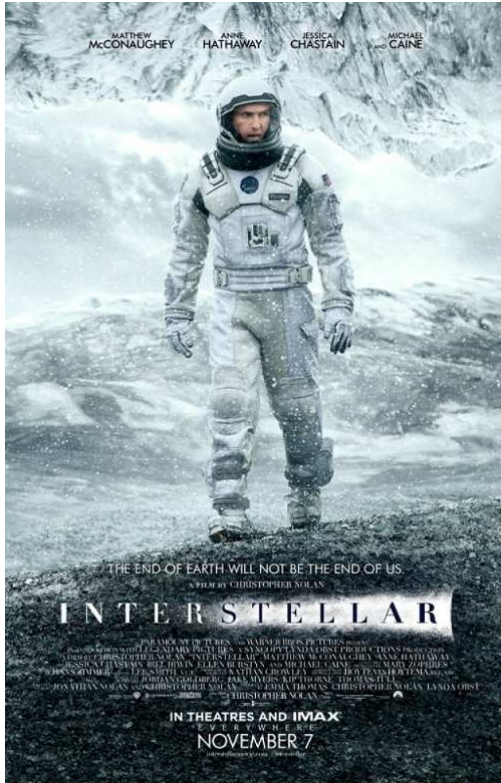
Gravedad = espacio curvo



La materia indica cómo se curva el espacio.
El espacio indica cómo se mueve la materia.

Dilatación temporal gravitatorio:

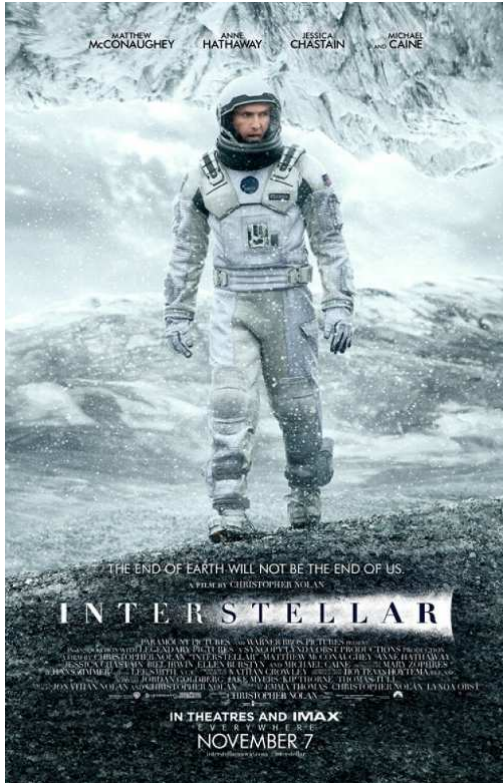
Abajo en un pozo gravitatorio el tiempo corre más lento!



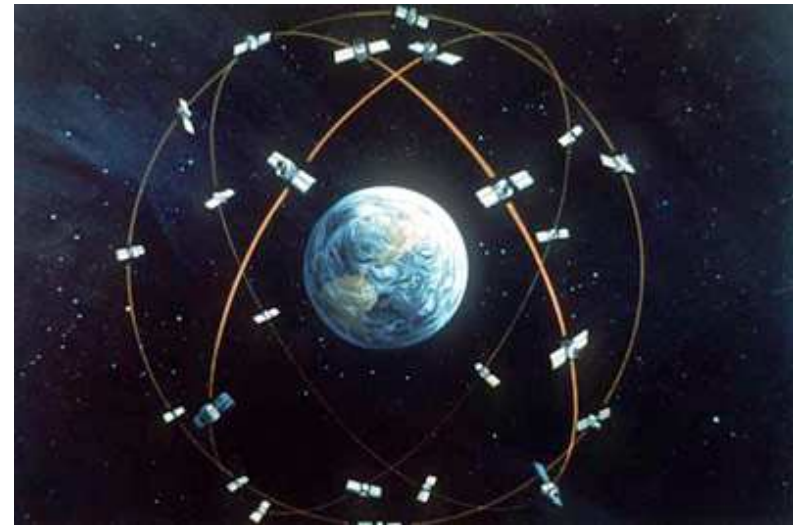
- 1 hora en planeta de agua cerca de Gargantua equivalen a 7 años en la Tierra

Dilatación temporal gravitatorio:

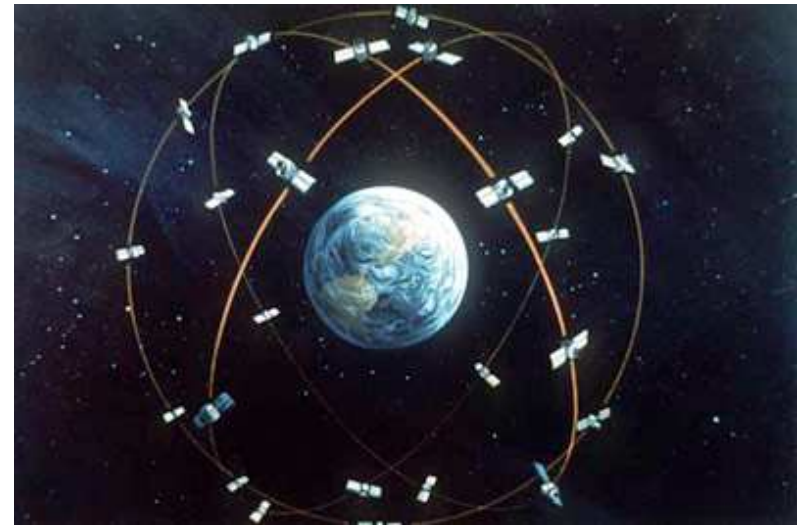
Abajo en un pozo gravitatorio el tiempo corre más lento!



- 1 hora en planeta de agua cerca de Gargantua equivalen a 7 años en la Tierra
- En la vida real: efecto importante en GPS



Contacto con satélites a 20 000 km
Imprecisión permitida: $< 0,03 \mu s/d$

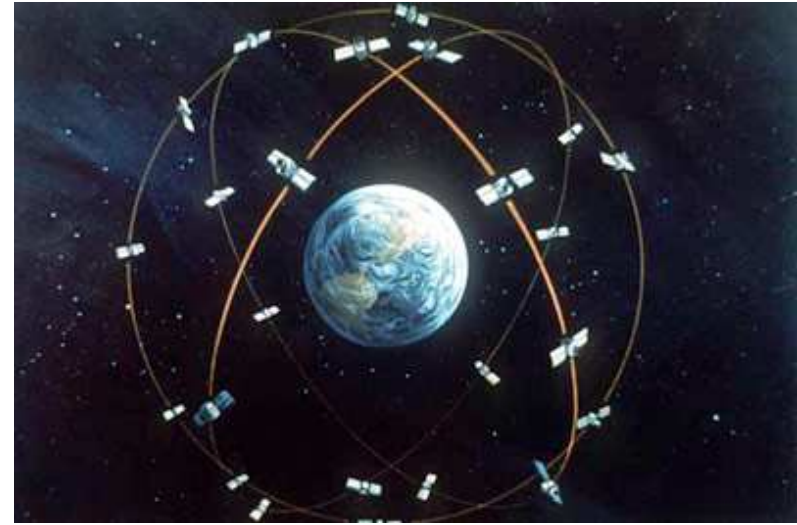


Contacto con satélites a 20 000 km

Imprecisión permitida: $< 0,03 \mu s/d$

Relatividad especial: retraso de $7 \mu s/d$

Relatividad general: adelanto de $45 \mu s/d$



Contacto con satélites a 20 000 km

Imprecisión permitida: $< 0,03 \mu s/d$

Relatividad especial: retraso de $7 \mu s/d$

Relatividad general: adelanto de $45 \mu s/d$

Efecto total: $38 \mu s/d$

—→ error acumulativo de 10 km/d!!!

—→ **Corrección en relojes de satélites**

La máquina del tiempo: el universo de Gödel

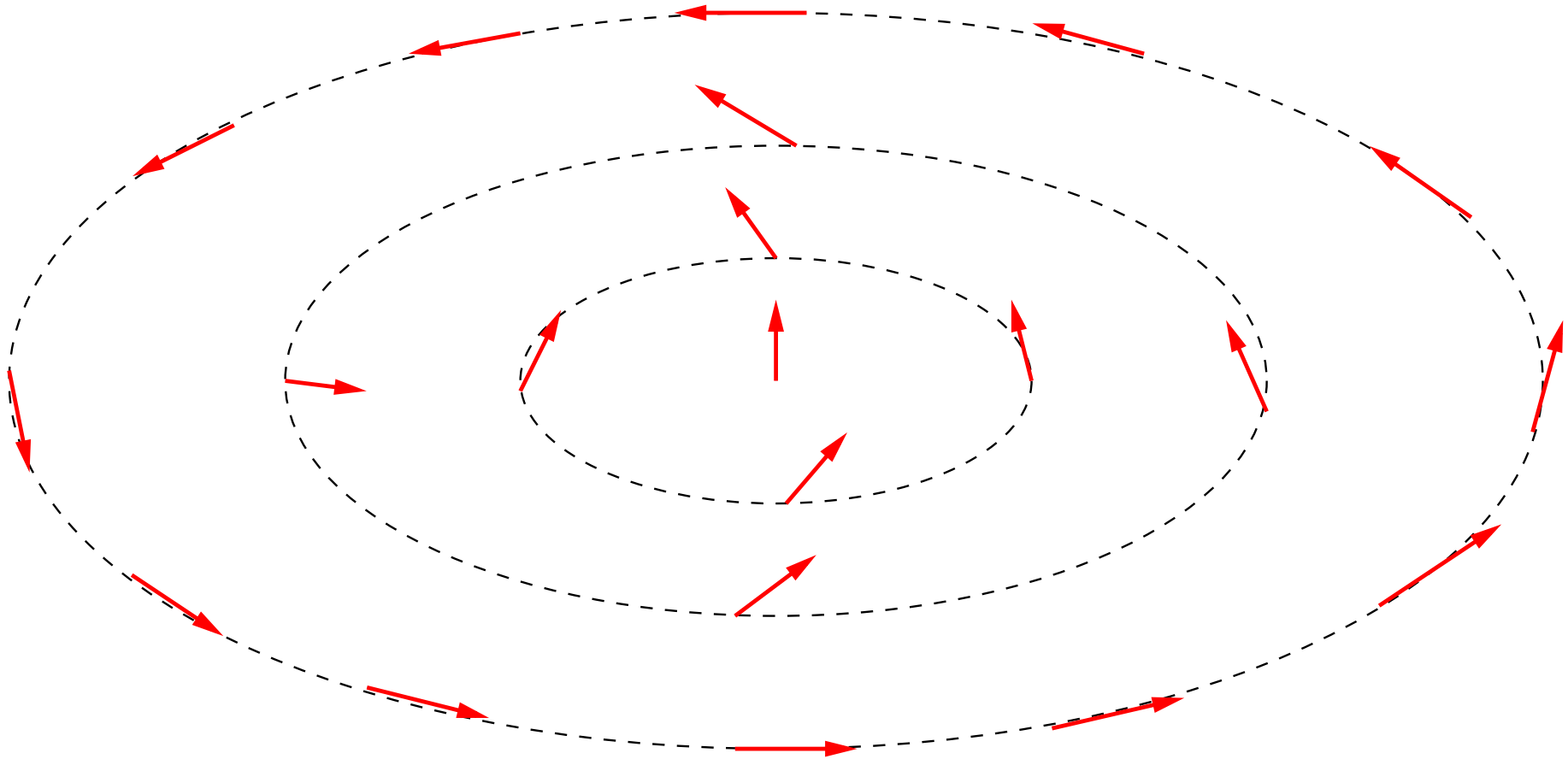
Kurt Gödel (1906 - 1978)



Regalo por el 70 cumpleaños de Einstein

Universo con curvas temporales cerradas

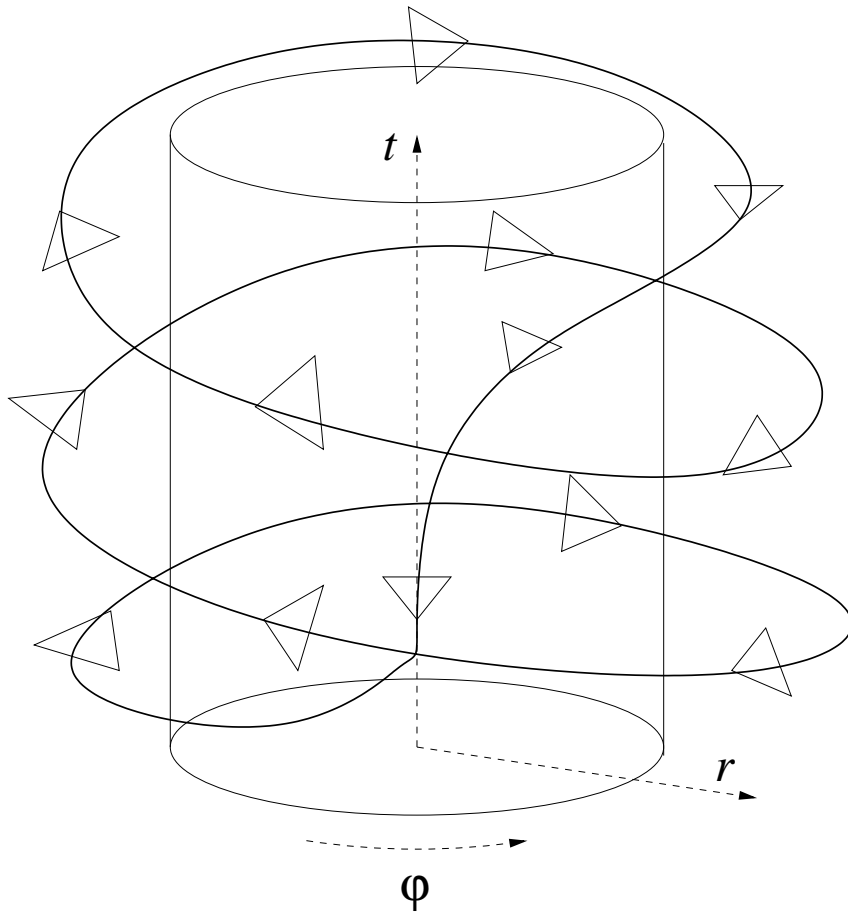
La dirección del tiempo puede variar de punto a punto



A partir de cierto radio, los círculos se vuelven temporales

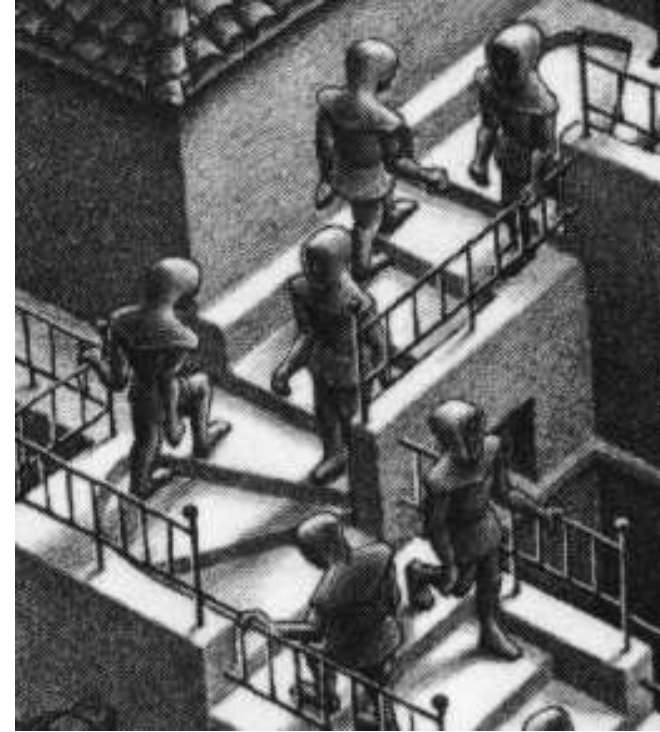
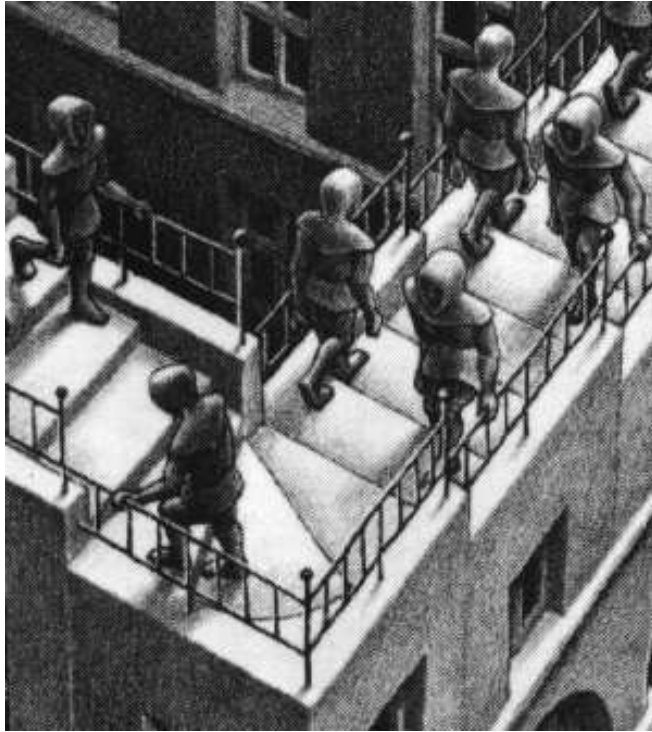
→ Curvas temporales cerradas

Posibilidad de viajes al pasado!

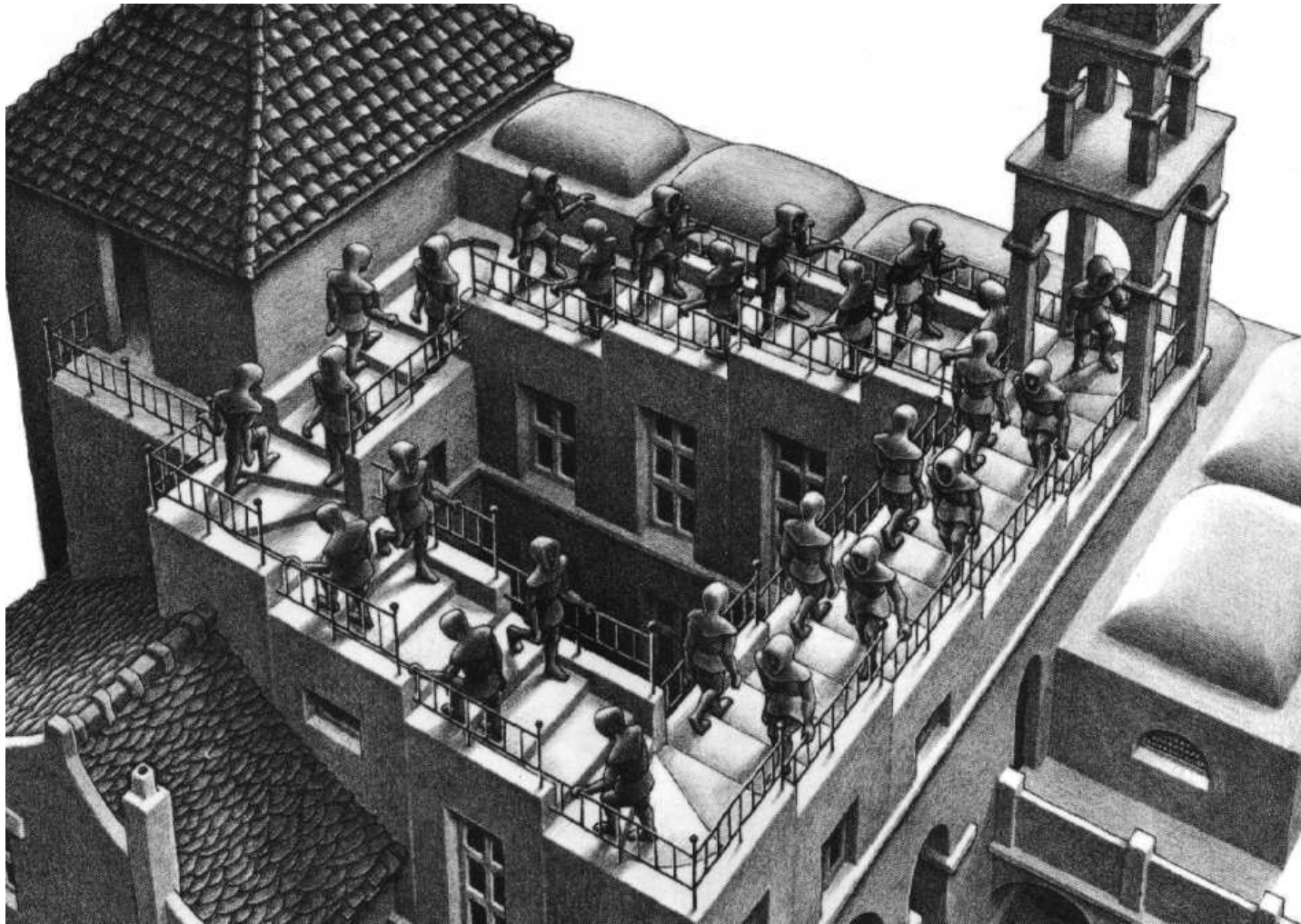


- Encuentro con tu "yo" más joven!
- Todos los problemas conocidos con causalidad'!

En cada región pequeña, la dirección del tiempo está perfectamente definida



Pero hay un problema en la estructura global



¿Cuál es el estatus científico del universo de Gödel?

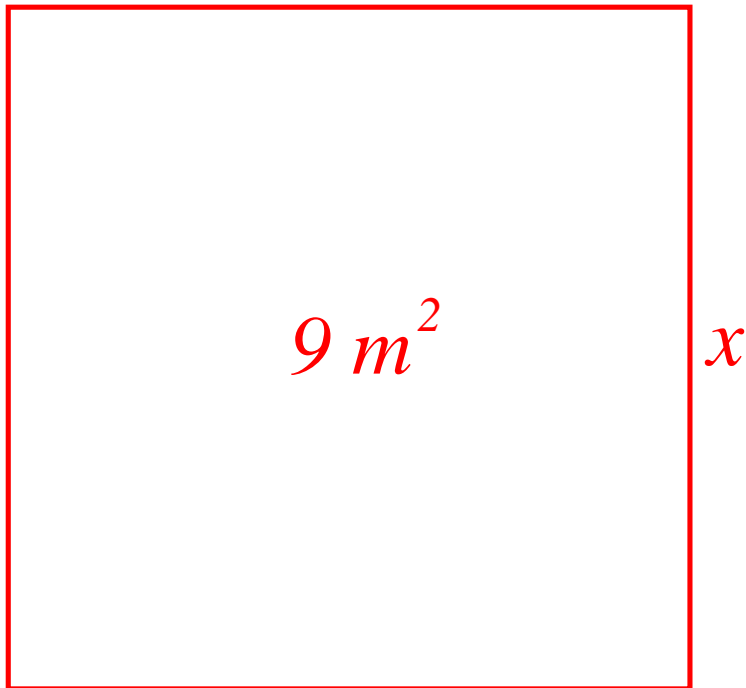
- Solución legítima de las ecuaciones de Einstein!

- Solución legítima de las ecuaciones de Einstein!
- Se suele descartar por razones físicas...

No todas las soluciones matemáticas tienen significado físico...

- Solución legítima de las ecuaciones de Einstein!
- Se suele descartar por razones físicas...

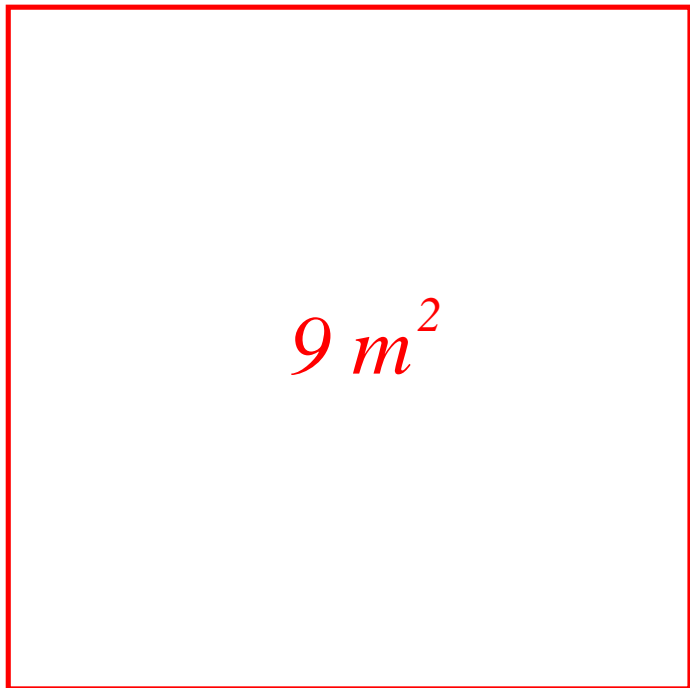
No todas las soluciones matemáticas tienen significado físico...



¿Cuánto mide el lado x de un cuadrado con $9 m^2$ de superficie?

- Solución legítima de las ecuaciones de Einstein!
- Se suele descartar por razones físicas...

No todas las soluciones matemáticas tienen significado físico...



¿Cuánto mide el lado x de un cuadrado con $9 m^2$ de superficie?

$$x^2 = 9 m^2 \quad \Longleftrightarrow \quad x = 3 m \quad \text{ó} \quad x = -3 m$$

—→ El universo de Gödel es una curiosidad matemática...

5. Resumen

¿Qué pues es el tiempo?

Si nadie me pregunta, sé lo que es.

Si deseo explicárselo a aquel que me lo pregunta, no lo sé...

5. Resumen

¿Qué pues es el tiempo?

Si nadie me pregunta, sé lo que es.

Si deseo explicárselo a aquel que me lo pregunta, no lo sé...

El tiempo físico:

- es la **cuarta dimensión** del espaciotiempo

5. Resumen

¿Qué pues es el tiempo?

Si nadie me pregunta, sé lo que es.

Si deseo explicárselo a aquel que me lo pregunta, no lo sé...

El tiempo físico:

- es la **cuarta dimensión** del espaciotiempo
- **no fluye igual** para todo el mundo

5. Resumen

¿Qué pues es el tiempo?

Si nadie me pregunta, sé lo que es.

Si deseo explicárselo a aquel que me lo pregunta, no lo sé...

El tiempo físico:

- es la **cuarta dimensión** del espaciotiempo
- **no fluye igual** para todo el mundo
- la **dirección del tiempo puede variar** de punto a punto

5. Resumen

¿Qué pues es el tiempo?

Si nadie me pregunta, sé lo que es.

Si deseo explicárselo a aquel que me lo pregunta, no lo sé...

El tiempo físico:

- es la **cuarta dimensión** del espaciotiempo
- **no fluye igual** para todo el mundo
- la **dirección del tiempo puede variar** de punto a punto
- viajes en el tiempo son posibles, **¡pero siempre hacia adelante!**

5. Resumen

¿Qué pues es el tiempo?

Si nadie me pregunta, sé lo que es.

Si deseo explicárselo a aquel que me lo pregunta, no lo sé...

El tiempo físico:

- es la **cuarta dimensión** del espaciotiempo
- **no fluye igual** para todo el mundo
- la **dirección del tiempo puede variar** de punto a punto
- viajes en el tiempo son posibles, **¡pero siempre hacia adelante!**
- **salvo excepciones matemáticas...**






Introducción a la Teoría de la Relatividad Del espaciotiempo a los agujeros negros y las ondas gravitacionales

<p>PROGRAMA</p> <p>LUNES, 13 DE MARZO Relatividad Especial I: historia y simetrías</p> <p>MARTES, 14 DE MARZO Relatividad Especial II: efectos relativistas</p> <p>MIÉRCOLES, 15 DE MARZO El espacio, el tiempo y el espaciotiempo</p> <p>LUNES, 20 DE MARZO El espaciotiempo curvo y la gravedad</p> <p>MARTES, 21 DE MARZO Predicciones y experimentos de la Relatividad General</p> <p>MIÉRCOLES, 22 DE MARZO Agujeros negros I: conceptos básicos y formación</p> <p>LUNES, 27 DE MARZO Agujeros negros II: agujeros negros clásicos y cuánticos</p> <p>MARTES, 28 DE MARZO Ondas gravitacionales</p> <p>MIÉRCOLES, 29 DE MARZO Cosmología</p> <p>LUNES, 3 DE ABRIL Más allá de la Relatividad General</p> <p>Horario sesiones: 19:00-21:00h</p> <p>Organizan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Centro Mediterráneo • Facultad de Ciencias • Estudiantes de Física y Electrónica (EFE) 	<p>DIRECCIÓN Y DOCENCIA</p> <p>Bert Janssen Profesor Titular del Departamento de Física Teórica y del Cosmos (UGR).</p> <p>LUGAR DE REALIZACIÓN</p> <p>Salón de Grados de la Facultad de Ciencias (UGR).</p> <p>Precio: 35€ general, 30 € socios de EFE</p> <p>Información en la Sala de Alumnos de la Facultad de Ciencias</p> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 10px; text-align: center; margin: 10px 0;"> <p>Curso pendiente de reconocimiento para la obtención de Créditos ECTS optativos en los Grados de Física, Matemáticas, Química, Biología, Ingeniería Civil, Ingeniería Electrónica Industrial, Filosofía, Educación Primaria.</p> </div> <p>INFORMACIÓN E INSCRIPCIÓN https://www.ugr.es/~cm/ Correo electrónico: cemed@ugr.es Telf.: 958 24 29 22 / 24 29 23 Centro Mediterráneo Complejo Administrativo Triunfo Cuesta del Hospicio, s/n 18071 - Granada</p>
--	--

Curso Divulgativo de Relatividad

Lugar: Facultad de Ciencias

Fecha: 13 marzo - 3 abril 2017

Horario: lunes a miércoles,
de 19h00 a 21h00

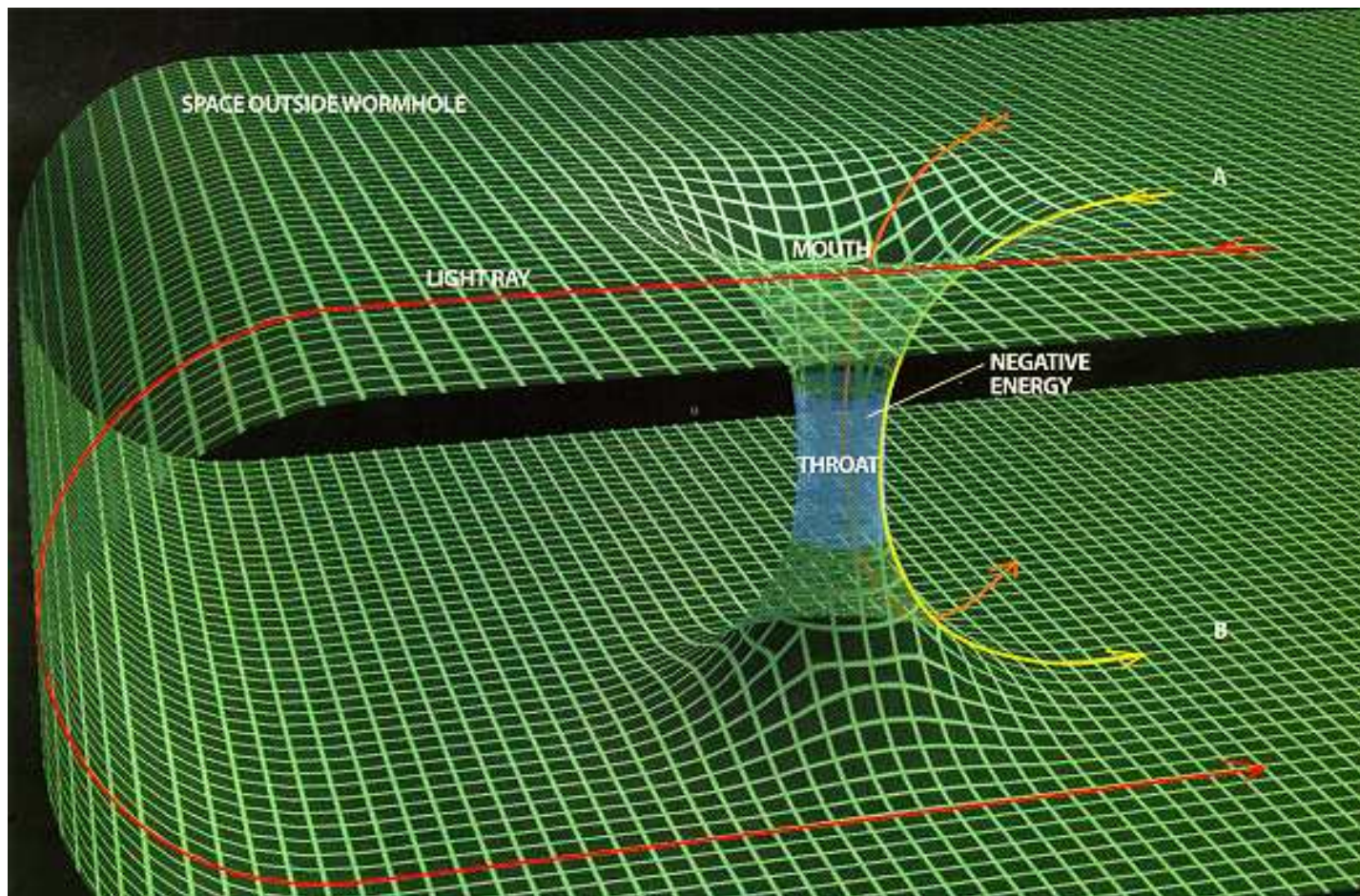
Duración: 20 horas (10 clases)

Información: Centro Mediterráneo

<https://www.ugr.es/~cm/accesos/gr14.html>

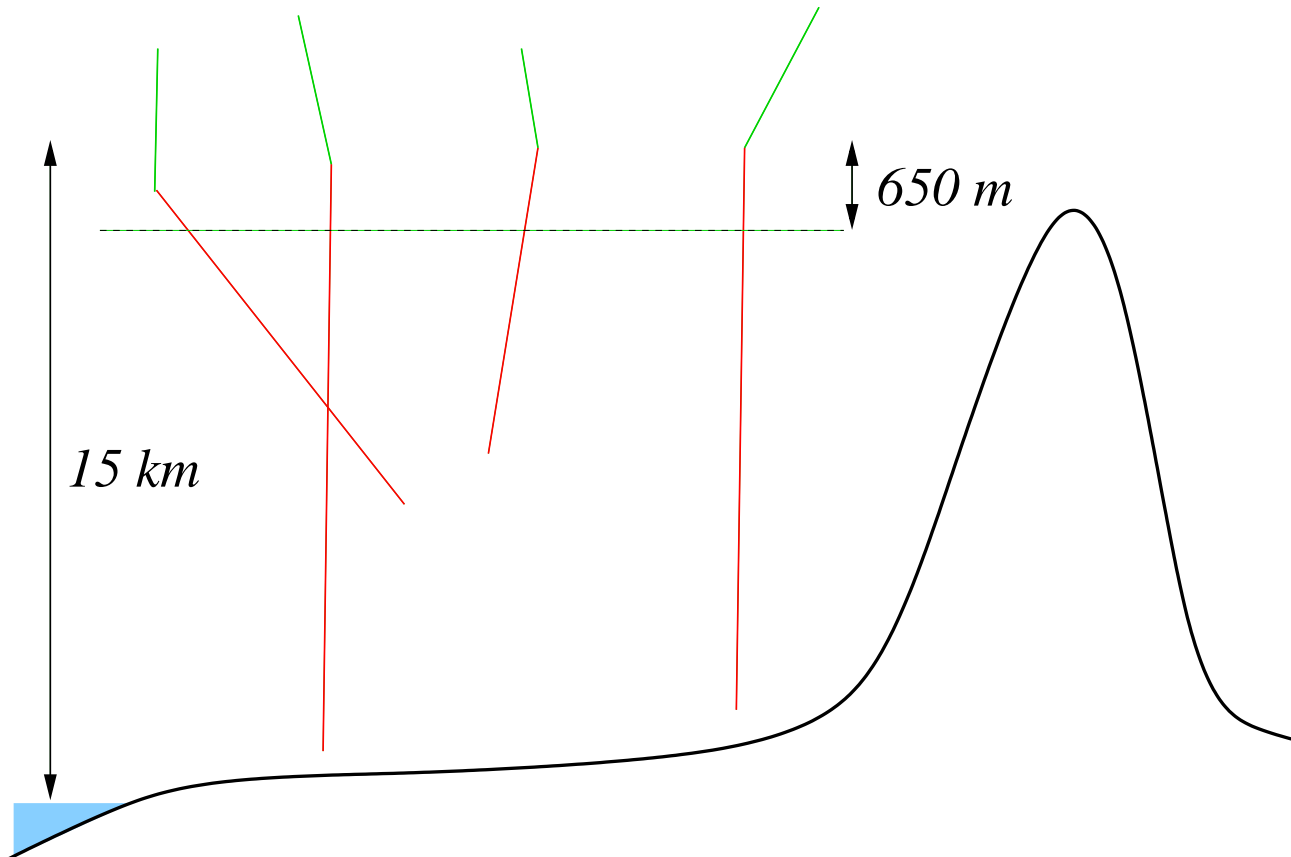
¡Gracias por vuestra atención!

Agujero de gusano



Experimento de los muones: (visto por nosotros)

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

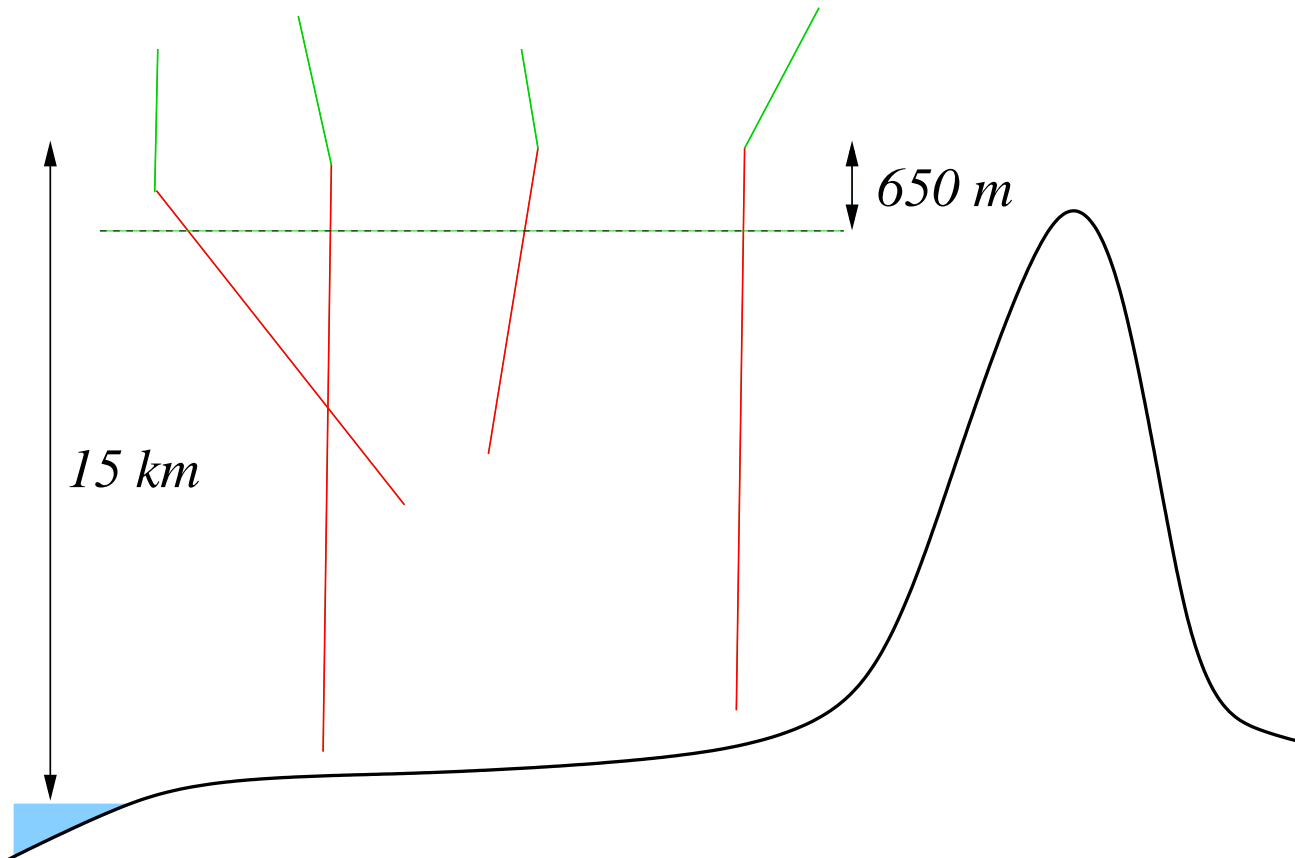


Vida media de un muón (en reposo): $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

Distancia recorrido en este tiempo: 650 m

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): $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

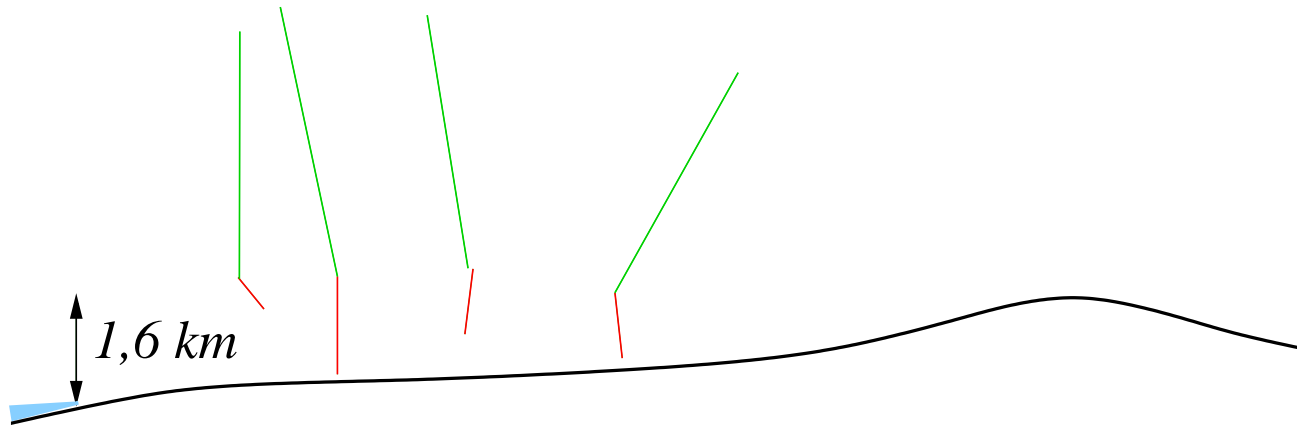
Distancia recorrido en este tiempo: 650 m

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

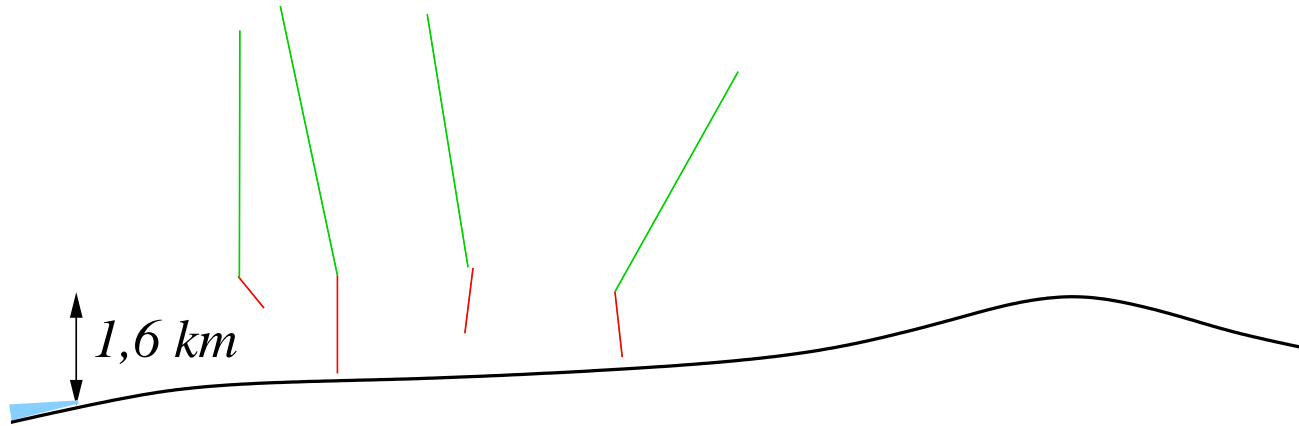


Vida media de un muón (en reposo): $2,2 \cdot 10^{-6} s$

Distancia recorrido en este tiempo: $650 m$

Experimento de los muones: (visto por los muones)

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



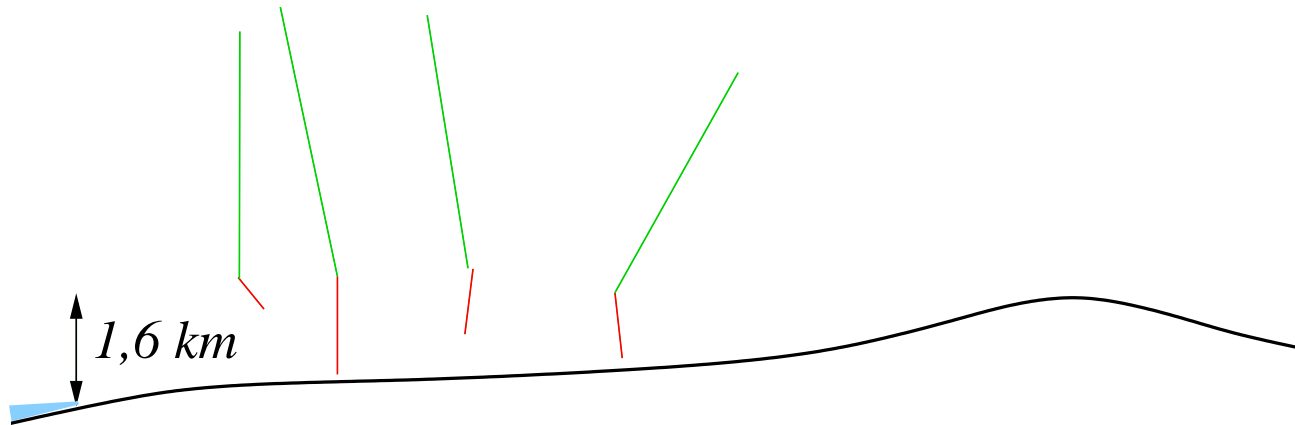
Vida media de un muón (en reposo): $2,2 \cdot 10^{-6} s$

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

La teoría de la Relatividad Especial



Einstein (1905):

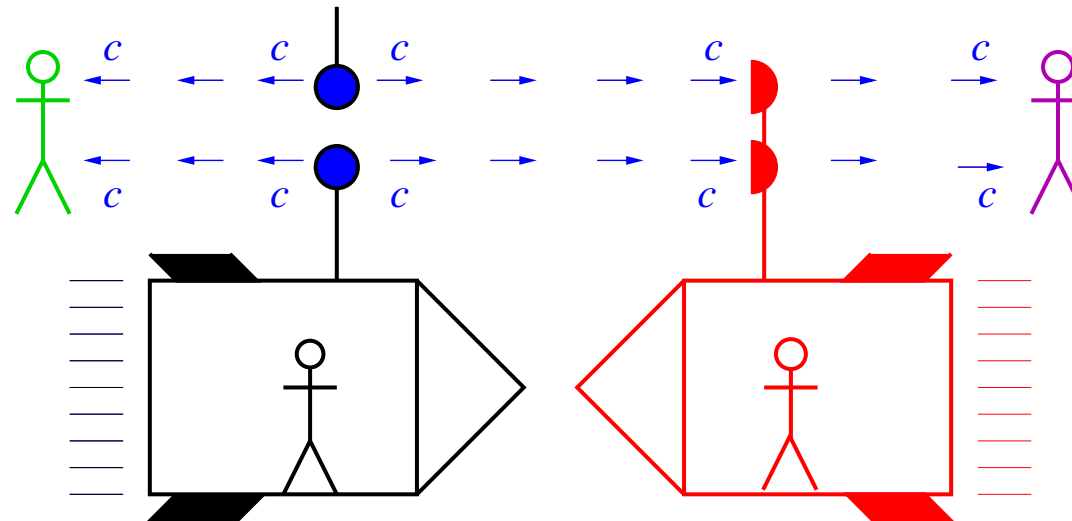
- Todos los observadores inerciales son equivalentes
- La velocidad de la luz es constante, independientemente del estado de movimiento de la fuente o del detector

La teoría de la Relatividad Especial



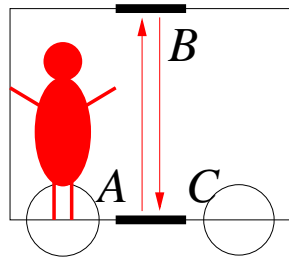
Einstein (1905):

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

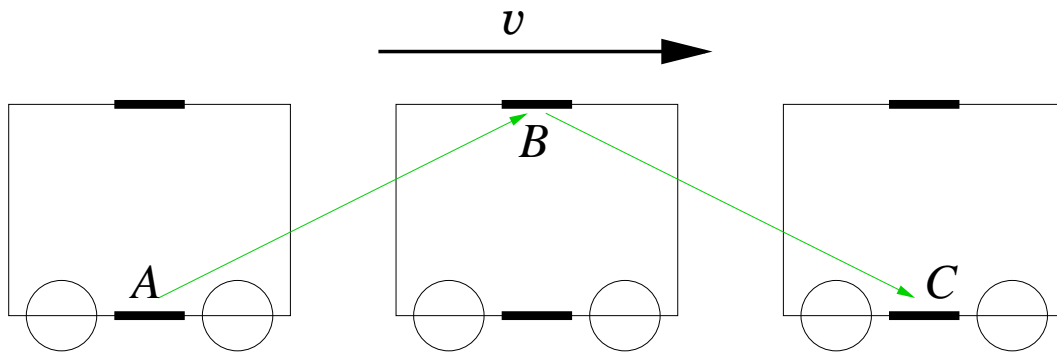


—→ muy extraño, pero no inconsistente...

El tiempo no fluye igual para todo el mundo



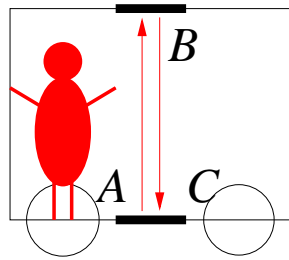
$$c = \Delta s' / \Delta t'$$



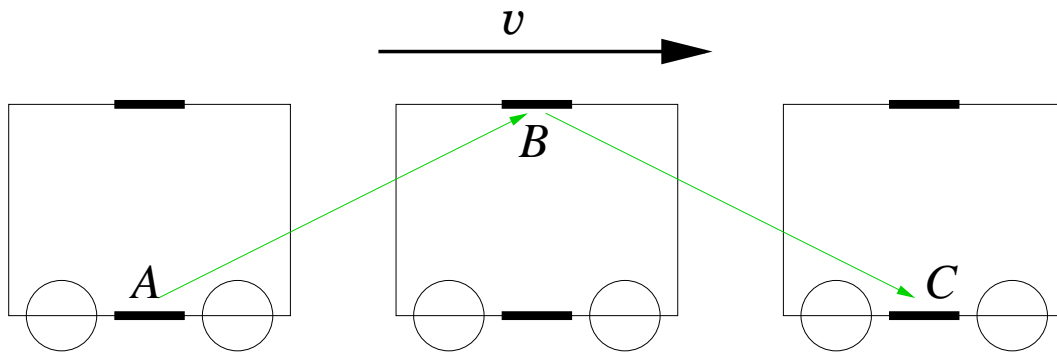
$$c = \Delta s / \Delta t$$



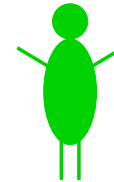
El tiempo no fluye igual para todo el mundo



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



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



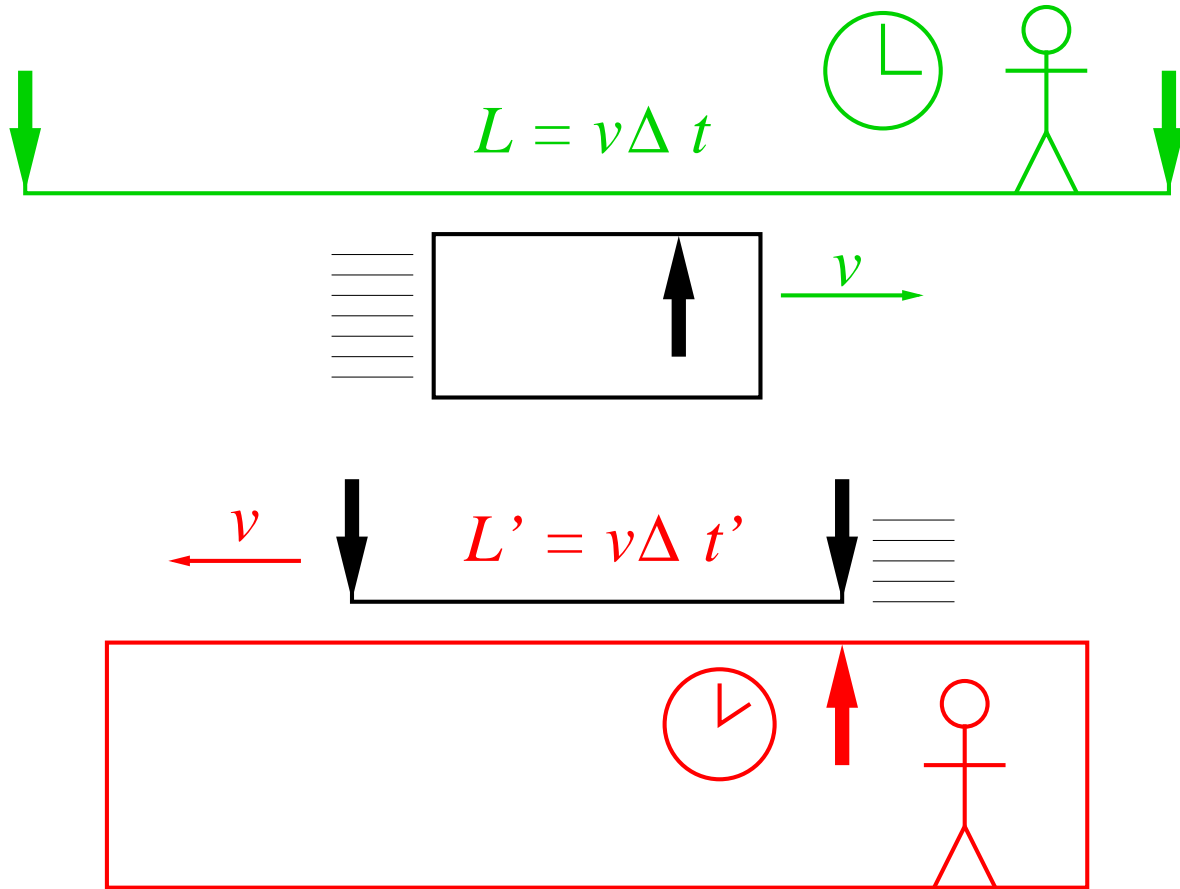
$$\left. \begin{array}{l} c = c \\ \Delta s' < \Delta s \end{array} \right\} \implies \Delta t' < \Delta t$$

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

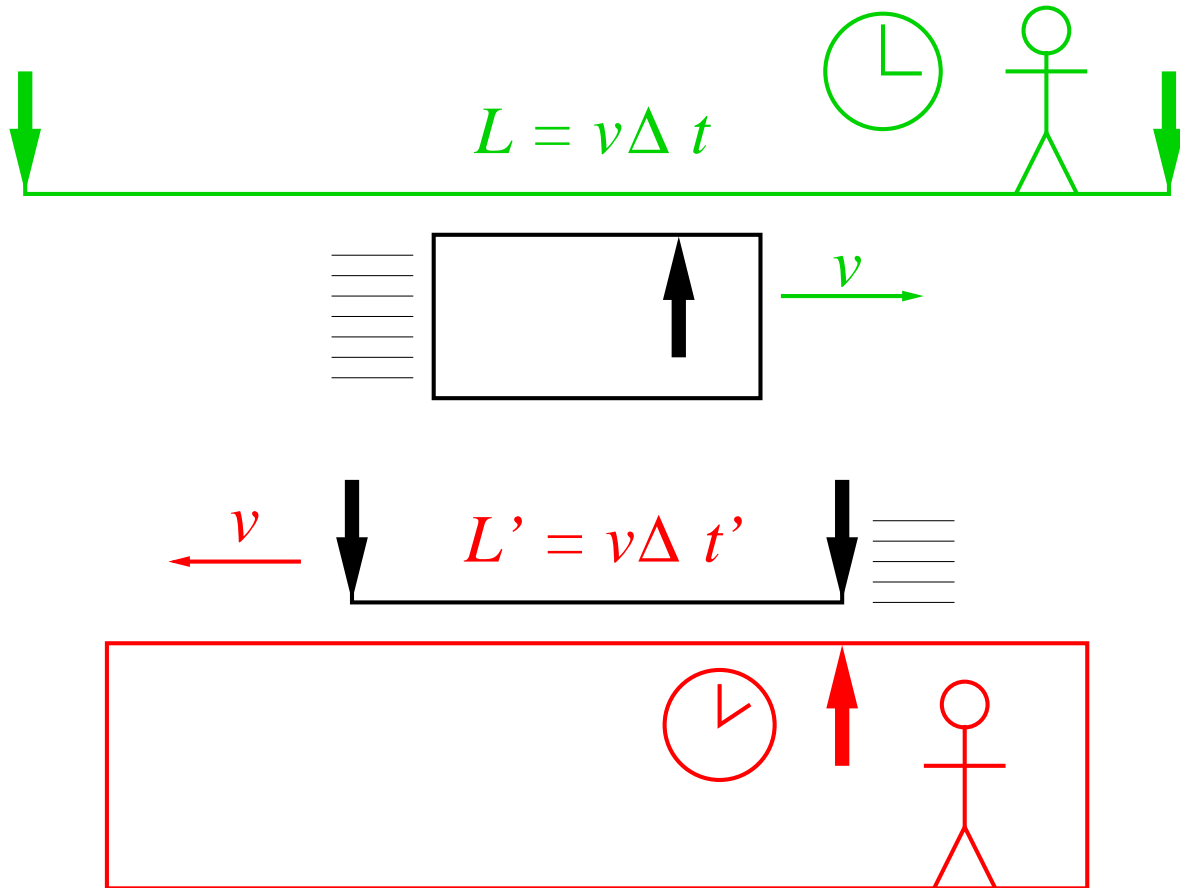
Ha pasado más tiempo para el jefe de estación que para el maquinista

→ Dilatación temporal

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



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



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

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

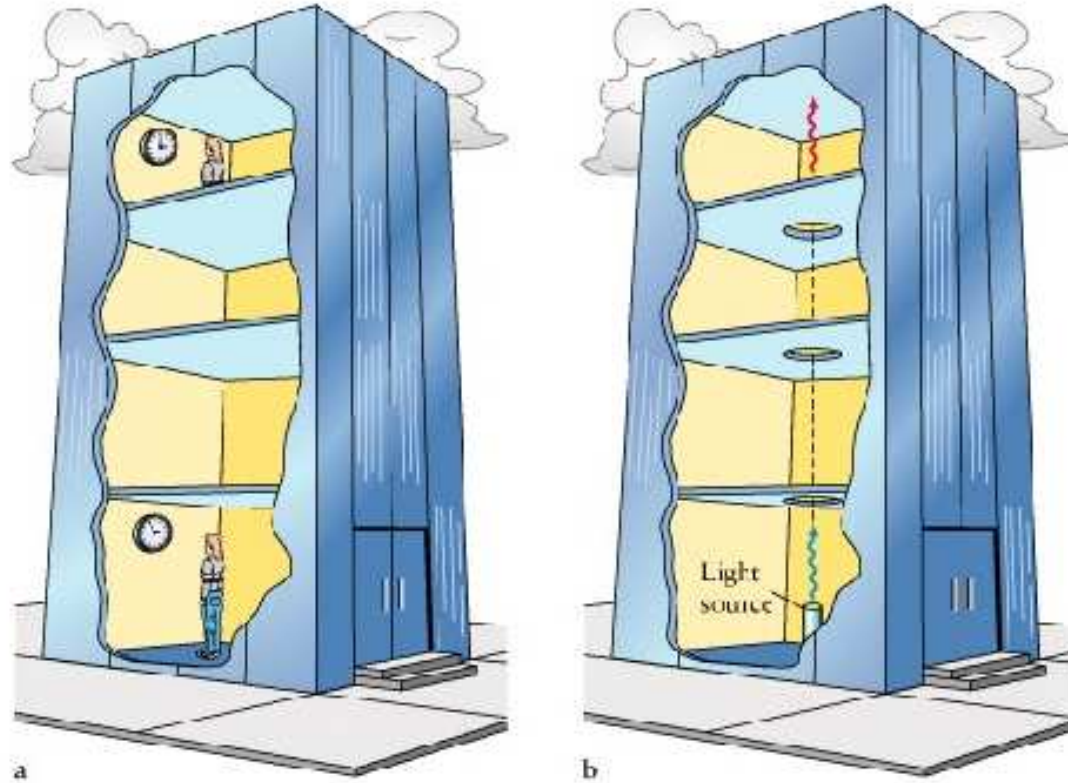
El andén es más corto para el **maquinista** que para el **jefe de estación**

→ Contracción de Lorentz

A. Dilatación temporal

La luz **pierde energía** al salir del pozo potencial

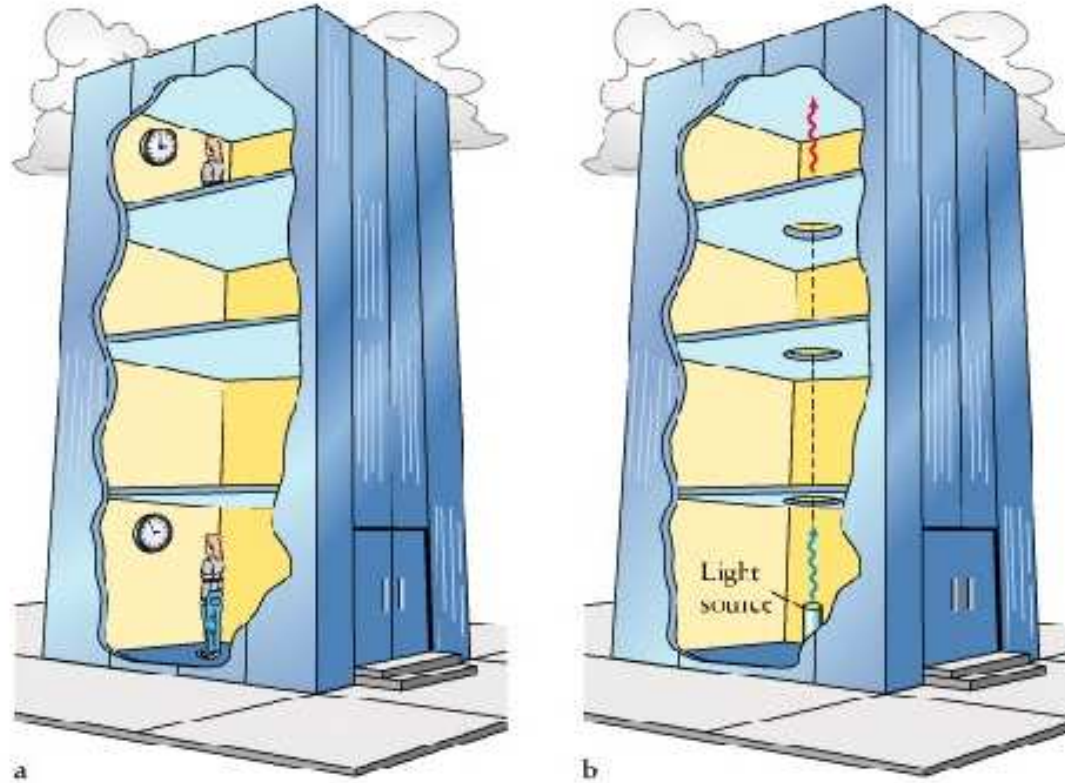
→ Efecto Doppler gravitacional



A. Dilatación temporal

La luz **pierde energía** al salir del pozo potencial

→ Efecto Doppler gravitacional



→ Tiempo corre más lento abajo que arriba!