

# **Relatividad especial**

## **conceptos e intuicion del espacio-tiempo**

**Gino Marceca, Junio 2022**

# Pre-Einstein

**Estos 3 postulados resultaban inconsistentes**

**1. Principio de relatividad de Galileo: (postulado fundamental de la mecánica)**

No existe sistema de referencia privilegiado para hacer experimentos ==

Las leyes de la **mecánica** deben tener la misma forma en todos los sistemas ==

Es imposible percibir el movimiento relativo mediante experiencias mecánicas

**2. Principio de la constancia de la velocidad de la luz: (teoría electromagnética)**

Existe un sistema de referencia en el que todo rayo de luz en el vacío se propaga a una velocidad constante (consecuencia de las ecuaciones de Maxwell)

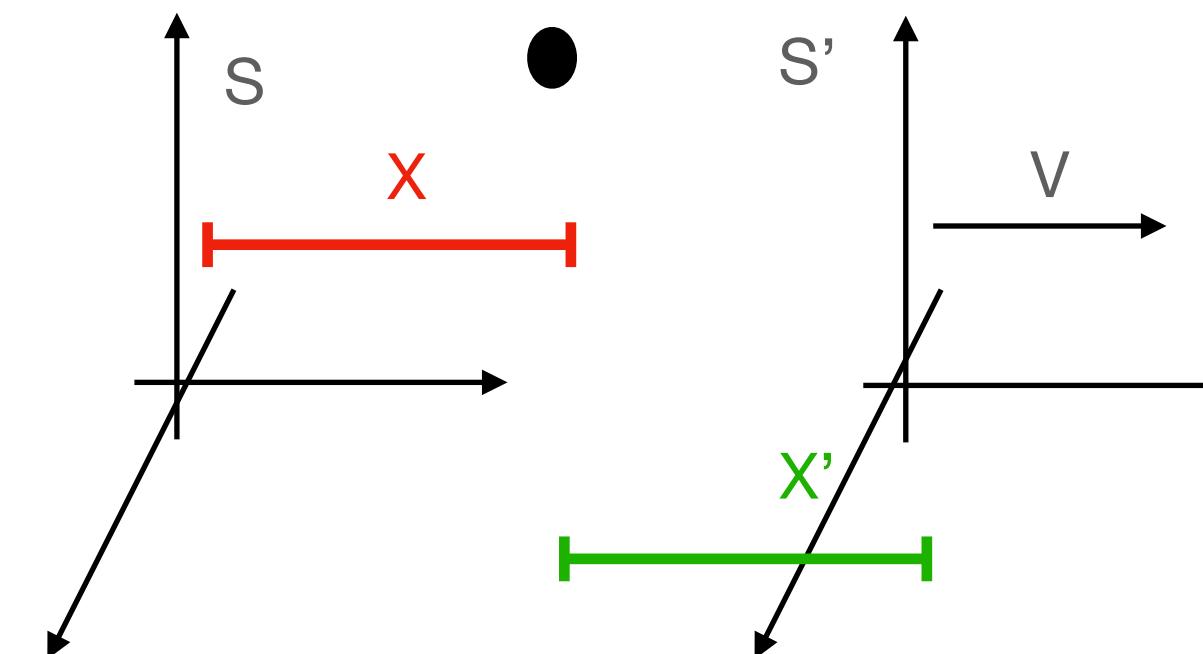
**3. Transformaciones de Galileo (noción del espacio y el tiempo)**

Para distintos observadores en movimiento relativo, las velocidades que perciben, es lo que resulta de la suma vectorial siguiendo la regla del paralelogramo.

$$x' = x - vt$$

$$t' = t$$

Tiempo  
absoluto



# Pre-Einstein

Para resolver la inconsistencia Einstein desecho el (3) y se quedo con (1) y (2)

## 1. Principio de relatividad de Galileo: (postulado fundamental de la mecánica)

No existe sistema de referencia privilegiado para hacer experimentos ==

Las leyes de la **mecánica** deben tener la misma forma en todos los sistemas ==

Es imposible percibir el movimiento relativo mediante experiencias mecánicas

## 2. Principio de la constancia de la velocidad de la luz: (teoría electromagnética)

Existe un sistema de referencia en el que todo rayo de luz en el vacío se propaga a una velocidad constante (consecuencia de las ecuaciones de Maxwell)

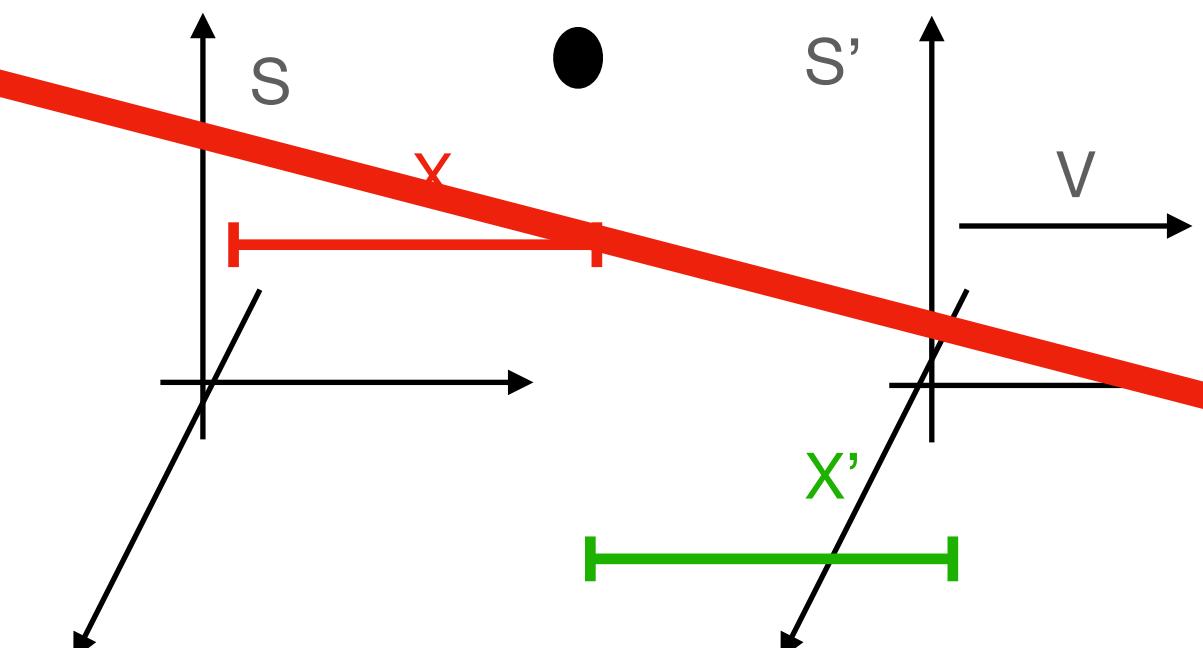
## 3. Transformaciones de Galileo (noción del espacio y el tiempo)

Para distintos observadores en movimiento relativo, las velocidades que perciben, es lo que resulta de la suma vectorial siguiendo la regla del paralelogramo.

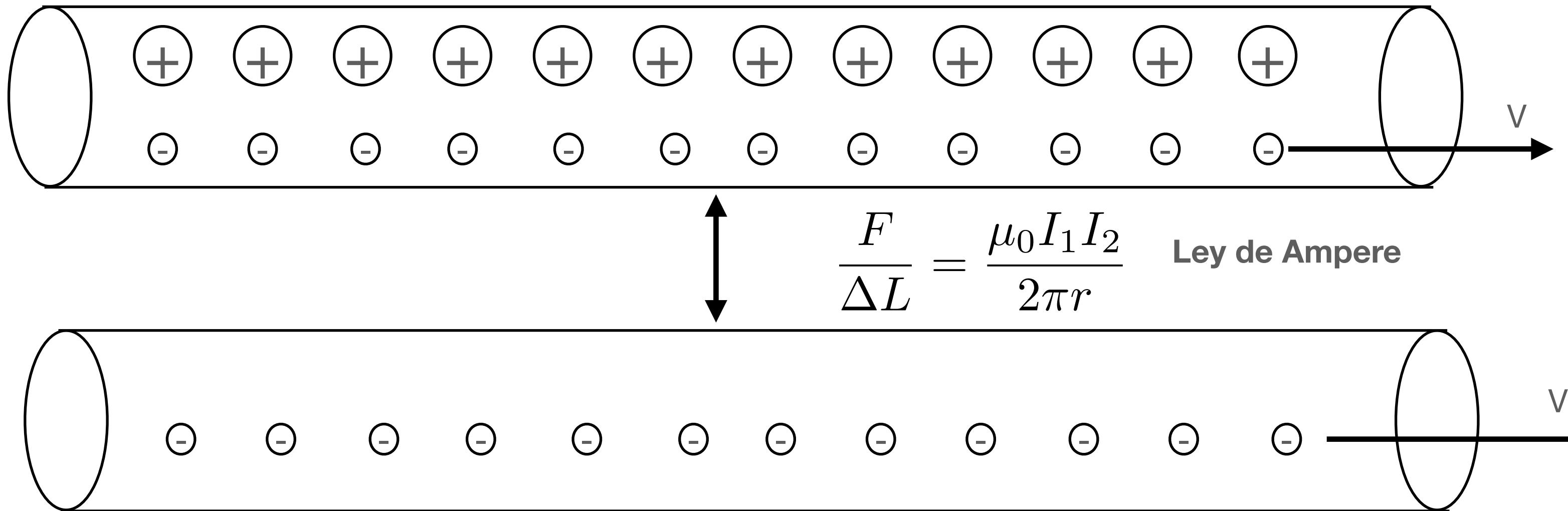
$$x' = x - vt$$

$$t' = t$$

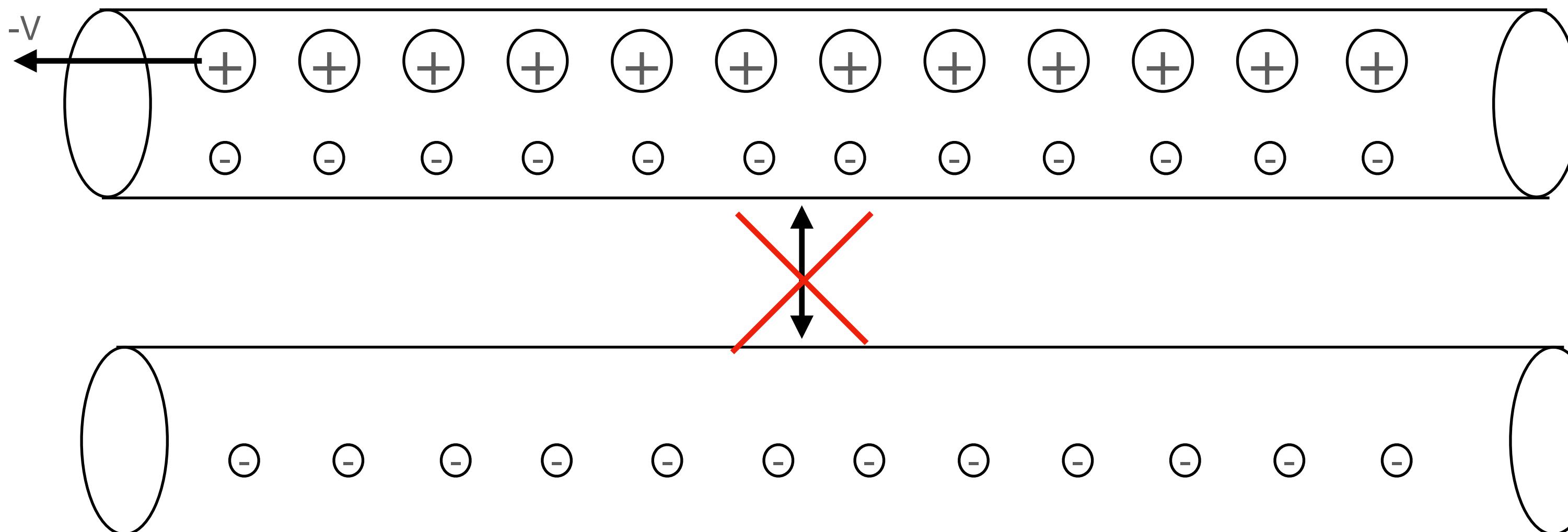
Tiempo  
absoluto



# Incompatibilidad entre la mecanica de Galileo y el electromagnetismo



Haciendo una transformacion de Galileo (si me subo arriba del cable):

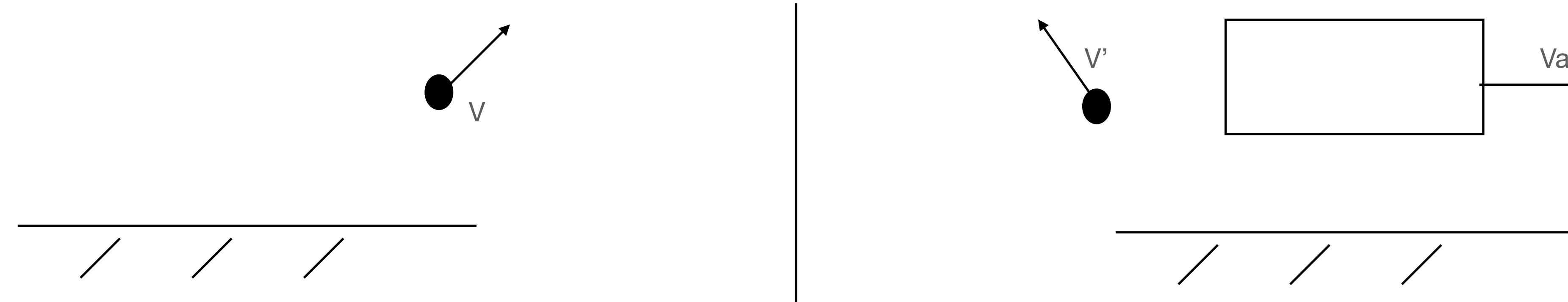


Los electrones en este sistema estan en reposo.  
No hay fuerza magnetica dado que solo hay una  
corriente, la de los protones  
(necesito por lo menos dos corrientes).  
Tampoco hay fuerza electrica dado que el cable de arriba  
es neutro  
→ inconsistencia con el principio de Galileo

# Bases de la teoría de la relatividad

1. Principio de relatividad de Galileo:

No existe sistema de referencia privilegiados para hacer experimentos



2. La velocidad de la luz en el vacío es constante y absoluta para todos los observadores:

Esto último lo propuso Einstein para que la mecánica de Newton sea consistente con la teoría electromagnética y no se viole (1)

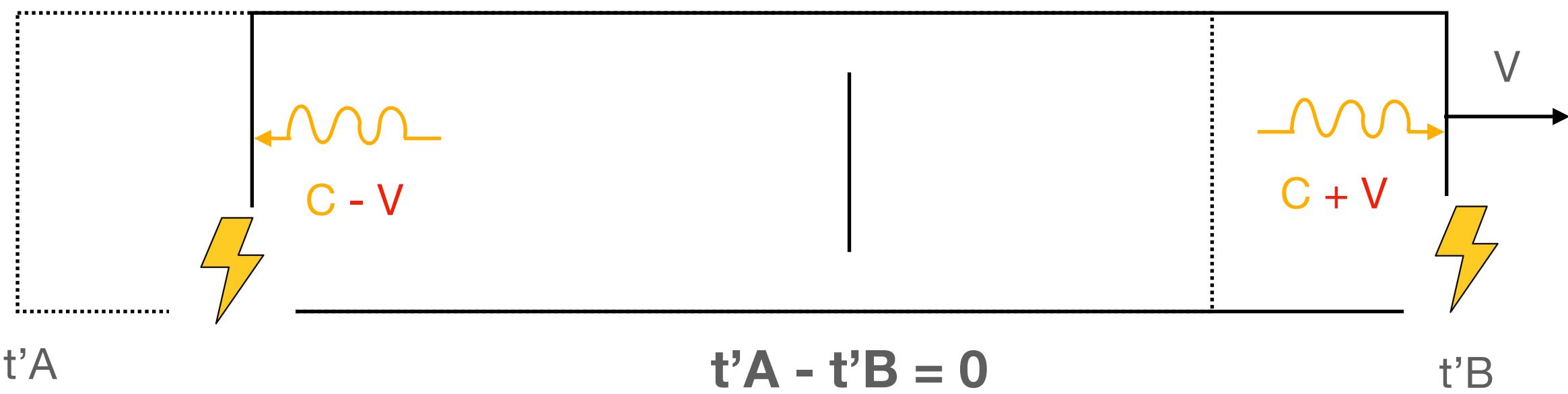
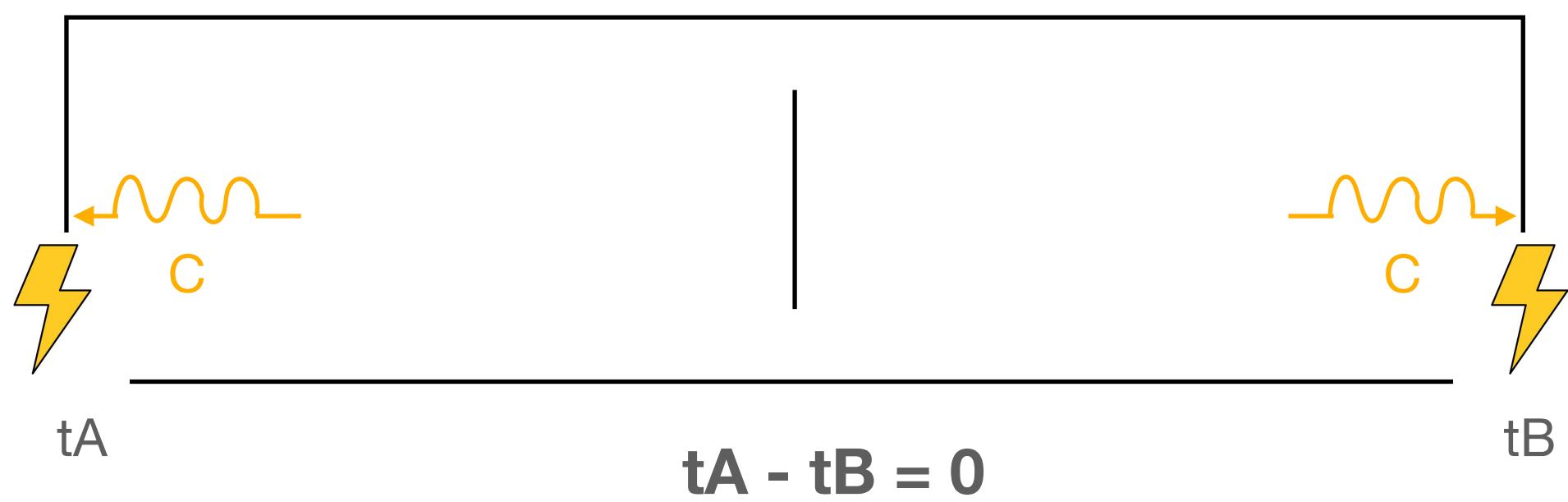
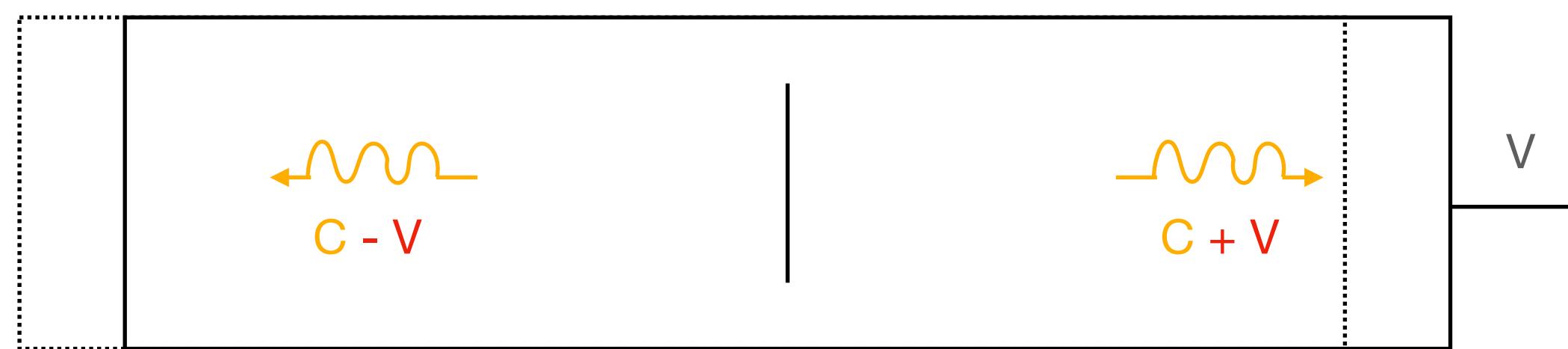
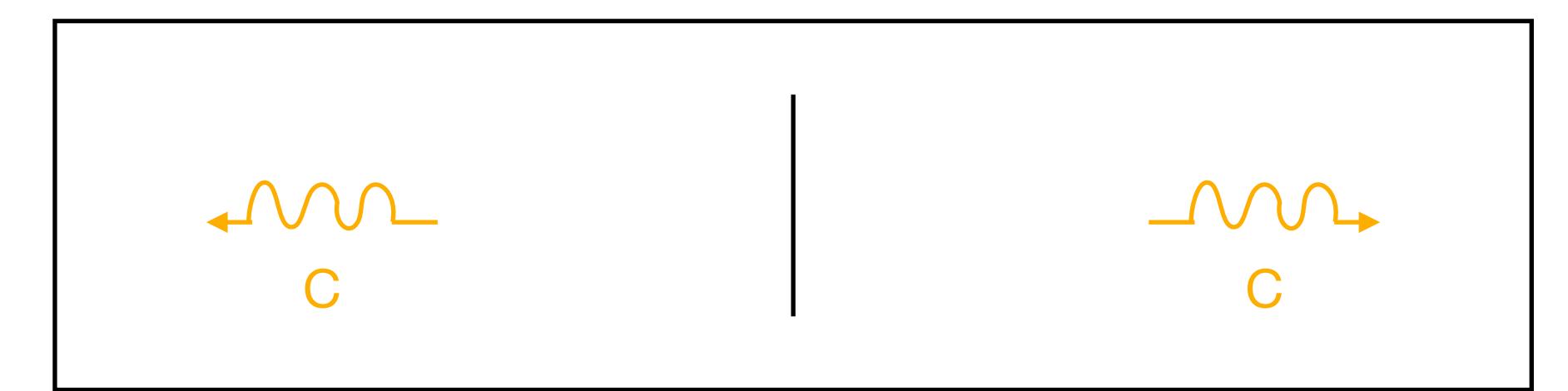
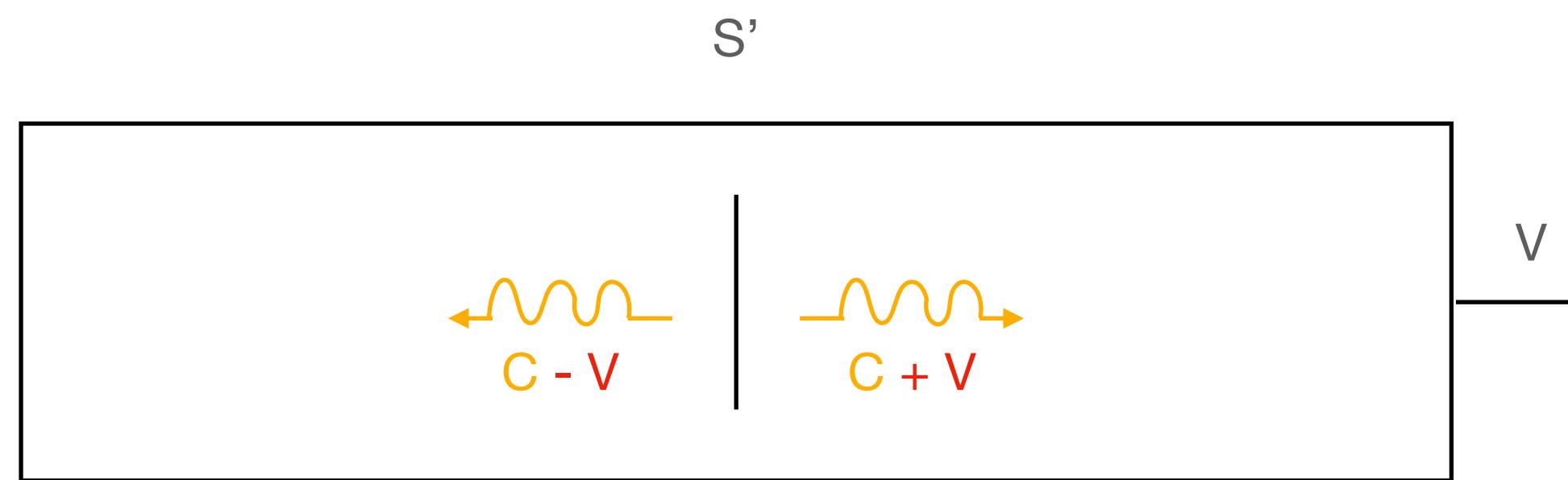
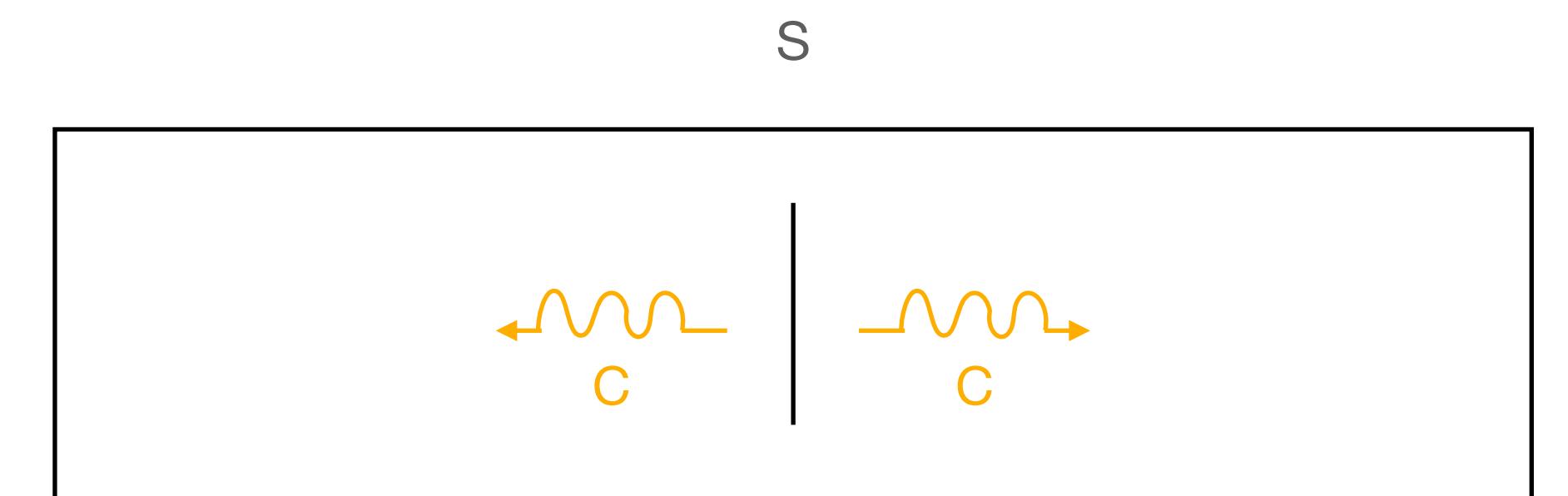
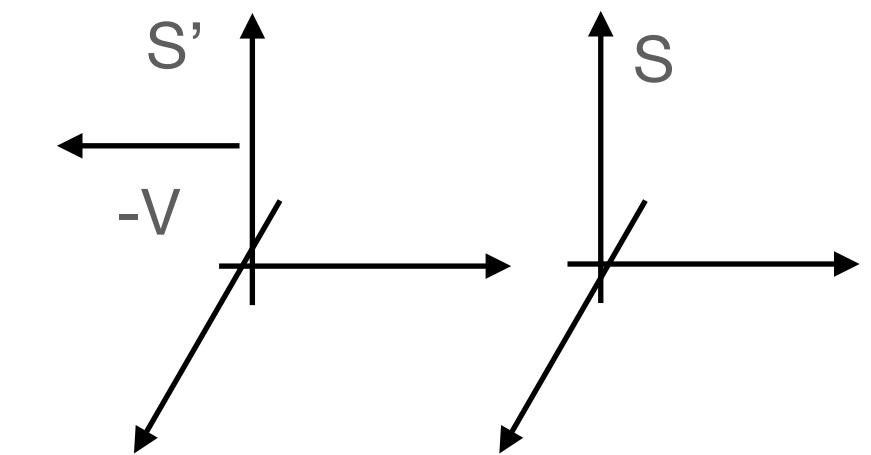
# Posibles preguntas

- Por que resulta inconsistente que la velocidad de la luz adquiera distintos valores y no que lo hagan distintas partículas materiales?
- Lorentz mostró que las ecuaciones de Maxwell (leyes fundamentales del electromagnetismo) obedecen ecuaciones de ondas que viajan a la velocidad de la luz. De aquí que Maxwell concluyó que velocidad de la luz es una onda electromagnética... al contrario de lo que sucede con partículas materiales que se mueven en el espacio (CINEMATICA), el electromagnetismo describe la DINAMICA y por ende las interacciones entre la materia. Si dejamos que la velocidad de la luz adquiera distintos valores dependiendo del sistema de referencia, las interacciones fundamentales resultarían distintas y por ende podría determinar el movimiento relativo ya que notaría distinta física en distintos sistemas en movimiento.

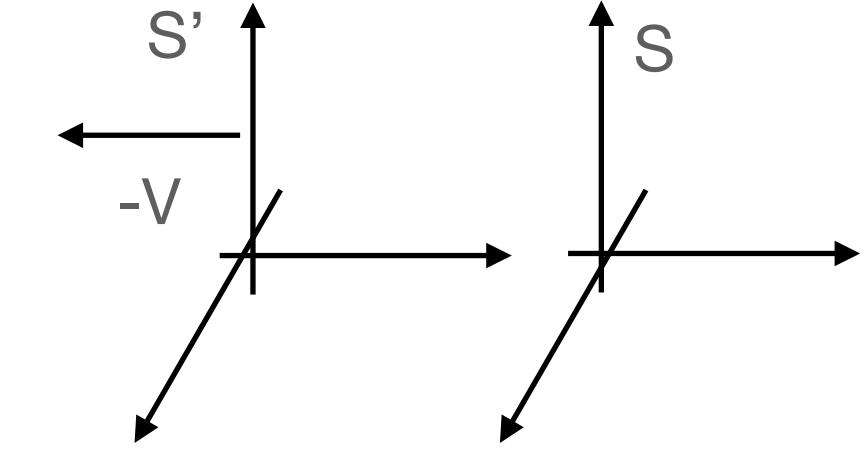
• A fines del siglo XIX se consideraba al centro del sistema solar un sistema privilegiado. Si el principio de relatividad no fuese valido, podría entonces medirse el movimiento translacional de la tierra alrededor del Sol (unos 30 km/s) mediante experimentos hechos en la tierra. El principio de relatividad podría violarse ya sea por anisotropia (dirección de movimiento privilegiada) o cantidad de movimiento (por ejemplo que la relación entre la longitud de onda entre una linea espectral y las dimensiones de un cuerpo específico dependa de la velocidad de la tierra respecto al Sol. Todos los esfuerzos para violar el principio de relatividad (como el de Michelson-Morley) resultaron fallidos.

# La simultaneidad absoluta en Newton

- En Newton  $t'A - t'B = 0$ . Y eventos simultáneos en S lo son tambien en  $S'$ .

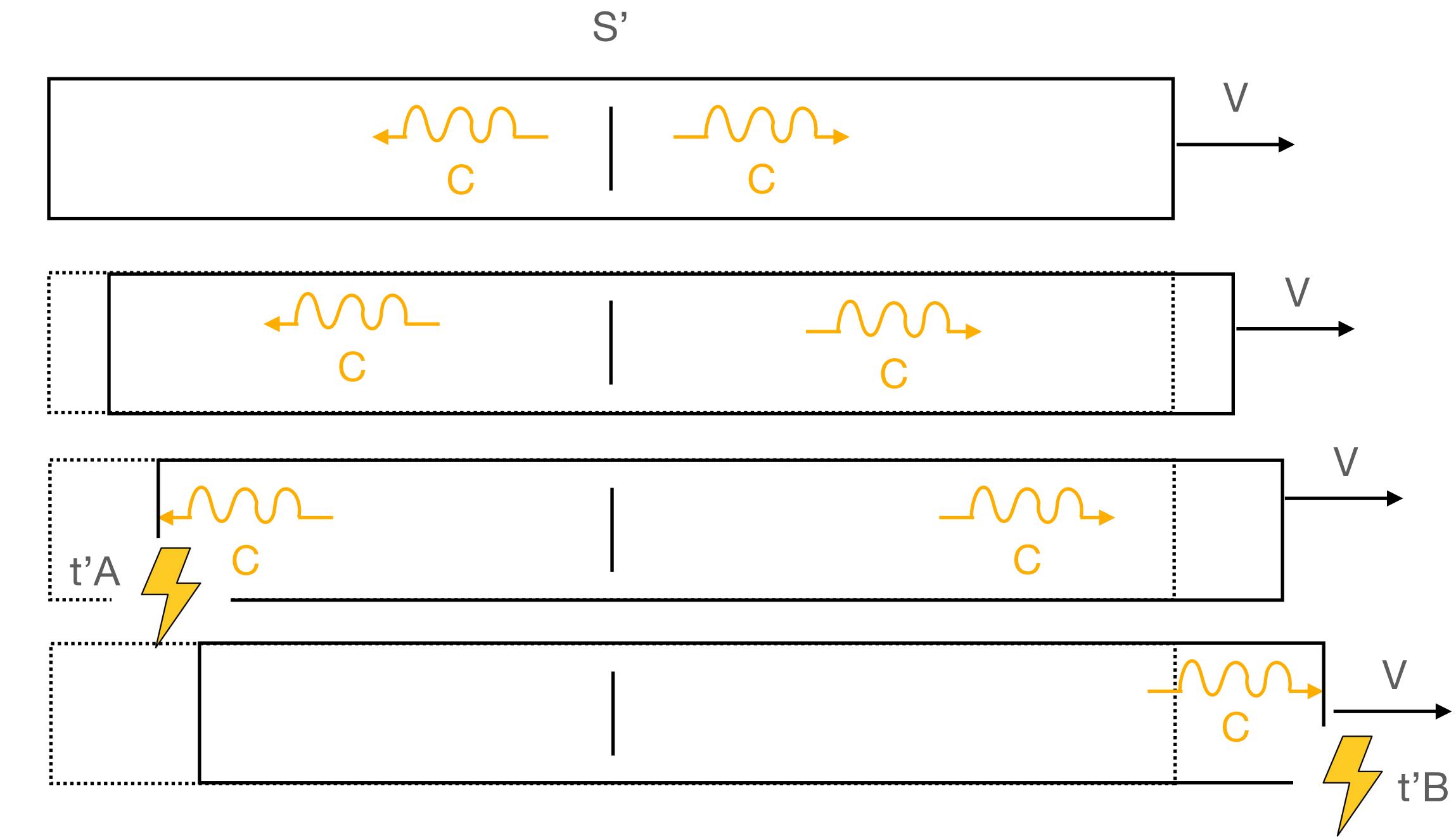
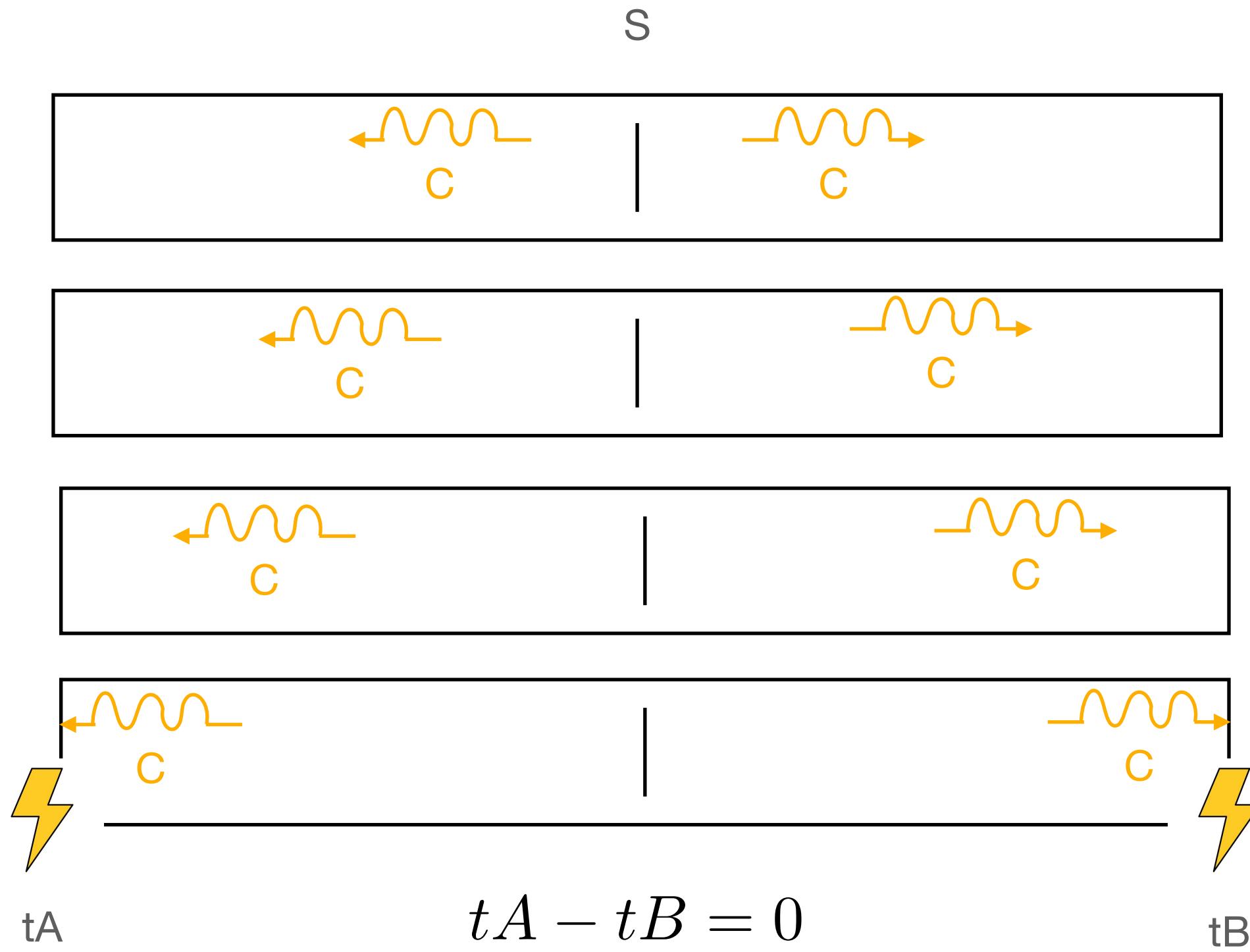


# La simultaneidad es relativa



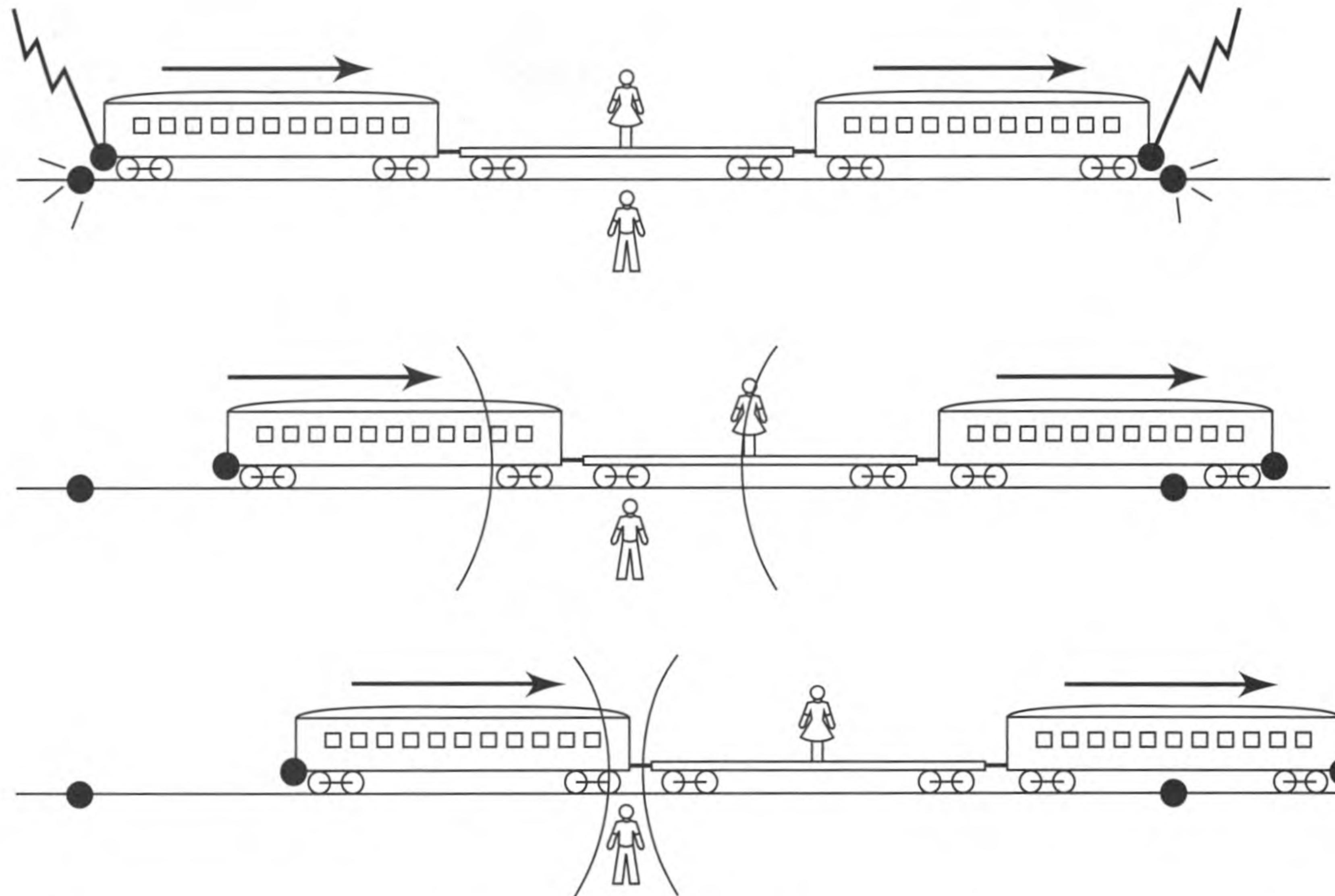
- Postulado fundamental de la relatividad:

La velocidad de la luz es absoluta y universal en todos los sistemas de referencia y tiene un valor de C independientemente de quien mida.



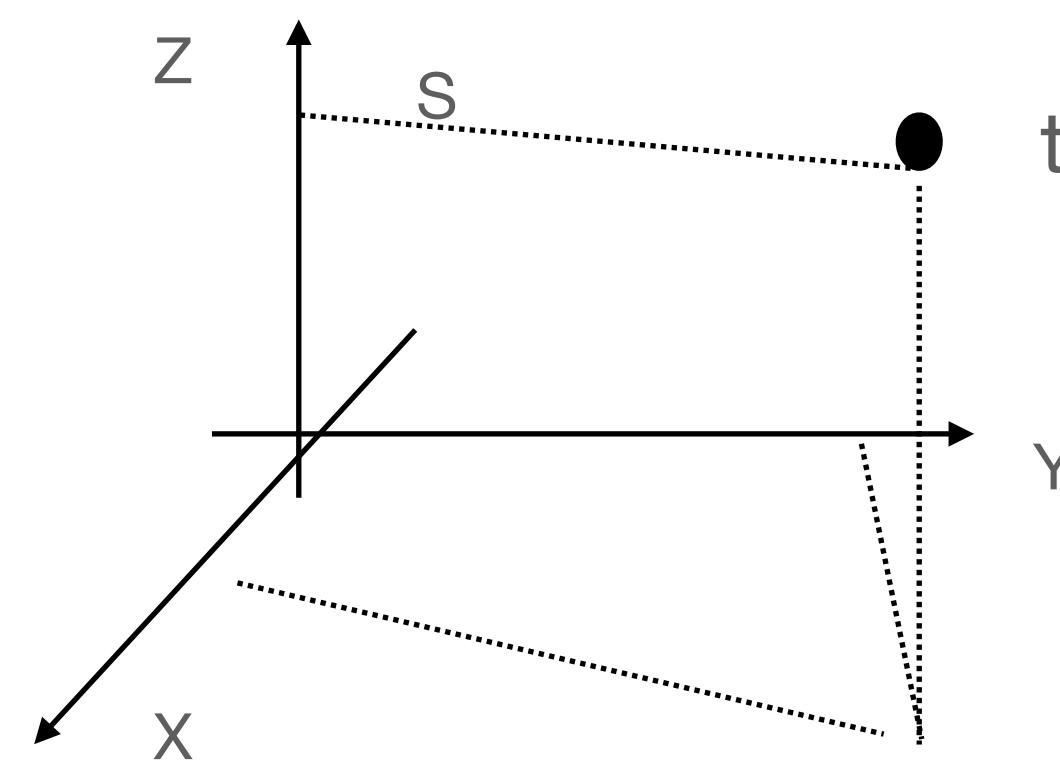
- Como consecuencia, los eventos A y B son simultáneos en S pero no lo son en S'. Esto ve que A precede a B.
- Usar los adverbios de tiempo como “ahora”, “en este momento”, “cuando” en forma generica es erroneo, y hay que especificar el sistema de referencia (su “ahora”, su “en este momento”, su “cuando”) de quien observa.

# La paradoja del tren



# El espacio-tiempo de Einstein

En la época de Newton una particular material solía describirse dando las 3 coordenadas espaciales respecto a un sistema de referencia y una coordenada universal ( $t$ ) para denotar el instante en que sucede un suceso.



Vimos que la noción de instante absoluto pierde sentido con la relatividad. Einstein propone otra forma de describir las coordenadas de un suceso, y por ende de medir el espacio y el tiempo.

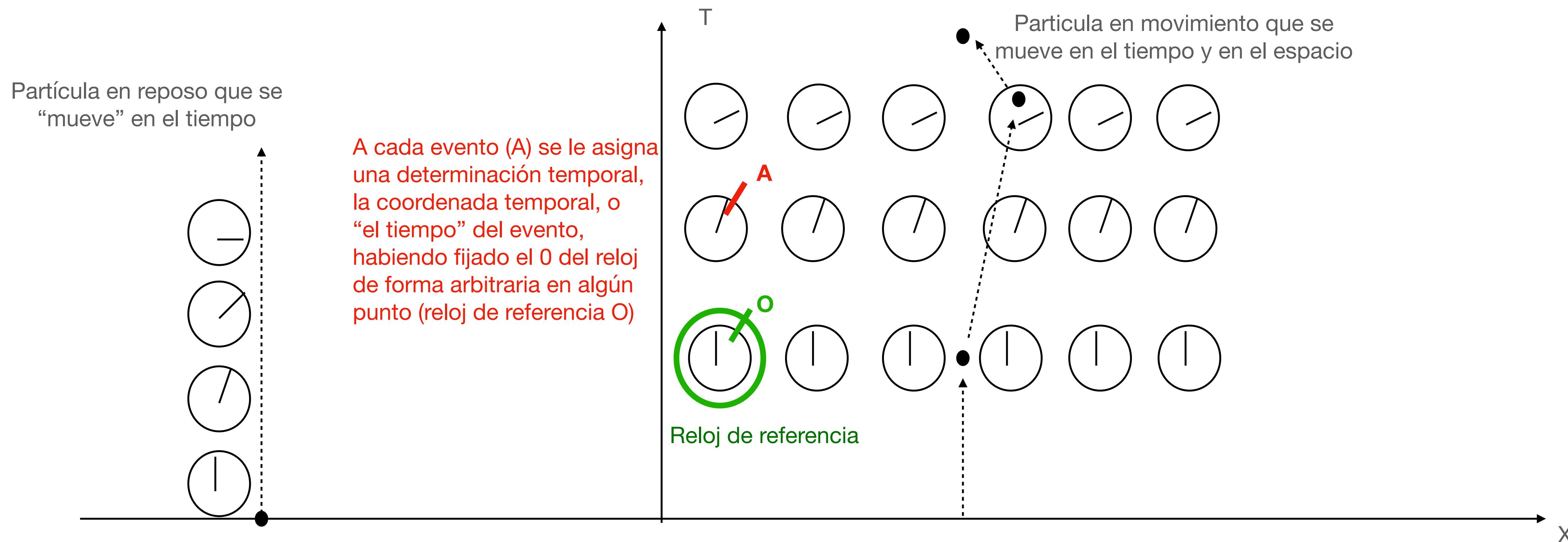
Einstein propone agregar una coordenada temporal adicional (una cuarta dimensión) para describir un suceso. Y la determinación del tiempo sería resultado de un procedimiento de medición físico.

# El espacio-tiempo de Einstein

Para determinar la coordenada temporal, Einstein propone usar “relojes”. Un reloj se define como un sistema físico que cambia de estado  $Z$  a  $Z'$  etc hasta que vuelve al estado  $Z$  y lo hace de forma periódica. Podemos medir el pasaje del tiempo **contando** las veces que el sistema volvió al estado  $Z$ .

Imaginemos pues el espacio-tiempo de Einstein repleto de relojes. En cada coordenada espacial nos encontramos con un reloj.

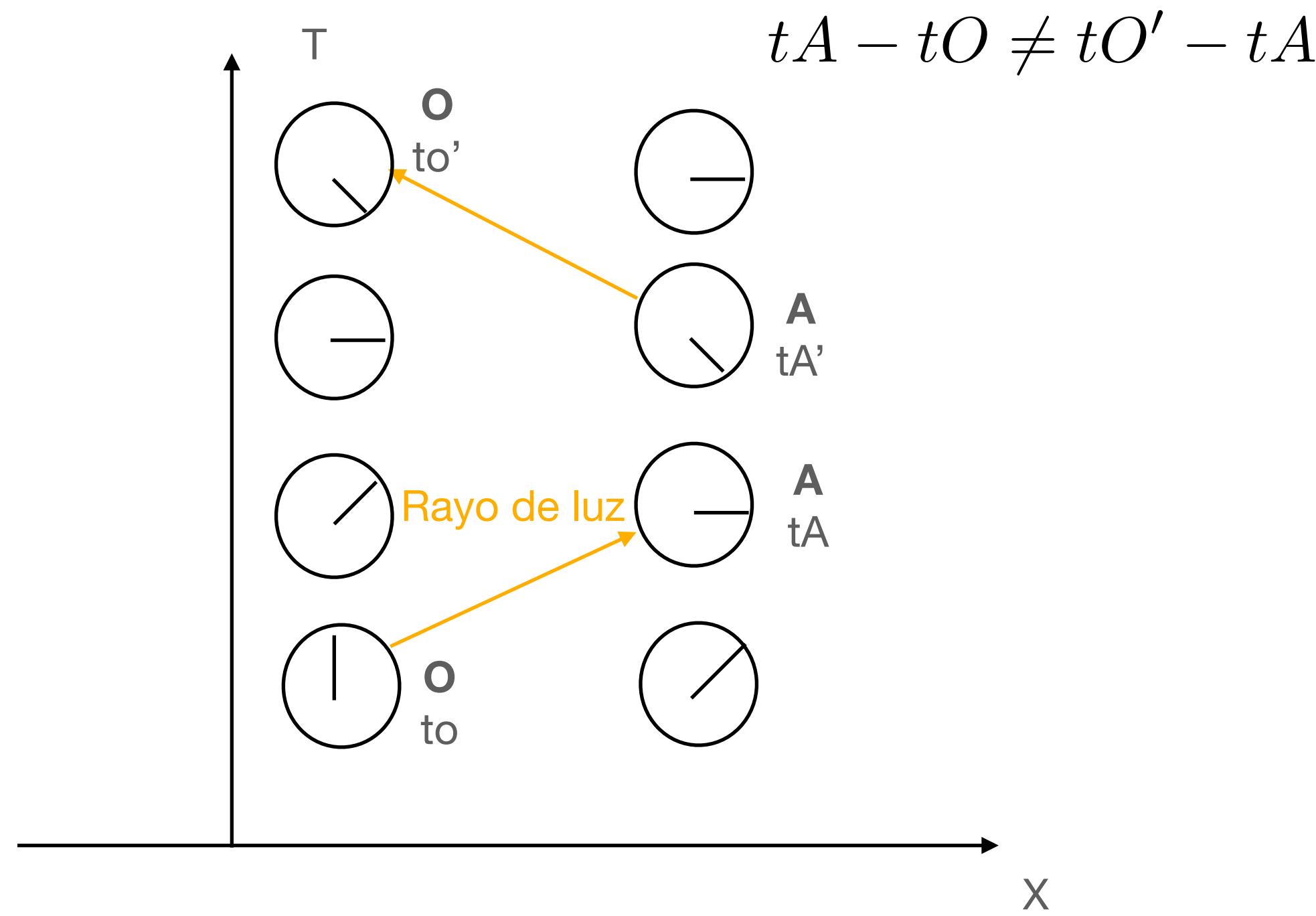
# Diagrama espacio-temporal de Einstein



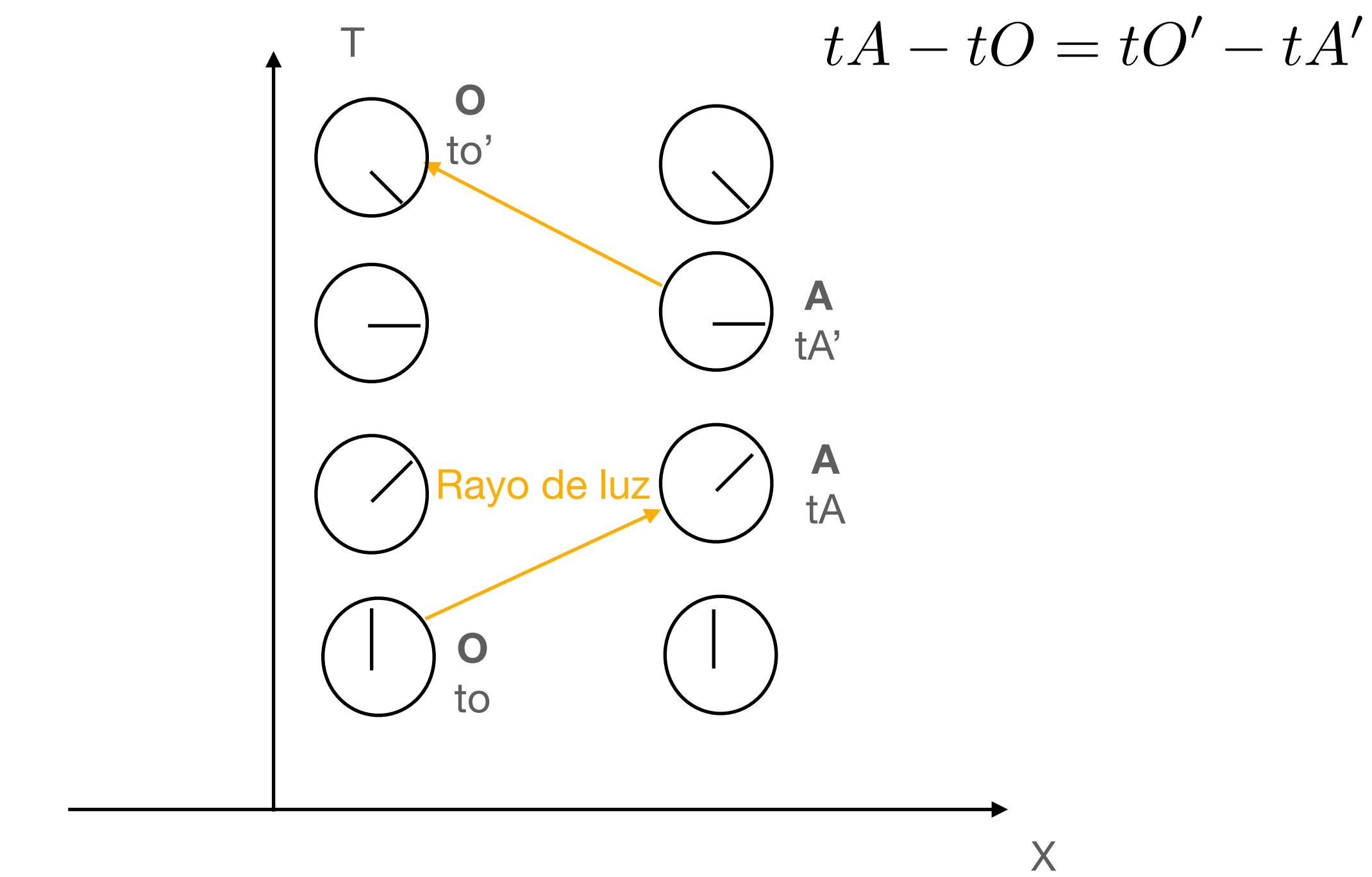
- Para relacionar los eventos A con O y establecer una conexión entre las determinaciones temporales que ocurren en O y A, utilizamos un procedimiento físico para que un reloj en una coordenada arbitraria A pueda regularse de acuerdo con O. Esto se denomina **SINCRONIZACION DE RELOJES** y es un proceso fundamental para hacer mediciones válidas de un suceso en un sistema dado.

# Proceso fisico de sincronizacion de relojes

Reloj NO sincronizados

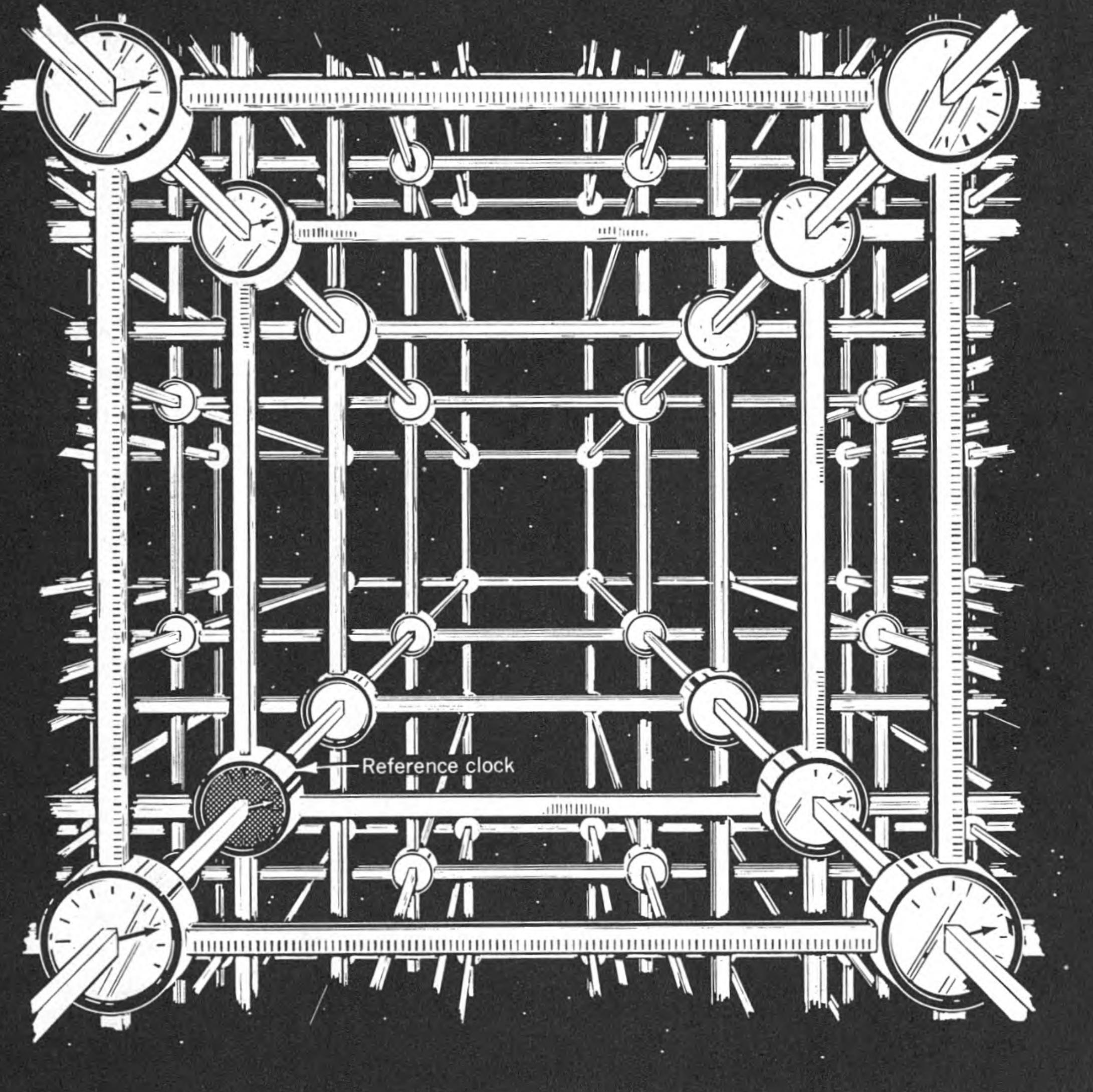


Reloj sincronizados



## Sincronizacion de Einstein:

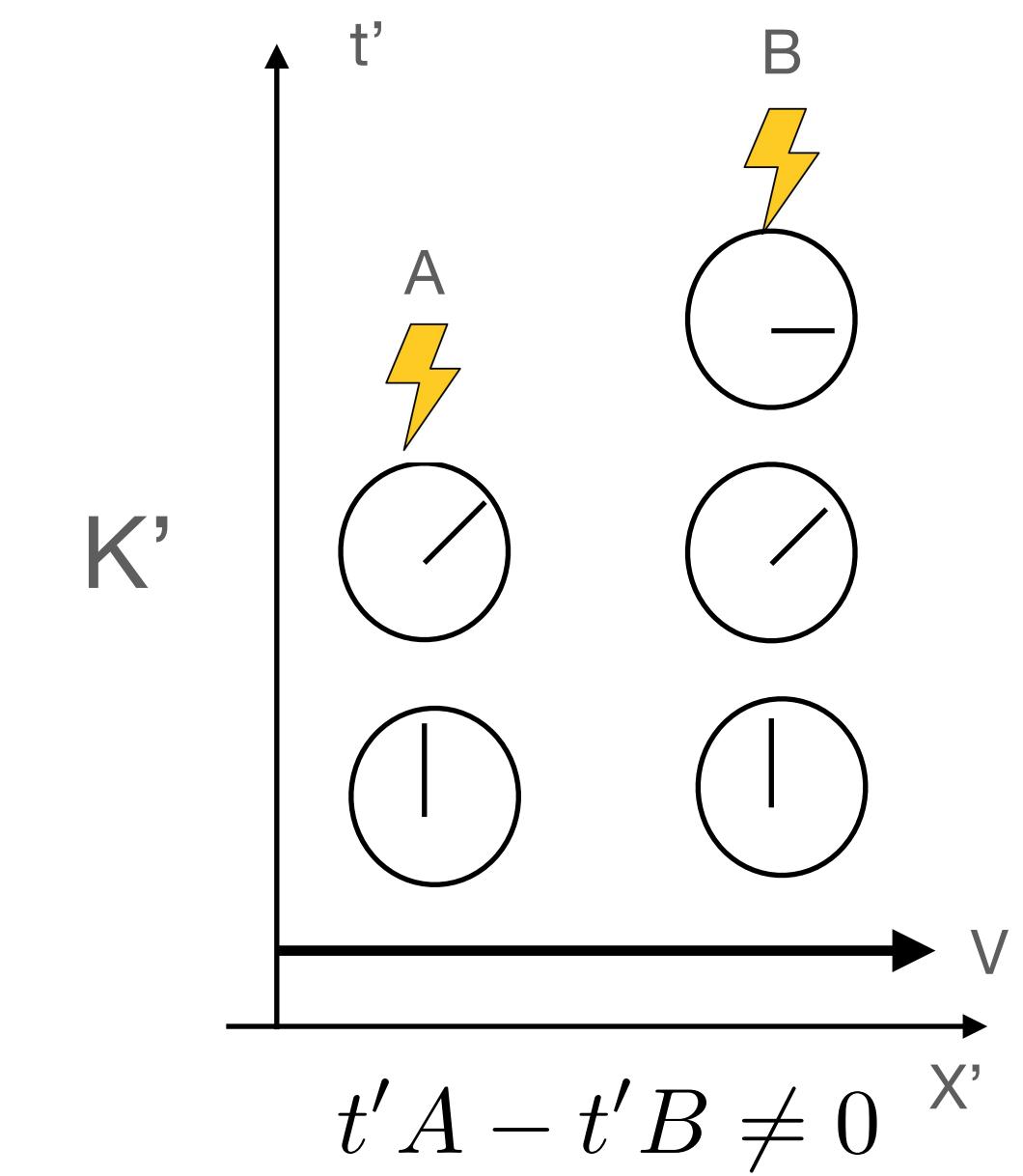
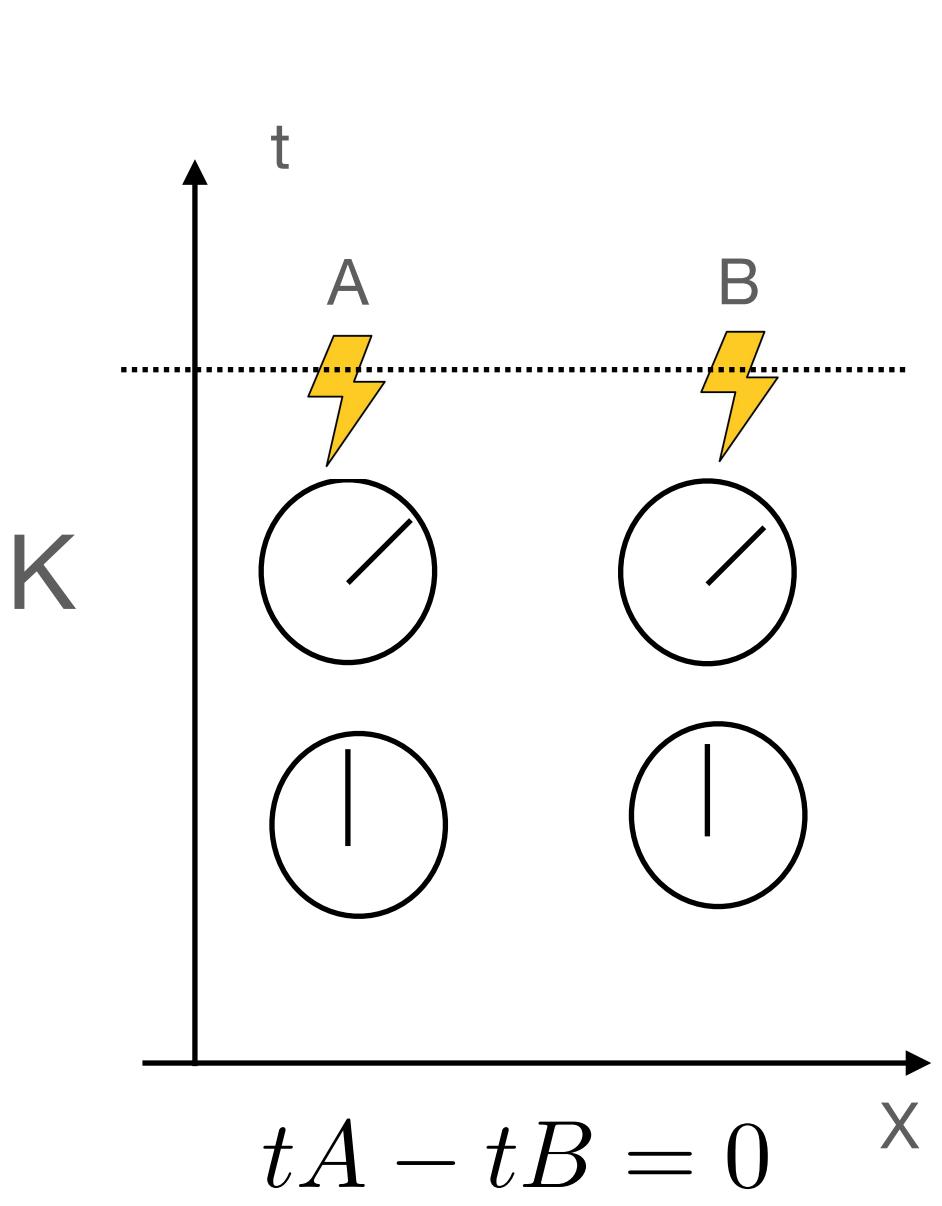
- Se envia una señal de O a A y vice versa (O - A) y (A - O). La señal enviada de O a tiempo  $t_0$  llega a A en el tiempo  $t_A$  (tiempo medido en A). Para que O y A estén en sincronía, el reloj de A debe cumplir que  $t_A - t_0 = t_{O'} - t_A'$ .
- Luego de este procedimiento, cada reloj estará sincronizado con respecto a cada uno del resto (no se privilegia el reloj de referencia O)



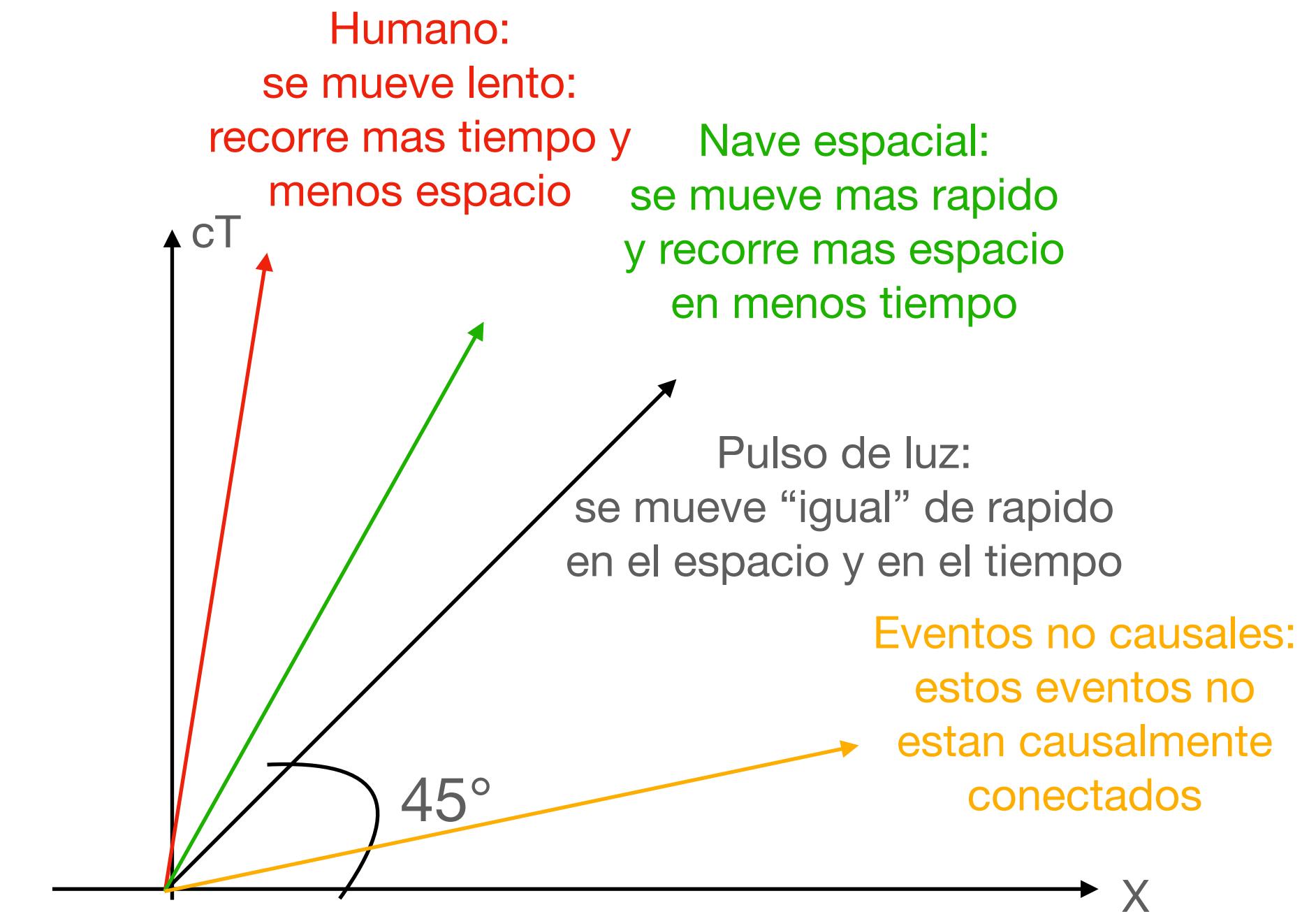
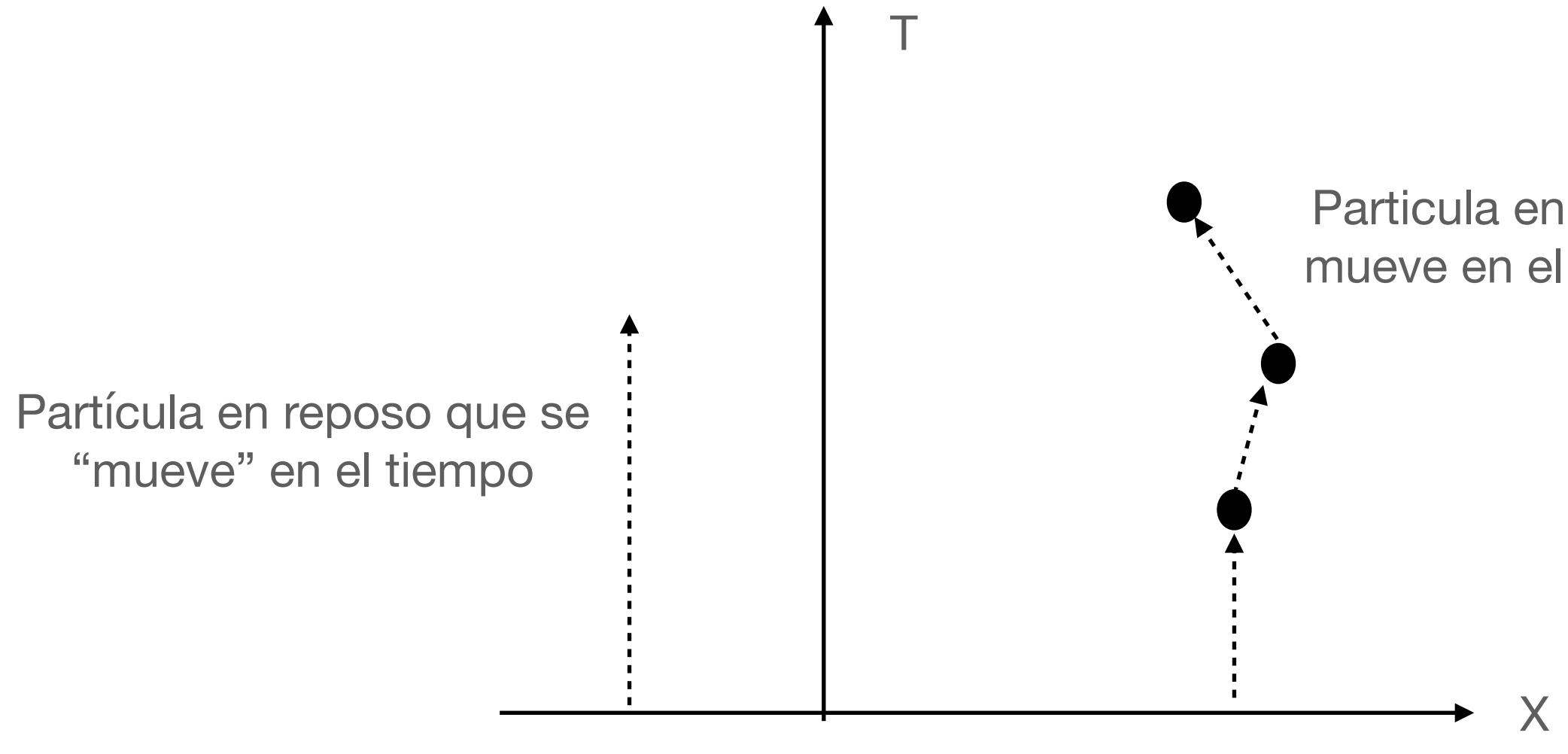
Observador: conjunto de relojes sincronizados asociados a un sistema de referencia.

Medicion: En la practica podemos pensar a una persona que recolecta los datos registrados por los relojes.

- Para la medición del tiempo y longitudes, necesitamos un sistema de referencia  $K$  con relojes idénticos, sincronizados y en reposo respecto a  $K$ .
- Podemos imaginar ahora un sistema  $K'$ , de la misma naturaleza que  $K$ , pero en movimiento relativo uno respecto al otro. En principio vemos que las coordenadas de un evento  $(t, x, y, z)$  en  $K$  y  $(t', x', y', z')$  de ese mismo evento en  $K'$ , son totalmente independientes en base a como las definimos con el procedimiento de medición.



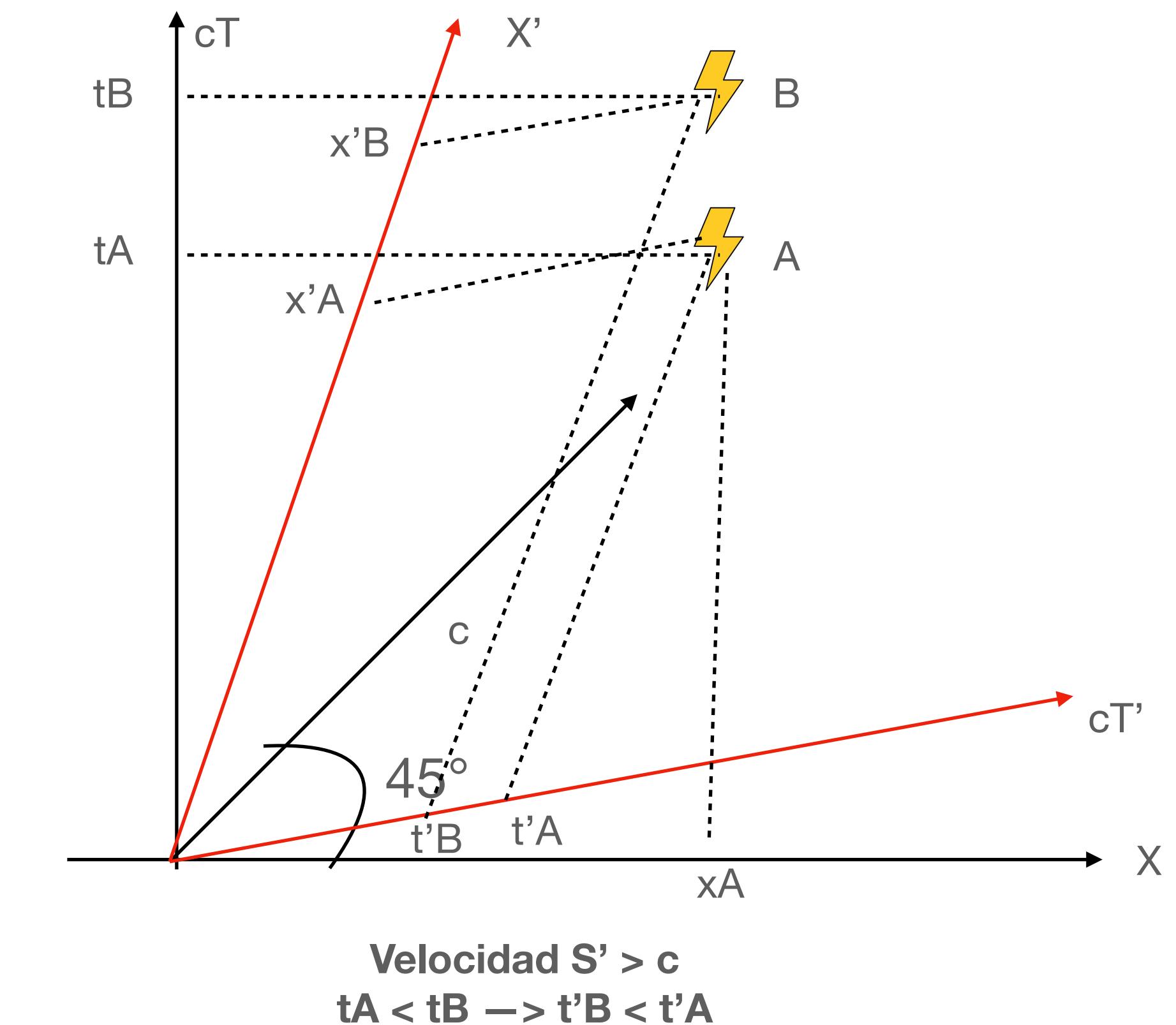
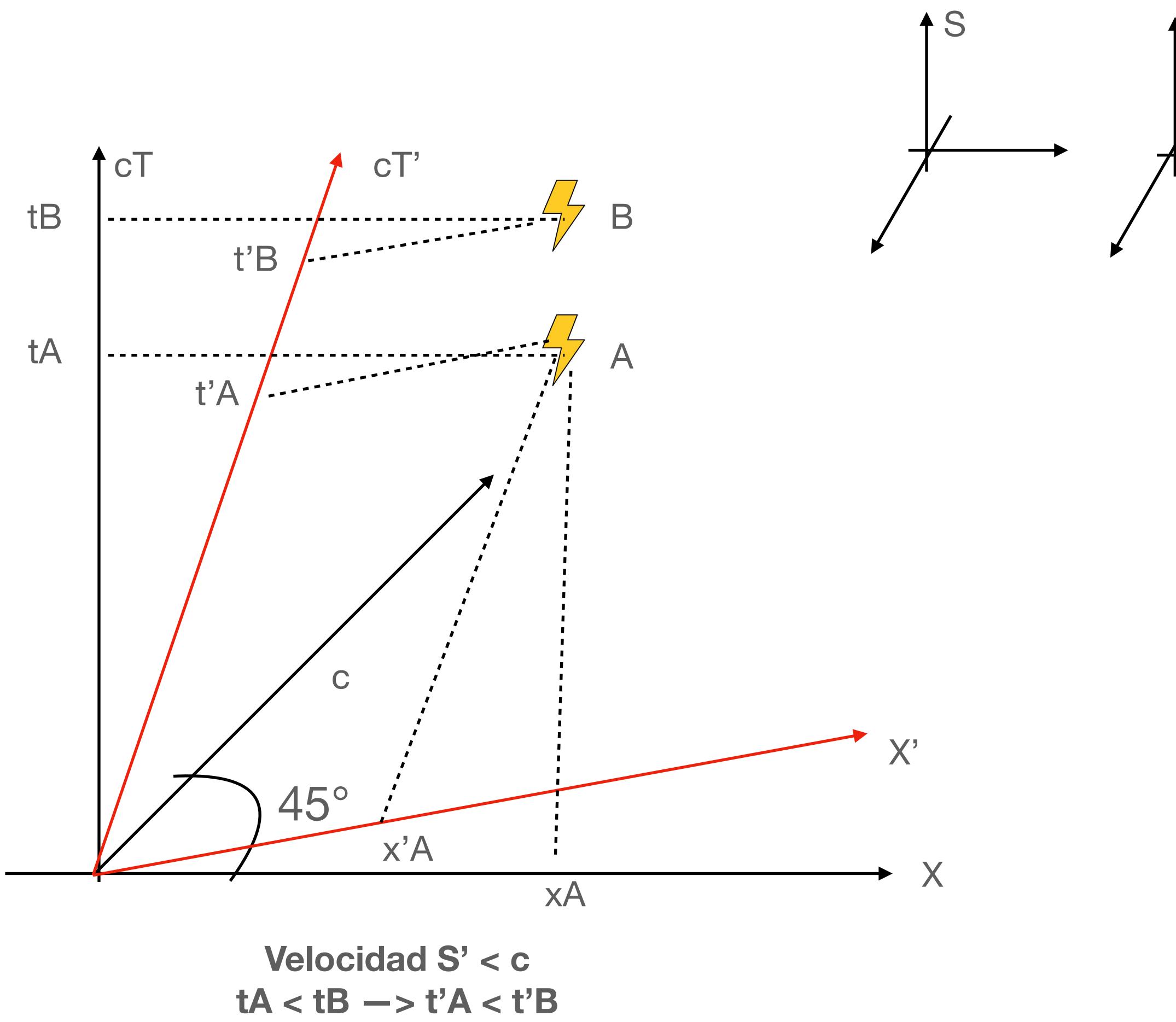
# Diagrama espacio-temporal de Einstein



- Que ningún cuerpo pueda superar la velocidad de la luz permite que la causalidad no se viole. Se puede ver que dos eventos A y B causalmente conectados ( $A \rightarrow B$ ) mantienen el orden (causa - efecto) para todo observador. Es decir la causalidad se conserva.

# Se puede ir mas rapido que la luz?

- Si yo viajase mas rapido que la luz, entonces podria observar los efectos antes que las causas.
- Viajar mas rapido que la luz equivale a una particula moviendose hacia atras en el tiempo.
- “*En principio no nada que impida ir mas rapido que c, siempre y cuando se mantenga una flecha del tiempo consistente... la relatividad nos dice que no sabe como hacerlo.*”

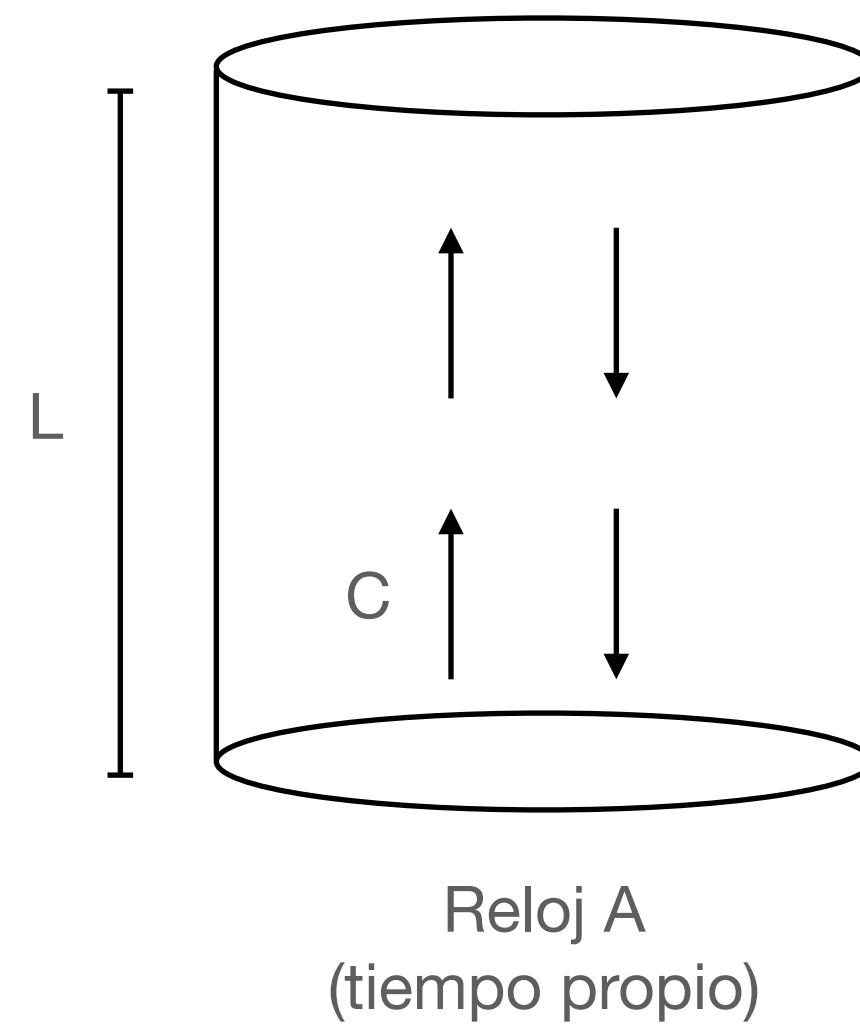


## Observador “ocular” vs observador “real”

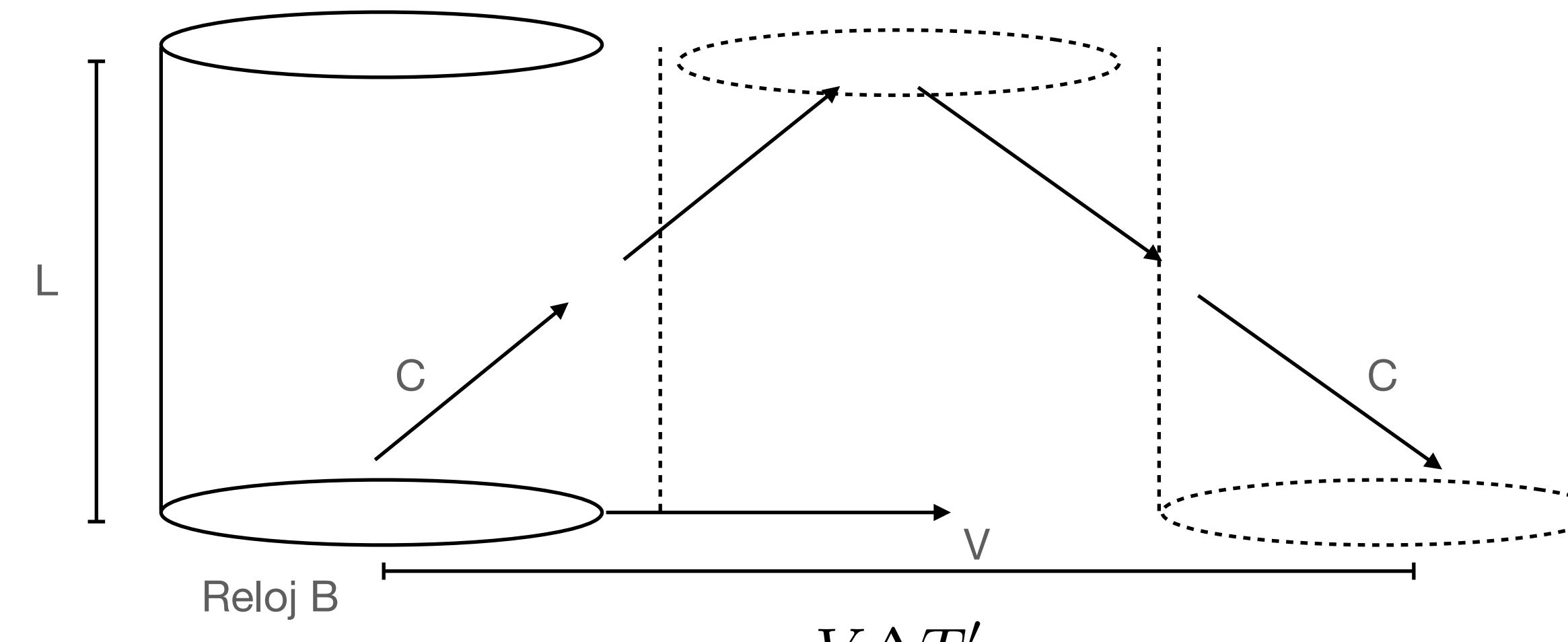


# dilatación del tiempo

- El tiempo aparenta fluir mas lento para un observador en movimiento respecto a otro.



$$c\Delta T/2 = L$$

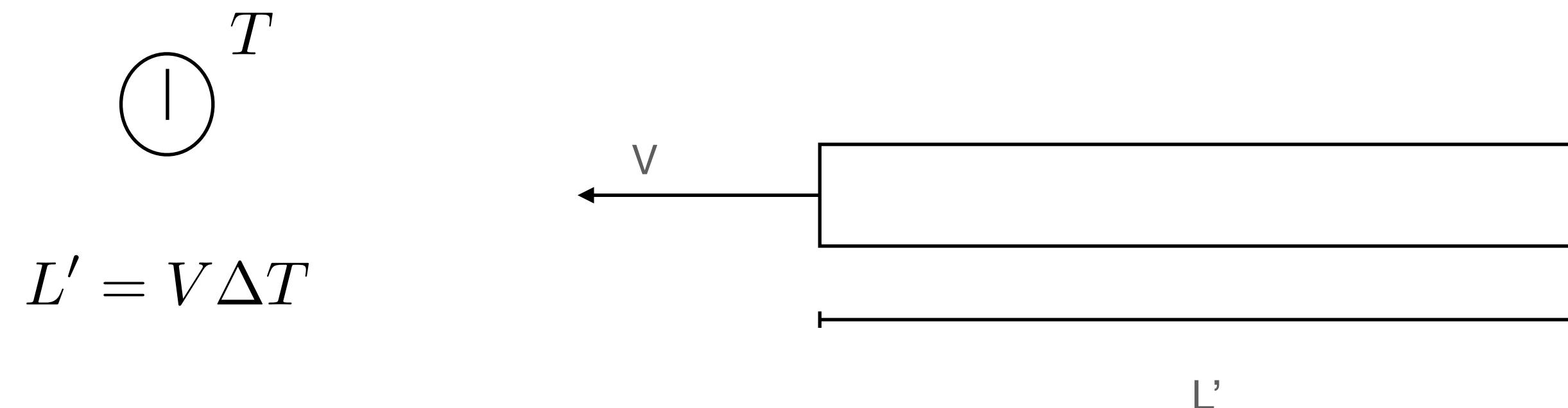


$$(c\Delta T'/2)^2 = L^2 + (V\Delta T'/2)^2 \longrightarrow \text{Pitagoras}$$

$$\begin{aligned} (c\Delta T')^2 &= (c\Delta T)^2 + (V\Delta T')^2 \\ \rightarrow \Delta T' &= \Delta T / \sqrt{1 - V^2/c^2} = \Delta T \gamma \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - V^2/c^2}, \quad \gamma > 1 \end{aligned}$$

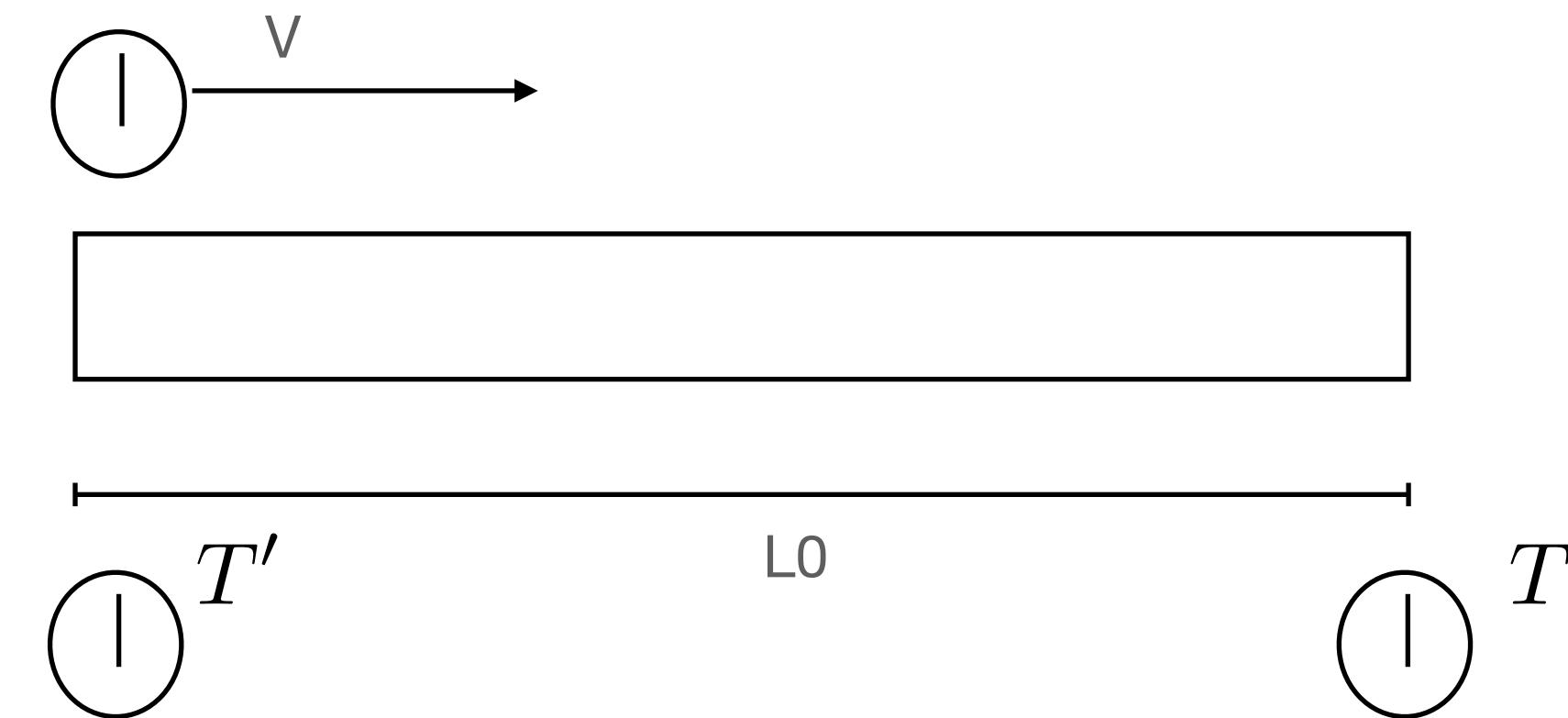
# Contraccion de longitudes

Medicion de la  
longitud movil  
usando el tiempo  
propio (reloj fijo)



Medicion de la  
longitud propia  
(barra en reposo)

$$L_0 = V\Delta T'$$



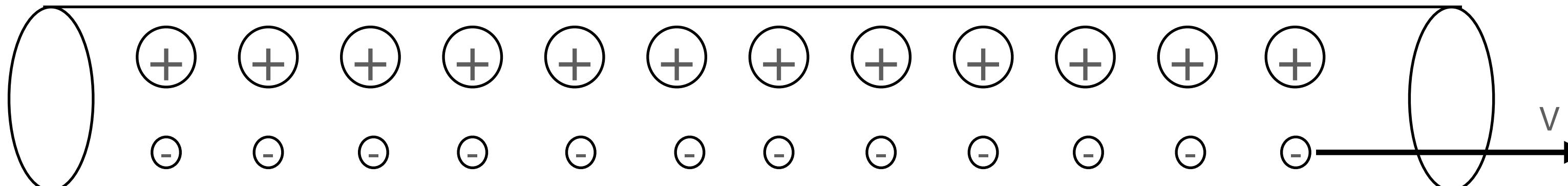
$$\longrightarrow L_0/\Delta T' = L'/\Delta T$$

Por dilatacion  
temporal

$$L_0/\gamma = L'$$

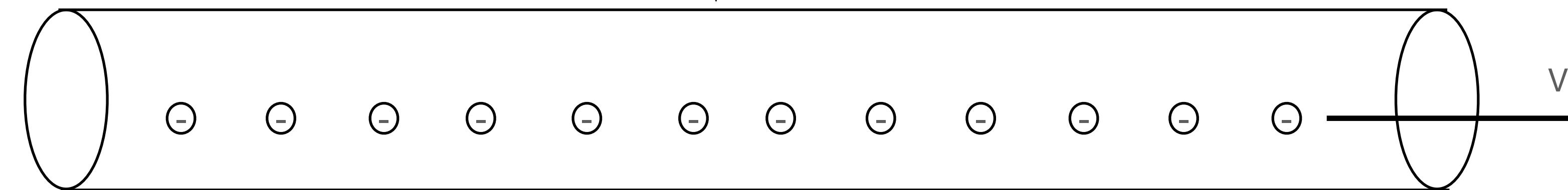
Las longitudes en la direccion del movimiento  
se contraen

# Contraccion de longitudes

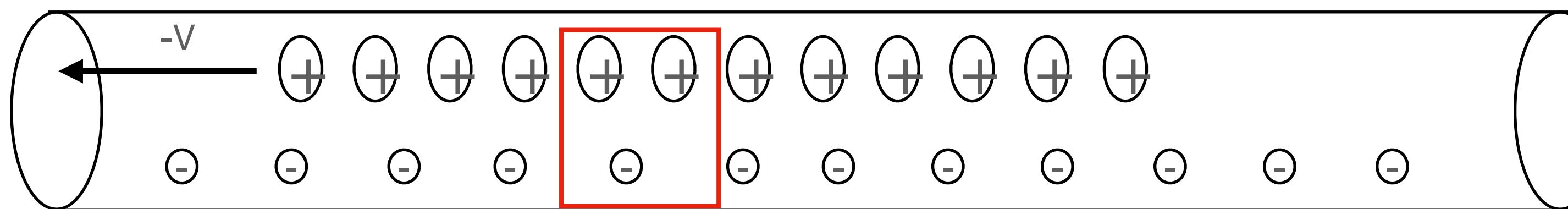


Campo magnetico

$$\frac{F}{\Delta L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} \quad \text{Ley de Ampere}$$



Haciendo una transformacion RELATIVISTA (si me subo arriba del cable), ahora el espacio se contrae dando lugar a un **campo electrico**:

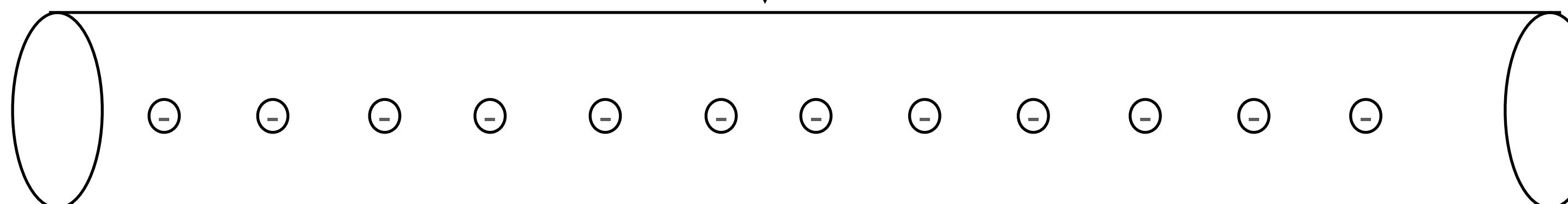


Campo electrico

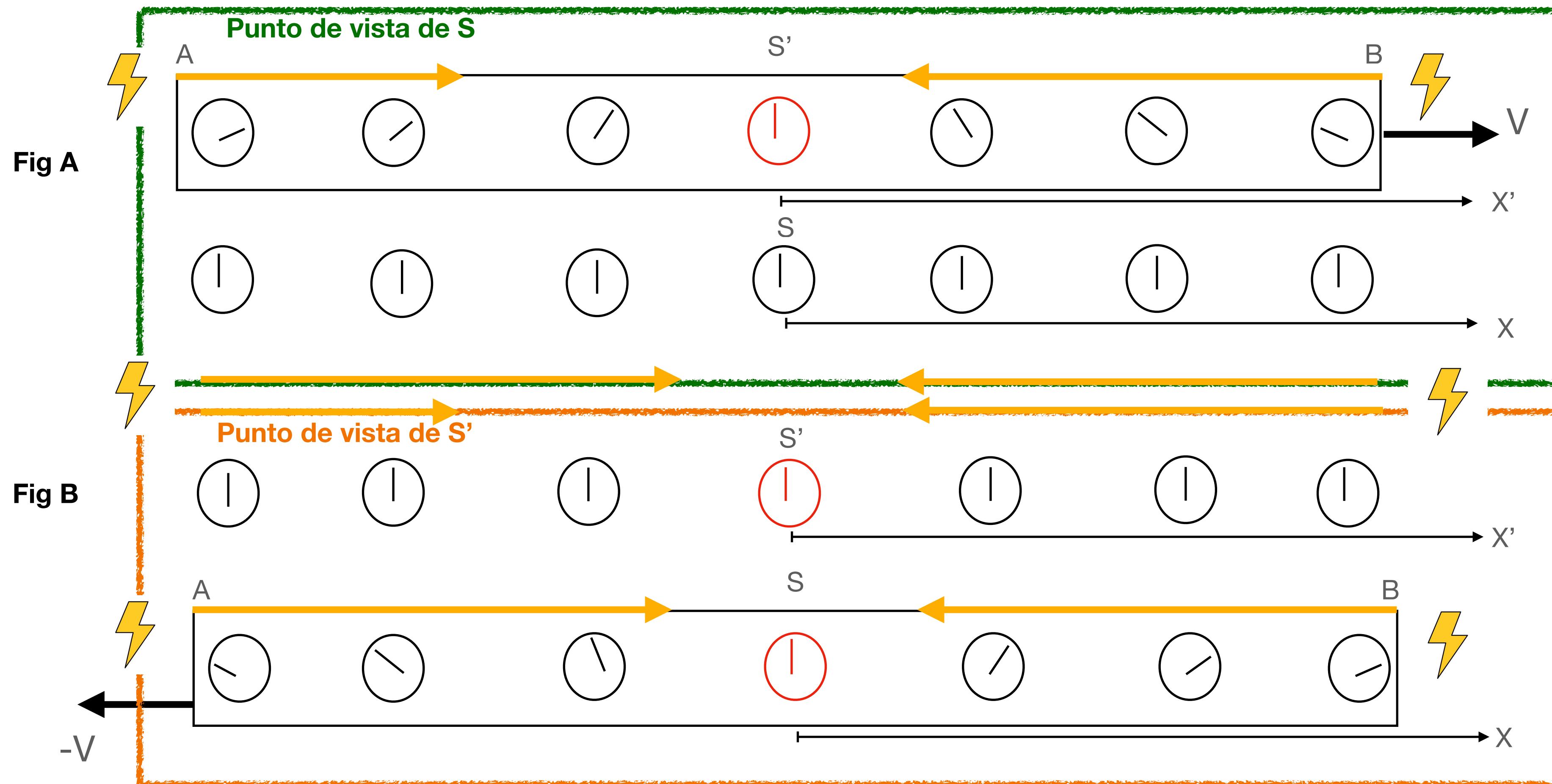
La distancia entre protones se contrae  
por la contraccion relativista y ahora  
el cable dejo de ser neutral

Un campo magnetico es un campo electrico  
visto desde otro sistema de referencia y  
vice versa

<https://www.youtube.com/watch?v=1TKSfAkWWN0>



# Relojes en movimiento



- $S$  ve que los eventos  $A$  y  $B$  son simultáneos, concluye que los relojes de  $S'$  están desincronizados, estando  $B$  **adelantado** respecto a  $A$  (Fig A)
- $S'$  recibe primero la señal de  $B$  y después la de  $A$ , está en el medio del vagón, mide las mismas velocidades de  $B$  y  $A$  y sus relojes los ve sincronizados, concluye pues que  $B$  precede a  $A$  y que los relojes de  $S$  están desincronizados, estando  $B$  **atrasado** respecto a  $A$  (Fig B)
- *La simultaneidad relativa no implica violación a la causalidad. Se demuestra que el orden A-B de eventos causales se mantiene independientemente del observador*

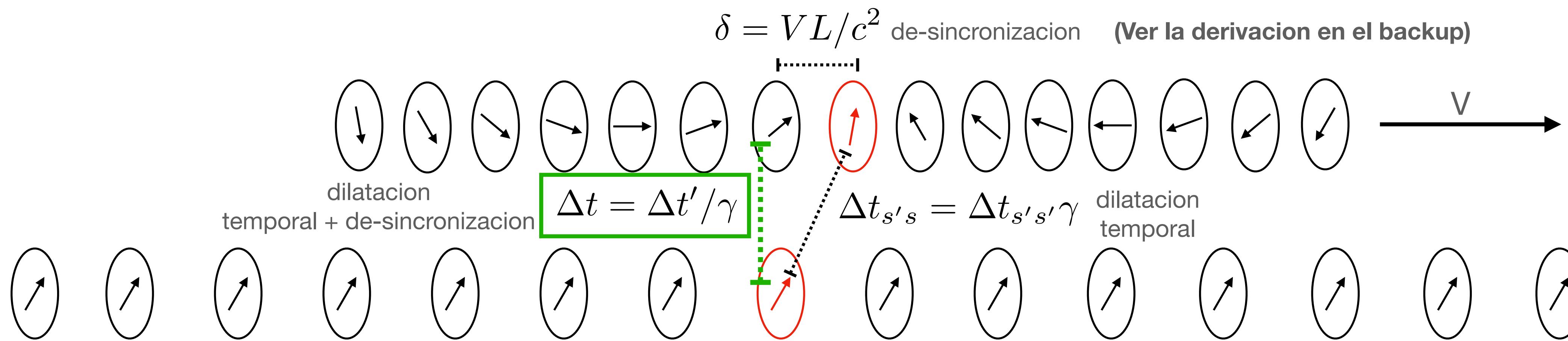
# De-sincronizacion de relojes

Animacion en gif:

[https://github.com/gmarceca/special\\_relativity\\_animations](https://github.com/gmarceca/special_relativity_animations)



# de-sincronizacion y dilatacion temporal



$\Delta x_{s's'} = 0$  (eventos suceden en el mismo lugar)  $\rightarrow \Delta t_{s's'} = \Delta\tau = \text{tiempo propio}$

Cual es la relacion entre lo medido en S y S' cuando  $\Delta x_{s's'} \neq 0$  ?  $\Delta t(\Delta t', \Delta x')$ ?

el caso mas general incluye la de-sincronizacion:  $\delta = V\delta x/c^2 + \text{la dilatacion temporal}$ :

$$\Delta t = \Delta t'\gamma + V\Delta x'\gamma/c^2 = \gamma(\Delta t' + V\Delta x'/c^2) \rightarrow \text{transformacion de Lorentz}$$

en el caso particular de  $\Delta x' = -V\Delta t'$

$$\rightarrow \Delta t = \gamma(\Delta t' + V^2/c^2\Delta t') = \Delta t'/\gamma$$

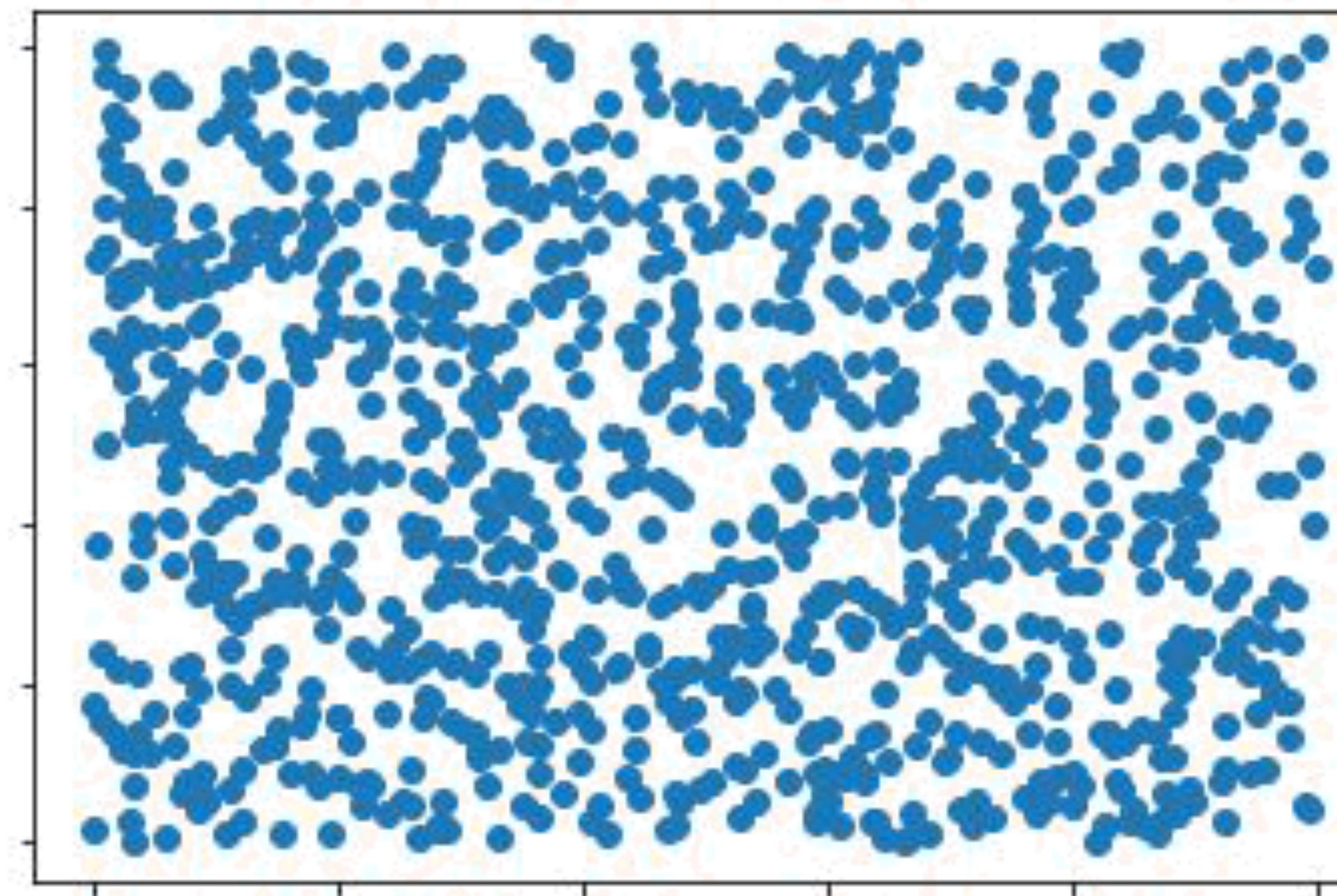
$\Delta x_{s's'} \rightarrow \Delta x'$
$\Delta t_{s's'} \rightarrow \Delta t'$
$\Delta x_{s's} \rightarrow \Delta x$
$\Delta t_{s's} \rightarrow \Delta t$

# Intuicion sobre el movimiento de la materia

- La materia a pequeña escala esta formada por electrones, protones y neutrones. Protones y neutrones estan formados a su vez por quarks. Tanto los quarks como los electrones podrian moverse a la velocidad de la luz si no estuviesen confinados por el campo del Higgs, el cual les otorga masa e impide que se muevan como la luz.
- Podemos pensar a la materia como una caja que contiene partculas que se mueven a la velocidad de la luz (o cerca) confinadas por fuerzas de diferentes campos. Las velocidades son aleatorias y por lo tanto la caja permanece en reposo dado que no hay una direccion privilegiada.

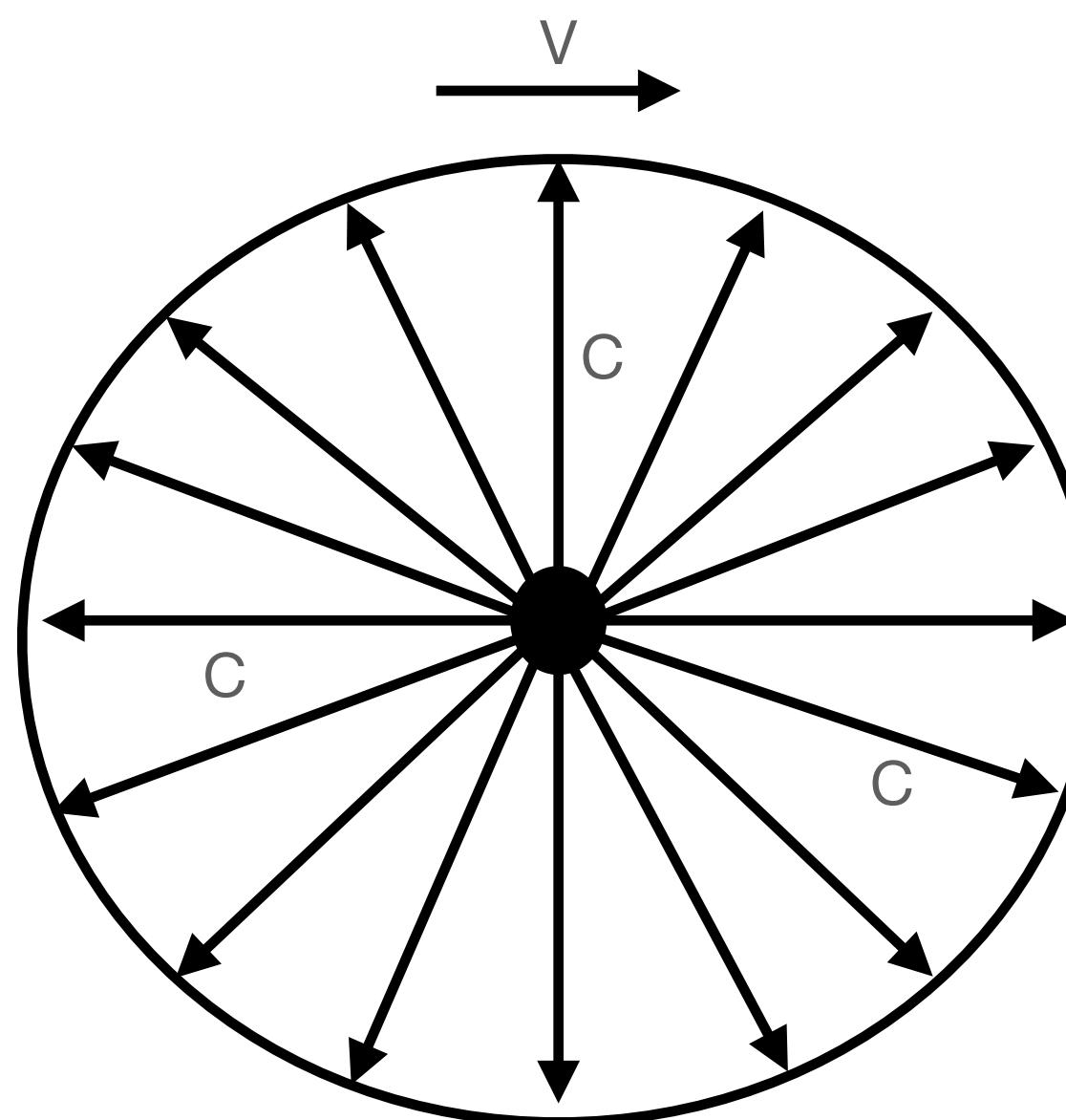
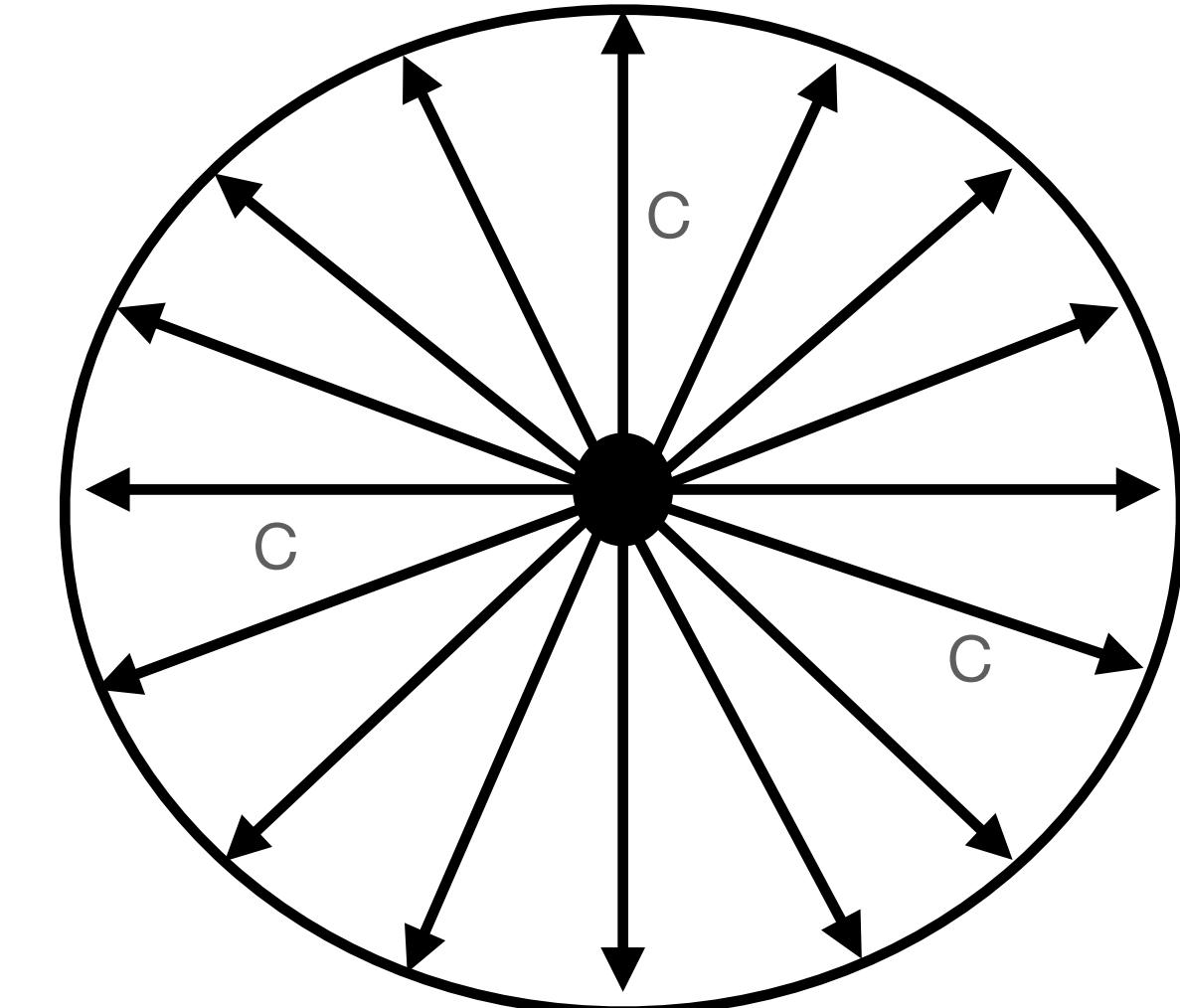
Animacion en gif:

[https://github.com/gmarceca/special\\_relativity\\_animations](https://github.com/gmarceca/special_relativity_animations)

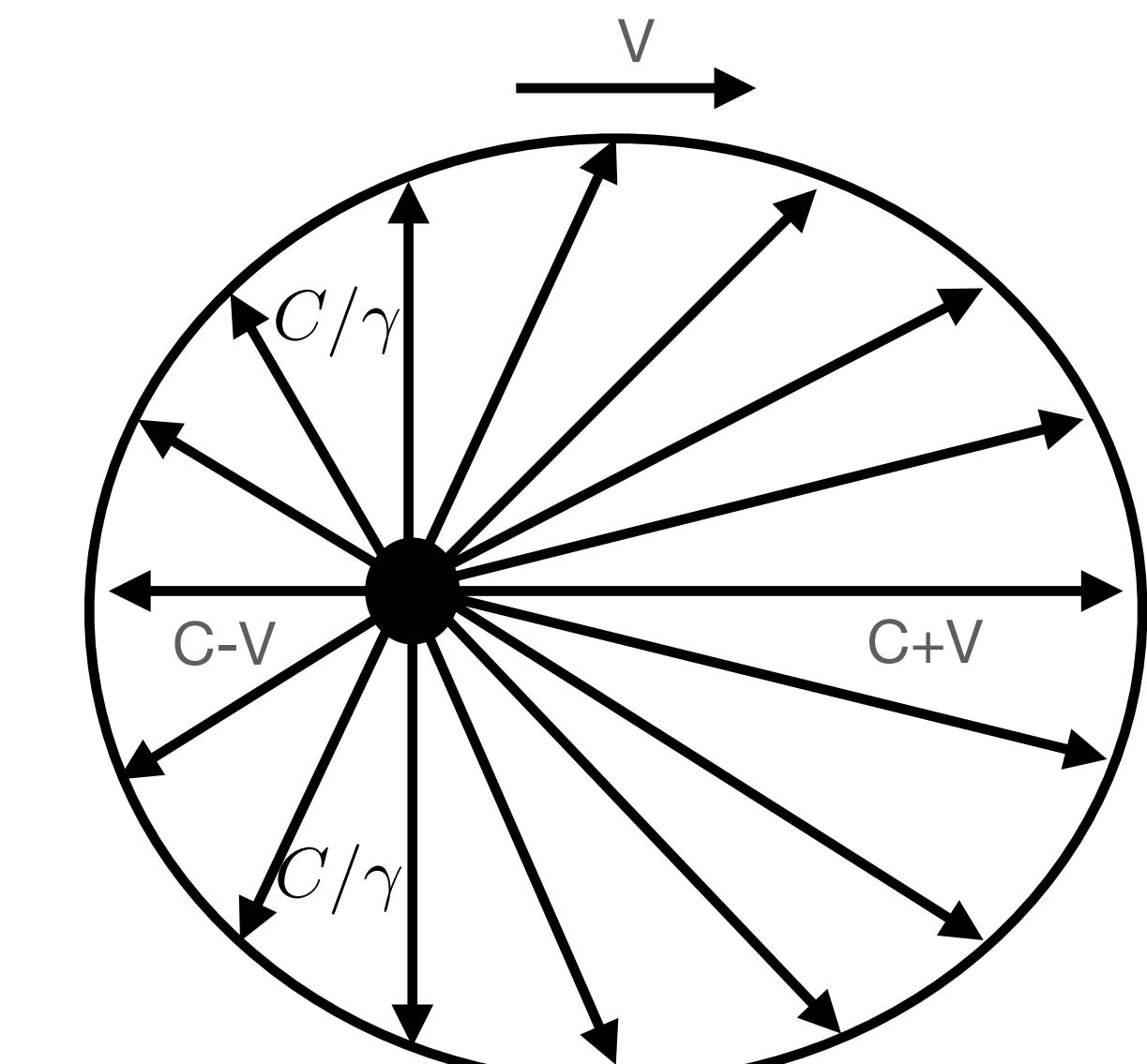
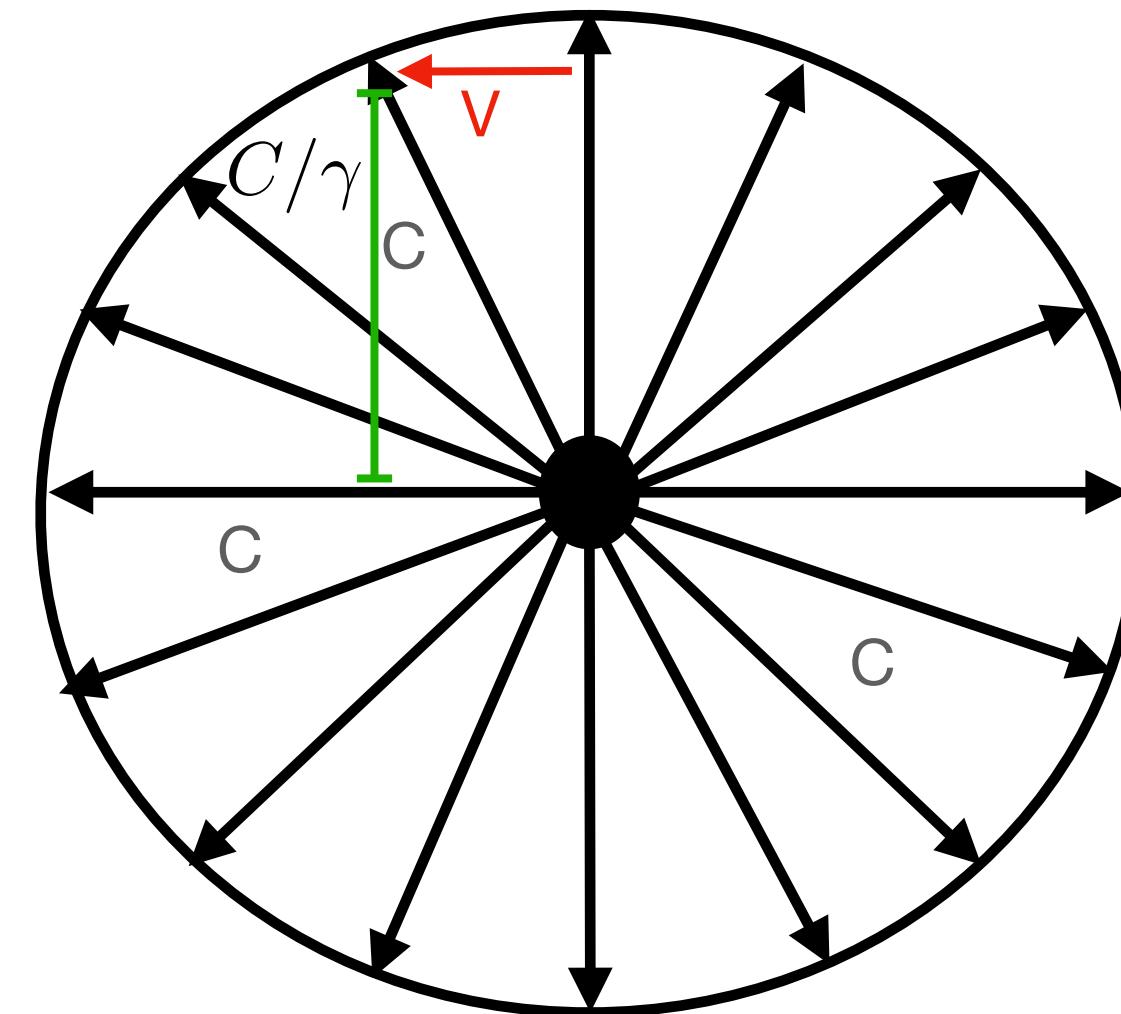


# Intuicion sobre el movimiento de la materia

- Consideramos una caja llena de partículas de luz que se mueven de forma aleatoria. El perfil de velocidades tendrá la siguiente forma simétrica:



- Según la mecánica de Newton, si ahora la caja se empieza a mover con velocidad  $V$  para la izquierda el perfil de velocidades sería distinto (no sería más simétrico):



# Intuicion sobre el movimiento de la materia

Para ver las animaciones correr el codigo en python que se encuentra en:  
[https://github.com/gmarceca/special\\_relativity\\_animations](https://github.com/gmarceca/special_relativity_animations)

# Intuicion sobre el movimiento de la materia

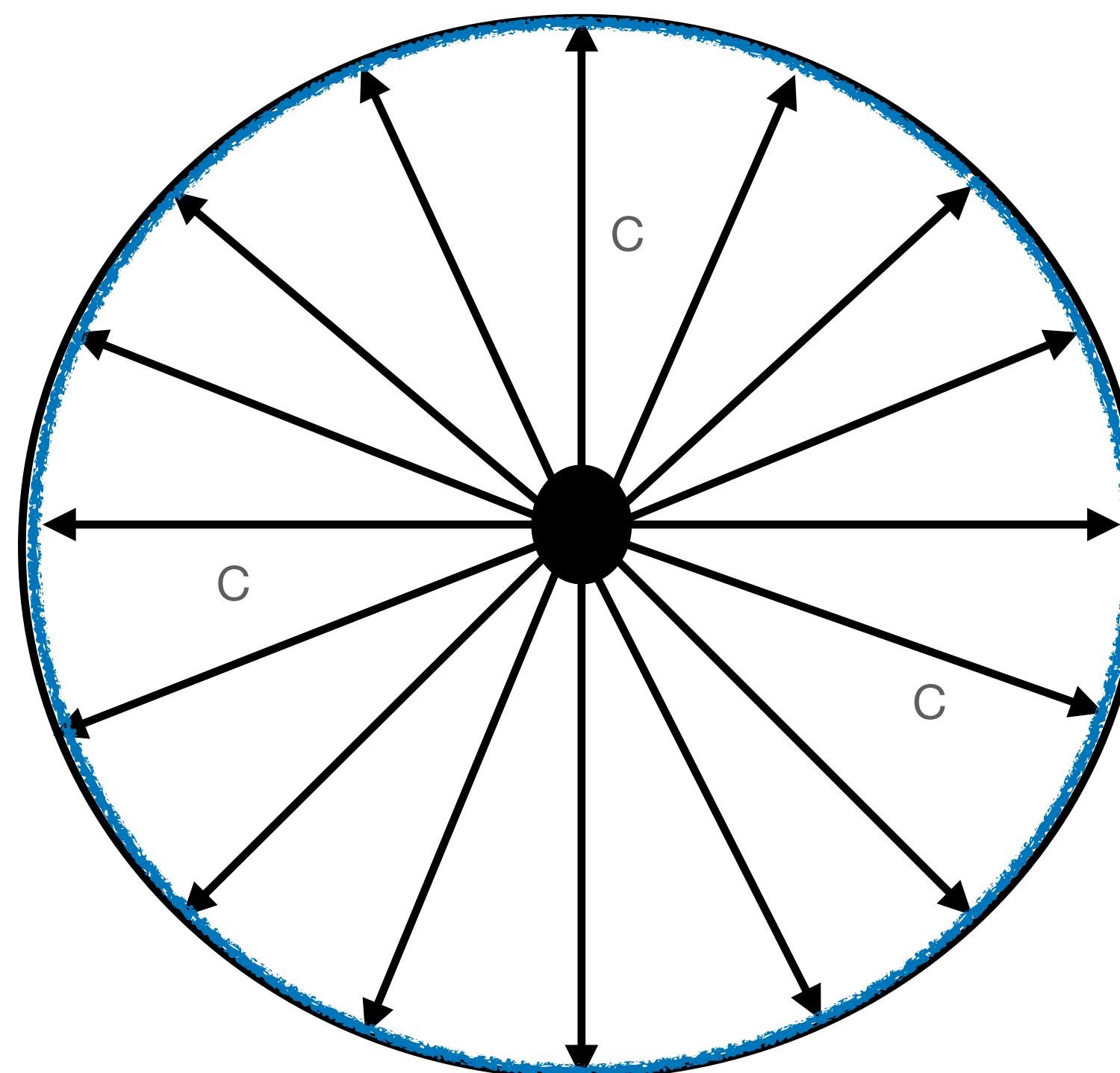
Calculamos el perfil de velocidades promedio entre partículas moviéndose en una dirección y la opuesta de la siguiente forma:

cuanto tarda una partícula que se mueve hacia adelante vs hacia atrás en recorrer una distancia fija “d”

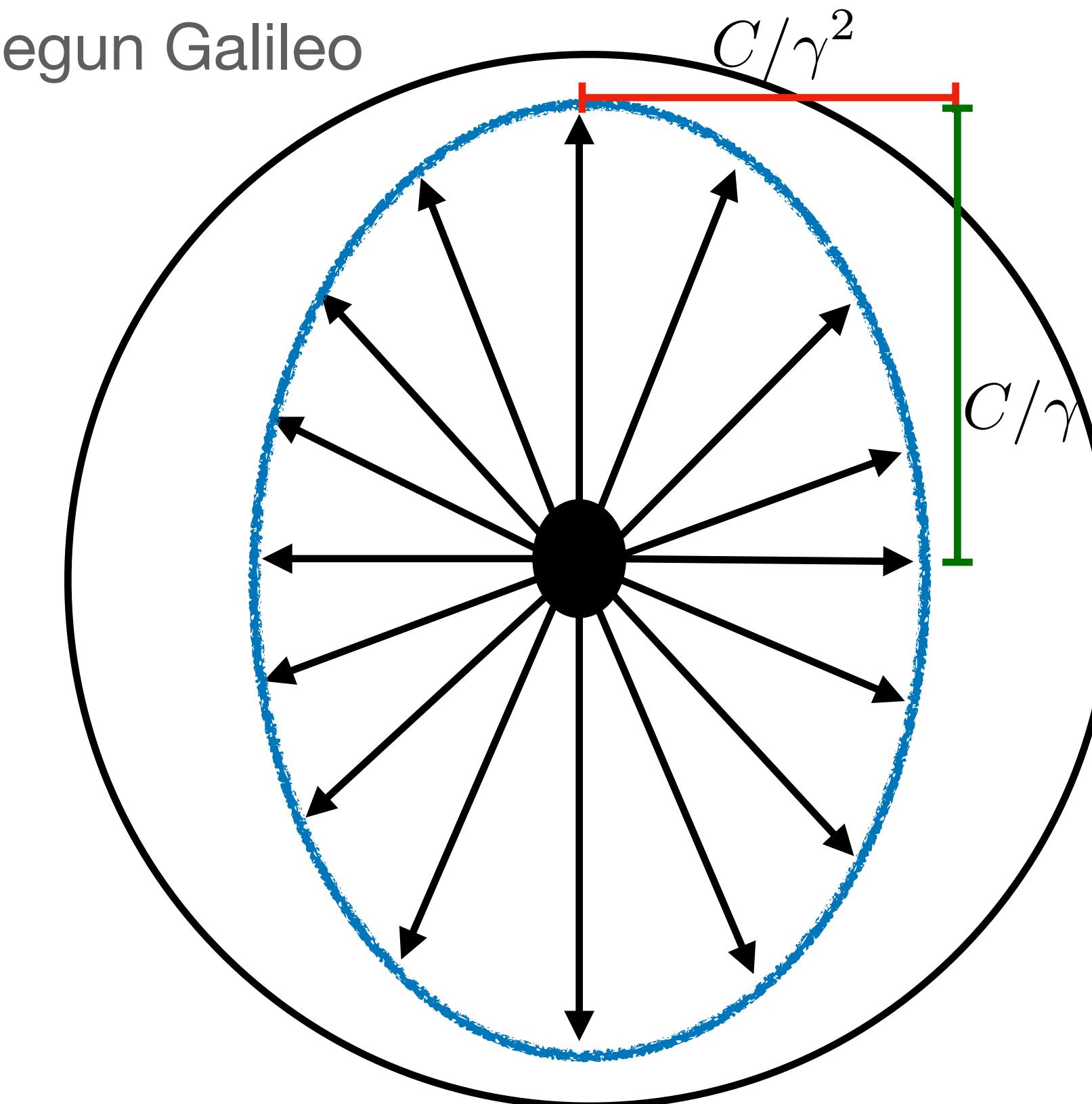
$$\langle v \rangle = d / \langle \Delta t \rangle = d / (\Delta t_{adelante} + \Delta t_{atras}) / 2$$

$$\langle v \rangle_{horizontal} = d / (d / (C + V) + d / (C - V)) / 2 = C / \gamma^2$$

Perfil segun la relatividad

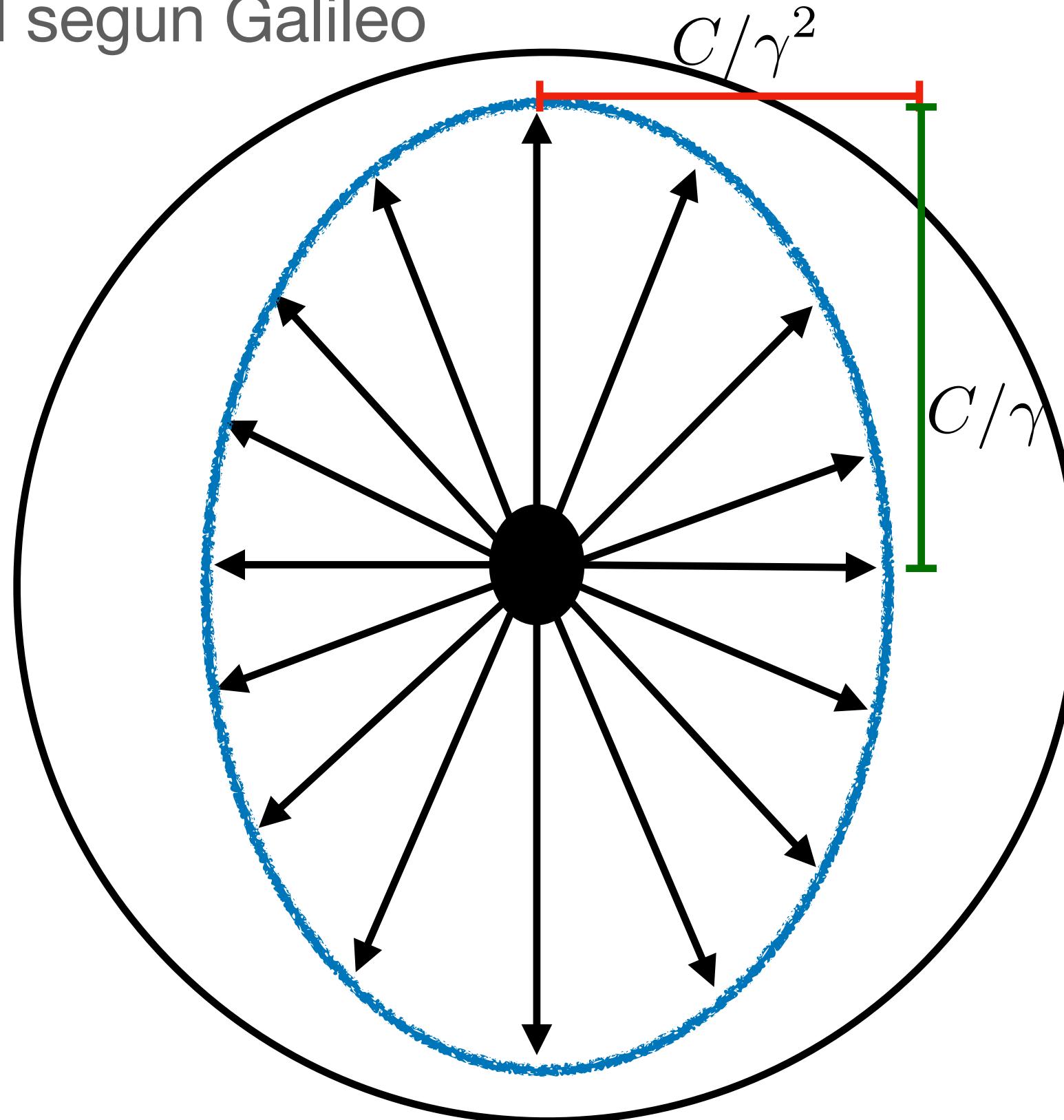


Perfil segun Galileo

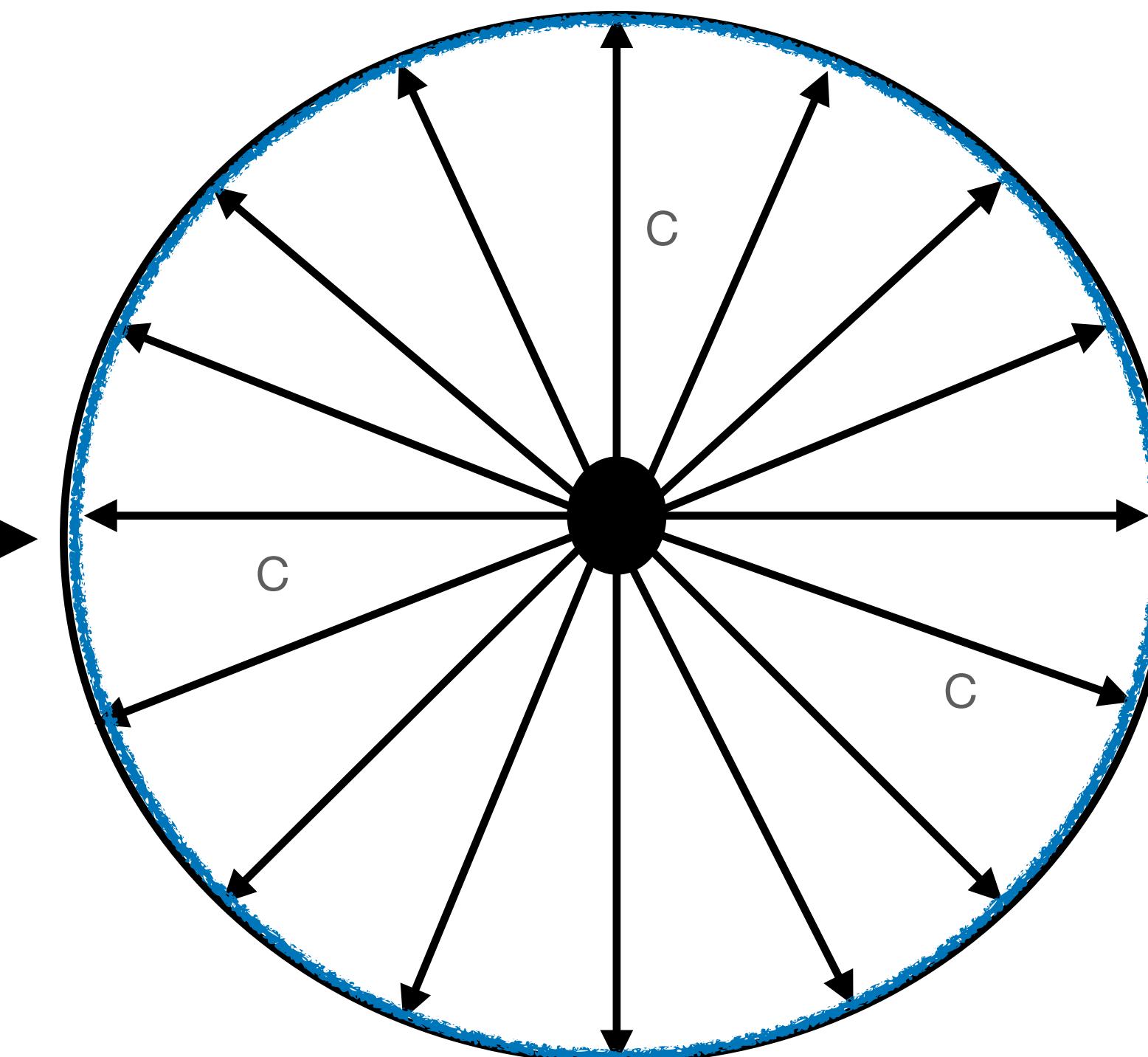


# Intuicion sobre el movimiento de la materia

Perfil segun Galileo



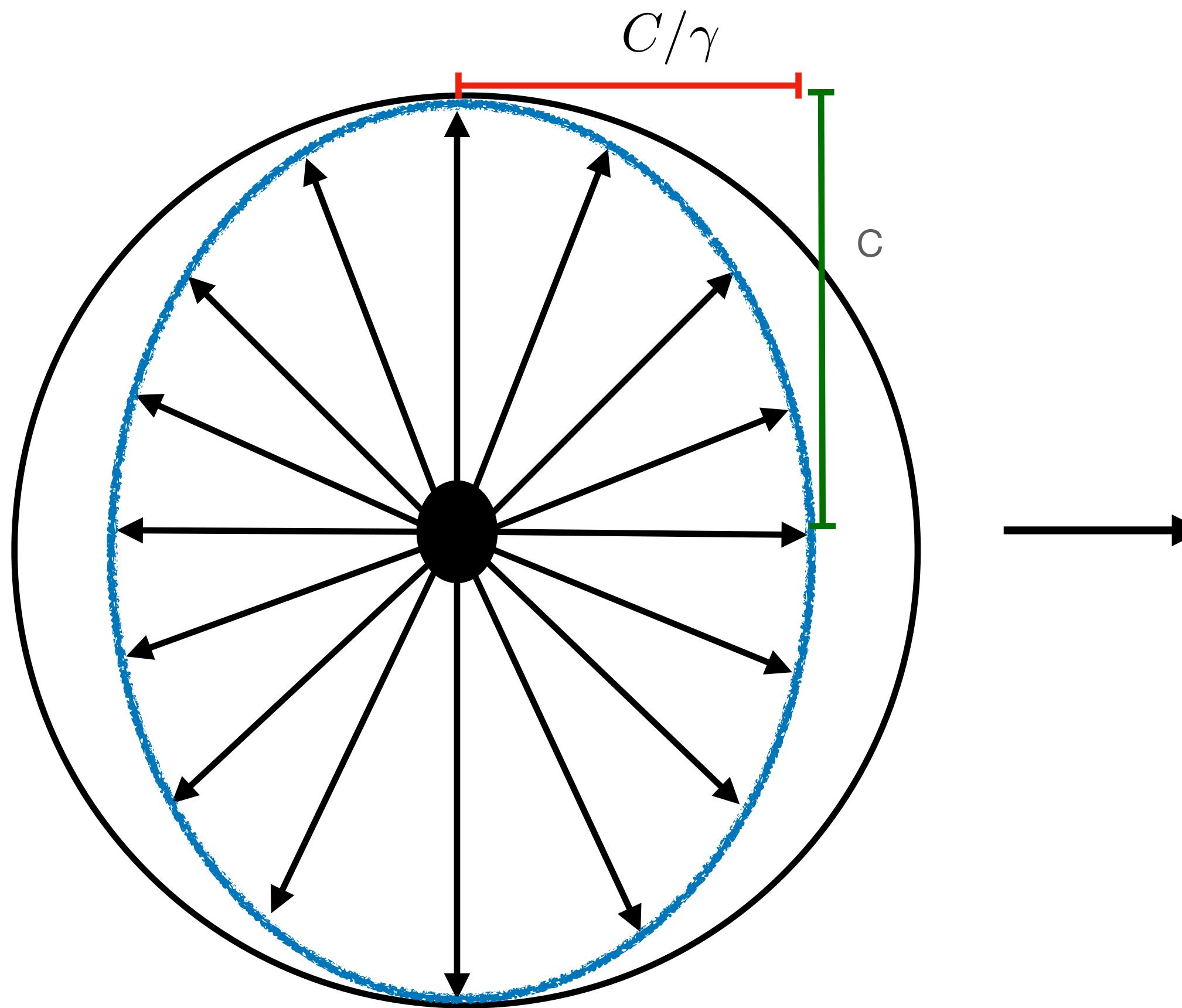
Perfil segun la relatividad  
(lo que sucede en la naturaleza)



- Ajusto el tiempo de forma de que coincida la velocidad vertical (**dilatacion del tiempo**)

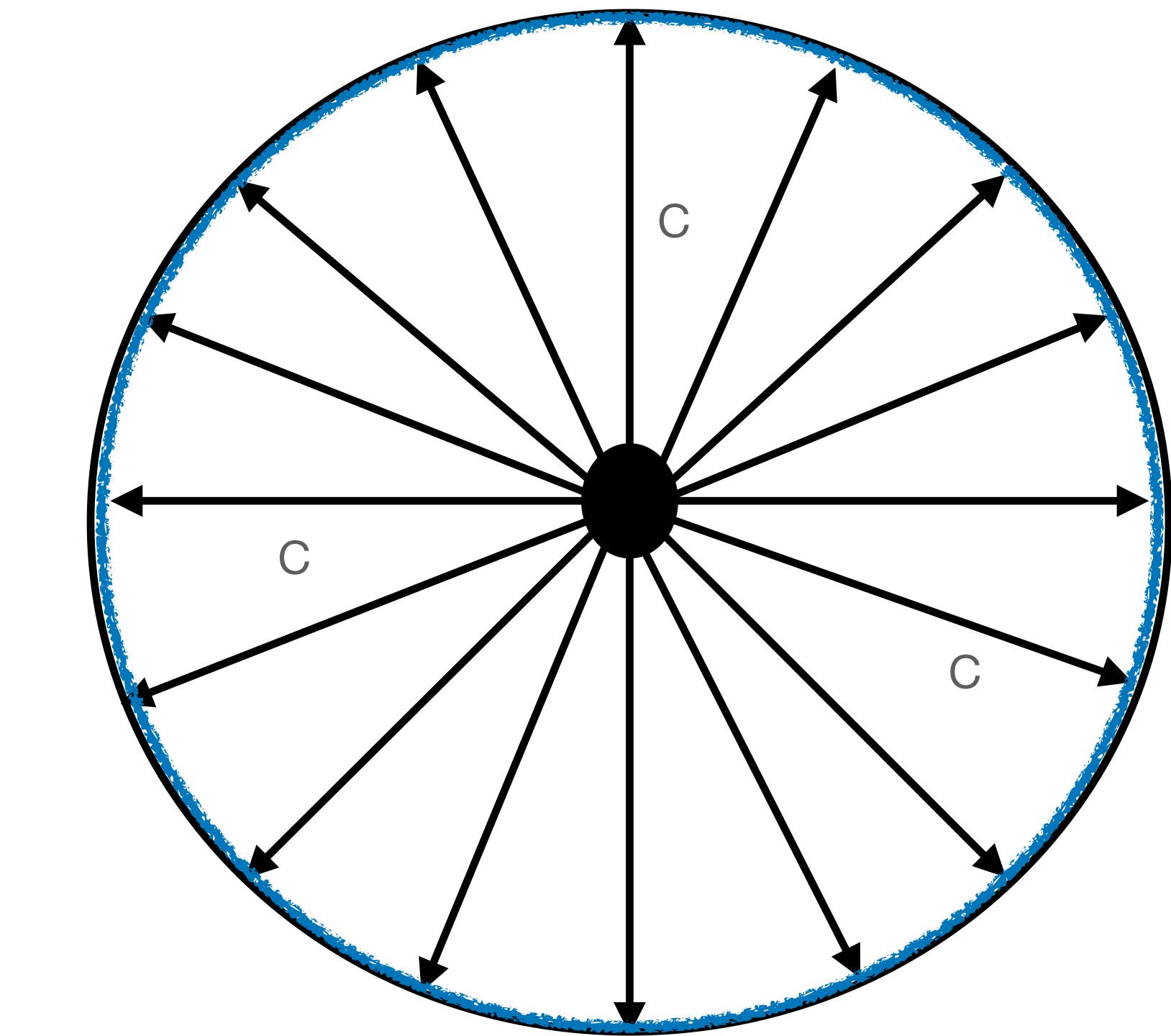
$$\langle v \rangle_{vertical} = C/\gamma = d/\langle \Delta t \rangle \longrightarrow \langle \Delta t' \rangle = \gamma \langle \Delta t \rangle$$

Perfil segun Galileo con la correccion temporal:  
las velocidades crecen en todas las direcciones.  
Sin embargo aun queda corregir la dirccion horizontal



$$d' = d/\gamma$$

Perfil segun Galileo con la dilatacion temporal +  
contraccion espacial  
= perfil relativista



- Agregando la contraccion espacial, me queda el perfil buscado

# Efecto doppler de la luz



- El receptor se acerca a la fuente, por lo tanto escuchó una mayor frecuencia dado que la distancia efectiva entre frentes de onda es menor

$$\lambda_s - vt_{r,s} = ct_{r,s} \rightarrow f_{r,s} = f_s(1 + v/c)$$

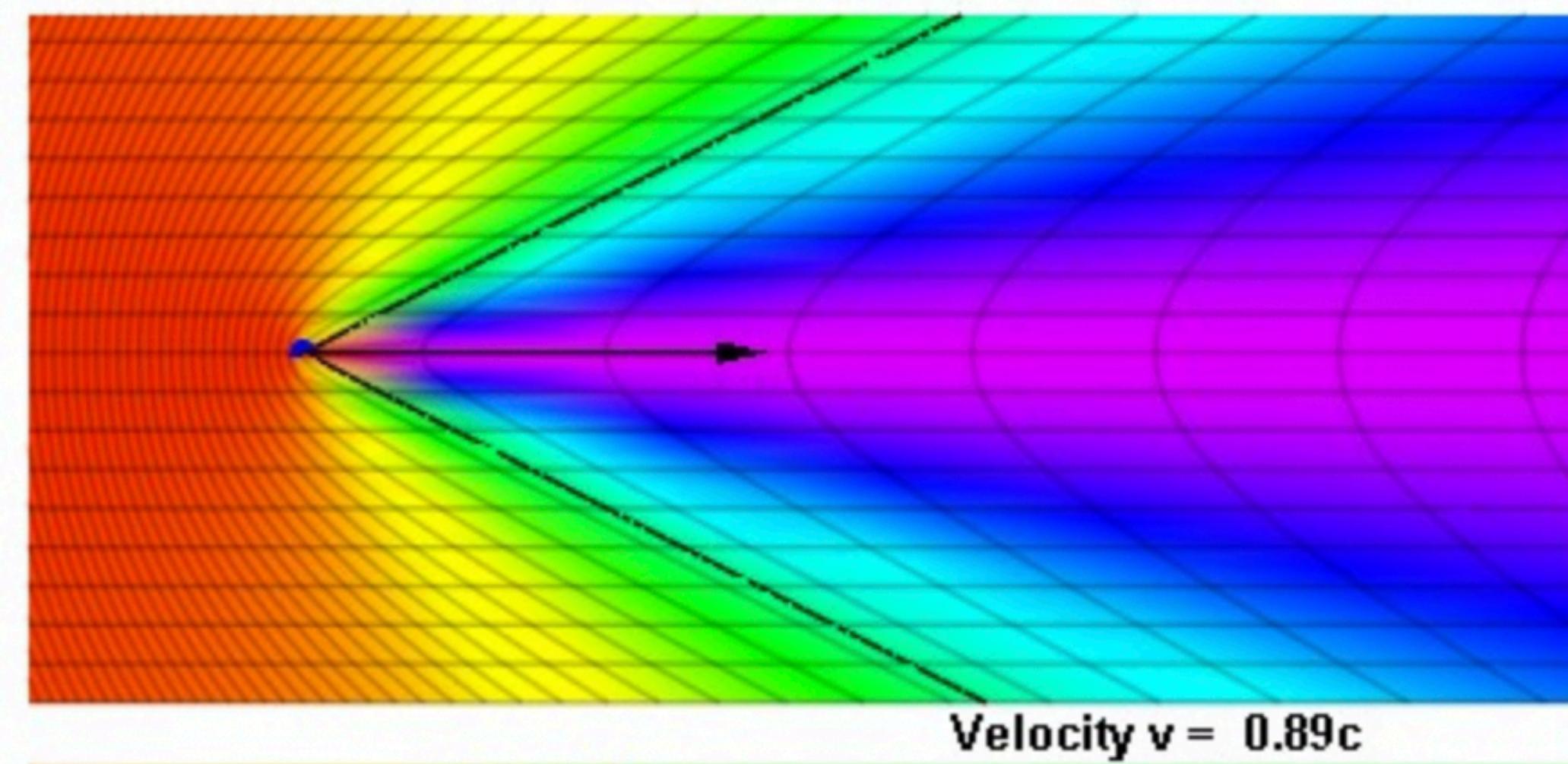
- Este es el efecto doppler clásico (como pasa con el sonido). Sin embargo hay que tener en cuenta la dilatación temporal

$$\Delta t_{r,s} = \gamma \Delta \tau_r$$

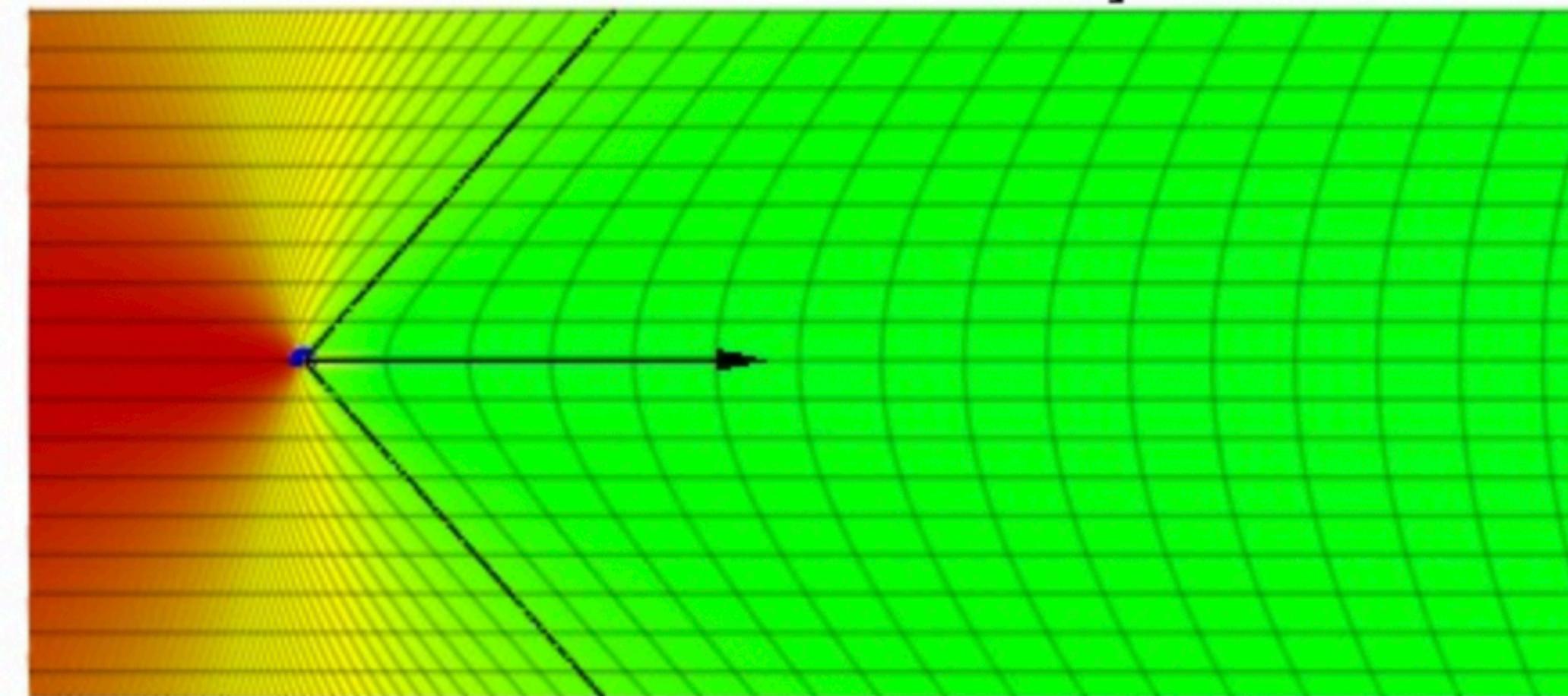
$$f_r = \gamma(1 + v/c)f_s$$

# Efecto doppler de la luz

Efecto Doppler relativista  
(lo que sucede)



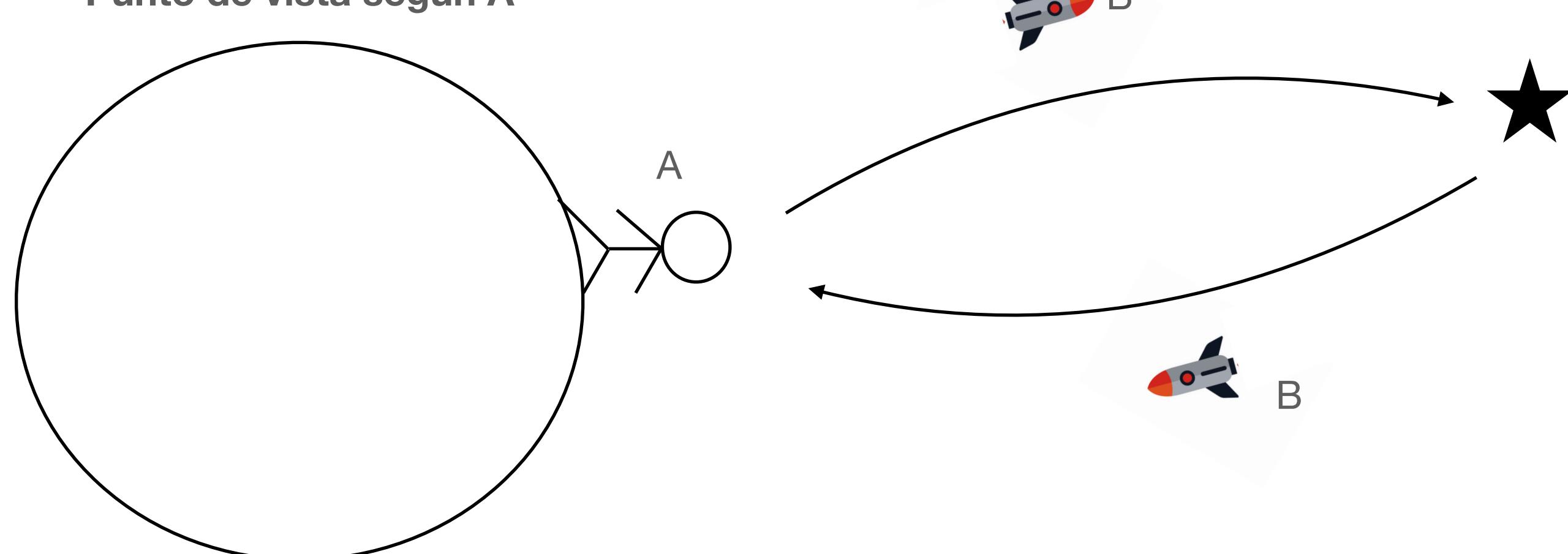
Efecto Doppler clasico



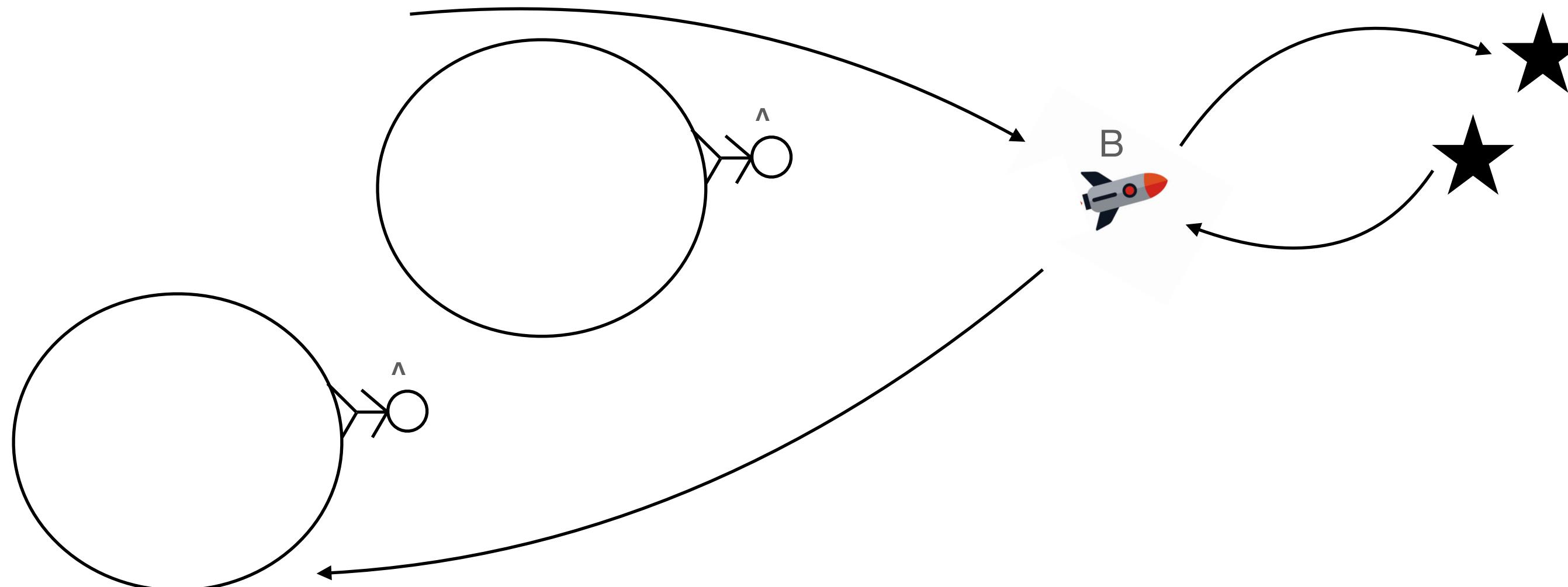
Un observador que llegue a  $0.89c$  moriria  
calcinado por rayos X

# Paradoja de los gemelos

Punto de vista segun A

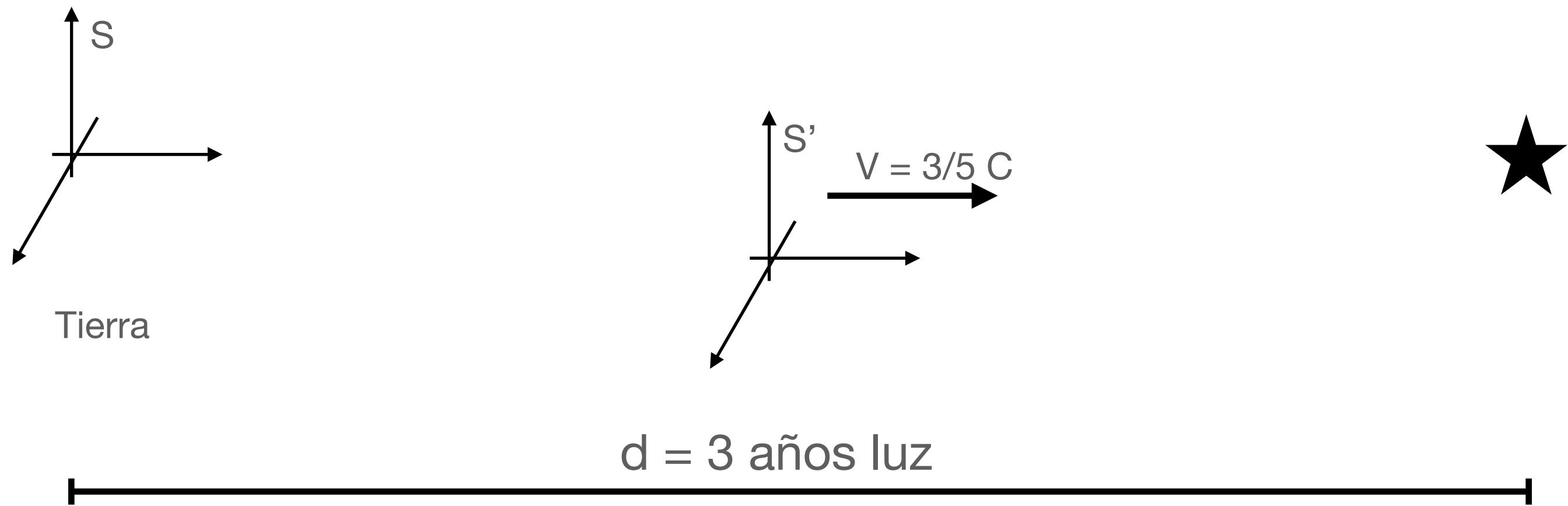


Punto de vista segun B



- Gemelo A se queda en la tierra (sistema A).
- Gemelo B va a alfa centauro a una velocidad cerca a la luz y vuelve (sistema B).
- Segun A: B se mueve cerca a la luz y por ende su reloj pasa mas lento (dilatacion del tiempo)
- Segun B: A junto con la tierra se mueve cerca a la luz y por ende su reloj pasa mas lento.
- Cuando se encuentran quien permanece mas joven?
- RTA: permanece mas joven B.
- **Paradoja: por que es B el que queda joven y no A o ninguno?  
La relatividad se contradice???**  
**(Spoiler: NO!)**

# Paradoja de los gemelos (punto de vista de la tierra)

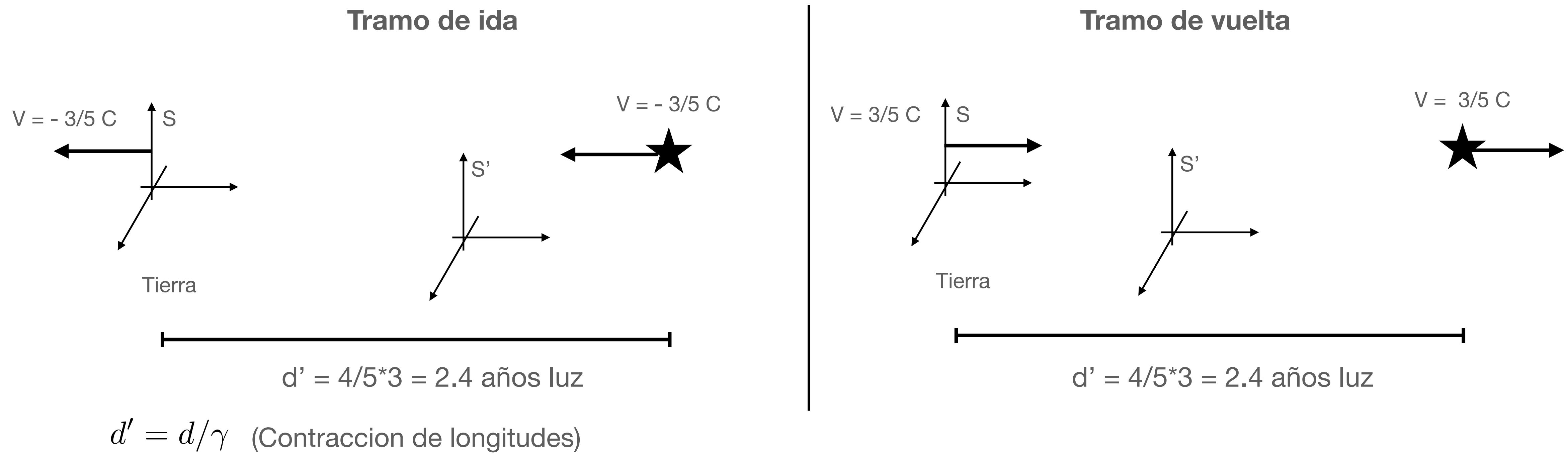


$$\gamma = 1/\sqrt{1 - V^2/c^2} = 1/\sqrt{1 - (3/5)^2} = 5/4$$

Calculo de S (sabe relatividad especial):

- Tiempo transcurrido en la tierra:  $T_e = 2d/V = 10 \text{ años}$
- Tiempo transcurrido en la nave:  $\Delta\tau = \Delta T'/\gamma = 10 * 4/5 = 8 \text{ años}$

# Paradoja de los gemelos (punto de vista de la nave)

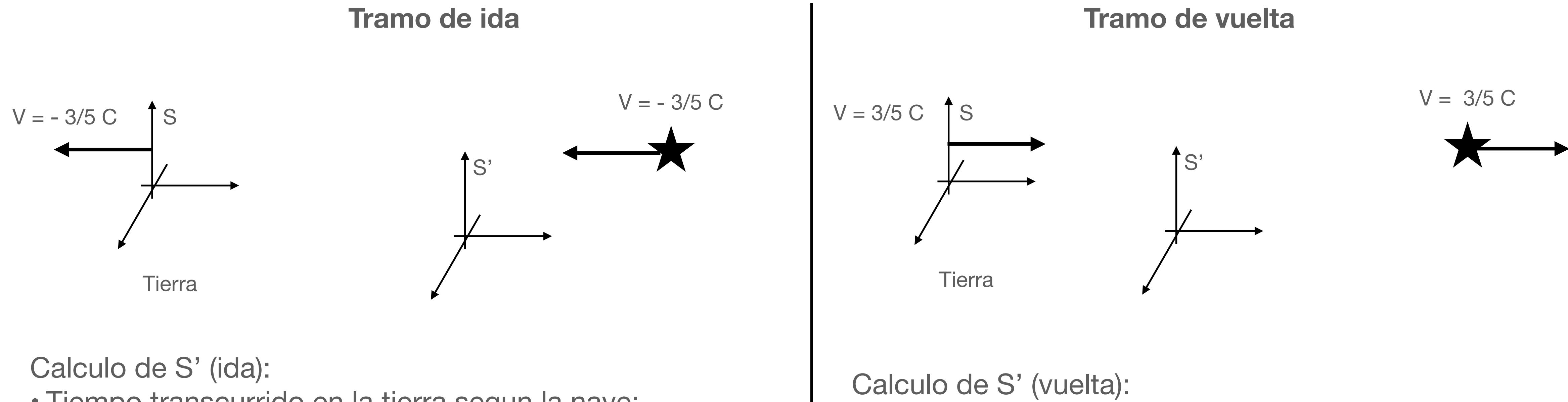


Calculo de  $S'$ :

- Tiempo transcurrido hasta la tierra (ida y vuelta):  $T_{\text{nave}} = 2d'/V = 8$  años

**Tanto  $S$  como  $S'$  saben relatividad especial y concuerdan en el tiempo transcurrido del viajero al llegar a la tierra. El resultado es absoluto y no hay paradoja: en la tierra pasaron 10 y en la nave pasaron 8 años. Por que no hay paradoja?: por que envejece  $S'$  2 años menos que  $S$  y no al revés?**

# Paradoja de los gemelos (punto de vista de la nave)



Calculo de  $S'$  (ida):

- Tiempo transcurrido en la tierra segun la nave: la tierra es la que se aleja respecto a la nave, por lo tanto  $S'$  ve que el tic-tac en la tierra es mas lento (dilatacion del tiempo).  
**Si en la nave pasaron 4 años de ida, en la tierra segun la nave pasaron solo 3.2 años. CORRECTO**

Entonces el tiempo total transcurrido en la tierra medido por la nave es  $2 \times 3.2 = 6.4$  años: **INCORRECTO!**  
**En la tierra habran pasado 10 años!**

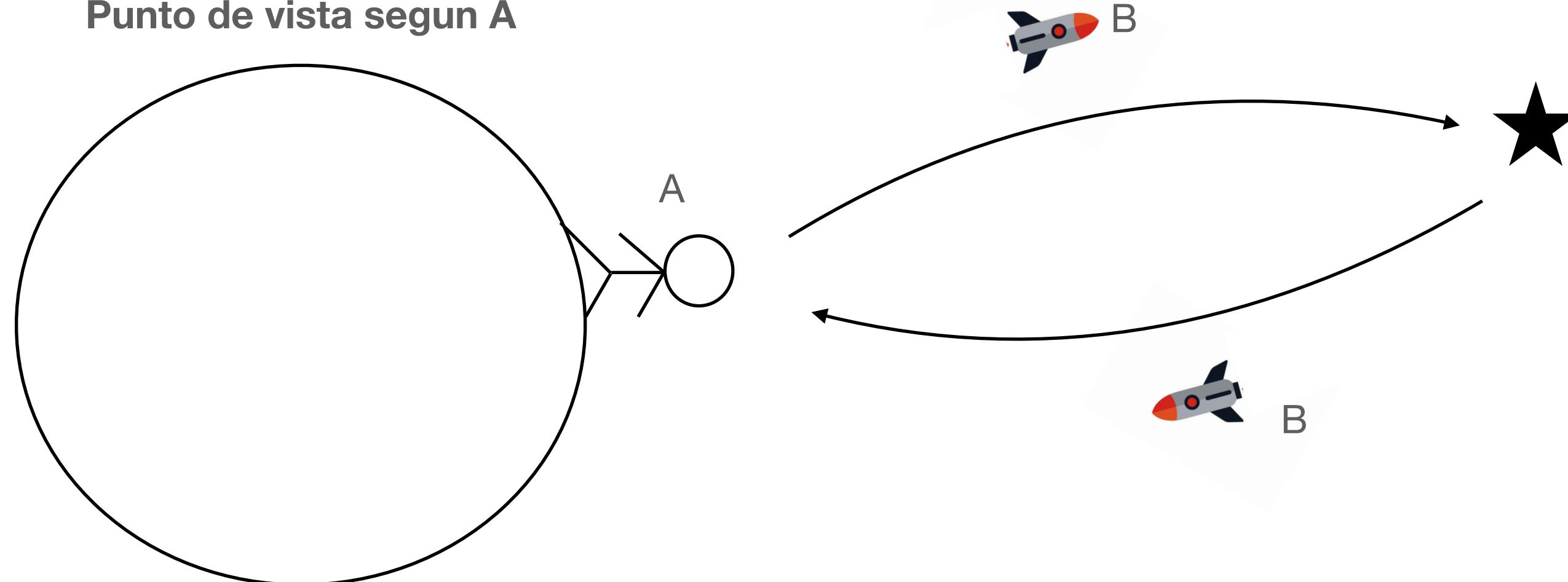
Calculo de  $S'$  (vuelta):

- Tiempo transcurrido en la tierra segun la nave: la tierra es la que se acerca respecto a la nave, por lo tanto, si en la nave pasaron 4 años de vuelta, en la tierra segun la nave pasaron solo 3.2 años.  
**CORRECTO**

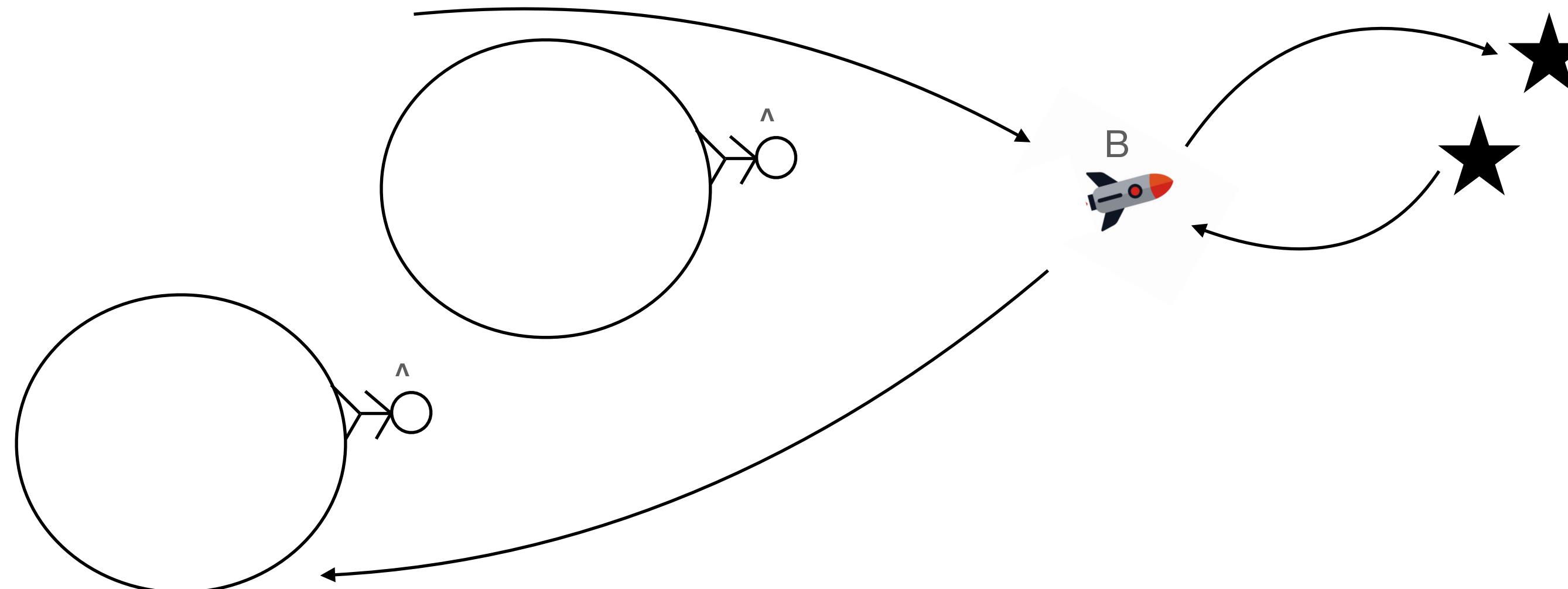
Como puede ser que hayan pasado en realidad 10?. Todo lo contrario, segun las mediciones en cada viaje, la tierra deberia estar mas joven! esto es una contradiccion en la relatividad... hmm....

# Resolucion de la paradoja de los gemelos

Punto de vista segun A



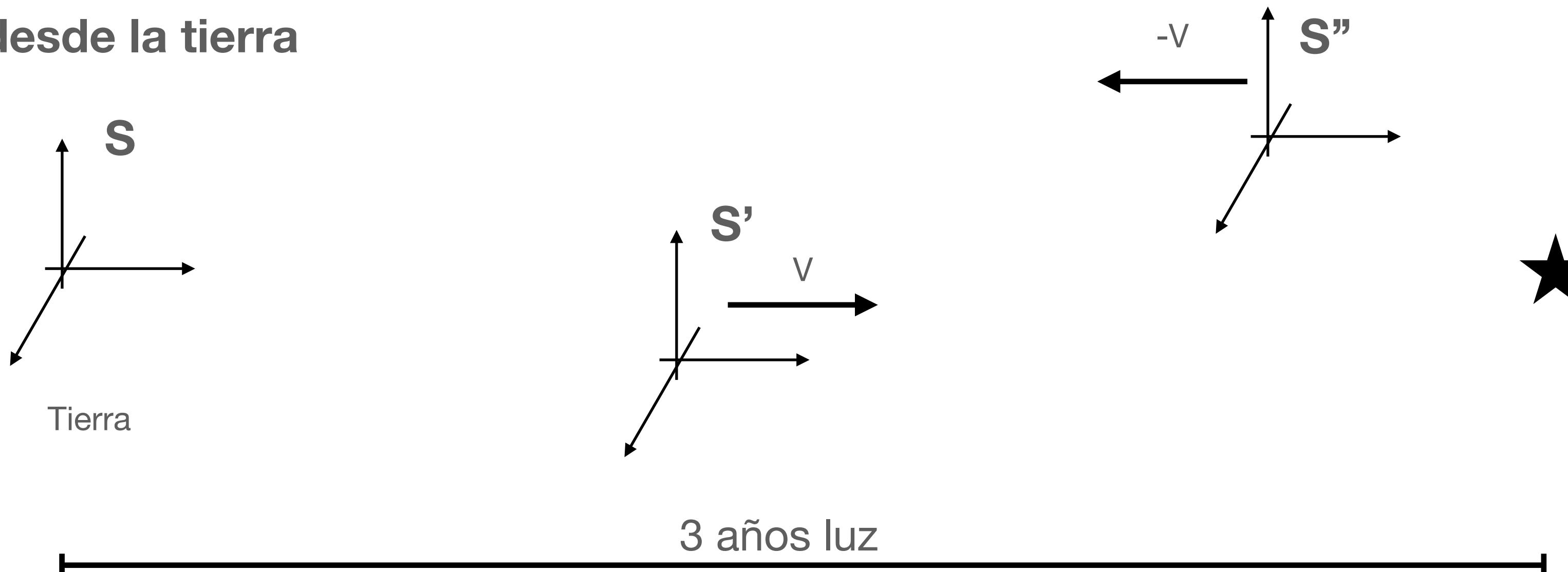
Punto de vista segun B



Notar que hay una asimetria en como los observadores experimentan el viaje:

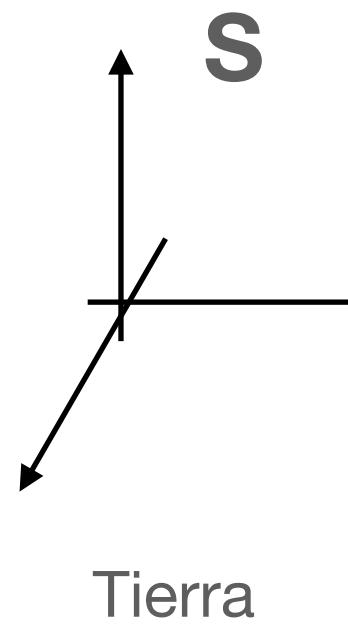
- El que esta en la tierra no experiencia nada fuera de lo comun, solo se queda sentado en una silla esperando a que pasen sus 10 años.
- Sin embargo para el viajero la situacion es mas complejo. Desde su punto de vista alpha centauro se acerca en el tramo de ida y la tierra se aleja a una velocidad V. Cuando la estrella llega al viajero, esta se detiene y pega la vuelta alejandose ahora de el, mientras que la tierra se acerca a el.

## Punto de vista desde la tierra

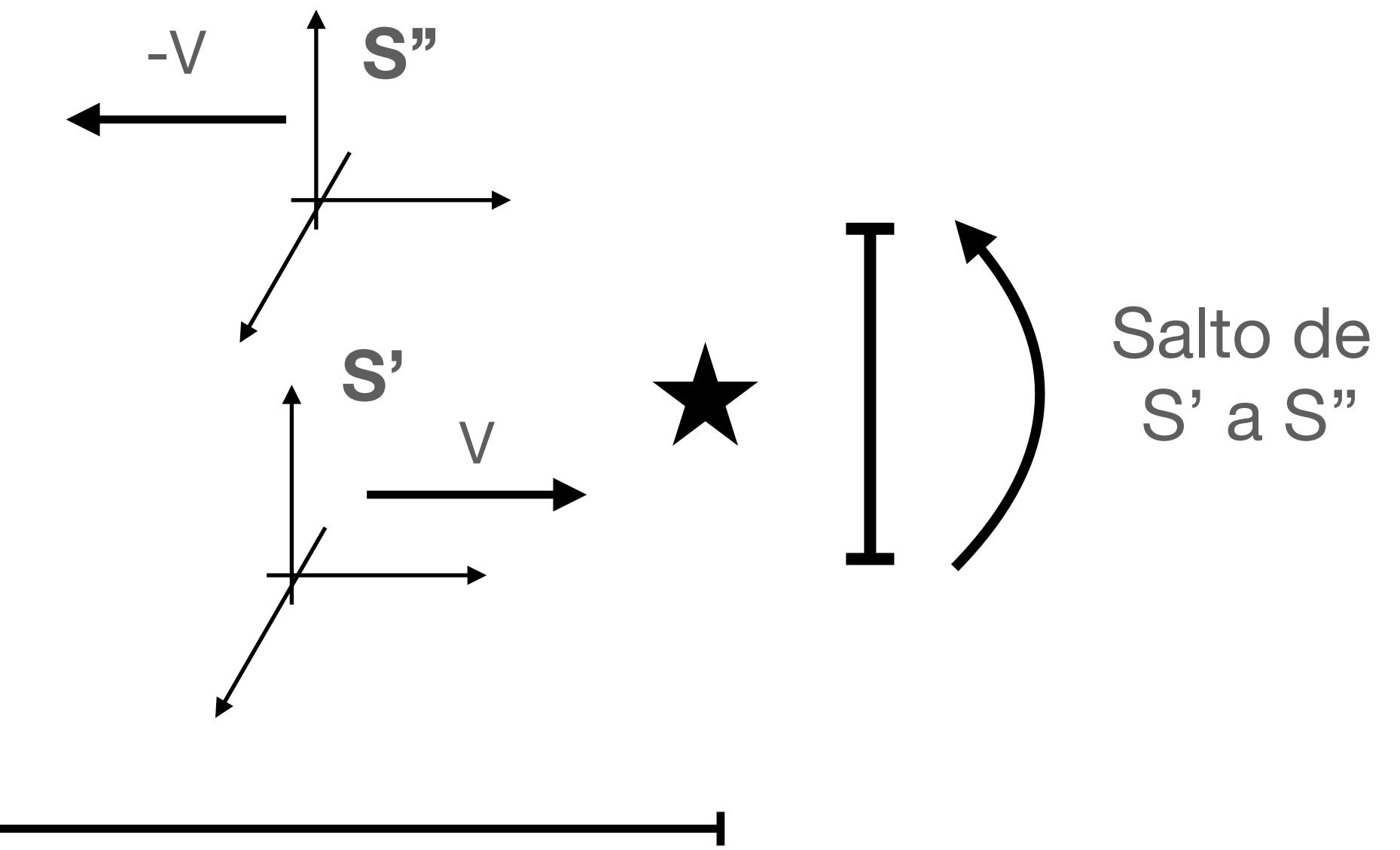


- Otra manera de notar la asimetría es ver que para describir el planeta tierra solo usamos 1 sistema de referencia  $S$ , mientras que para la nave usamos 2,  $S'$  que se mueve hacia la estrella y  $S''$  que regresa hacia la tierra.

## Punto de vista desde la tierra

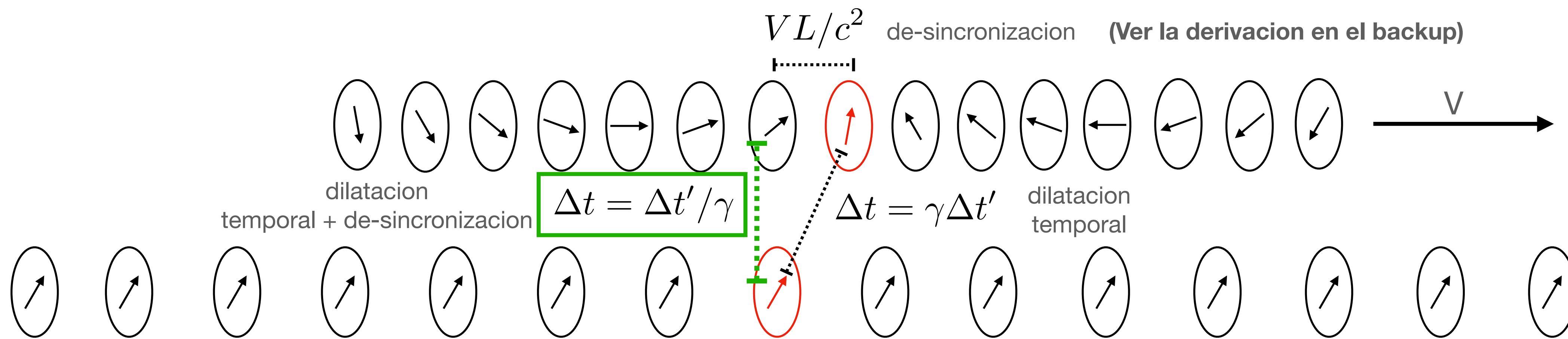


$d = 3$  años luz



- Otra manera de notar la asimetría es ver que para describir el planeta tierra solo usamos 1 sistema de referencia **S**, mientras que para la nave usamos 2, **S'** que se mueve hacia la estrella y **S''** que regresa hacia la tierra.
- La paradoja se resuelve al considerar la sincronización de los relojes al saltar del sistema **S'** al sistema **S''**

# de-sincronizacion y dilatacion temporal

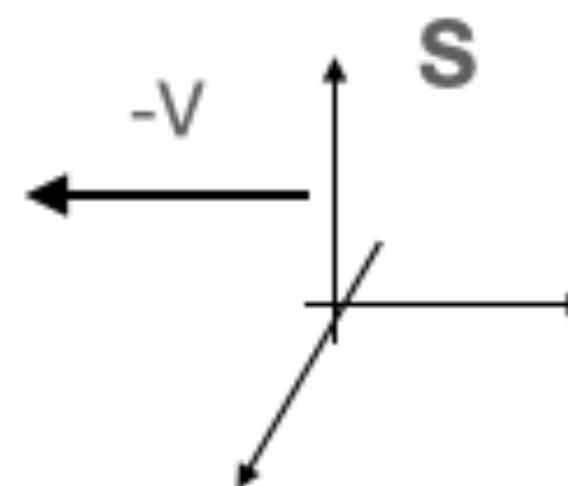


# Resolucion de la paradoja: el salto hacia el futuro

Animacion en gif:

[https://github.com/gmarceca/special\\_relativity\\_animations](https://github.com/gmarceca/special_relativity_animations)

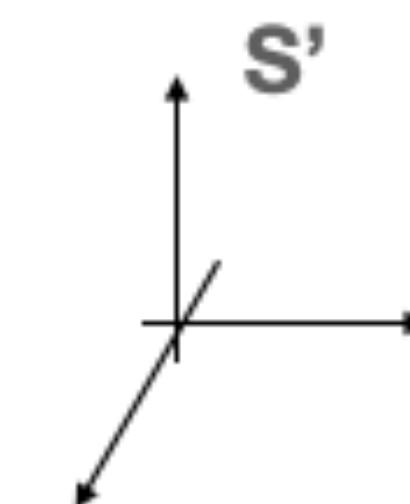
Punto de vista desde la nave



Tierra

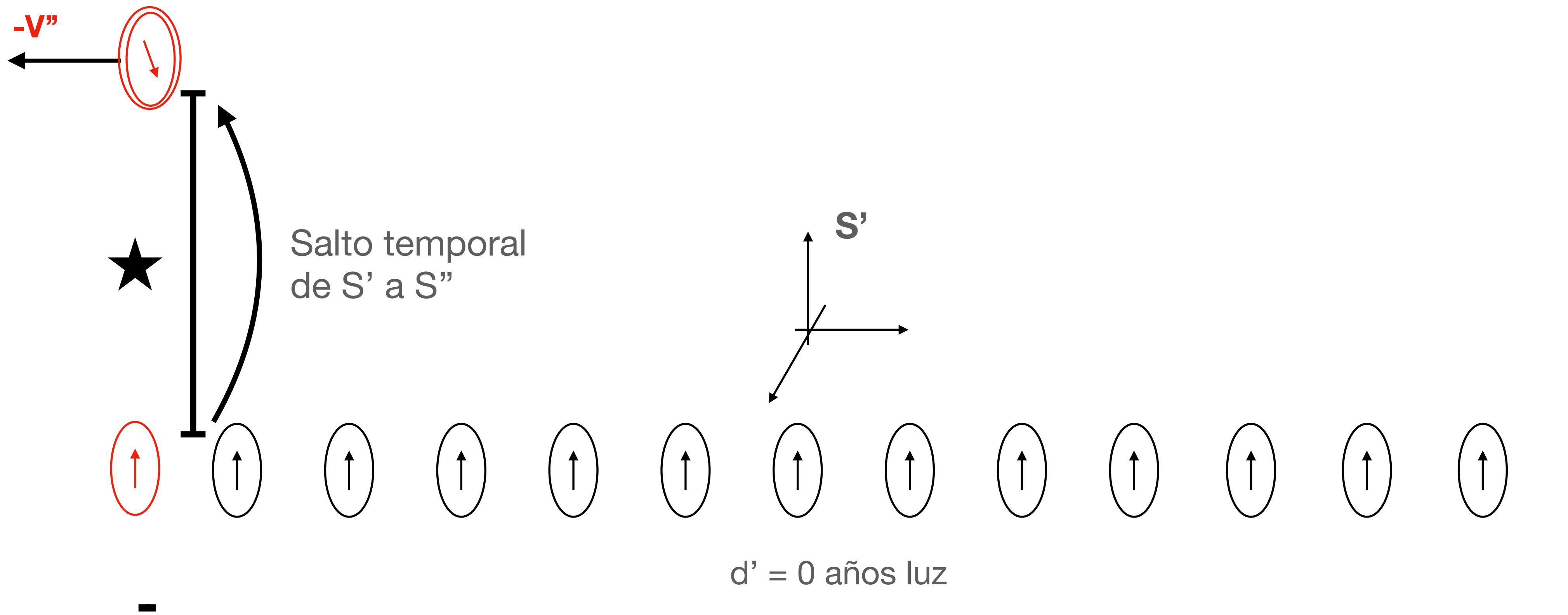


$d' = 2.4$  años luz

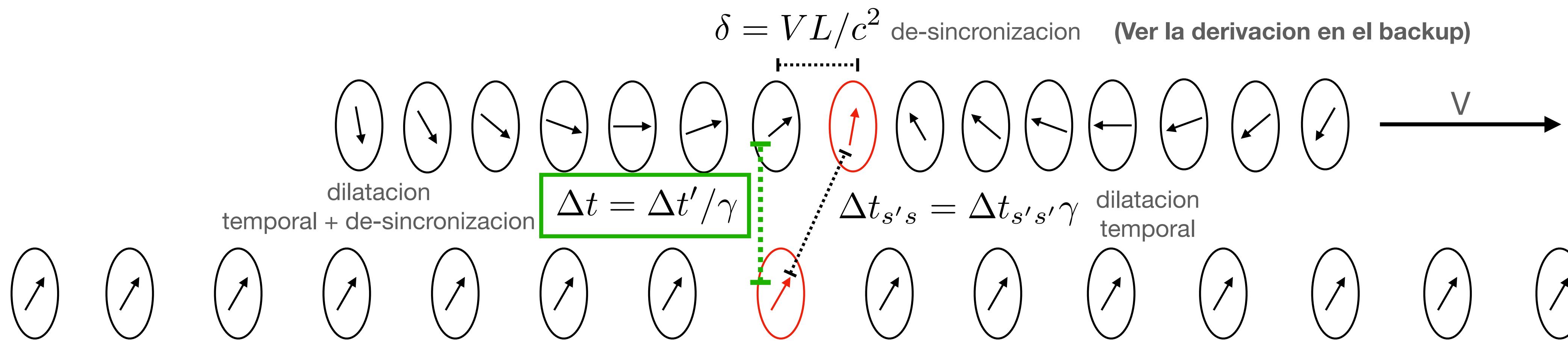


# Resolucion de la paradoja: el salto hacia el futuro

Punto de vista desde la nave



# de-sincronizacion y dilatacion temporal



$\Delta x_{s's'} = 0$  (eventos suceden en el mismo lugar)  $\rightarrow \Delta t_{s's'} = \Delta\tau = \text{tiempo propio}$

Cual es la relacion entre lo medido en S y S' cuando  $\Delta x_{s's'} \neq 0$  ?  $\Delta t(\Delta t', \Delta x')$ ?

el caso mas general incluye la de-sincronizacion:  $\delta = V\delta x/c^2 + \text{la dilatacion temporal}$ :

$$\Delta t = \Delta t'\gamma + V\Delta x'\gamma/c^2 = \gamma(\Delta t' + V\Delta x'/c^2) \rightarrow \text{transformacion de Lorentz}$$

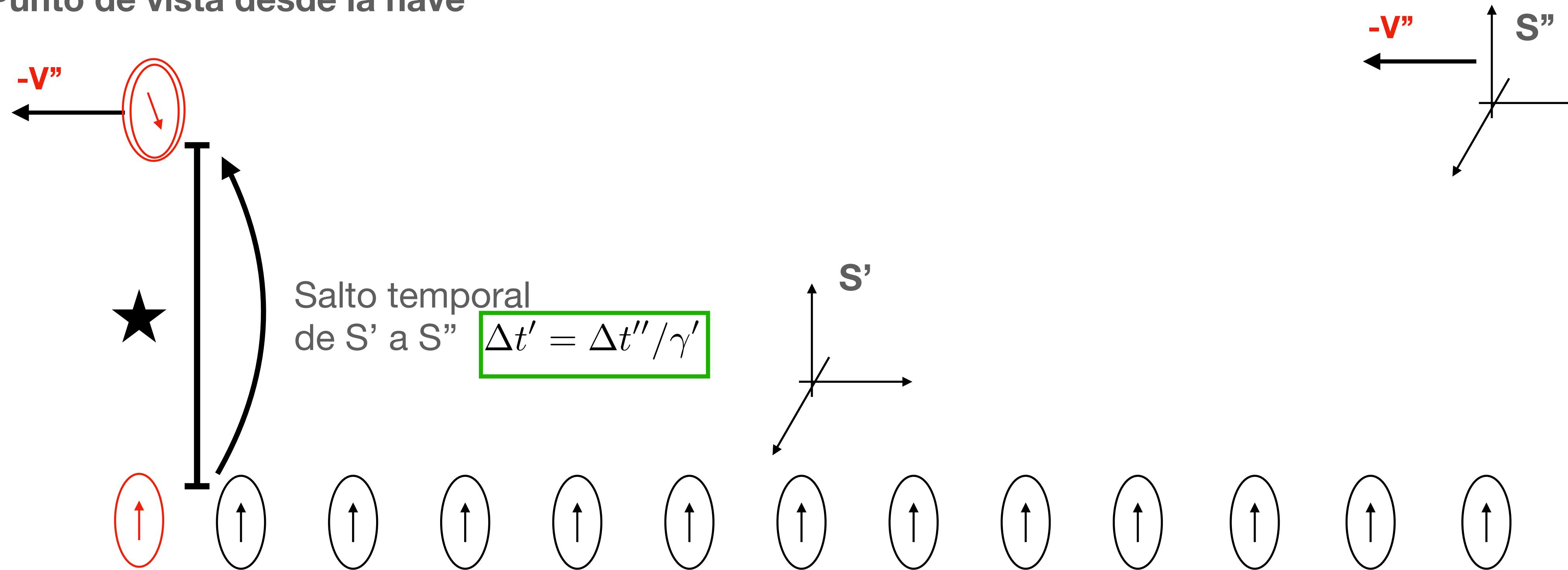
en el caso particular de  $\Delta x' = -V\Delta t'$

$$\rightarrow \Delta t = \gamma(\Delta t' + V^2/c^2\Delta t') = \Delta t'/\gamma$$

$\Delta x_{s's'} \rightarrow \Delta x'$
$\Delta t_{s's'} \rightarrow \Delta t'$
$\Delta x_{s's} \rightarrow \Delta x$
$\Delta t_{s's} \rightarrow \Delta t$

# Resolucion de la paradoja: el salto hacia el futuro

Punto de vista desde la nave



donde  $\gamma'$  se obtiene de la adicion relativista de velocidades  $V''$  y  $V'$ , es decir la velocidad de  $S''$  medida respecto a  $S'$ . Esto da  $V = -15/17 c$ , el cual corresponde a  $\gamma' = 2.125$

# Resolucion de la paradoja: el salto hacia el futuro

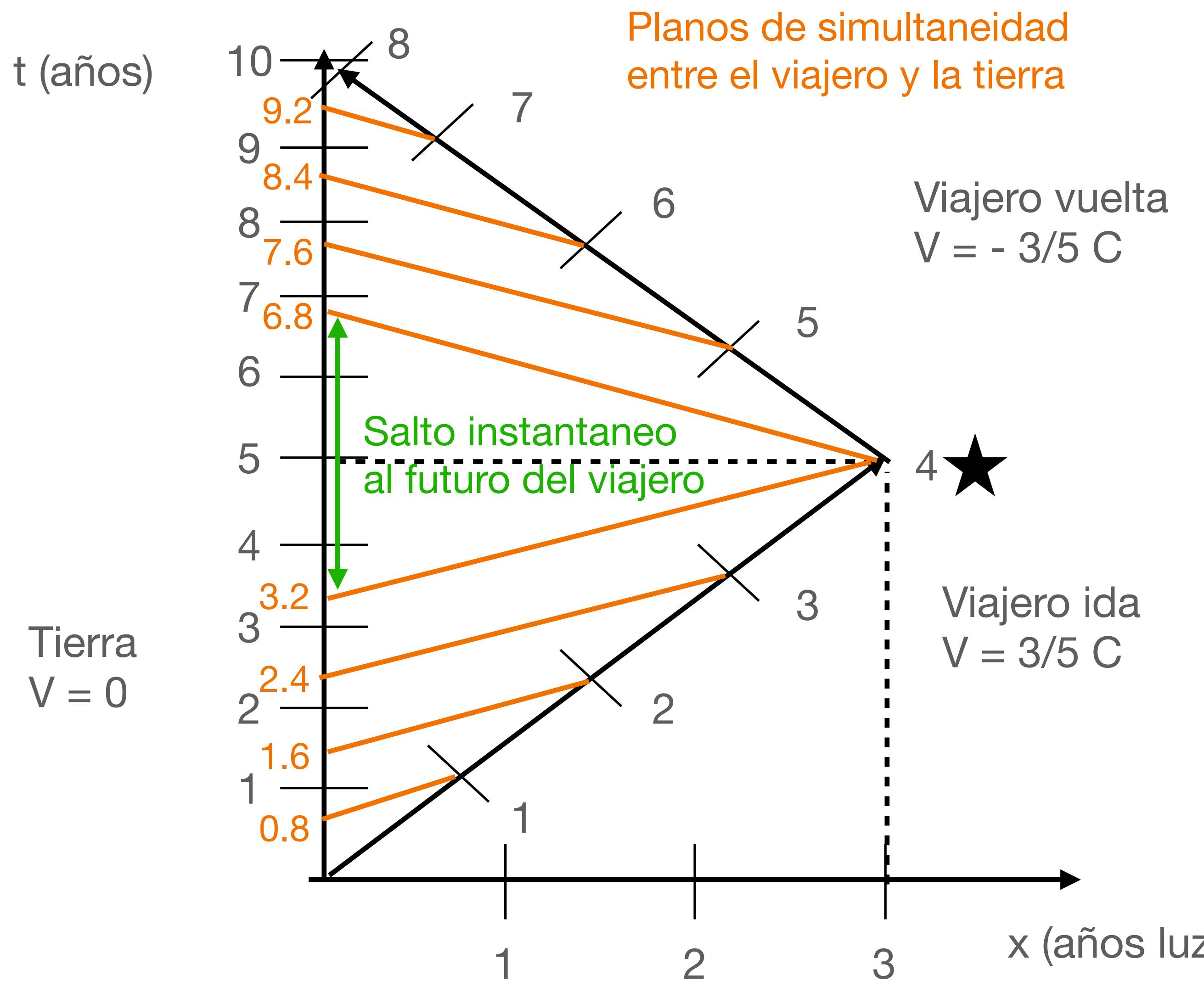
Entonces como se resuelve la paradoja??

El tiempo transcurrido en la tierra segun el viajero consta de 3 partes:

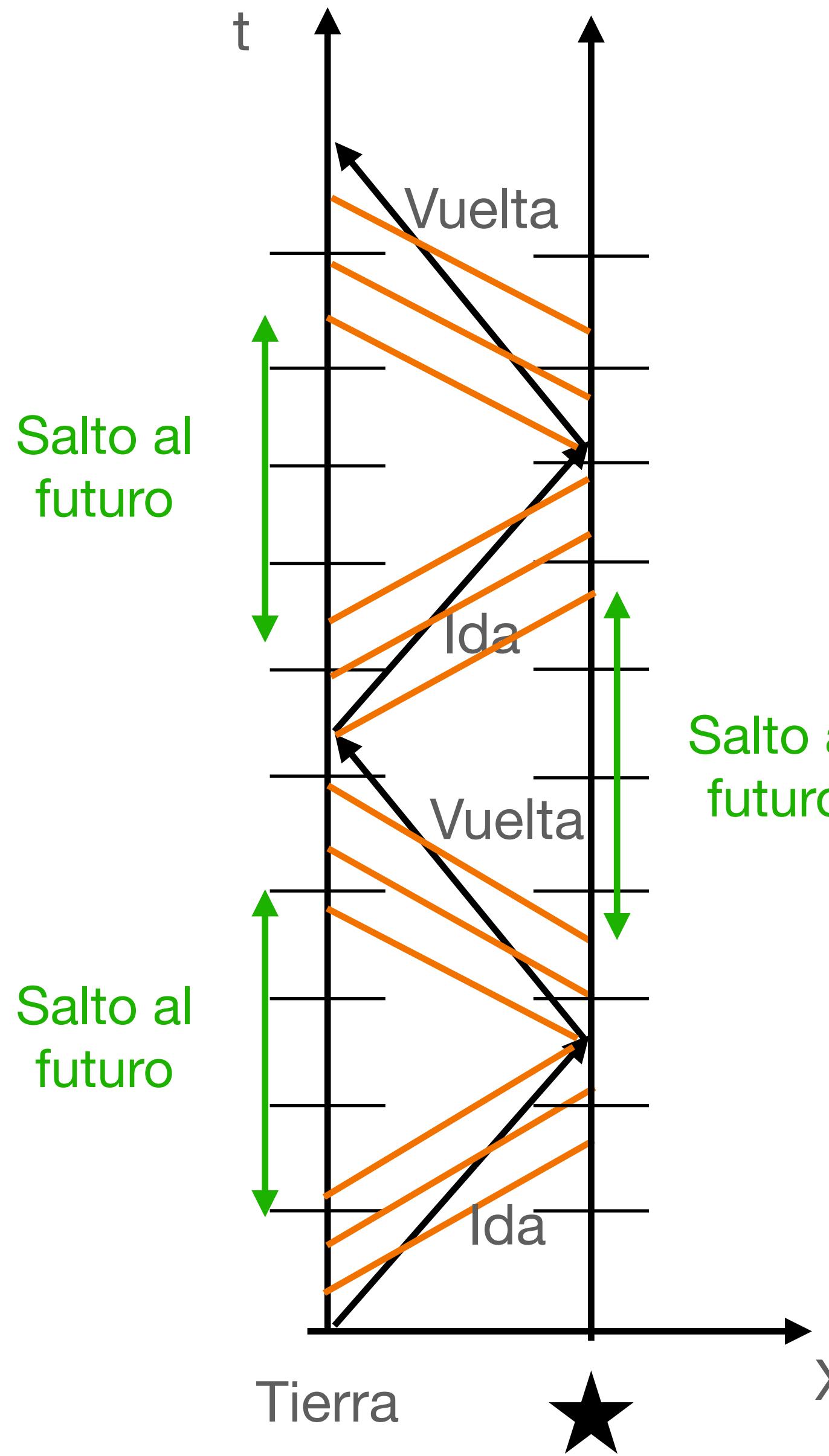
	Ida	Ida + Salto	Vuelta	Total
Tiempo transcurrido en la tierra medido por el viajero	3.2 años	$\Delta t'' = \Delta t' \gamma'$ $= 3.2 * 2.125 = 6.8$	3.2 años	$6.8 + 3.2 = 10$ años
Tiempo del viajero medido por el viajero	4 años	4 años	4 años	8 años

El resultado final del cronograma del viajero coincide ahora con el de la tierra, aunque los pasos intermedios (las razones) son distintas. No hay por ende paradoja. Ambos van a estar de acuerdo que en la tierra pasaron 10 mientras que en la nave pasaron 8 años.

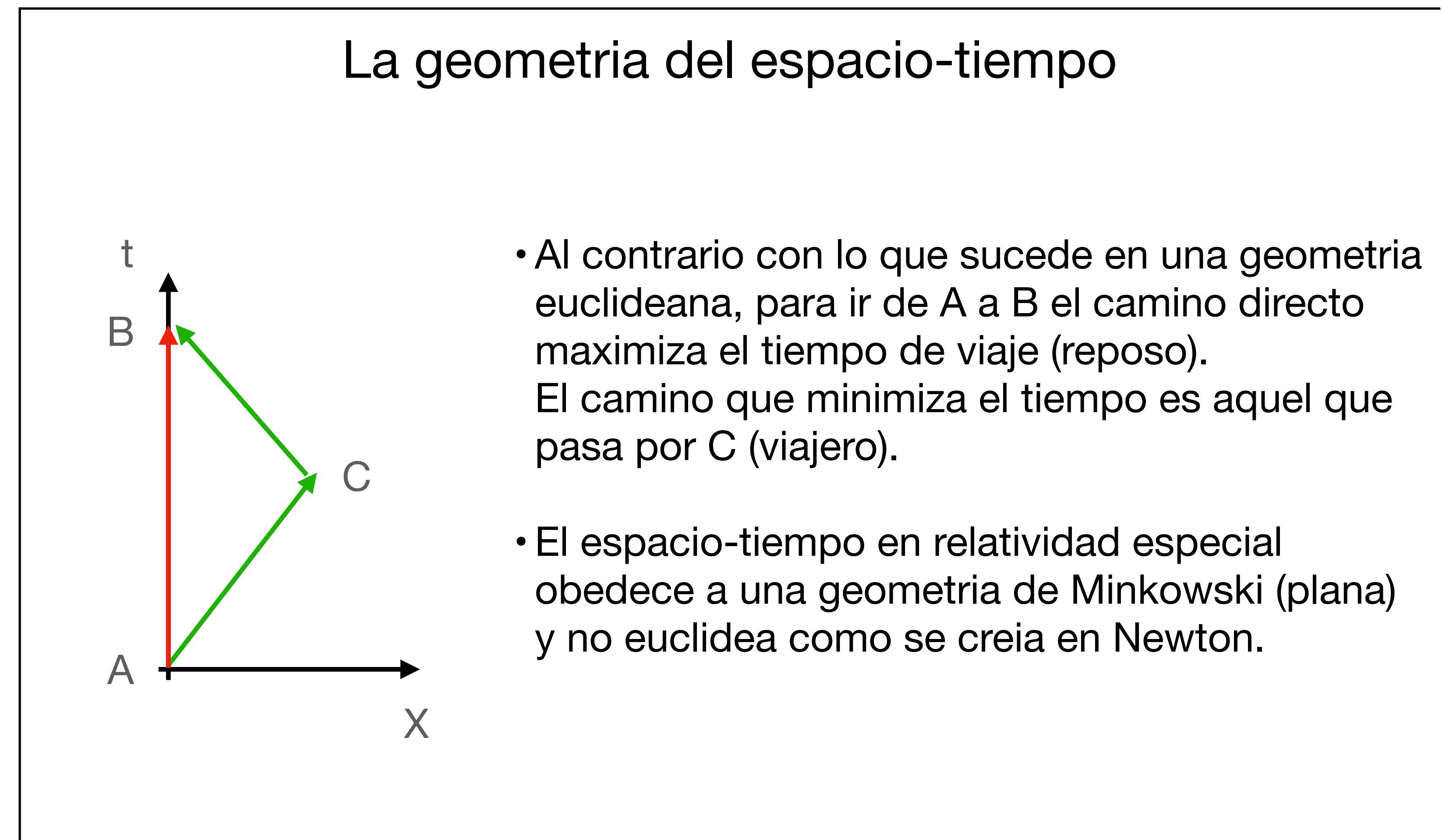
# El salto hacia el futuro (version grafica)



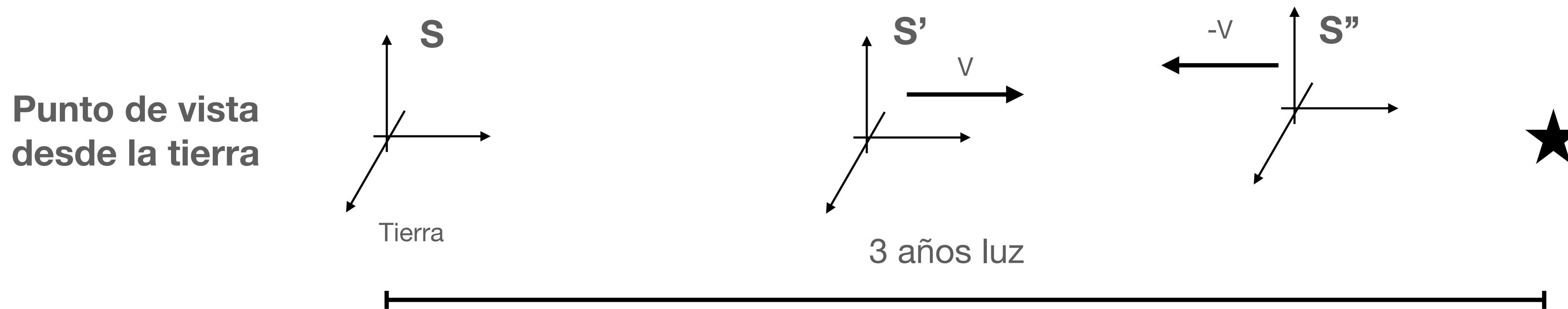
# El salto hacia el futuro (version grafica)



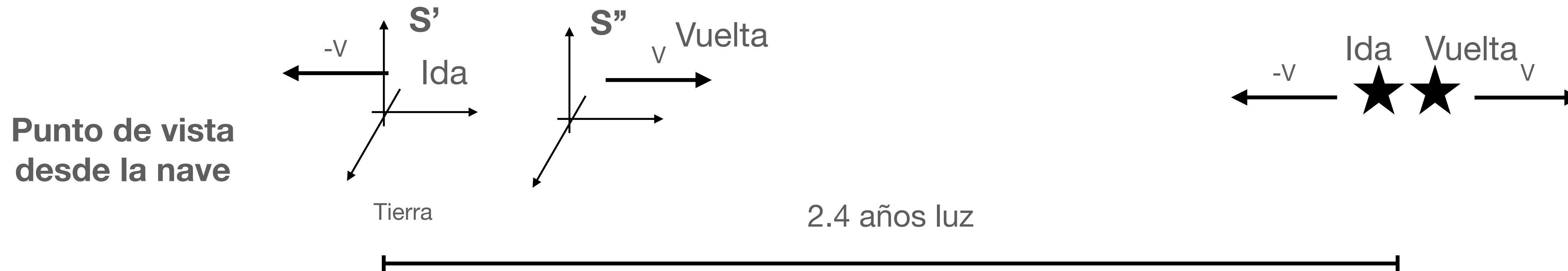
Ejemplo de un viajero que va y vuelve. Podria ser por ejemplo el caso de un nadador que pega muchas vueltas en la pileta. En cada vuelta el nadador da un salto al futuro.



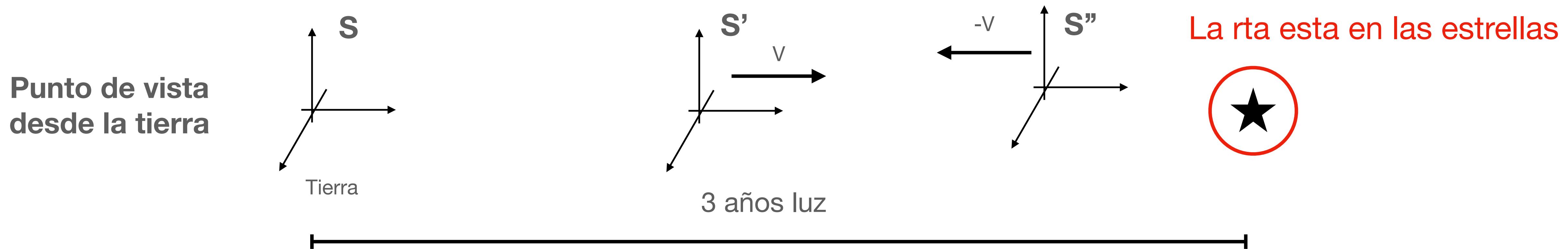
# De vuelta a la paradoja?



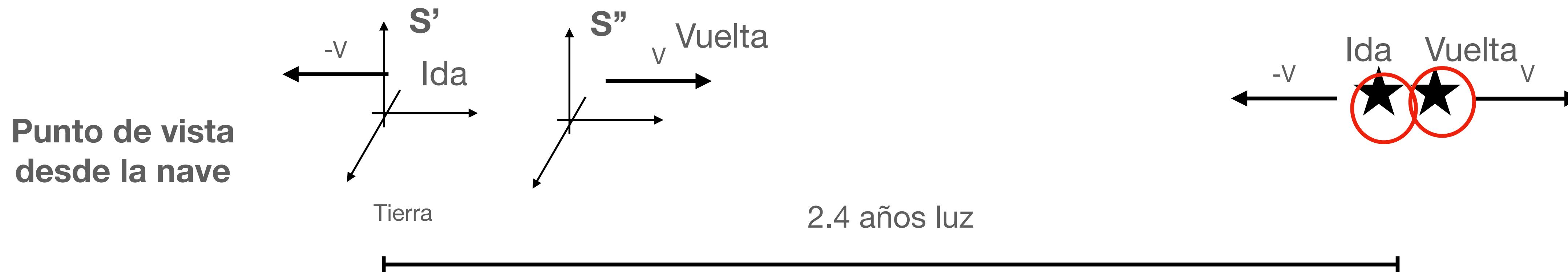
- La paradoja se resolvio al notar que hay 2 sistemas de referencias para describir al viajero pero solo 1 para la tierra y considerar la sincronizacion de relojes cuando el viajero salta de un sistema a otro en movimiento. Vimos que de esta forma la relatividad resulta consistente y los observadores estan de acuerdo en los hechos (pero no en sus causas)
- Pero... por que esta bien considerar 2 sistemas de referencia para el viajero y 1 para la tierra y no al reves? Desde el punto de vista del viajero la tierra se aleja y vuelve, por que no considero 2 sistemas para la tierra y 1 para el viajero?



# De vuelta a la paradoja?



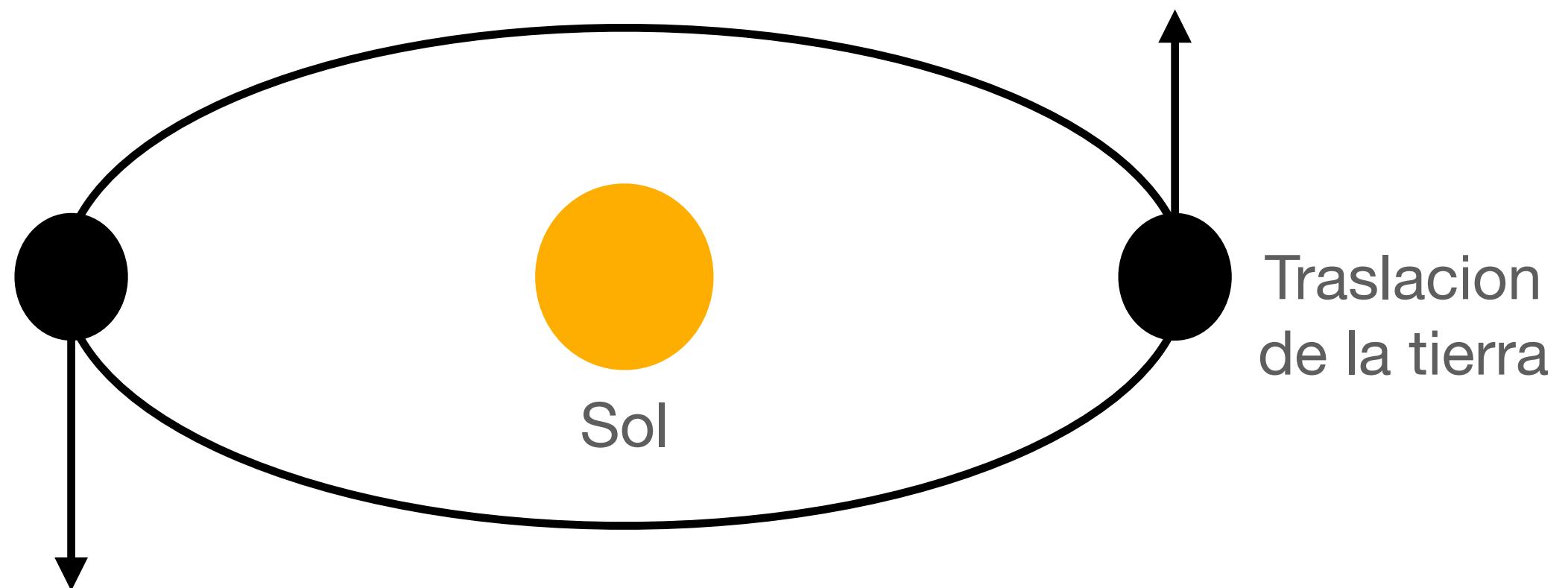
- La paradoja se resolvio al notar que hay 2 sistemas de referencias para describir al viajero pero solo 1 para la tierra y considerar la sincronizacion de relojes cuando el viajero salta de un sistema a otro en movimiento. Vimos que de esta forma la relatividad resulta consistente y los observadores estan de acuerdo en los hechos (pero no en sus causas)
- Pero... por que esta bien considerar 2 sistemas de referencia para el viajero y 1 para la tierra y no al revés? Desde el punto de vista del viajero la tierra se aleja y vuelve, por que no considero 2 sistemas para la tierra y 1 para el viajero?



# Sistema absoluto de referencia en la relatividad especial?

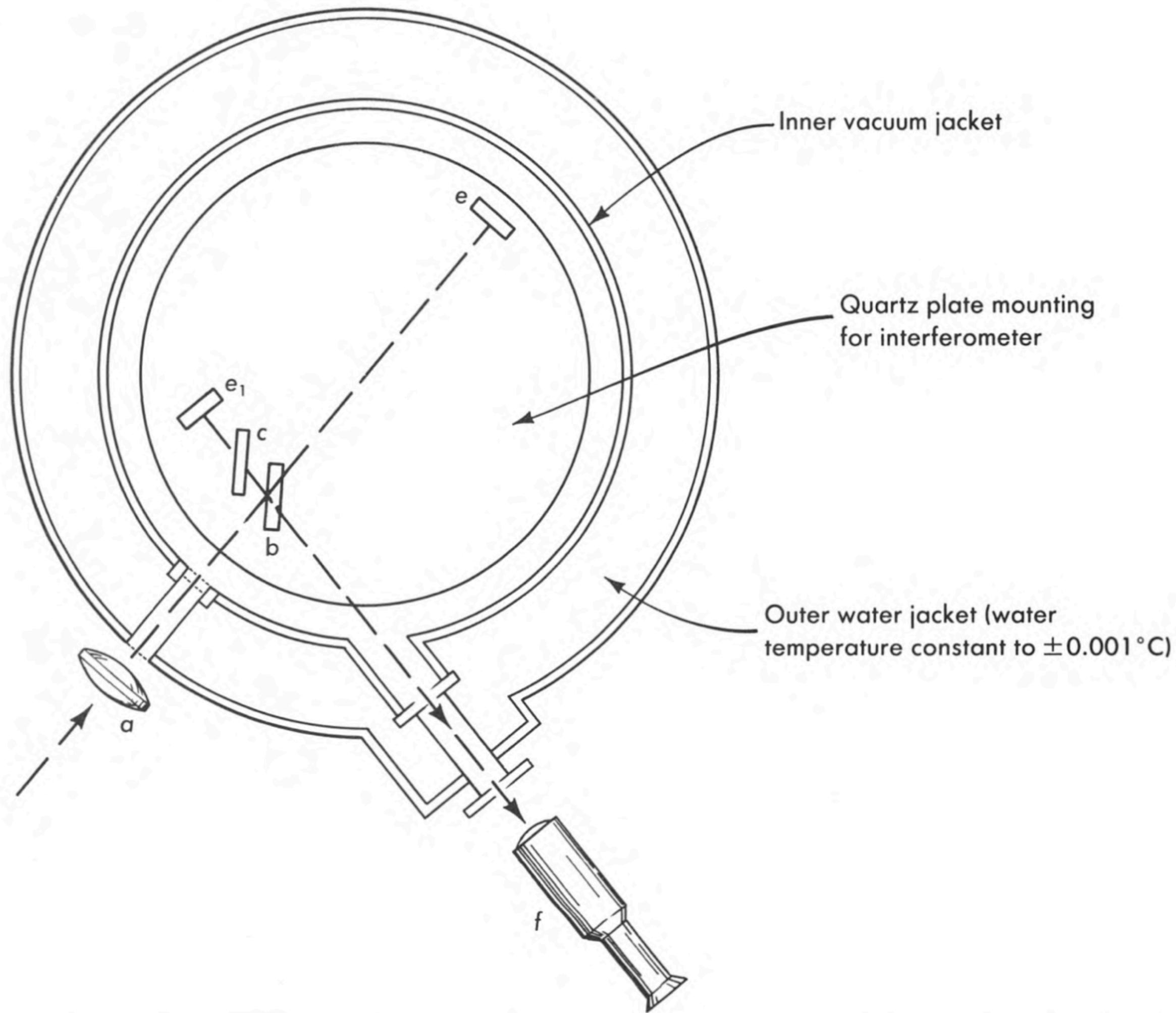
- La resolucion de la paradoja en la relatividad conlleva a la existencia (incomprobable) de un sistema absoluto de referencia, dado por el marco referencial de las “estrellas fijas” (o el eter?).
- In 1911, Langevin wrote: "A uniform translation in the aether has no experimental sense. But because of this it should not be concluded, as has sometimes happened prematurely, that the concept of aether must be abandoned, that the aether is non-existent and inaccessible to experiment. Only a uniform velocity relative to it cannot be detected, but any change of velocity .. has an absolute sense." [36]

Eter: medio absoluto en el que se supone que la luz se mueve con la velocidad característica c



- El experimento de Michelson-Morley (1887) descarto la traslacion uniforme respecto al eter. Sin embargo, este experimento descarta la teoria del eter completamente?
- En la vision moderna la teoria del eter fue descartada por la relatividad y la luz no necesita medio para propagarse.
- MM mostraron que la velocidad de la luz es isotropica en sistemas inerciales en movimiento relativo.
- Pero es su valor c tambien el mismo?
- —> Kennedy—Thorndike experiment (1932)

# Kennedy—Thorndike experiment (1932)



- El experimento uso un haz continuo de luz monocromatica de periodo  $T = 1.82 \times 10^{-15}$  seg emitida por una fuente de mercurio.
- Cuantos periodos mas tarde va a llegar la luz que viaja en el brazo largo (eb) con respecto al corto (e1b)?
- La velocidad de la luz medida cuando la tierra se traslada en el 1er semestre sera la misma a cuando lo hace en el 2do semestre?
- RTA: SI!

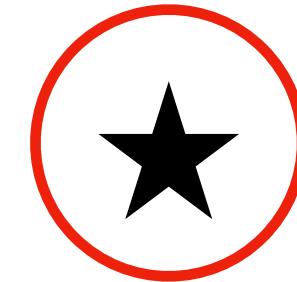
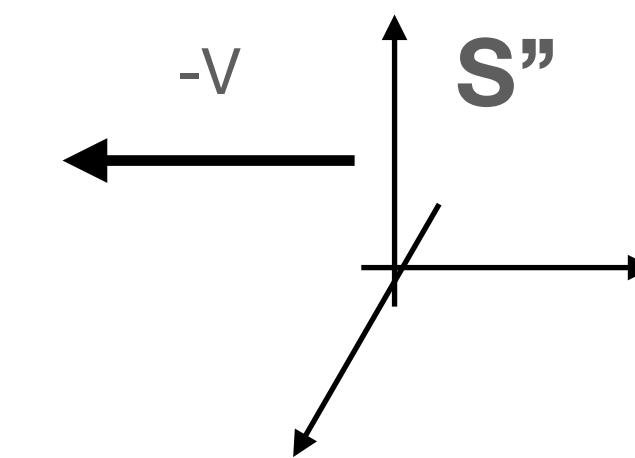
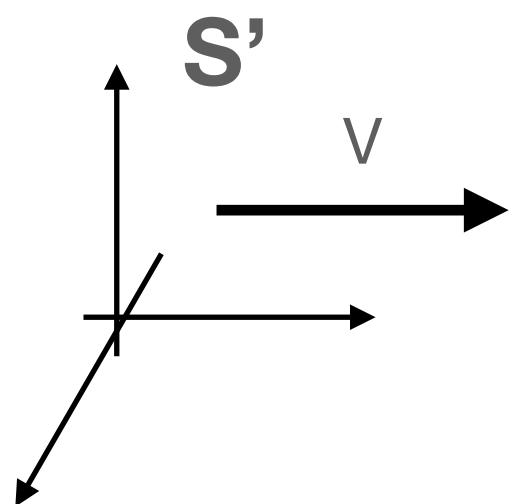
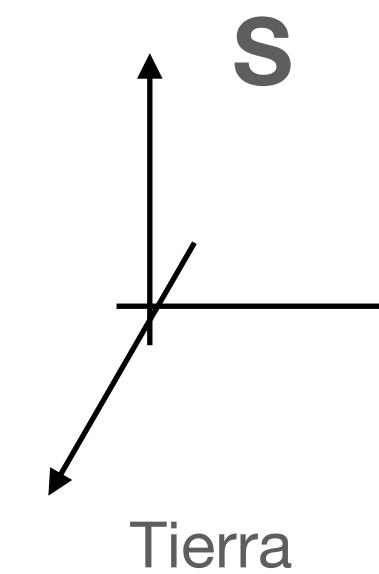
El interferómetro está montado sobre una placa de cuarzo, que cambia muy poco de dimensión cuando varía la temperatura. El interferómetro está encerrado en una cámara de vacío para que los cambios en la presión atmosférica no alteren la longitud efectiva del camino óptico de los brazos del interferómetro (velocidad de vuelo ligeramente diferente a distinta presión atmosférica). El vacío interior está rodeada por una cámara de agua exterior en la que el agua se mantiene a una temperatura que varía menos de  $\pm 0.001$  grados. Todo el aparato mostrado en la figura está encerrado en un pequeño cuarto oscuro (no mostrado) mantenido a una temperatura constante dentro de unas centésimas de grado. El cuarto oscuro pequeño está a su vez encerrado en un cuarto oscuro más grande cuya temperatura es constante dentro de unas pocas décimas de grado. El tamaño total del aparato puede juzgarse por el hecho de que la diferencia de longitud de los dos brazos del interferómetro (longitud eb comparada con la longitud e1b) es de 16 centímetros.

# Teorias alternativas a la relatividad: teoria del eter A vs teoria del eter B (1932)

- Ambas (A y B) asumen la idea viaje de un espacio absoluto, o “eter” en el que se propaga la luz.
  - Ambos explican el resultado nulo del experimento de MM diciendo que todo tipo de materia sufre una contraccion (absoluta) en la direccion de movimiento ( $dx$ ) en un factor  $1/\gamma$  (hipotesis de Lorentz-FitzGerald).
  - Las teorias difieren en lo que respecta al pasaje del tiempo al moverse en el “espacio absoluto”:
    - La teoria A dice que no hay efecto en el tiempo  $t$  (tiempo inmutable).
    - La teoria B dice que un reloj que se mueve en el espacio absoluto sufre una dilatacion (absoluta).
  - En la teoria B la proporcion  $dx / t$  no sera afectado por el movimiento y dara por ende un resultado nulo (obtenido) del experimento de **Kennedy—Thorndike** (“explicacion compleja para un fenomeno simple”).
  - En la teoria A, la proporcion  $dx / t$  si se vera afectada. El resultado nulo de **Kennedy—Thorndike**, descarto por ende la teoria A.
  - PERO el experimento no descarta la teoria del eter B ni tampoco (la mucho mas simple) la relatividad especial de Einstein.
- 
- Actualmente no podemos decir (y quizas nunca se pueda) cual, si la teoria del eter B (espacio absoluto) o la relatividad especial es la correcta. No hay ninguna prueba fisica que distinga una interpretacion de la otra.
  - Sin embargo, a pesar de que el termino “eter” tenga una connotacion negativa hoy en dia (a favor de la relatividad), es lo que mejor representa en la forma de pensar de los fisicos cuando se refieren al vacio.

# Y para terminar...

Punto de vista  
desde la tierra



Habria salto al  
futuro si las  
estrellas / galaxias  
no existiesen?

- En la paradoja de los gemelos notar que estamos apelando a la existencia de 2 sistemas de referencia para el viajero y solo 1 para la tierra, o a la realidad de una aceleracion (del viajero) absoluta. **Existirian los efectos de la paradoja (viajero mas joven que en la tierra) si no existiese el marco de estrellas y galaxias distantes?**
- La mayoria de los fisicos dirian que no...
- Será la definición de un sistema inercial aquel que tenga aceleración cero respecto a la materia del universo en general?
- El principio de Mach (conjetura) (1883) sostiene que las leyes físicas locales están determinadas por la estructura a gran escala del universo. (Mach fue una gran inspiración de Einstein para su teoría de relatividad general).
  - Segun este principio si todas las estrellas se pusieran a rotar, habría una ley física que haría que sintiéramos una fuerza centrífuga debido a la rotación del cosmos.
  - O que si un astronauta empieza a girar en un universo vacío este no sentiría una fuerza centrífuga que haga que se extiendan sus brazos. Que existan tales fuerzas iniciales sería indicio de que existe un marco de estrellas en algún lado...
  - Sin embargo pensar en una rotación sin ningún punto de referencia implicaría una noción de espacio y marco de referencia absoluto...

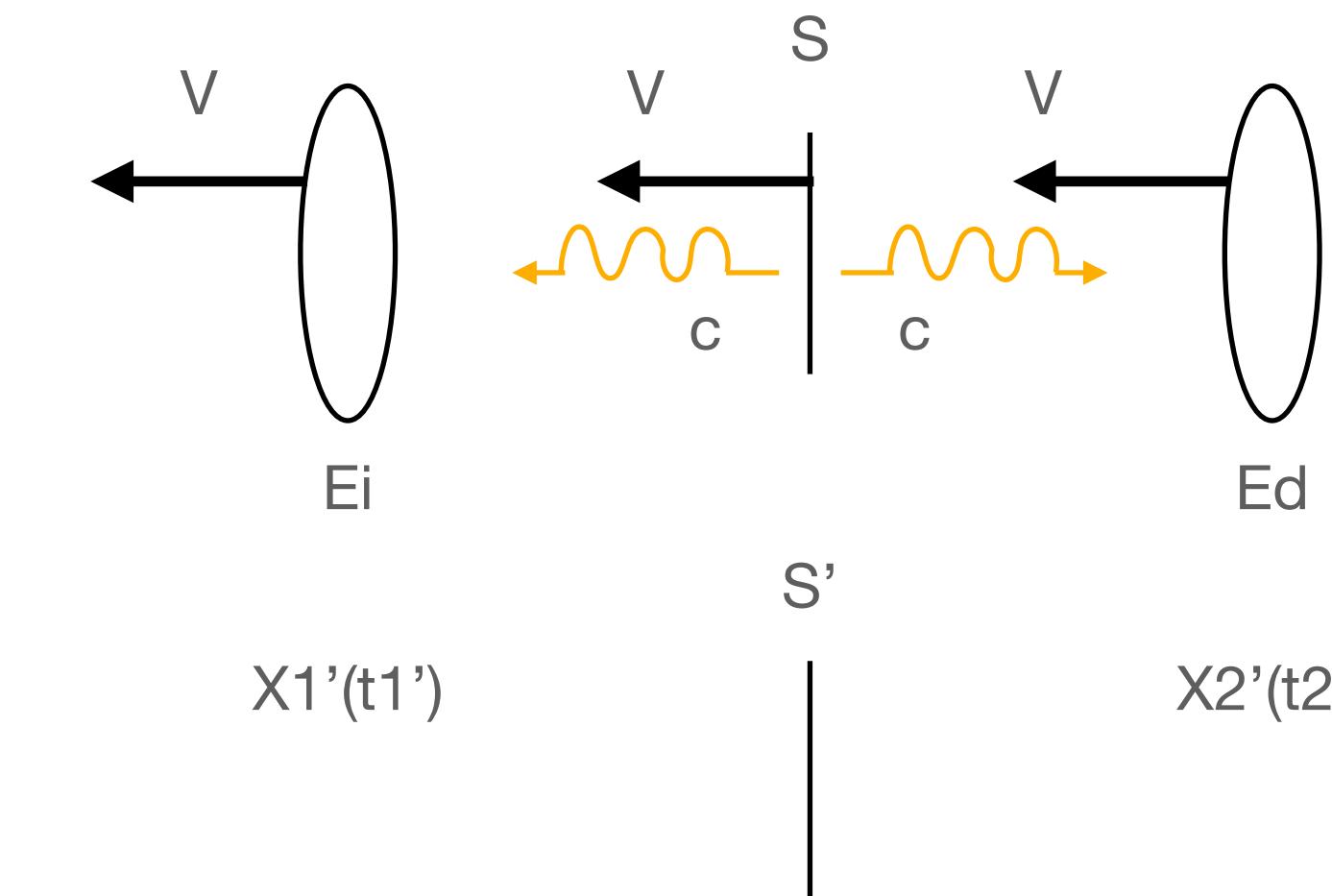
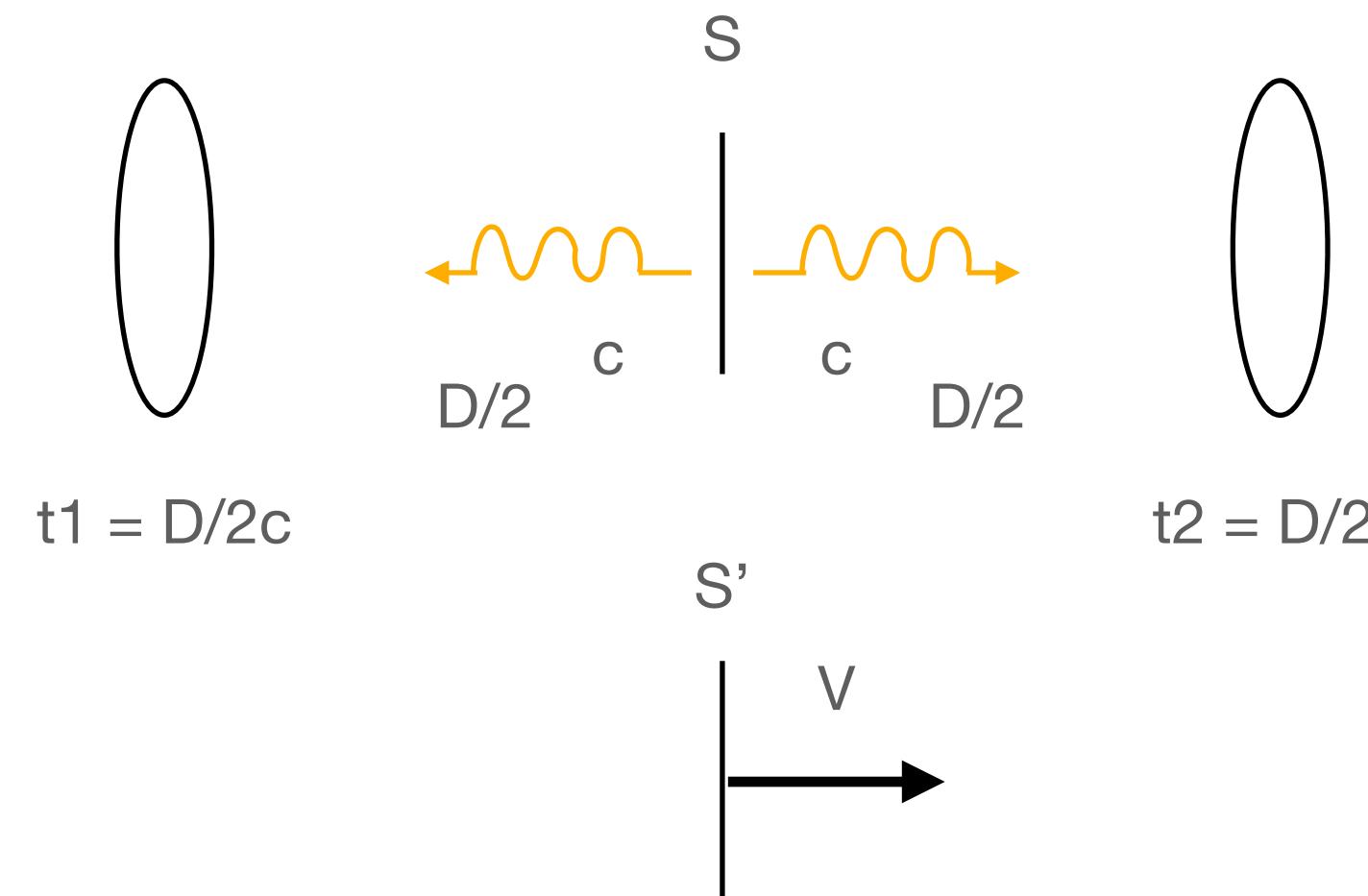
# Referencias

- Wheeler, J., Taylor, E. (1992). Spacetime Physics, second edition
- Foundations of Modern Cosmology (John E. Hawley)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Twin\\_paradox](https://en.wikipedia.org/wiki/Twin_paradox)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Mach%27s\\_principle](https://en.wikipedia.org/wiki/Mach%27s_principle)
- <https://www.cpp.edu/~ajm/materials/twinparadox.html>
- <https://www.youtube.com/watch?v=1TKSfAkWWN0>
- <https://www.youtube.com/watch?v=s7xfOShO0VQ>
- [https://physics.nyu.edu/~ts2/Animation/special\\_relativity.html](https://physics.nyu.edu/~ts2/Animation/special_relativity.html)
- <https://medium.com/@hackguru/special-relativity-intuitive-explanation-ee4f351f2fa0>

# **BACKUP**

# Derivacion del termino de de-sincronizacion

- Para derivar la corrección temporal debido a la desincronización de relojes en movimiento relativo imponemos la constancia de la velocidad de la luz para el caso en que la propagación de la señal ocurre en la dirección del movimiento. Esto es ortogonal al análisis que se hizo para determinar la dilatación temporal usando el teorema de Pitágoras.



Ec. de mov para  $E_i$  (espejo izquierdo):  
 $X'_{ei}(t_1') = -D'/2 - Vt'$

Ec. de mov para el rayo c:  
 $X'_c(t_1') = -ct'$

El rayo llega al espejo:  
 $X'_{ei} = X'_c \rightarrow t_1' = D'/2 / (c-V)$

Mismo razonamiento para  $t_2'$ :  
 $t_2' = D'/2 / (c+V)$

$$t_1' - t_2' = \Delta t' = \gamma DV/c^2$$