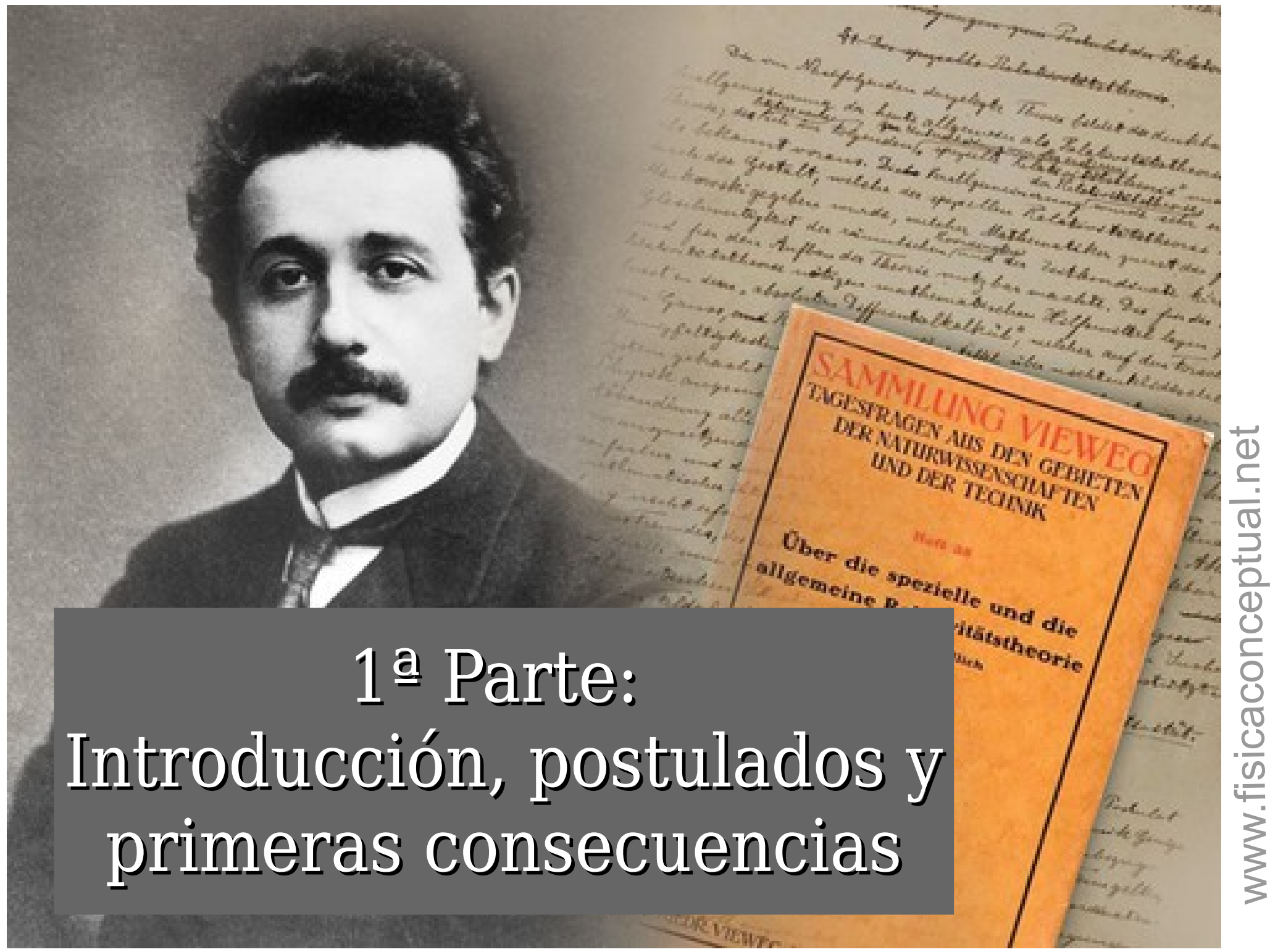
A composite image featuring a black and white portrait of Albert Einstein on the left. On the right, there is a photograph of the cover of a book titled 'SAMMLUNG VIEWEG' (Vieweg Collection). The book cover is orange and contains the text: 'TAGESTRAGEN AUS DEN GEBIETEN DER NATURWISSENSCHAFTEN UND DER TECHNIK', 'Heft 88', 'Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie', 'Gemeinverständlich', 'Von A. Einstein', and '1. Auflage'. The background of the entire image is a faded, handwritten document in German, likely related to Einstein's work on relativity.

Introducción Conceptual a la Relatividad Especial



1ª Parte:
Introducción, postulados y
primeras consecuencias



¿Qué puedo esperar de esta presentación?

Lo que no es: la típica explicación de la relatividad en 2 minutos

Cuando nos quedamos en la superficialidad, no podemos entender en profundidad, ni disfrutar, ni valorar, el significado y las implicaciones de la relatividad.



¿Puedo entender la Relatividad?
Es posible con un poco de esfuerzo,
siempre que estés dispuesto a someter
tus ideas a revisión.

¿Necesito saber Matemáticas?
Las demostraciones matemáticas que se
hacen en Relatividad Especial son
sencillas. En esta presentación casi se
prescinde de ellas.

¿Tengo que saber Física?
Casi no hacen falta conocimientos de
Física para entender los fundamentos de
la teoría. En esta presentación tan solo
utilizaremos la conocida fórmula $v=e/t$



Entonces

¿Dónde está el problema?

¿Por qué la gente no sabe relatividad?

La dificultad que tiene esta teoría es que parece contraria a nuestra experiencia.

Además, cuesta mucho adaptarse a esta nueva forma de interpretar la realidad. Se cometen muchos fallos de razonamiento debido a que, sin querer, seguimos pensando en términos de espacio y tiempo absolutos.



Advertencias

Es necesario olvidarnos de nuestra experiencia previa: casi todo lo que creemos saber del espacio y el tiempo es falso...

Si nos empeñamos en seguir nuestra experiencia sentiremos confusión, perplejidad, incredulidad...

Sin embargo, ¡la Relatividad es cierta!
Se ha comprobado en multitud de situaciones distintas, con una precisión inimaginable, y todos los resultados experimentales verifican los postulados asumidos y concuerdan con las predicciones teóricas.



Nuestra guía debe ser la razón.

Partiremos de solo dos postulados. Veremos que son muy sencillos y, a su vez, muy razonables.

Debemos tener presente cuáles son esos postulados. A partir de ellos deduciremos qué implican.

Por tanto, si los postulados son ciertos,

las conclusiones que obtendremos serán inevitables, por extrañas que pudieran parecer.

Resumiendo:

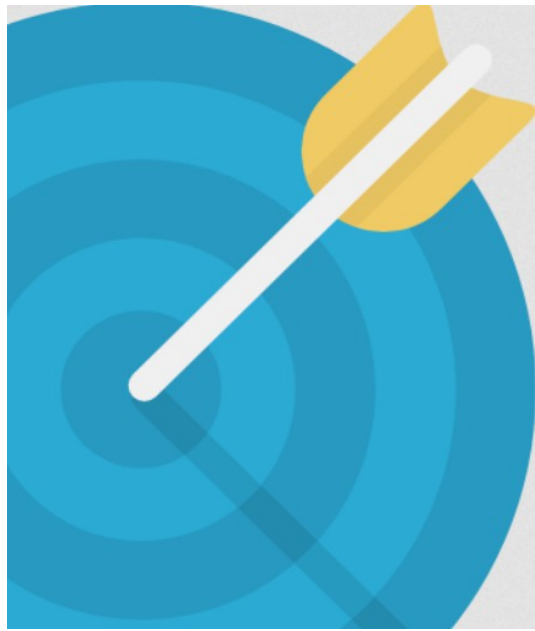
Ten la mente abierta.

Libérate de tu experiencia:
No es aplicable a lo que
veremos aquí.

Ármate de la lógica para lidiar
con el reto intelectual al que
vamos a enfrentarnos.

Una nueva realidad nos espera...





Objetivos:

- 1) Comprender la relatividad del tiempo y el espacio
 - De dónde surgen
 - Qué significan y qué implican

2) Comprobar la coherencia de la teoría (pese a las múltiples paradojas que irán apareciendo)

Queda fuera de los objetivos de esta presentación tratar sobre el concepto relativista de masa y energía (ya que requiere conocer unos conceptos físicos).

Aún así, las bases de la Relatividad quedarán establecidas.



El experimento de Michelson-Morley

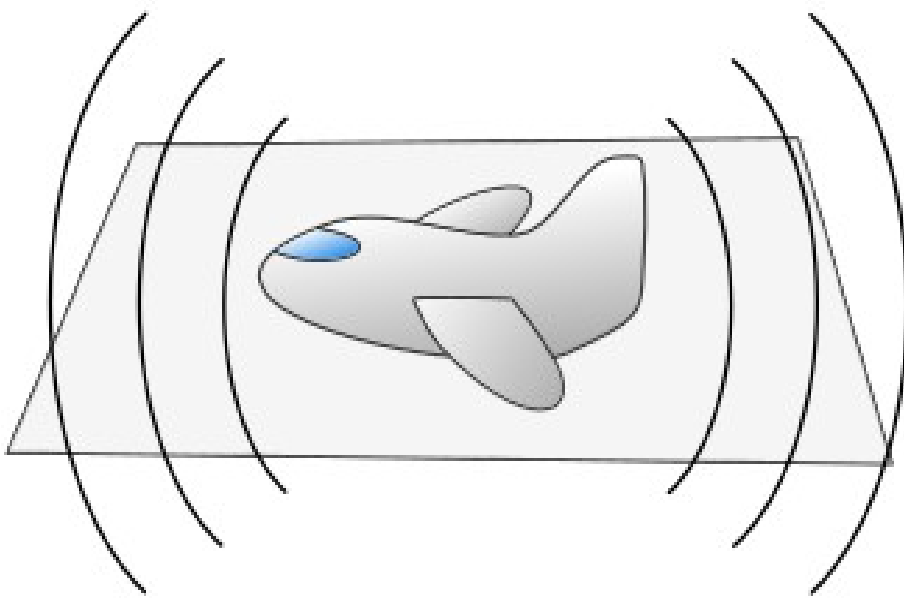
Uno de los
experimentos más
bellos (y relevantes) de
la Física

... pese a que fue
un “fracaso”

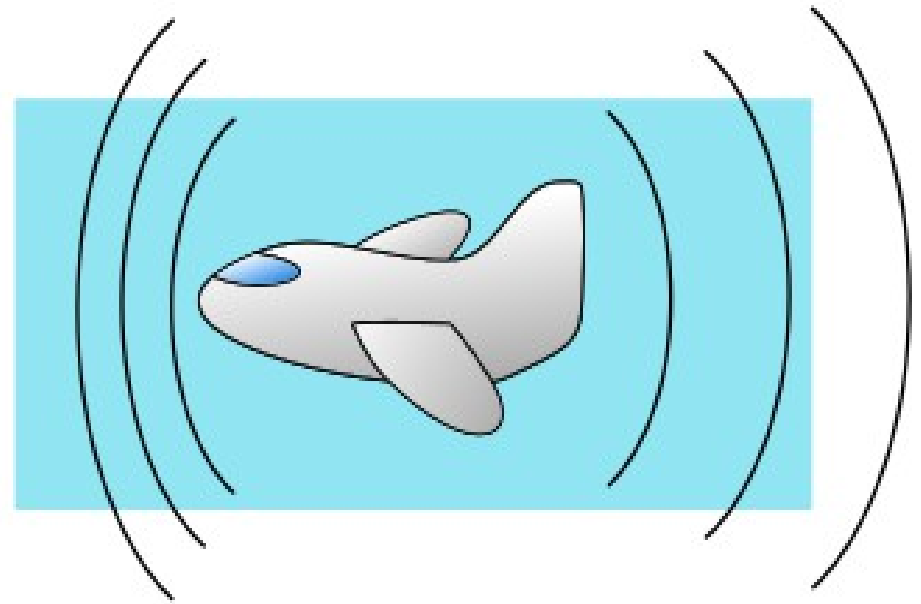
Contexto histórico:

así como el sonido necesita el aire para propagarse, se pensaba que la luz necesitaba un medio para propagarse (el éter).

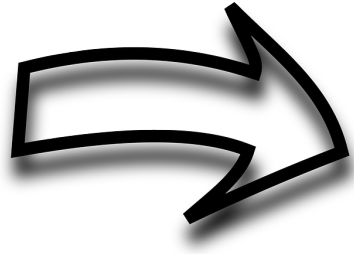
¿A qué velocidad se aleja el sonido de un avión?



Si está en reposo, por el morro y por la cola se aleja a 340 m/s



Si el avión va a 240 m/s, el sonido del morro se aleja a 100 m/s y el de la cola a 580 m/s



De forma análoga, Michelson y Morley quisieron medir la velocidad a la que se mueve la Tierra respecto al éter.

Si la Tierra está en reposo respecto al éter, apuntemos donde apuntemos, la luz se alejará de la Tierra a la misma velocidad.

Si la Tierra se mueve respecto al éter, la velocidad será diferente según dónde se dirija el rayo de luz.

Esto permitiría medir la velocidad de la Tierra.

Pero no se detectó ninguna variación en la velocidad de la luz...

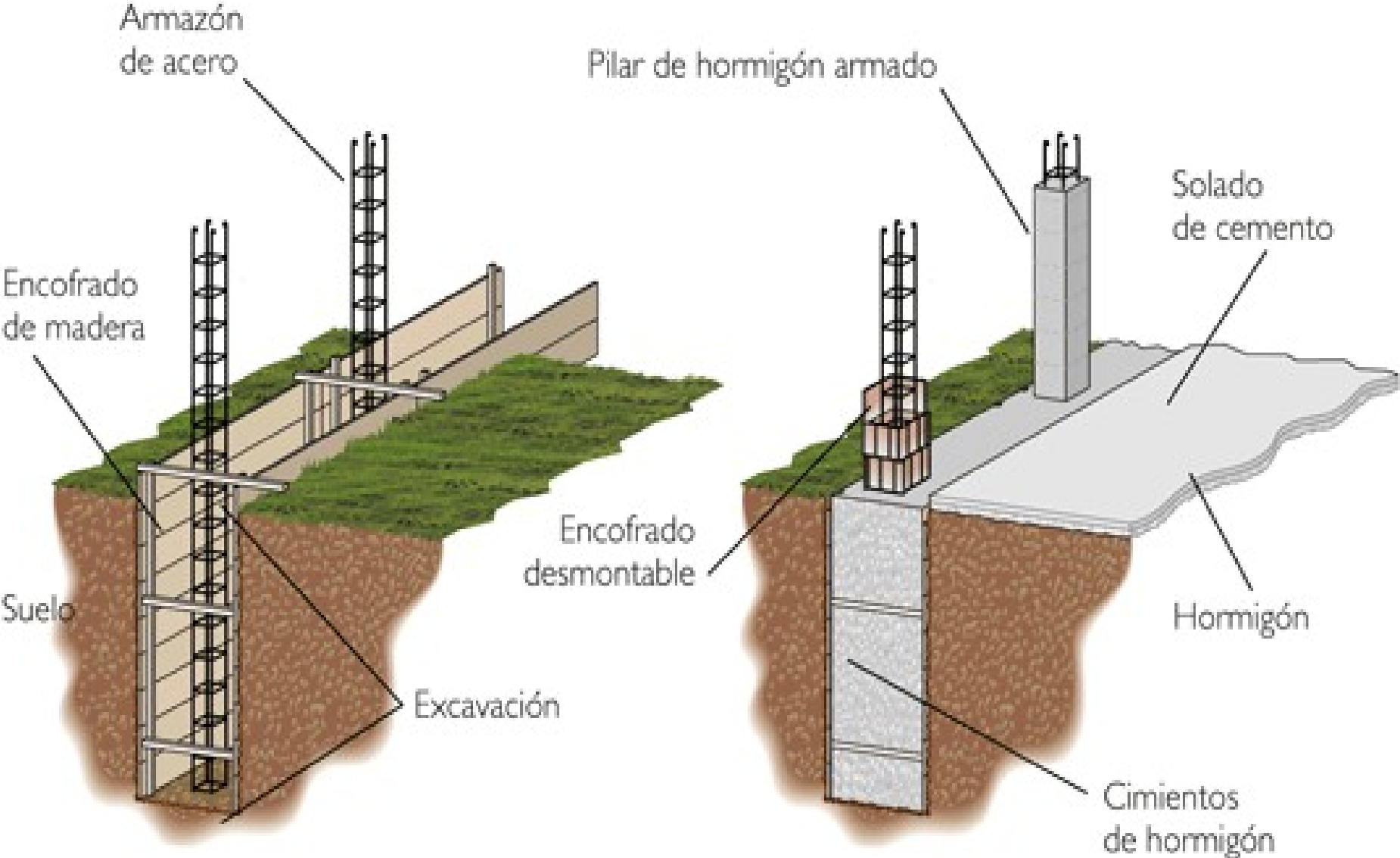
El resultado obtenido no tenía ningún sentido: era como si la Tierra estuviera siempre quieta respecto al éter, cuando obviamente no podía estar siempre quieta...

El experimento se revisó y se volvió a hacer, mejorado y con diferentes diseños una y otra vez, y los resultados indicaban que la velocidad de la luz siempre era la misma.

Esa constancia en la velocidad de la luz fue un elemento clave en el desarrollo de la relatividad.



Postulados



Postulado de Relatividad:

Todos los sistemas de referencia (s.r.) inerciales son equivalentes. No existe ningún s.r. privilegiado.

Postulado de constancia de la velocidad de la luz:

La velocidad de la luz es siempre la misma, independientemente de la velocidad de la fuente y de la velocidad del observador.

Nota:

s.r. inercial es aquel que mantiene constante su velocidad.

Son ejemplos de s.r. inerciales:

- un coche en una autopista a una velocidad fija de 100 km/h
- una nave espacial a una velocidad fija de 50000 km/h

Postulado de Relatividad:

Todos los sistemas de referencia (s.r.) inerciales son equivalentes. No existe ningún s.r. privilegiado.

Postulado de constancia de la velocidad de la luz:

La velocidad de la luz es siempre la misma, independientemente de la velocidad de la fuente y de la velocidad del observador.

Ambos postulados se han comprobado hasta la saciedad. Ya en la época de Einstein había pruebas muy fuertes que apuntaban a la validez de ambos (por ejemplo, el resultado del experimento de Michelson-Morley está presente en los dos postulados).

Postulado de Relatividad:

Todos los sistemas de referencia (s.r.) inerciales son equivalentes. No existe ningún s.r. privilegiado.

Este postulado, en parte, ya era aceptado por los Físicos. Se conocía como Principio de Relatividad de Galileo. Lo que ocurre es que hasta Einstein, solo se aplicaba en el contexto de la mecánica. Einstein generalizó este principio. Desde entonces se aplica también al contexto del electromagnetismo (y, por tanto, de la luz).

Con este postulado, se entiende bastante bien el resultado del experimento de Michelson-Morley: la Tierra en reposo y la Tierra en movimiento son equivalentes. La luz debe ir a la misma velocidad en ambos casos.

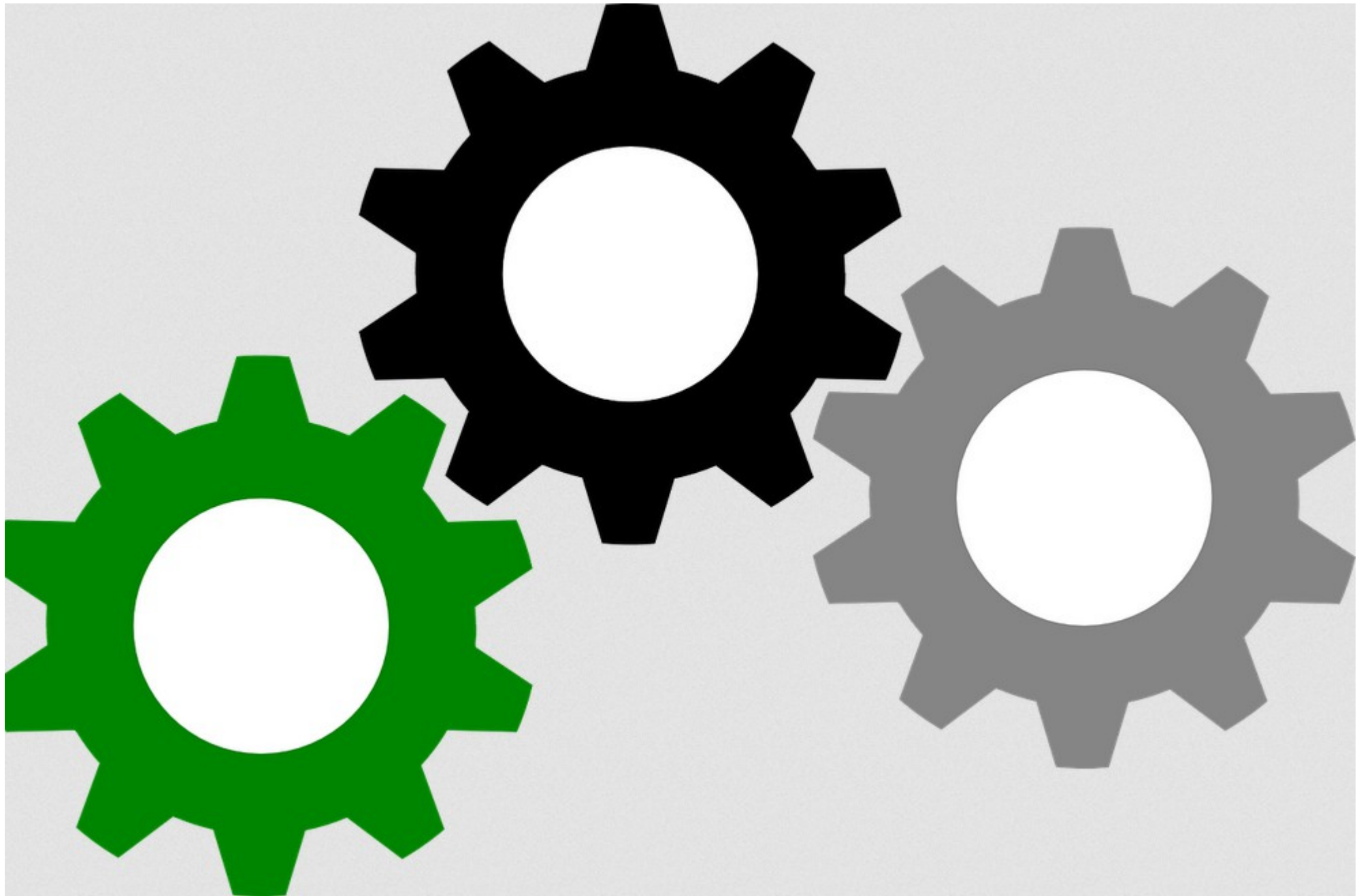
Postulado de constancia de la velocidad de la luz:
La velocidad de la luz es siempre la misma, independientemente de la velocidad de la fuente y de la velocidad del observador.

Velocidad de la luz = 300 000 km/s

Notación: Velocidad de la luz = c

Con este postulado se entiende también bastante bien el resultado del experimento de Michelson-Morley: aunque la Tierra se mueva respecto al Sol, la luz que se emite desde ella siempre se propaga a la misma velocidad.

Consecuencias



Postulado de Relatividad:

Todos los sistemas de referencia (s.r) inerciales son equivalentes. No existe ningún s.r. privilegiado.



Consecuencia inmediata:

No existe ni un s.r. absoluto ni un espacio absoluto

No tiene sentido tratar de medir la velocidad de la Tierra respecto al éter, ni respecto a un espacio absoluto. Ese s.r. absoluto no existe (el éter tampoco). El experimento de Michelson-Morley perseguía algo imposible.

La expresión: “estar parado” no tiene sentido, a menos que se indique respecto a qué se está parado. Estar parado respecto al espacio tampoco tiene sentido: el espacio absoluto no existe.

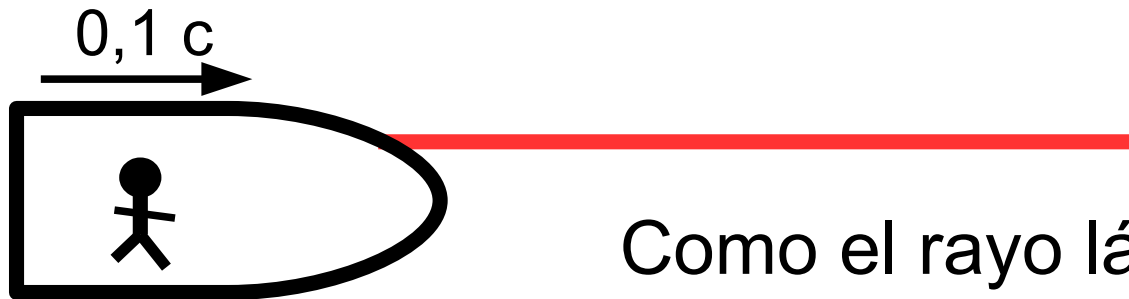
Postulado de constancia de la velocidad de la luz:

La velocidad de la luz es siempre la misma, independientemente de la velocidad de la fuente y de la velocidad del observador.



Consecuencia inmediata:

La ley de Adición de Velocidades clásica es falsa



Como el rayo láser se aleja de la nave a una velocidad c , ¿Se aleja de la Tierra a $1,1 c$?

NO. Se aleja también a c

Postulado de constancia de la velocidad de la luz:

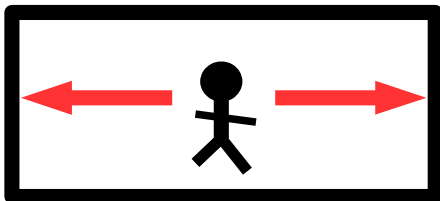
La velocidad de la luz es siempre la misma, independientemente de la velocidad de la fuente y de la velocidad del observador.



Consecuencia:

La simultaneidad es relativa

Demostración:



Desde el centro de una nave espacial se lanzan dos rayos en sentidos opuestos

Para el observador de la nave los rayos llegan a ambas paredes a la vez.

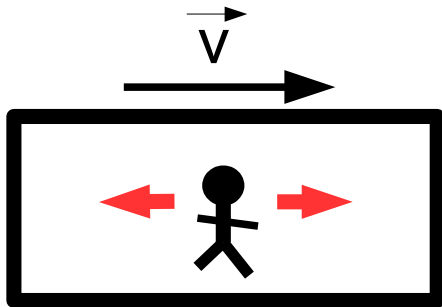
Postulado de constancia de la velocidad de la luz:

La velocidad de la luz es siempre la misma, independientemente de la velocidad de la fuente y de la velocidad del observador.



Consecuencia:

La simultaneidad es relativa



Visto desde la Tierra, los dos rayos se propagan a la misma velocidad: la de la luz.

Pero, visto desde la Tierra, la nave avanza hacia la derecha a una velocidad v .



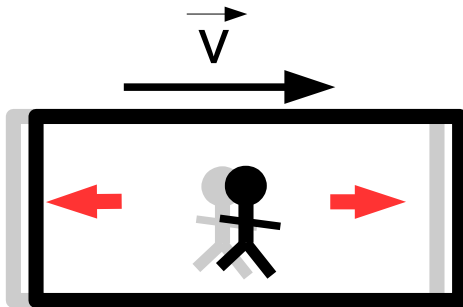
Postulado de constancia de la velocidad de la luz:

La velocidad de la luz es siempre la misma, independientemente de la velocidad de la fuente y de la velocidad del observador.



Consecuencia:

La simultaneidad es relativa

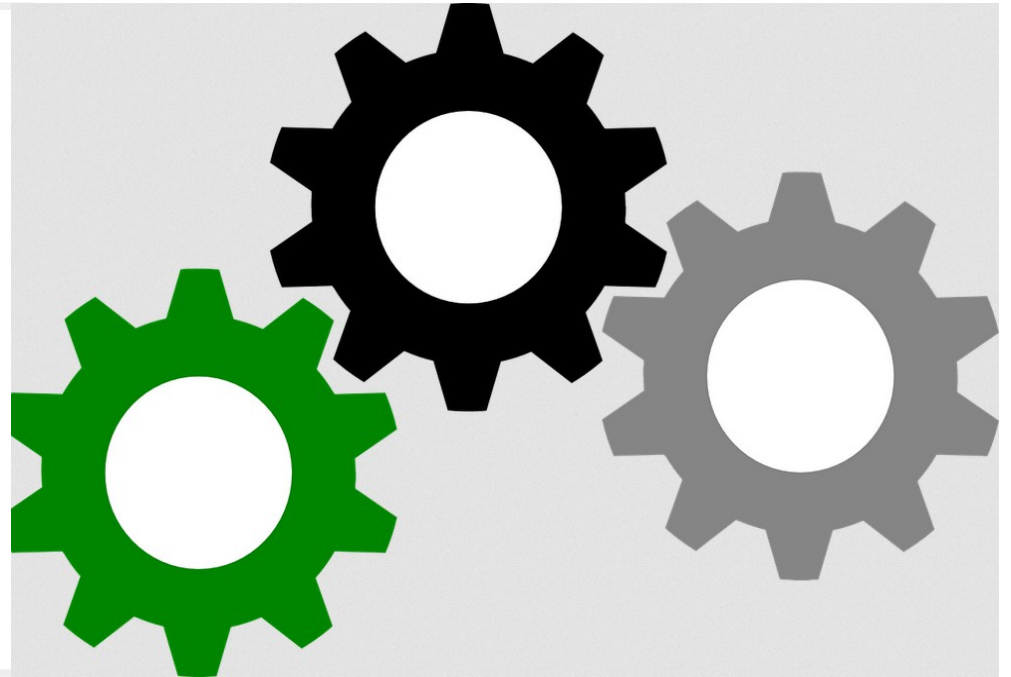


Visto desde la Tierra,
el rayo de la izquierda
llega antes a la pared.

Luego,
sucesos simultáneos en la nave
(los rayos llegan a la pared),
no son simultáneos
para el observador terrestre.



En la 2ª parte
de la presentación
seguiremos
explorando
consecuencias de los
postulados asumidos



Llegaremos a
un resultado notable:

La dilatación temporal




Autor: Juan Antonio Martínez-Castroverde Pérez
Licenciado en Física
Profesor de Secundaria y Bachillerato

Traducción al Inglés: Carlos Rodríguez Pérez
María José Lorenzana Sánchez



Esta presentación está publicada bajo una licencia
Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-
CompartirIgual 3.0 Unported License
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>)

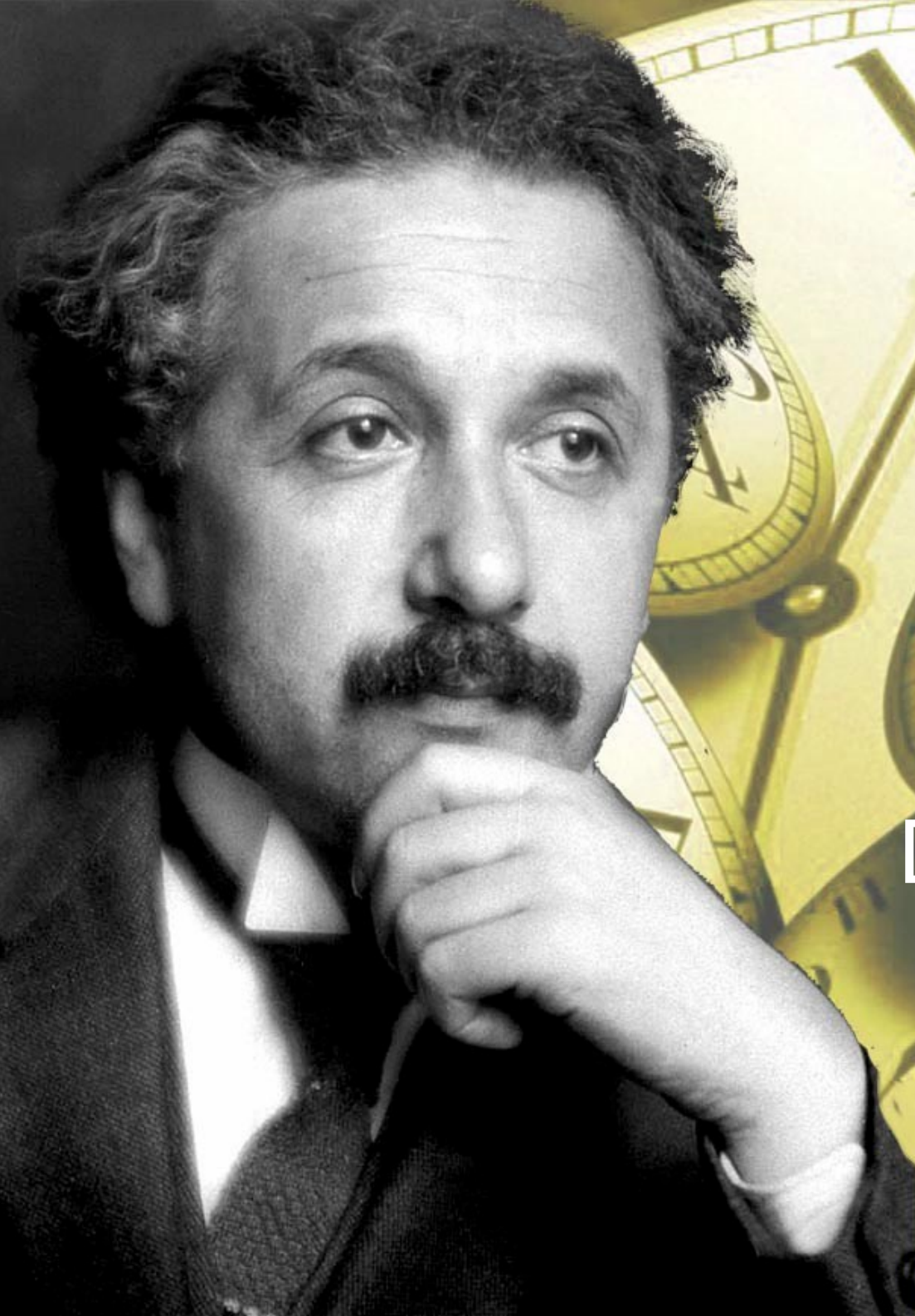
Permisos más allá del alcance de esta licencia se pueden
solicitar en: <http://www.fisicaconceptual.net>

A composite image featuring a black and white portrait of Albert Einstein on the left. On the right, there is a photograph of the cover of a book titled 'SAMMLUNG VIEWEG' (Vieweg Collection). The book cover is orange and contains the text: 'TAGESTRAGEN AUS DEN GEBIETEN DER NATURWISSENSCHAFTEN UND DER TECHNIK', 'Heft 88', 'Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie', 'Gemeinverständlich', 'Von A. Einstein', and 'zweite Auflage'. The background of the entire image is a faded, handwritten document in German, likely related to Einstein's work on relativity.

Introducción Conceptual a la Relatividad Especial

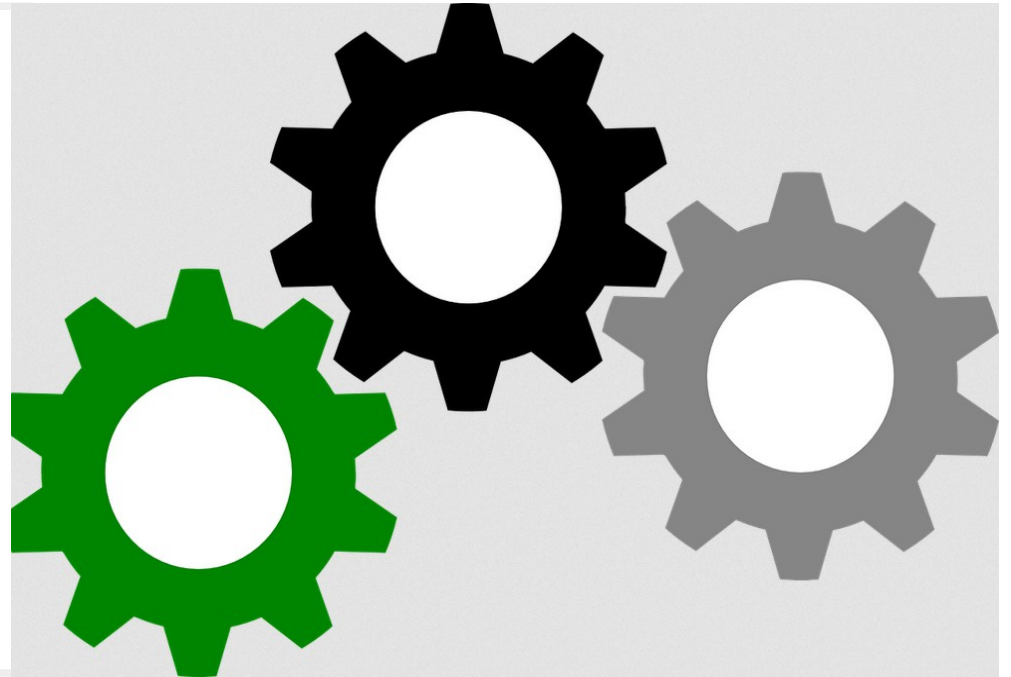
2ª Parte: Dilatación del tiempo





Dilatación del tiempo

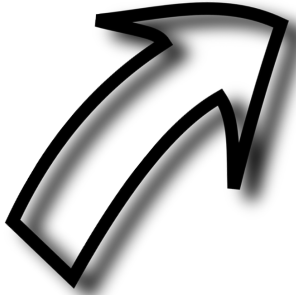
Sigamos
explorando
consecuencias de
los postulados
asumidos



Llegaremos ahora a un resultado notable:

La dilatación temporal

Antes de seguir, conviene distinguir entre lo que ocurre realmente en el universo y lo que podemos ver, que no siempre son simultáneos.



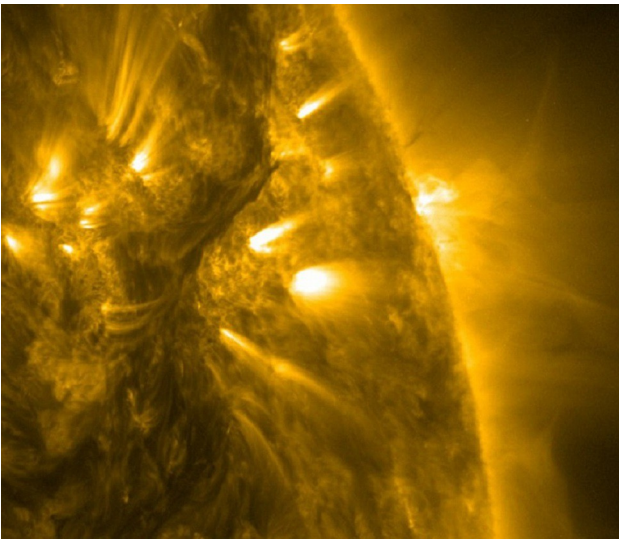
El motivo de por qué a veces no coinciden es que la luz, aunque viaje muy rápido, tarda un tiempo en propagarse.

Cuando ocurre algo muy cercano a nosotros, vemos lo que realmente ocurre prácticamente en ese instante.

Pero cuando el suceso ocurre muy lejos, habrá sido realidad aunque la luz todavía no haya llegado a nosotros y, por ese motivo, no lo hayamos visto.

Hay dos formas de analizar las conclusiones sorprendentes que ofrece la Relatividad: considerando lo que ven los distintos observadores o, como haremos en esta presentación, considerando lo que realmente está sucediendo, aunque los observadores no sean conscientes todavía.

Utilizaremos expresiones del tipo “si pudiéramos ver”, para hacer referencia a esa realidad que no siempre podremos confirmar al instante.

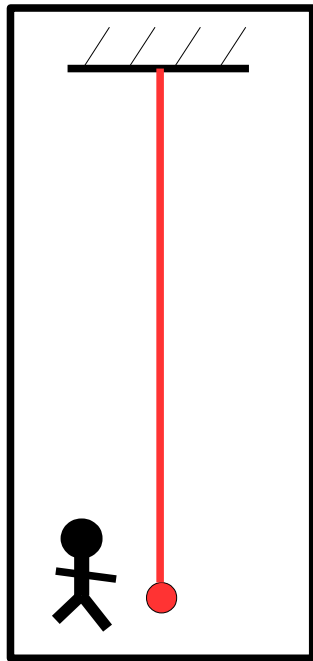


Ejemplo: si el Sol se apagara ahora, tardaríamos unos 8 minutos y medio en dejar de recibir su luz. El Sol **realmente se habría apagado**, pero seguiríamos viviendo, inconscientes, como si no hubiera pasado nada ese tiempo que la luz tarda en llegarnos.



Experimento mental:

Si pudiéramos ver, “como por arte de magia”,
lo que ocurre dentro de una nave espacial
que pasa a gran velocidad
¿qué veríamos?



s.r. nave

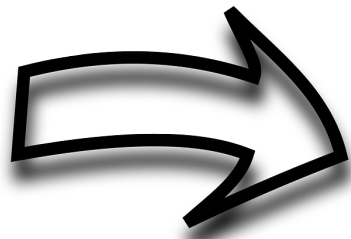
A la izquierda, lo que se ve
desde dentro de la nave cuando
se dispara un rayo láser rojo.

Desde que sale el rayo láser,
se refleja en el espejo y vuelve,
la manecillas del reloj
del astronauta avanzan 1 s

Utilizando: $v = \frac{e}{t} \rightarrow t = \frac{e}{v}$

Concluimos que,
para la luz: $t = \frac{e}{c}$

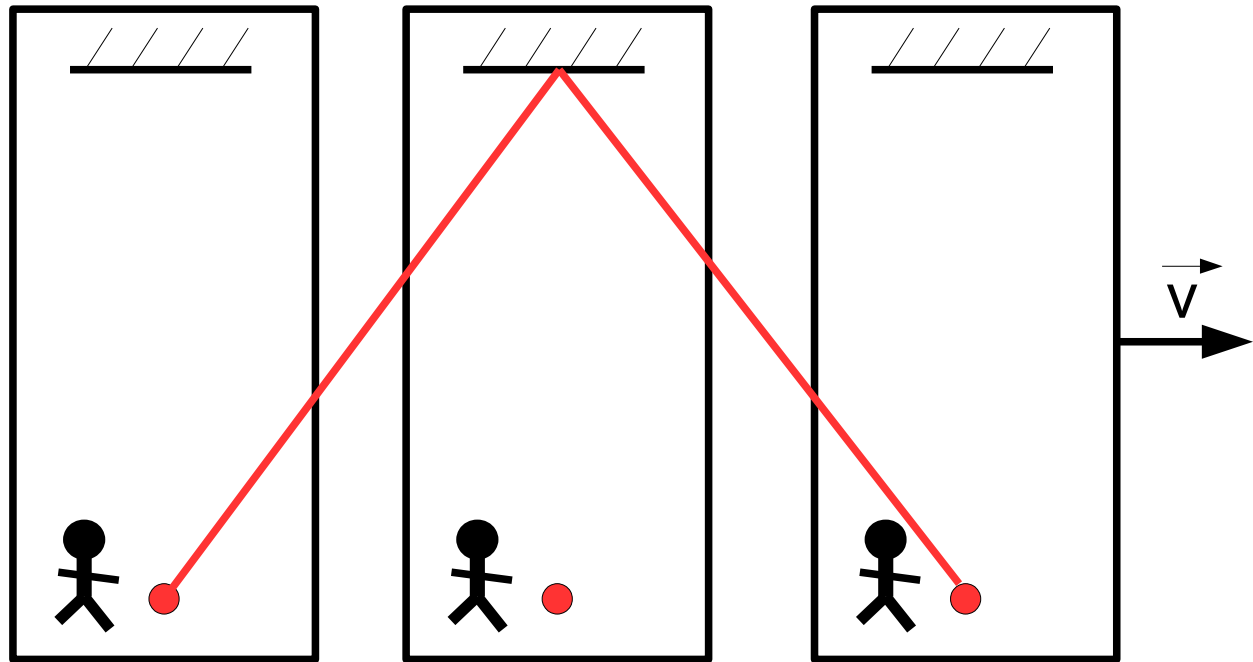
Utilizando el postulado de constancia de la velocidad de la luz, vemos que hay una relación directa entre la distancia que recorre la luz y el tiempo que tarda en hacerlo:



Más distancia recorrida por la luz,
más tiempo ha pasado

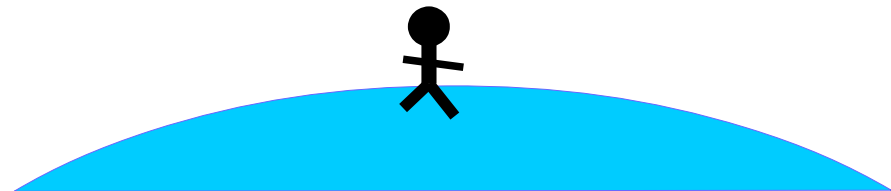
Visto desde la Tierra, la nave pasa a gran velocidad y el rayo láser sigue la trayectoria indicada

Desde la Tierra, se observa que el reloj que hay en la nave avanza 1 s desde que sale el rayo hasta que vuelve

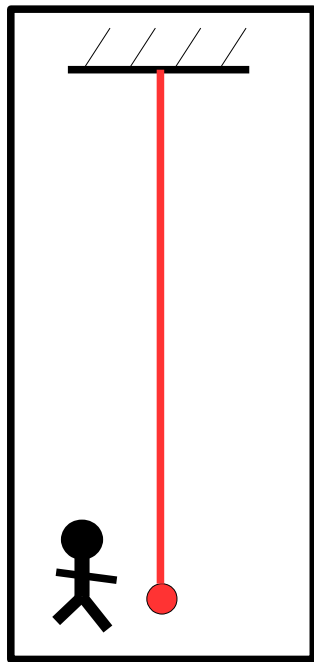


Pero: ¿un reloj terrestre avanza 1 s desde que sale el rayo hasta que vuelve?

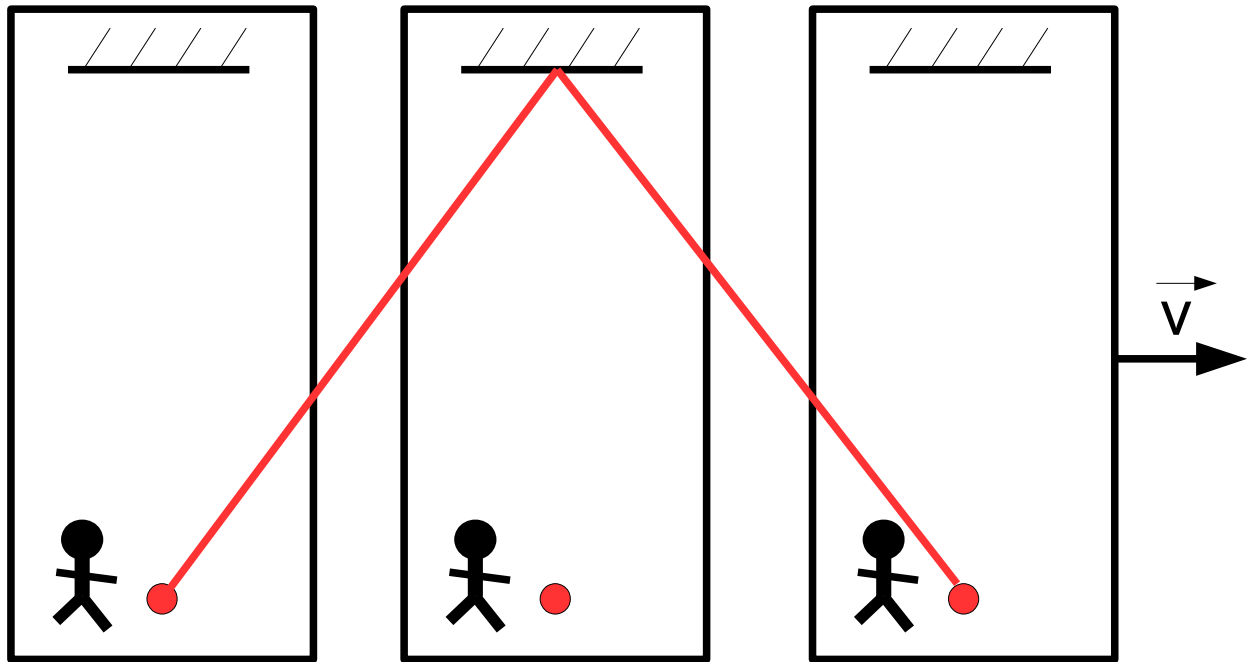
s.r. Tierra



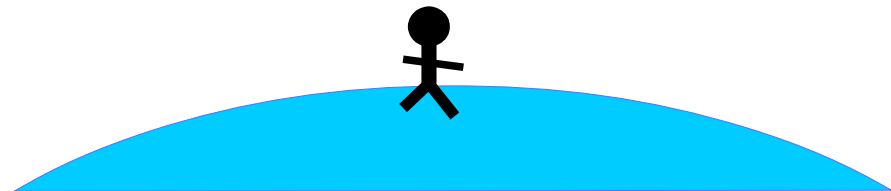
Para ambos observadores la velocidad de la luz es la misma, pero la distancia recorrida por la luz es distinta:



s.r. nave

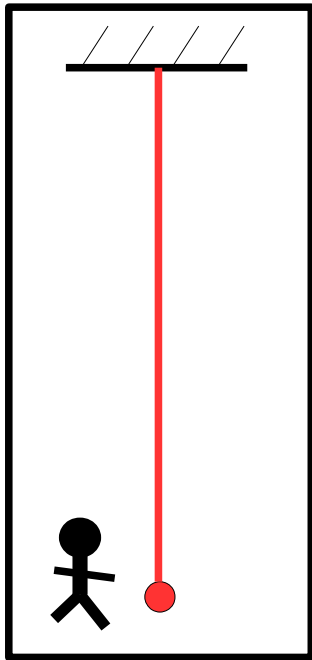


s.r. Tierra

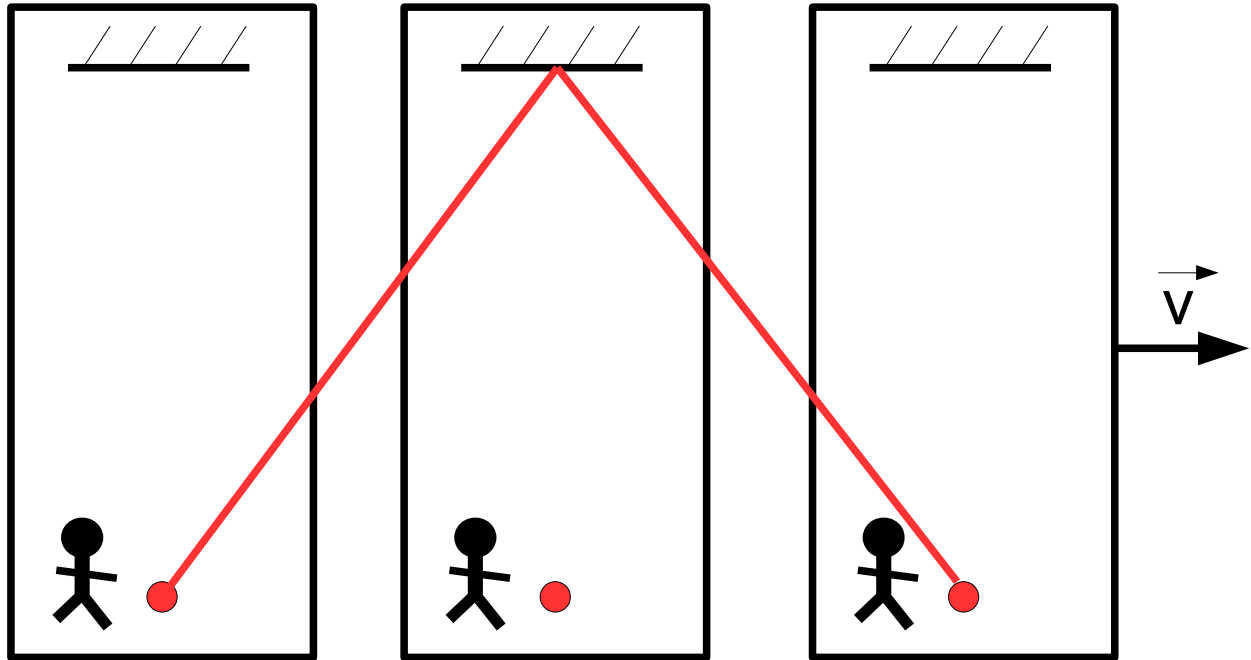


como: $t = \frac{e}{c}$

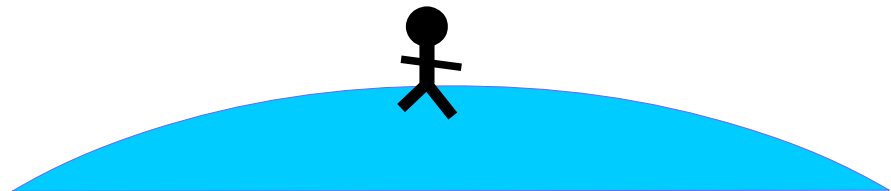
La percepción del transcurso del tiempo será diferente para cada observador...



s.r. nave

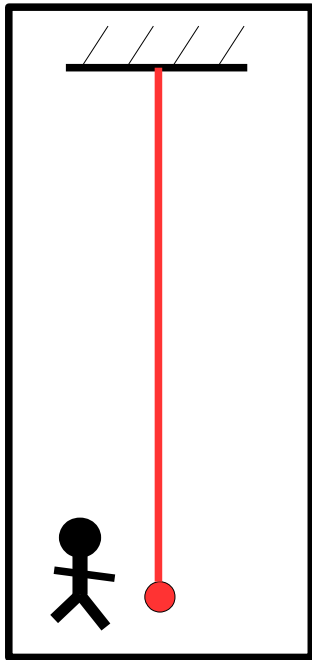


s.r. Tierra

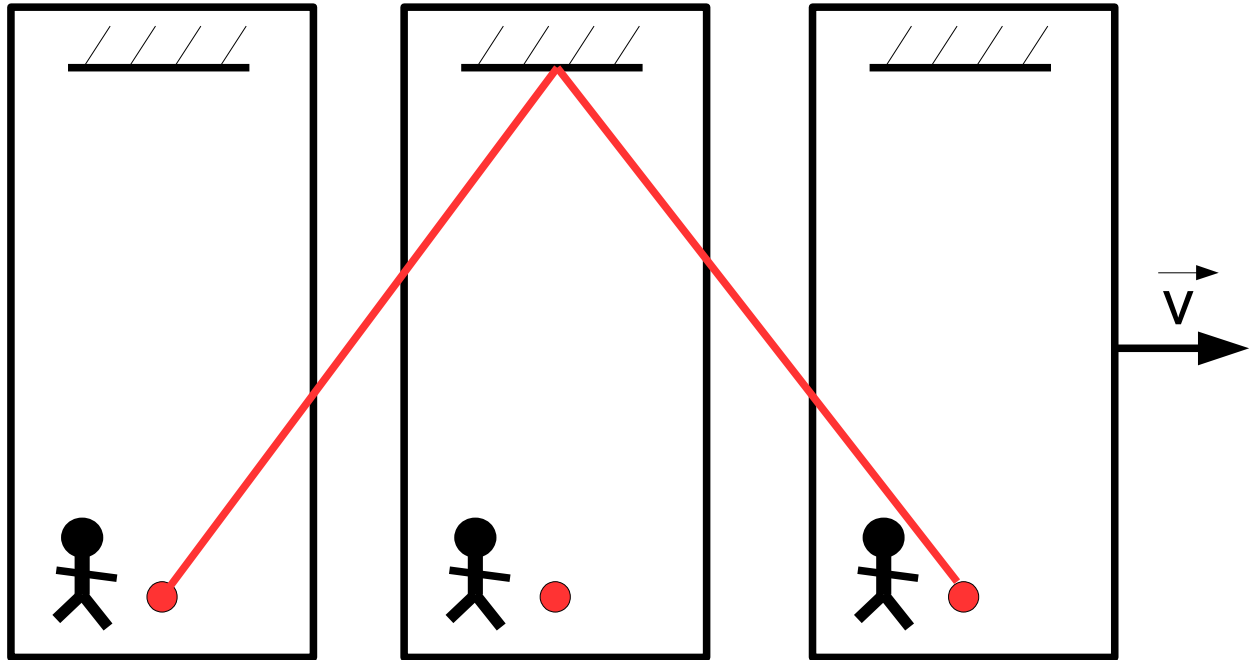


$$t = \frac{e}{c}$$

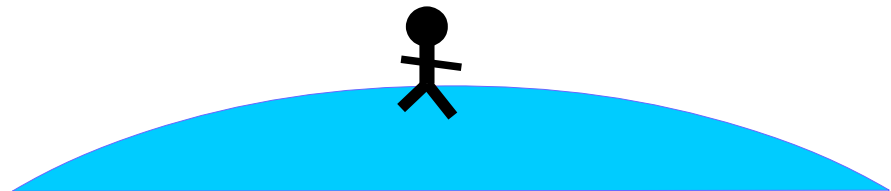
Un reloj terrestre avanza más de 1 s desde que sale el rayo láser hasta que vuelve



s.r. nave



s.r. Tierra





Conclusión:

Un observador terrestre que pudiera ver lo que ocurre en la nave, vería que el tiempo en ella transcurre más despacio, como a “cámara lenta”: el tiempo se dilata.

Si el observador terrestre mira a un reloj en la nave y ve que éste avanza $\Delta t'$, mientras que un reloj terrestre avanza Δt , la relación entre ambos es:

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

(esta relación se puede deducir fácilmente usando el Teorema de Pitágoras)

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

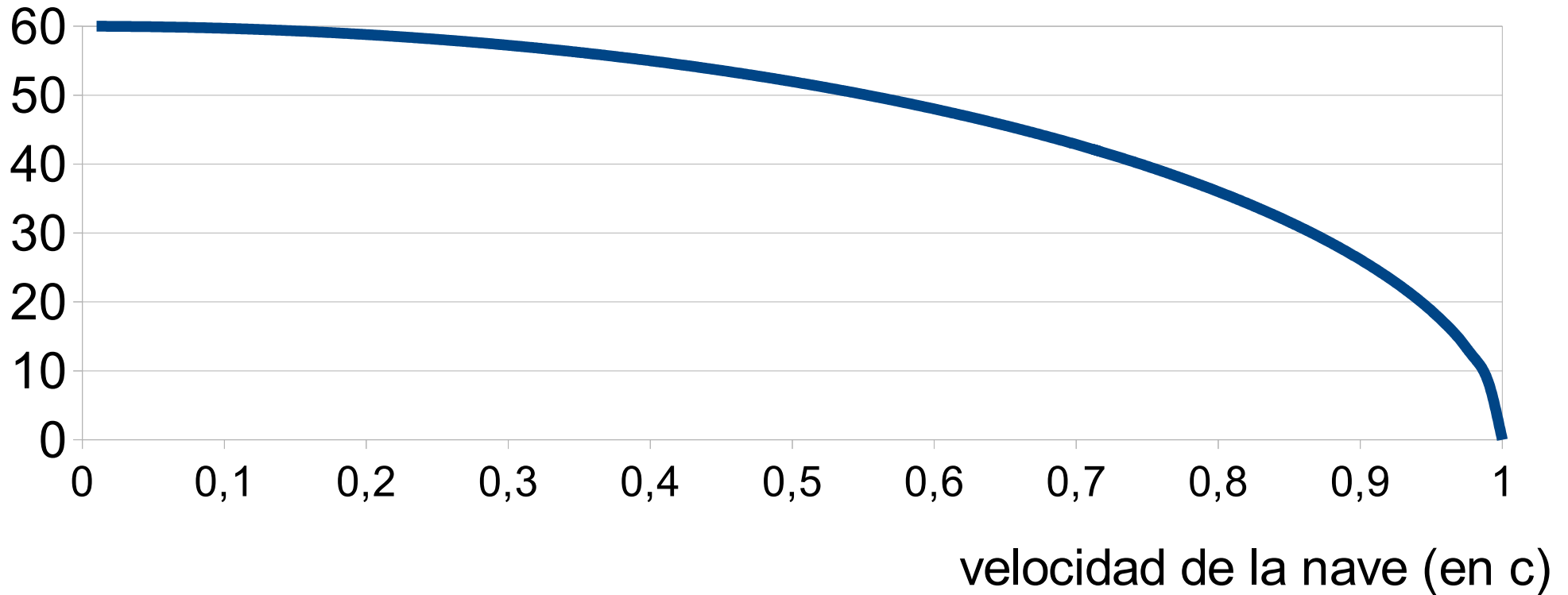
Más que la fórmula en sí, lo que ahora se quiere destacar son los casos límite:

$$v = 0 \quad \rightarrow \quad \Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{0^2}{c^2}} \quad \rightarrow \quad \Delta t' = \Delta t$$

$$v = c \quad \rightarrow \quad \Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{c^2}{c^2}} \quad \rightarrow \quad \Delta t' = 0$$

Conforme una nave se va acercando a la velocidad de la luz, vemos que el tiempo en ella se “congela” cada vez más.

Cada hora en la Tierra,
¿Cuántos minutos avanza el reloj de la nave?

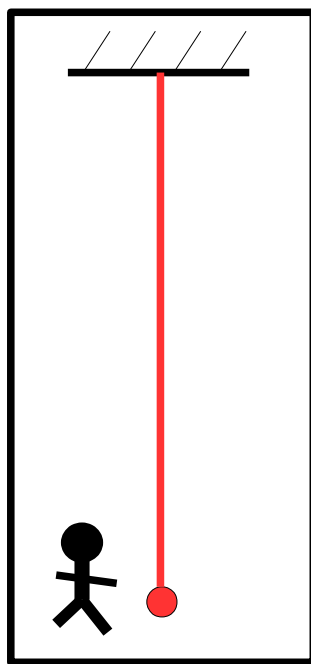


Ejemplo: Si una nave pasa a 0,866 c,
cuando el reloj terrestre avanza 1 hora,
veríamos que el reloj de la nave avanza 30 minutos

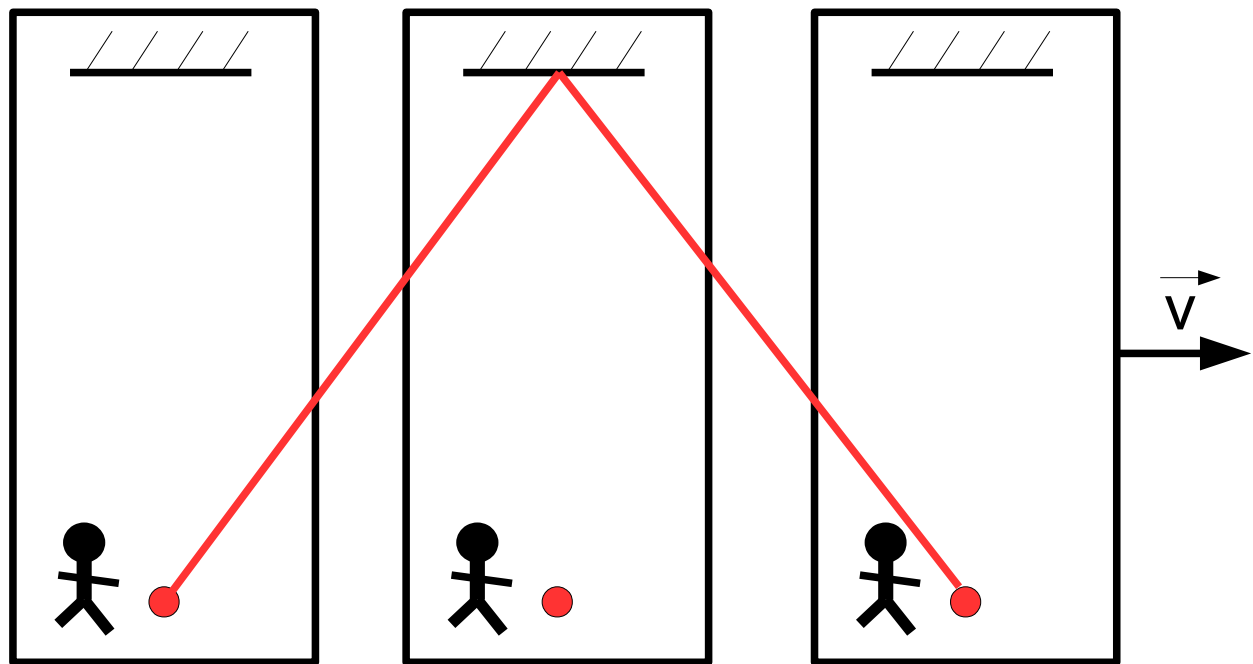
$$t = \frac{e}{c}$$

La dilatación del tiempo
es una necesidad lógica del postulado
de constancia de la velocidad de la luz

¡No es ningún efecto óptico!



s.r. nave

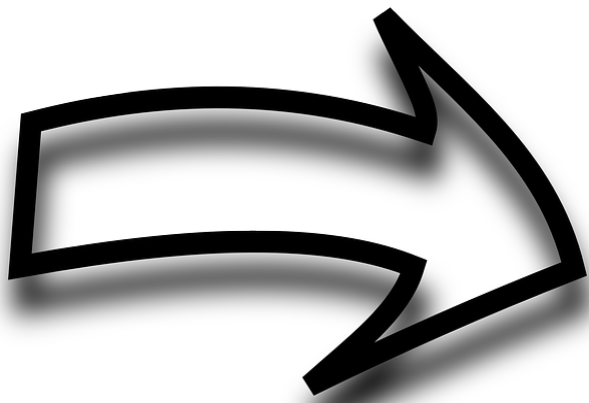


s.r. Tierra

Pero...

¡El tiempo en la nave
trascurre con normalidad!

(postulado de equivalencia
de todos los s.r. inerciales)



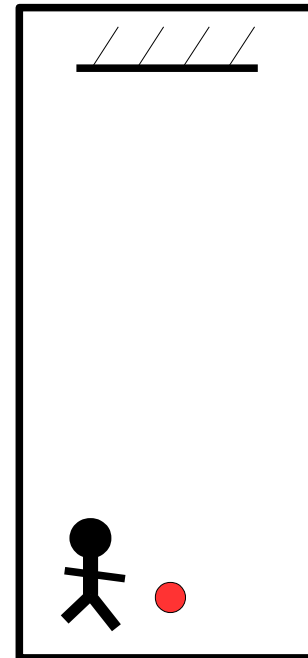
Es el observador terrestre
el que observa
la dilatación del tiempo
en el interior de la nave



Paradoja (Tiempo Propio / Tiempo Impropio)

Desde la nave es la
Tierra la que se mueve.

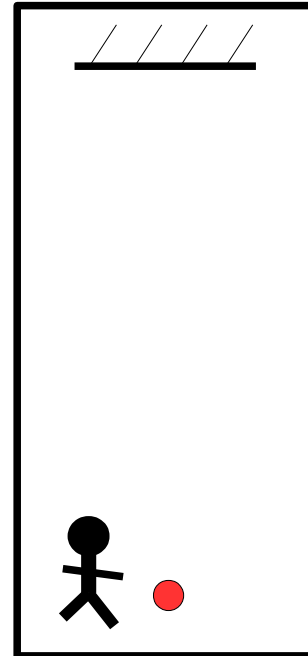
Cuando el astronauta
mira a la Tierra ve que
en ella el tiempo
transcurre más lentamente.



s.r. nave

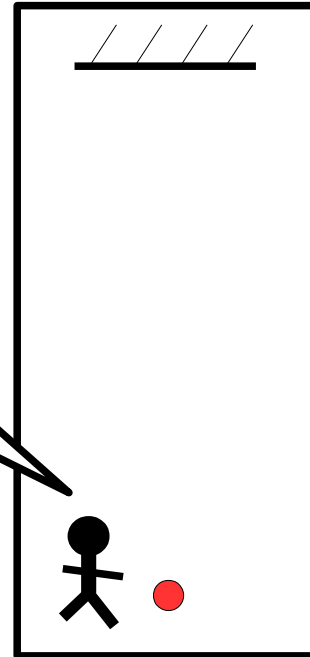


Cuando mi reloj avanza 2s,
el tiempo en la nave
avanza 1s



Cuando mi reloj avanza 2s,
el tiempo en la Tierra
avanza 1s

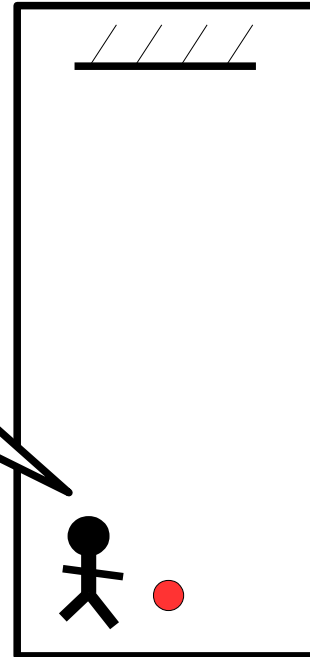
Cuando mi reloj avanza 2s,
el tiempo en la nave
avanza 1s



¿absurdo?

Cuando mi reloj avanza 2s,
el tiempo en la Tierra
avanza 1s

Cuando mi reloj avanza 2s,
el tiempo en la nave
avanza 1s



¿absurdo?

¡¡NO es absurdo!!

¿absurdo?

¡¡NO es absurdo!!

Ten presente que:

- ✓ Paradoja = contradicción aparente
- ✓ La dilatación del tiempo se ha comprobado experimentalmente

Por ejemplo, los físicos de partículas la comprueban a diario, cuando hacen mediciones sobre partículas que viajan a velocidades cercanas a c , que se desintegrarían antes de poder hacer esas mediciones de no existir la dilatación temporal.

¿cómo es posible que no sea absurdo?



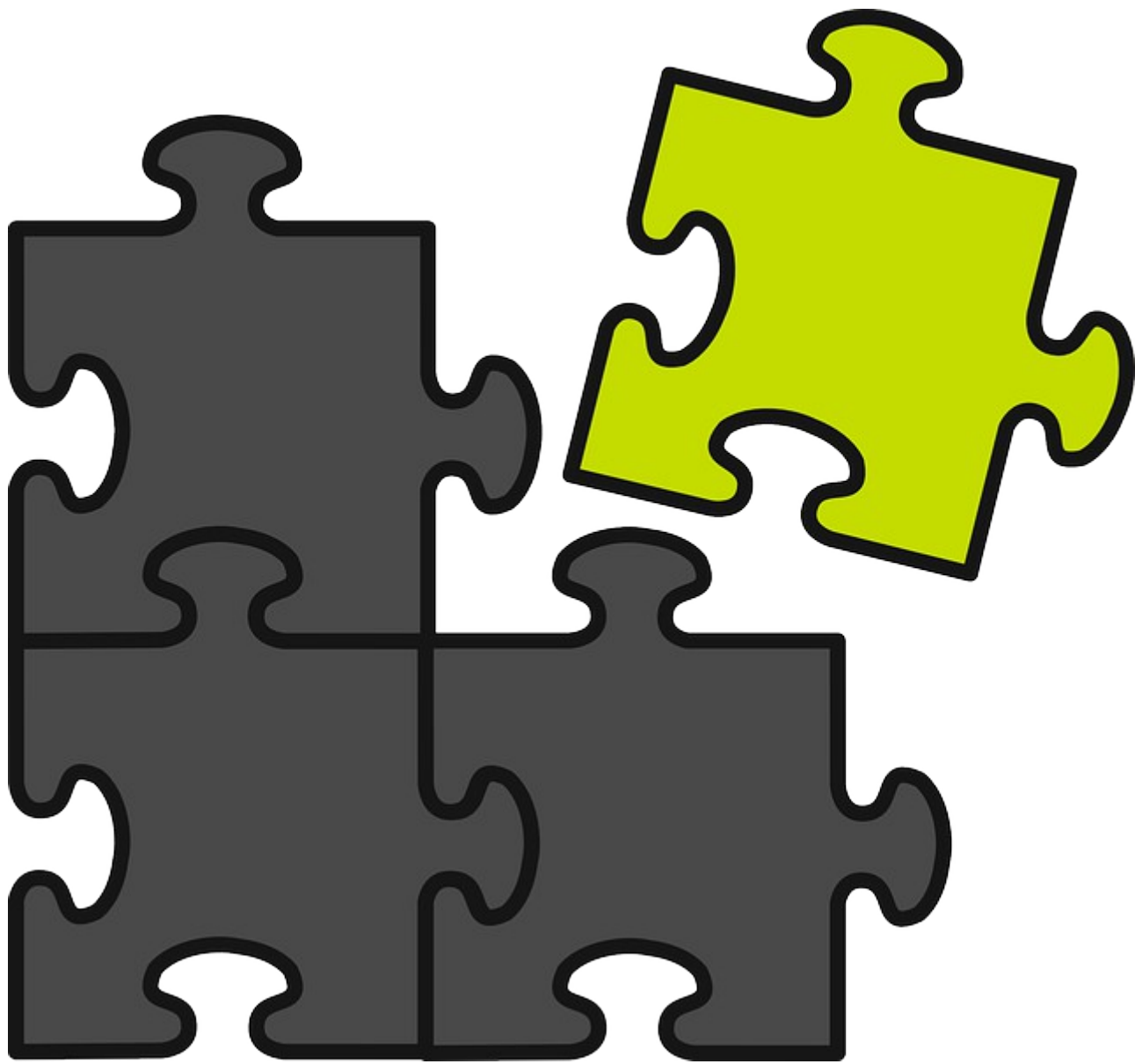
¿cómo es posible que no sea absurdo?



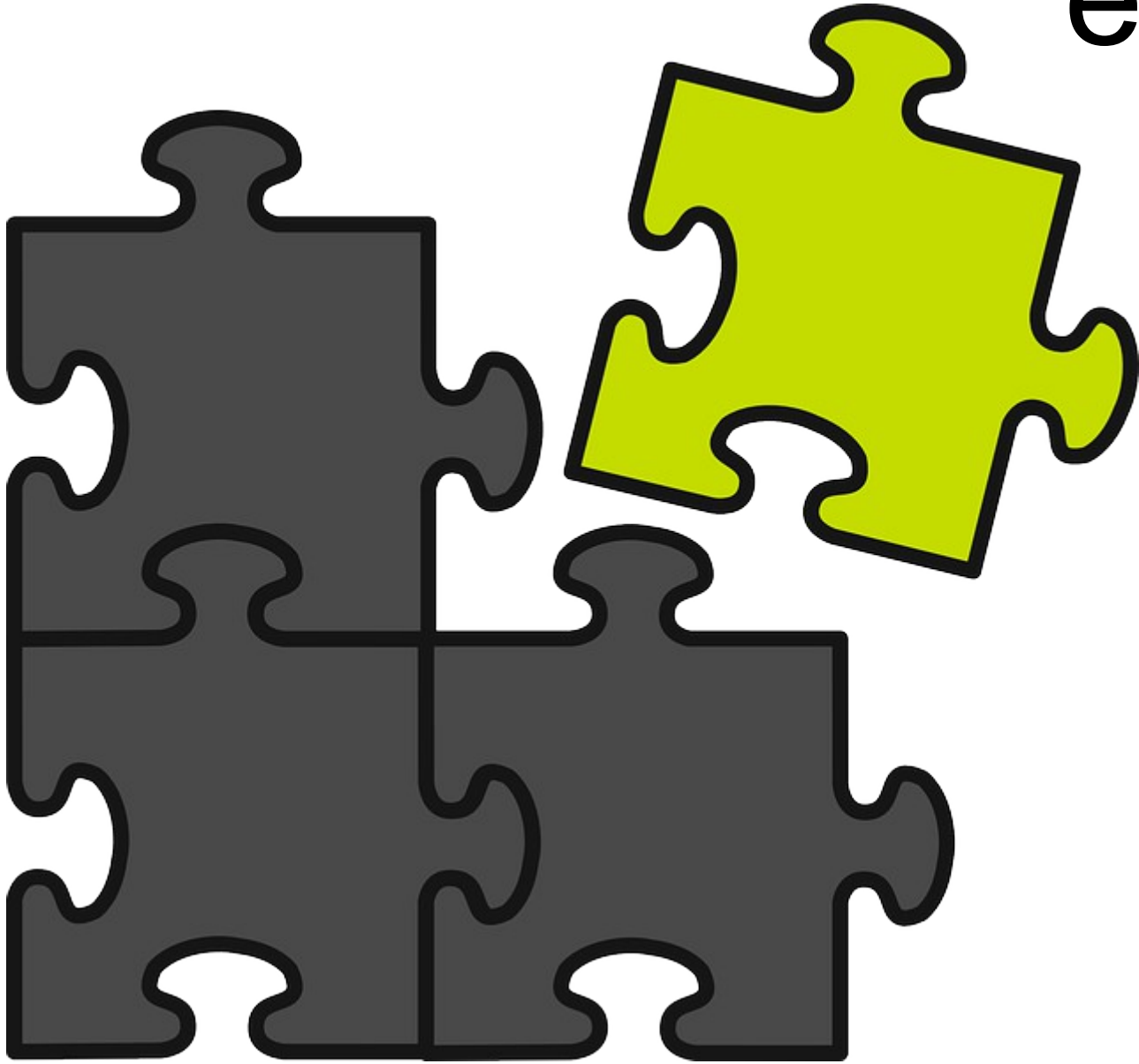
¡Piénsalo!

¡Date la oportunidad!

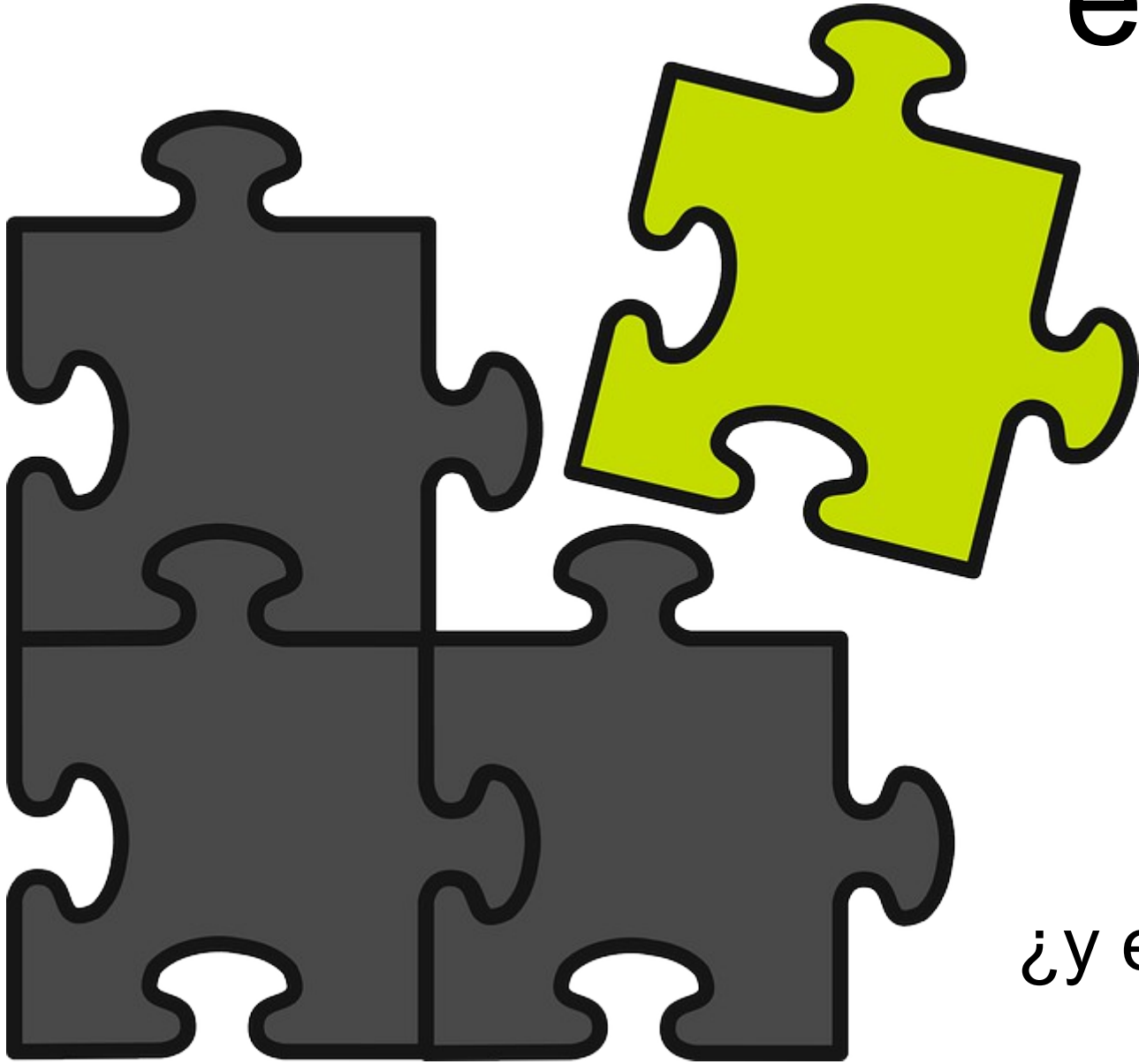
La explicación es...



La explicación es... ¡que el tiempo
es relativo!

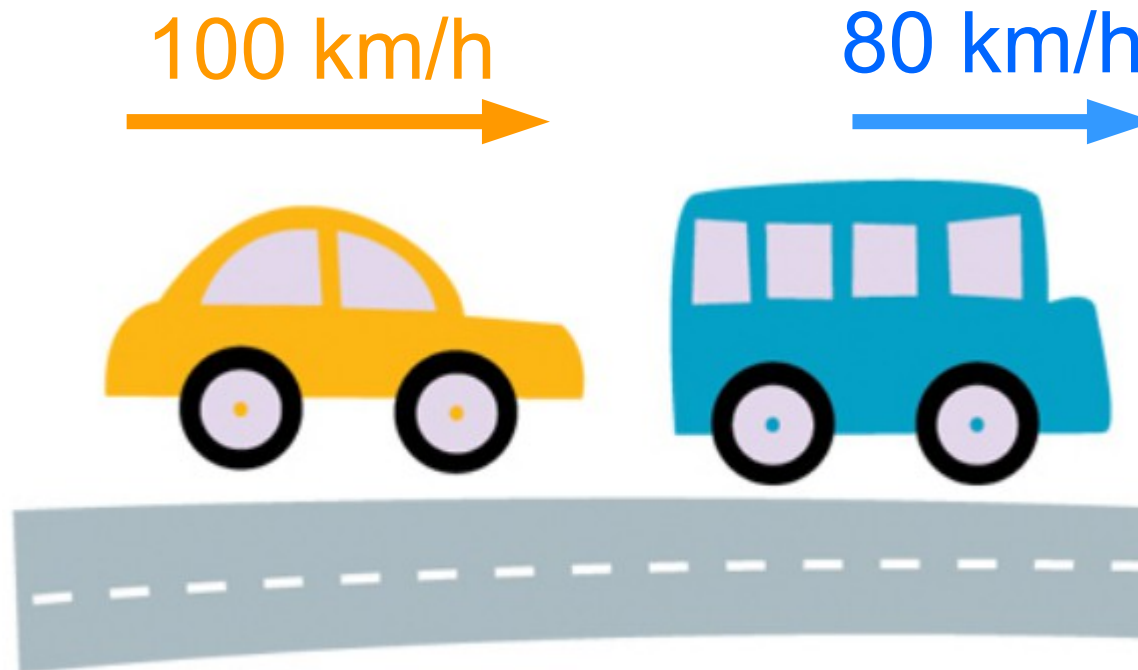


La explicación es... ¡que el tiempo
es relativo!



¿y eso qué significa?

Consideremos un ejemplo sencillo:



¿Es absurdo decir que el coche tiene una velocidad de 100 km/h respecto al asfalto y una velocidad de 20 km/h respecto al autobús?

No es absurdo,
ya que la velocidad es relativa

No es absurdo,
ya que la velocidad es relativa



Sin embargo....

Sí es absurdo decir que
el coche tiene, a la vez,
una velocidad de
100 km/h y de 20 km/h
respecto al asfalto.

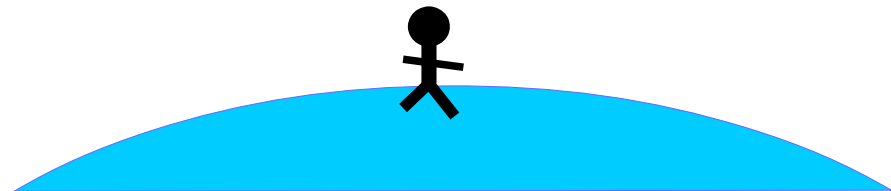
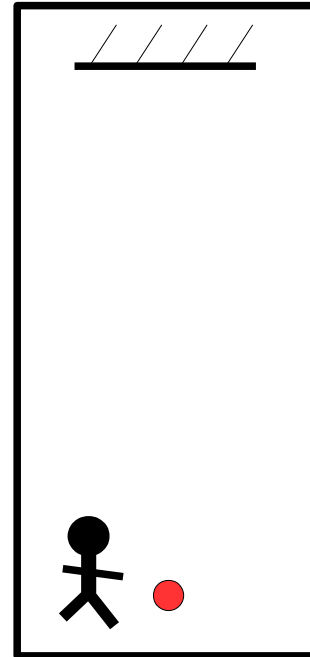
No es absurdo,
ya que la velocidad es relativa



Sin embargo....

Sí es absurdo decir que el coche tiene, a la vez, una velocidad de 100 km/h y de 20 km/h respecto al asfalto.

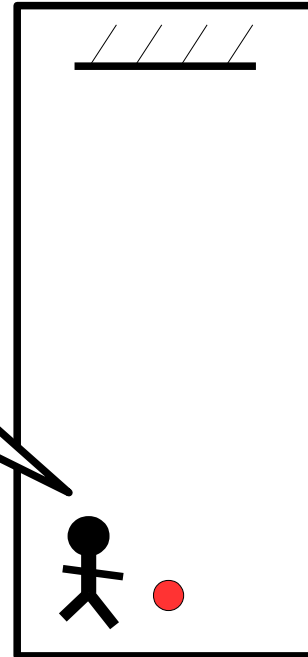
De forma análoga, es absurdo decir que las dos afirmaciones sobre el paso del tiempo sean ciertas “a la vez”.



De forma análoga, es absurdo decir que las dos afirmaciones sobre el paso del tiempo sean ciertas “a la vez”.

Cuando mi reloj avanza 2s,
el tiempo en la Tierra
avanza 1s

Cuando mi reloj avanza 2s,
el tiempo en la nave
avanza 1s

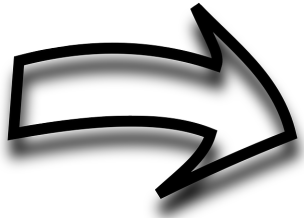




Que el tiempo es relativo significa que el paso del tiempo depende de cada observador.



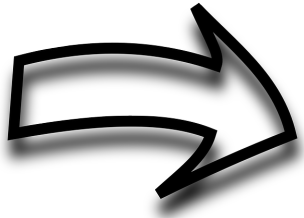
Que el tiempo es relativo significa que el paso del tiempo depende de cada observador.



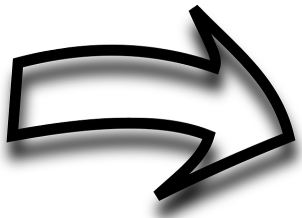
En consecuencia, cada afirmación sobre cómo pasa el tiempo solo tiene validez en ese s.r.



Que el tiempo es relativo significa que el paso del tiempo depende de cada observador.



En consecuencia, cada afirmación sobre cómo pasa el tiempo sólo tiene validez en ese s.r.



Ninguna afirmación tiene validez universal porque no hay un tiempo absoluto.



Paradoja (Paradoja de los Gemelos)

Pero... si la nave se frena y su ocupante baja a la Tierra, entonces ¡¡¡ambos compartirán el s.r. y sus vivencias pasadas son incompatibles entre sí!!!



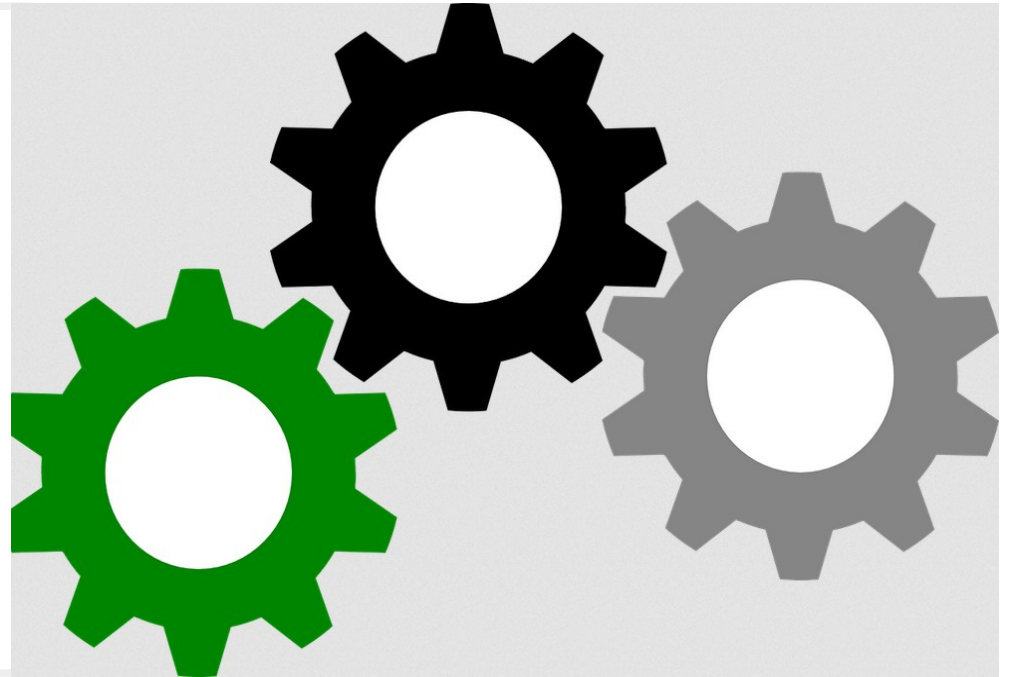
Paradoja (Paradoja de los Gemelos)

Pero... si la nave se frena y su ocupante baja a la Tierra, entonces ¡¡¡ambos compartirán el s.r. y sus vivencias pasadas son incompatibles entre sí!!!

La versión más famosa de esta paradoja es la Paradoja de los Gemelos...

Un poco de paciencia. Todavía no ha llegado el momento de abordarla. Volveremos sobre esto más adelante.

En la 3ª parte de la presentación seguiremos explorando consecuencias de los postulados asumidos



Llegaremos a otro resultado notable:

La contracción de longitudes




Autor: Juan Antonio Martínez-Castroverde Pérez
Licenciado en Física
Profesor de Secundaria y Bachillerato

Traducción al Inglés: María José Lorenzana Sánchez



Esta presentación está publicada bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>)

Permisos más allá del alcance de esta licencia se pueden solicitar en: <http://www.fisicaconceptual.net>

A composite image featuring a black and white portrait of Albert Einstein on the left. On the right, there is a photograph of the cover of a book titled 'SAMMLUNG VIEWEG TAGESTRAGEN AUS DEN GEBIETEN DER NATURWISSENSCHAFTEN UND DER TECHNIK'. The book cover is orange and contains the text 'Herausgegeben von der Naturforschenden Versammlung der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien', 'Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie', 'Vom Verfasser', 'Von A. Einstein', and 'Zweite Auflage'. The background of the entire image is a faded, handwritten document in German, with some legible words like 'Relativitätstheorie' and 'Mathematiker'.



3ª Parte: Contracción de longitudes

Contracción de longitudes

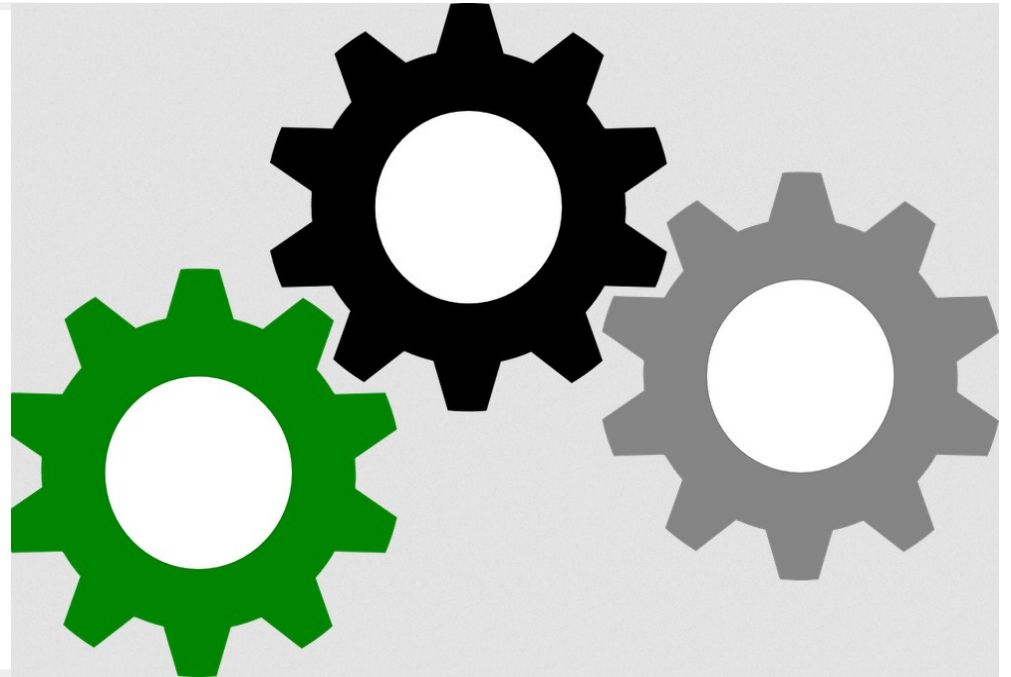
0,866 c



0,990 c

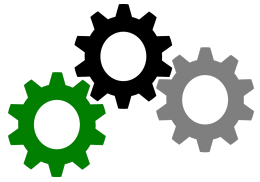


Seguimos
explorando
consecuencias de
los postulados
asumidos



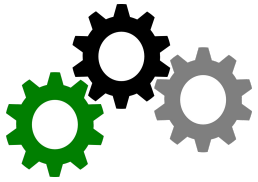
Llegaremos ahora a otro resultado notable:

La contracción de longitudes



Consecuencia: Contracción de longitudes

Supongamos un viaje a un planeta, distante 10 años-luz, realizado por una nave a $0,866 c$

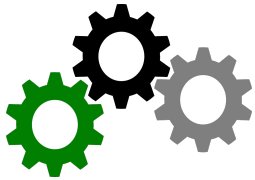


Consecuencia: Contracción de longitudes

Supongamos un viaje a un planeta, distante 10 años-luz, realizado por una nave a $0,866 c$

Visto desde la Tierra:

- El viaje dura 11,55 años.
- La nave se aleja a $0,866 c$
- Al acabar el viaje el reloj de la nave indica 5,77 años (la mitad de tiempo)



Consecuencia: Contracción de longitudes

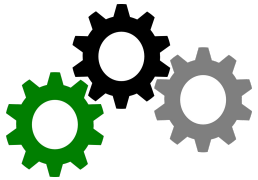
Supongamos un viaje a un planeta, distante 10 años-luz, realizado por una nave a $0,866 c$

Visto desde la Tierra:

- El viaje dura 11,55 años
- La nave se aleja a $0,866 c$
- Al acabar el viaje el reloj de la nave indica 5,77 años (la mitad de tiempo)

Visto desde la nave:

- Su velocidad ha sido $0,866 c$
- El viaje dura 5,77 años



Conseuencia: Contracción de longitudes

Supongamos un viaje a un planeta, distante 10 años-luz, realizado por una nave a $0,866 c$

Visto desde la Tierra:

- El viaje dura 11,55 años.
- La nave se aleja a $0,866 c$
- Al acabar el viaje el reloj de la nave indica 5,77 años (la mitad de tiempo)

Visto desde la nave:

- Su velocidad ha sido $0,866 c$
- El viaje dura 5,77 años

Sin embargo, **dentro de la nave, sus 5,77 años han transcurrido con normalidad.** El flujo de su tiempo es tan válido como el flujo del tiempo terrestre.

¿Cómo puede ser que viajando a la misma velocidad que la observada desde la Tierra el viaje dure menos?



¿Cómo puede ser que viajando a la misma velocidad que la observada desde la Tierra el viaje dure menos?

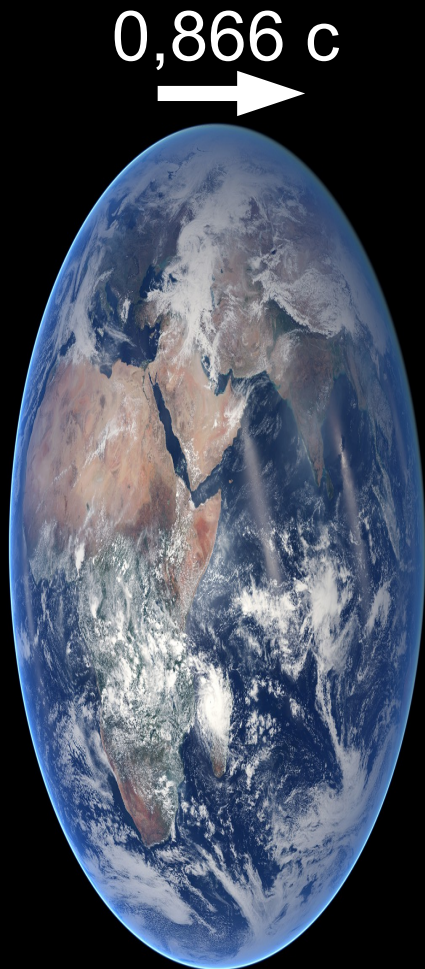
Notación:

sea v , e y t la velocidad de la nave, el espacio que recorre y el tiempo que tarda vistos desde el s.r. Tierra y v' , e' y t' esos mismos valores vistos desde el s.r. nave

$$\left. \begin{array}{l} v' = \frac{e'}{t'} \\ v = \frac{e}{t} = \frac{e}{2t'} \\ v' = v \end{array} \right\} \frac{e'}{t'} = \frac{e}{2t'} \rightarrow \boxed{e' = \frac{e}{2}}$$

Dilatación temporal

La respuesta es clara:
en la nave el viaje dura menos porque la distancia
entre los dos planetas se ha contraído a la mitad.



Este resultado no afecta solo a la
distancia, sino al espacio en sí:

Visto desde la nave,
**el espacio se contrae en la dirección
de la velocidad.**

Por tanto, no solo se contrae la distancia,
también se contraen los propios planetas
que desde la nave se ven pasar,
que adoptarían forma de lenteja.

Sin embargo,
para un observador en cualquiera de los planetas,
lo que se mueve es la nave y será la nave
la que se contrae en la dirección de su velocidad.

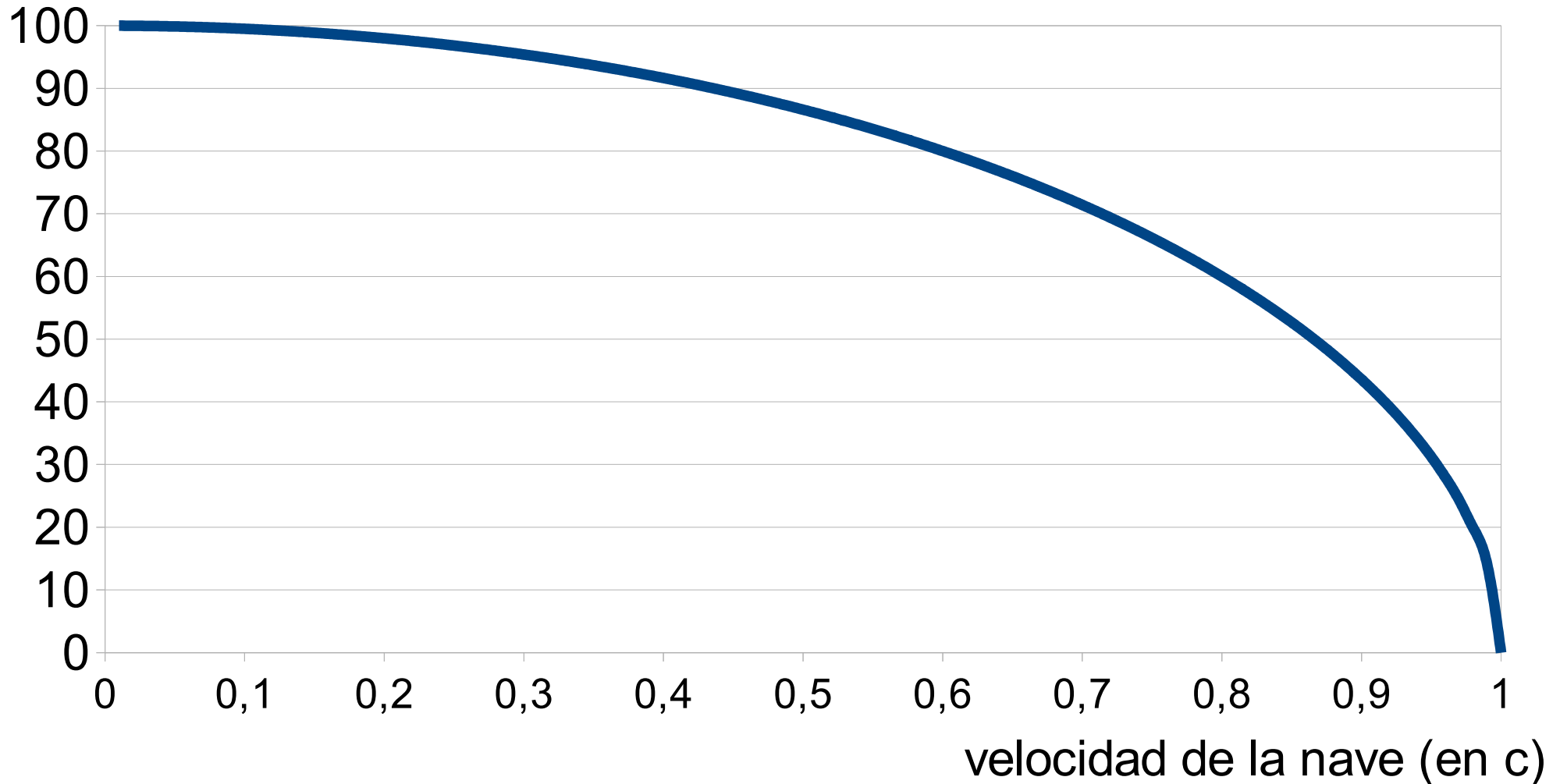


Visto desde los planetas,
la Tierra permanece inalterada

Conclusión:

Tanto los objetos que vemos pasar, como el espacio en el que están (el espacio es relativo), se contraen en la dirección de la velocidad en la que los vemos moverse

Visto desde la Tierra,
¿Cuánto mide una nave de 100 m de longitud?



Ejemplo:

Si una nave pasa a 0,866 c, su longitud se reduce a la mitad

Aviso: la contracción de longitudes no es un “efecto óptico” debido a la velocidad. Es algo real... **es una consecuencia lógica** de los postulados asumidos.



Vamos a diseñar un experimento mental para ilustrar qué significa que la contracción de longitudes es algo real.

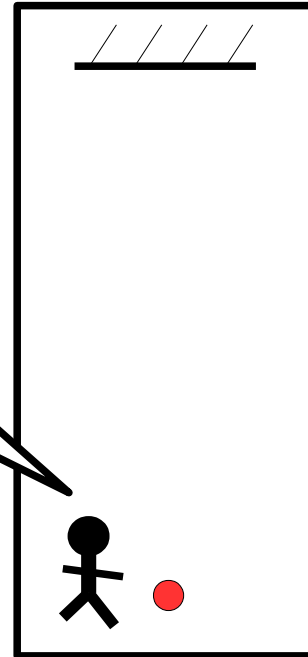
Y de paso, aparecerá una desconcertante paradoja, cuya resolución no es menos sorprendente.

Pongámonos en perspectiva:

¿Cómo habíamos resuelto esta paradoja?

Cuando mi reloj avanza 2s,
el tiempo en la Tierra
avanza 1s

Cuando mi reloj avanza 2s,
el tiempo en la nave
avanza 1s

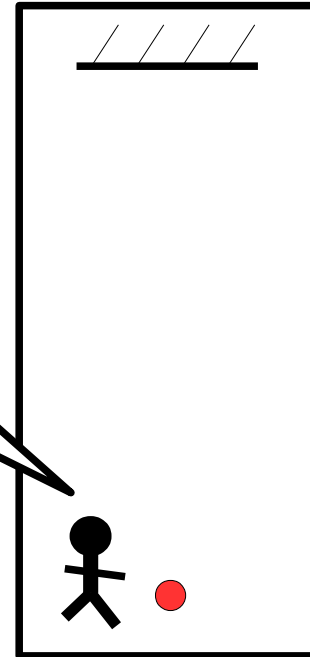


¿Cómo habíamos resuelto esta paradoja?

Cada afirmación solo es válida en su s.r.

Cuando mi reloj avanza 2s,
el tiempo en la Tierra
avanza 1s

Cuando mi reloj avanza 2s,
el tiempo en la nave
avanza 1s



Cada
afirmación
está
“aislada”
de la otra





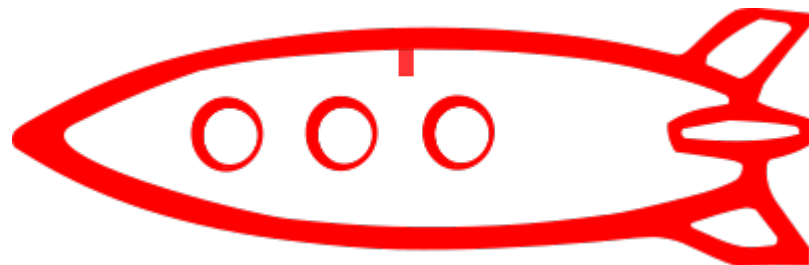
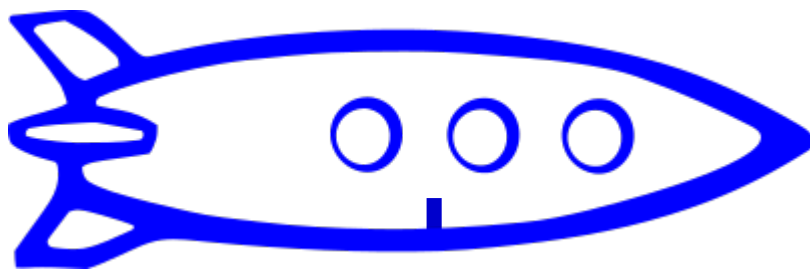
Planteamos ahora un experimento mental que “conectará” esos dos s.r. distintos.
¿Cómo resolveremos ahora la paradoja?



Planteamos ahora un experimento mental que “conectará” esos dos s.r. distintos.
¿Cómo resolveremos ahora la paradoja?

Sean dos naves espaciales exactamente iguales, pero de distinto color:

Aquí vemos a las dos naves en reposo, antes de partir.

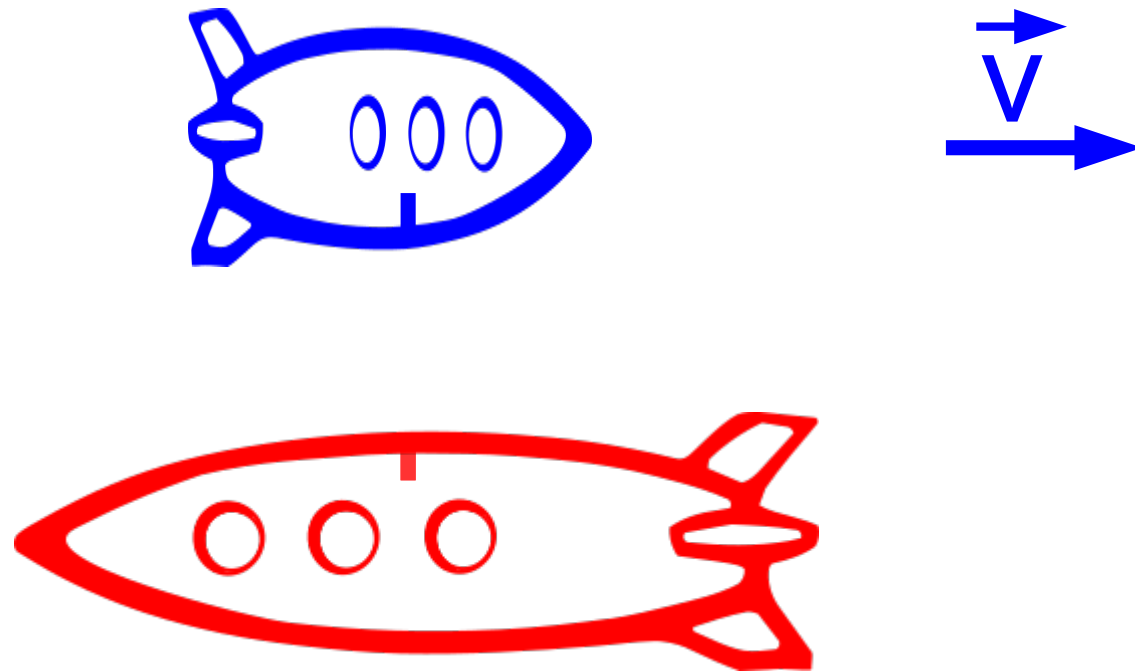


Para probar que la contracción de longitudes es cierta, se les ocurre realizar el siguiente experimento:

Las naves se cruzan a una velocidad relativa de $0,866 c$

Visto desde el s.r. Rojo (**s.r. R**), es la nave azul la que se mueve a $0,866 c$ y, en consecuencia, la nave Azul se contrae a la mitad de su longitud

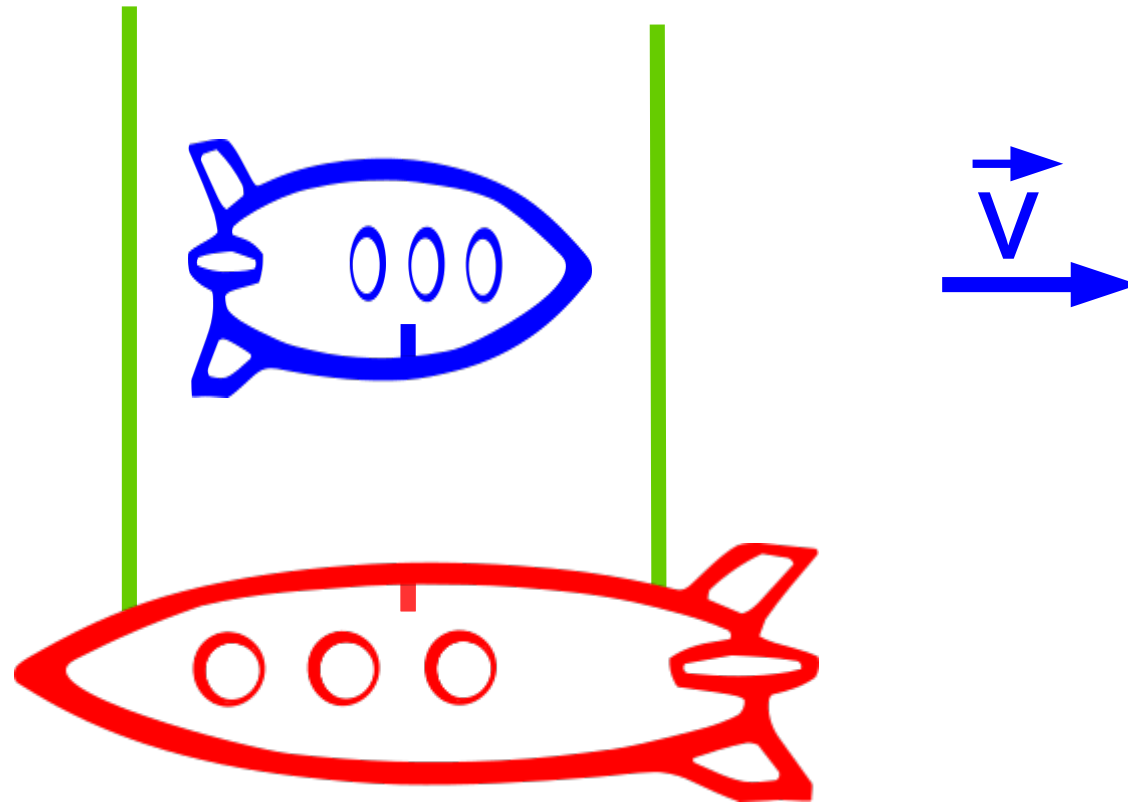
s.r. R



Cuando se cruzan, al coincidir las marcas de las dos naves, la nave Roja dispara dos rayos láser mortales.

Supuestamente no hay ningún problema, ya que la nave Azul se ha contraído a la mitad:
se confirma que la contracción de longitudes es cierta.

s.r. R

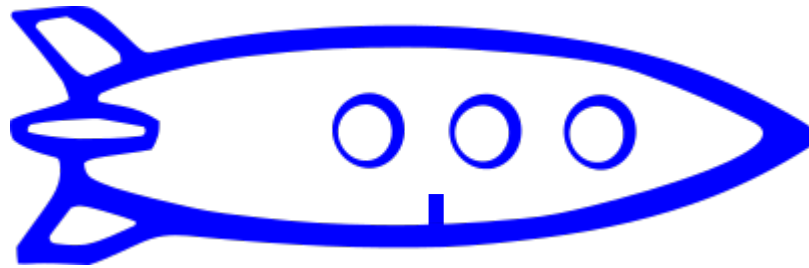




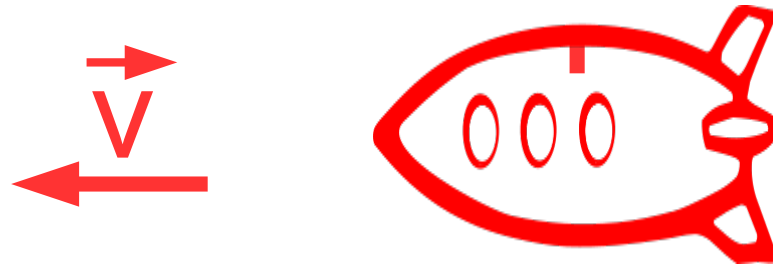
Paradoja (De la escalera y el granero)

...sin embargo, desde la nave Azul, (s.r. A)
la que se mueve, y se contrae ¡¡¡es la Roja!!!

¿Aceptarías que la nave Roja disparara los
rayos láser cuando las marcas coincidan?



s.r. A

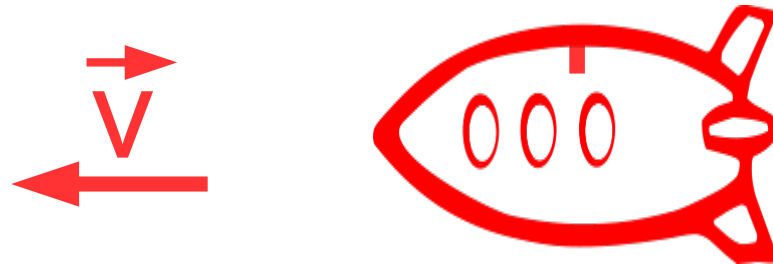
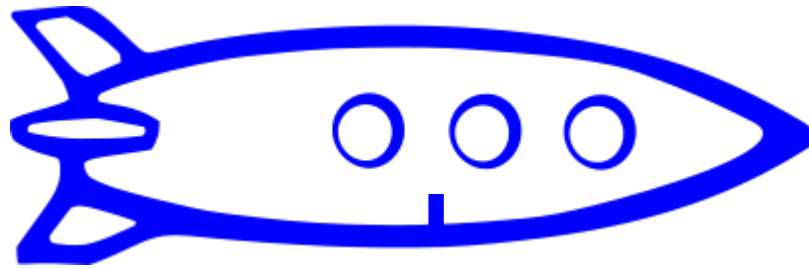


No te preocupes, si visto desde la nave Roja no mueres, no puedes morir: no tendría sentido que alguien muriera en un s.r. y no en otro...

Pero llegamos a una situación aparentemente imposible.

¿Cómo podemos explicar todo esto?

s.r. A

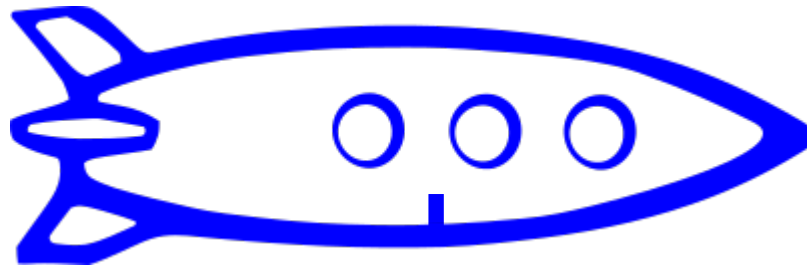


La explicación viene de otro resultado sorprendente de la relatividad ya obtenido previamente:

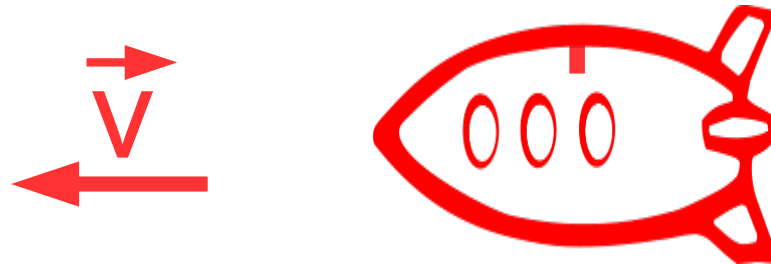


La simultaneidad es relativa

Sucesos simultáneos en un s.r. (disparar los dos rayos láser cuando las marcas coinciden) no lo son en el otro s.r.



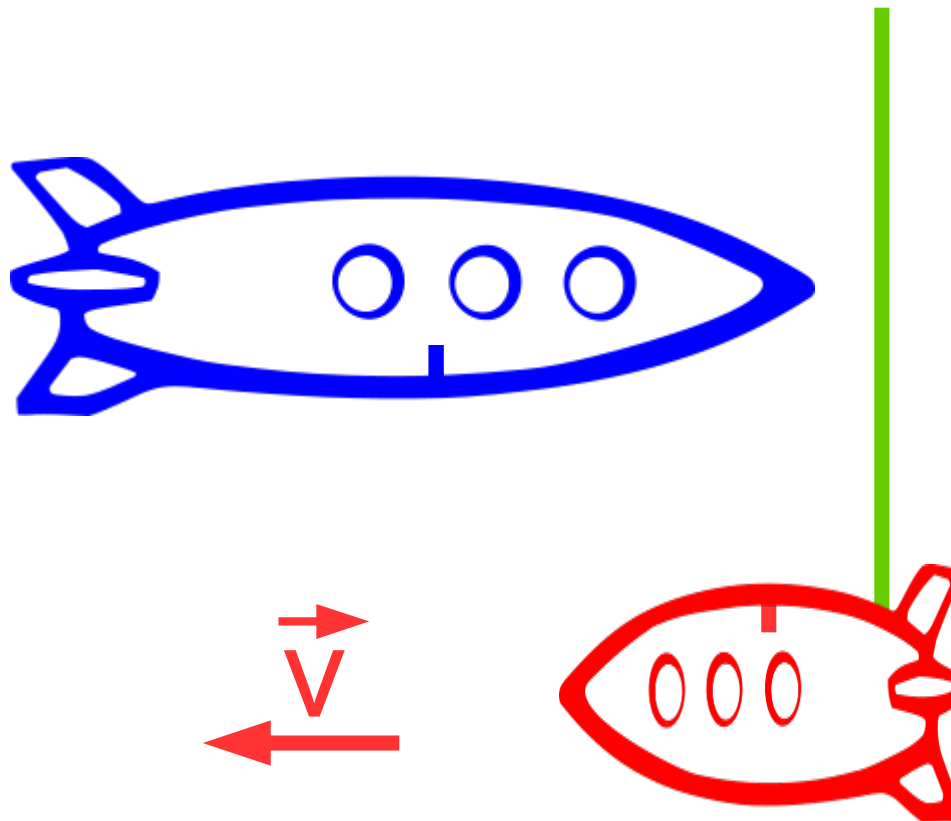
s.r. A



Desde la nave Azul,
la sucesión de acontecimientos es la siguiente:

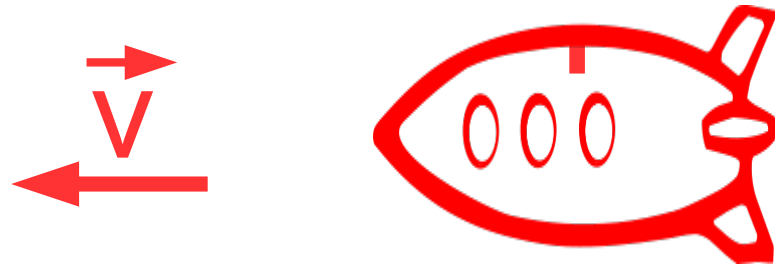
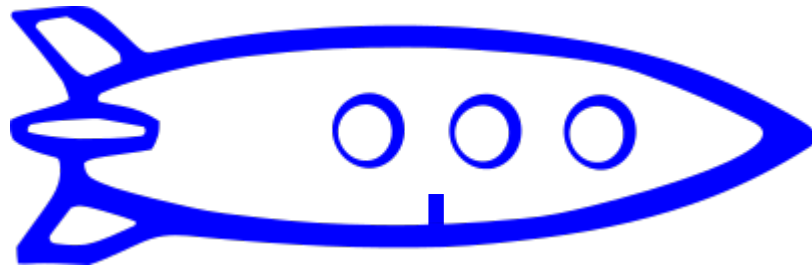
La nave Roja dispara el primer
láser sin alcanzar a la nave Azul

s.r. A



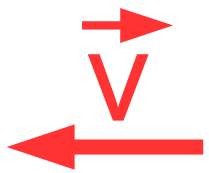
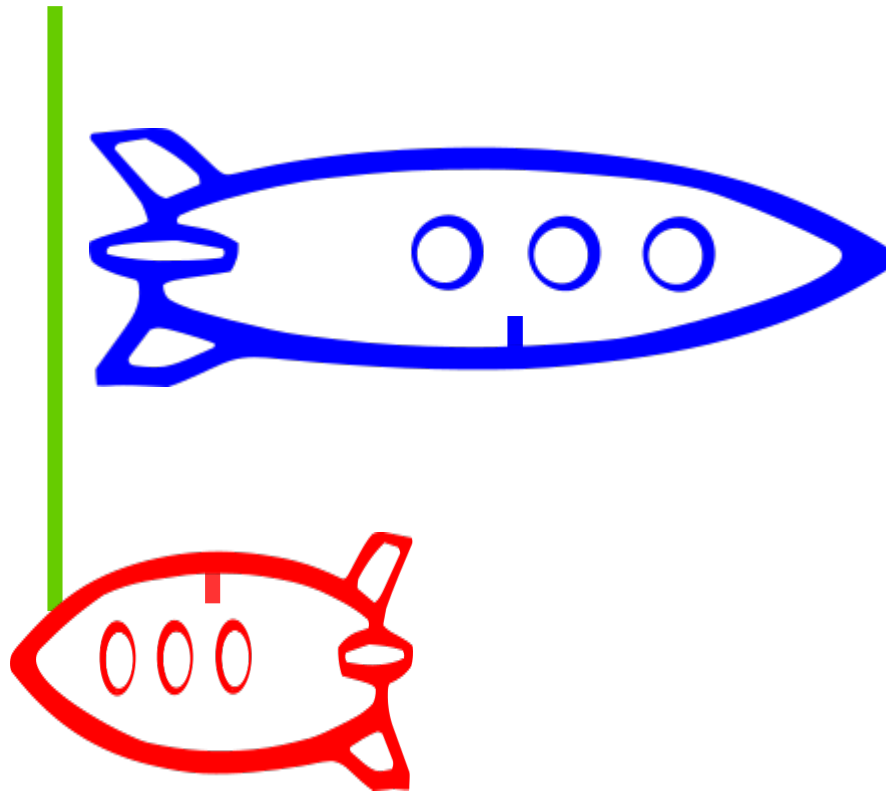
Las dos marcas coinciden, pero no hay disparo

s.r.A



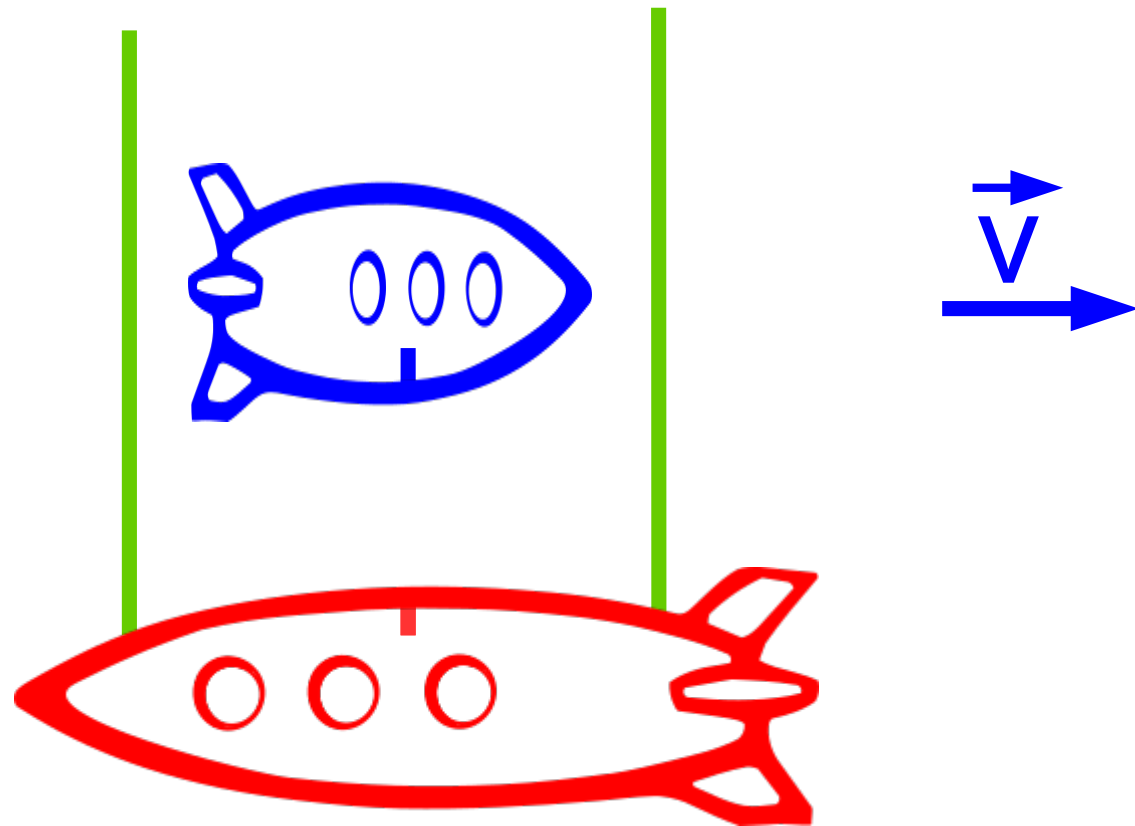
La nave Roja dispara el segundo láser sin alcanzar a la nave Azul

s.r. A



El experimento de las naves confirma que la contracción de la longitud es real (la nave azul no es destruida) y se ha salvado una situación aparentemente absurda.

s.r. R



¿Ha llegado el momento de hacer un alto?
Puede que estés sorprendido o un poco confuso...

Hemos visto que el tiempo y el espacio, que siempre considerábamos absolutos... en realidad no lo son.

Más sorprendente todavía, la simultaneidad, que también pensábamos absoluta, tampoco lo es...



Surge un problema:

Si estábamos equivocados en nuestra forma de entender conceptos tan básicos como el de espacio, tiempo, simultaneidad, llega un momento en el que ya dudamos de todo.

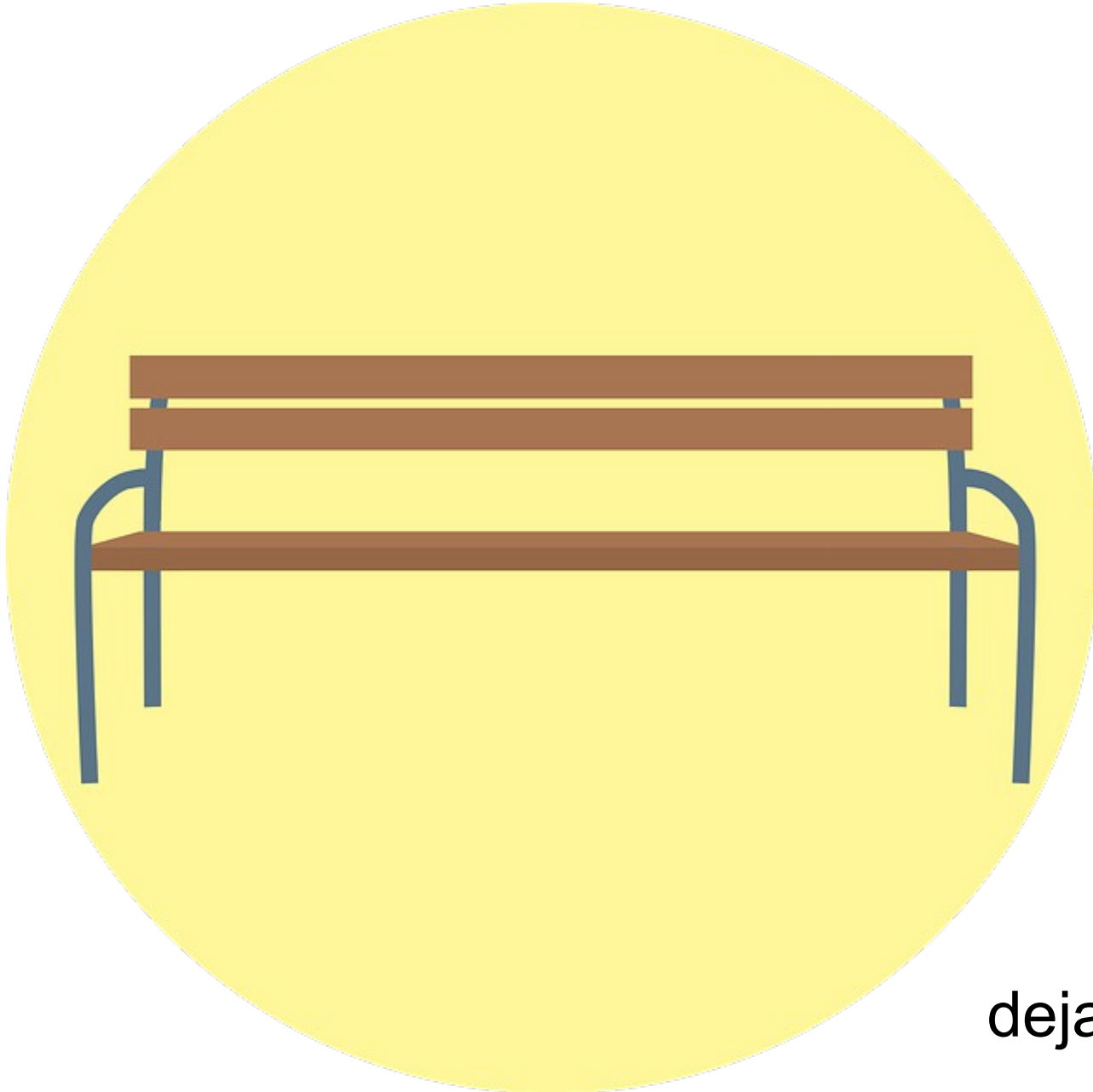
Aparte de los postulados asumidos,

¿qué nos queda como cierto?



Tranquilo:

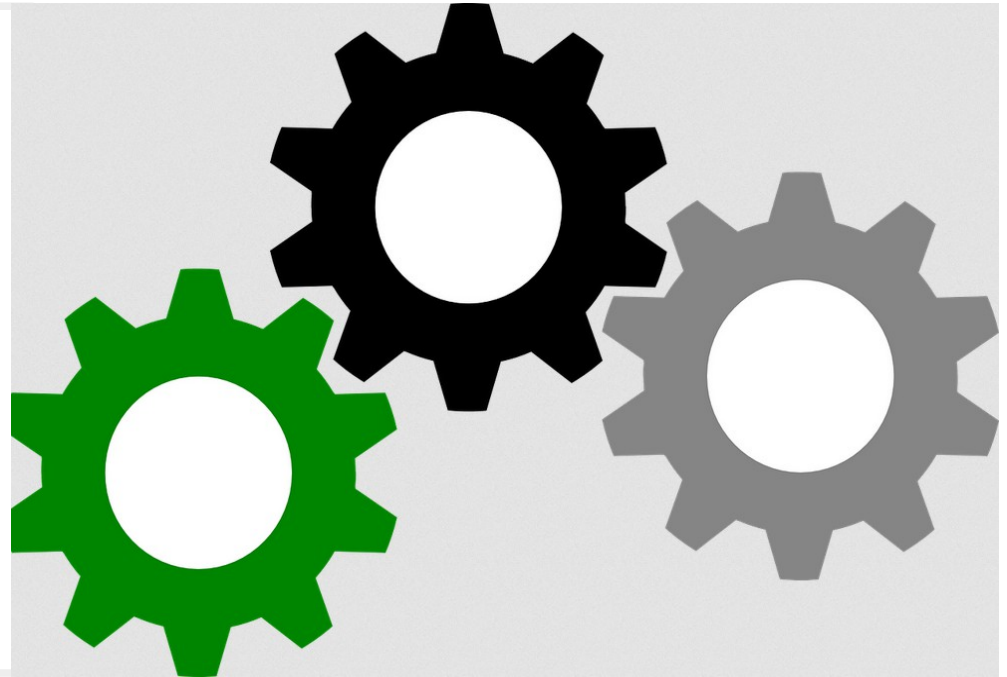
Hay cosas de las que podemos estar seguros.



Cosas que se dan por ciertas en esta presentación y que quizá ahora te cuestiones.

Pero ten paciencia: la mayoría de estas consideraciones las dejaremos para el anexo.

En la 4^a parte
de la presentación
seguiremos
explorando
consecuencias de los
postulados asumidos



Resolveremos una de las
más famosas paradojas de
la Relatividad Especial

La paradoja de
los gemelos




Autor: Juan Antonio Martínez-Castroverde Pérez
Licenciado en Física
Profesor de Secundaria y Bachillerato

Traducción al Inglés: María José Lorenzana Sánchez

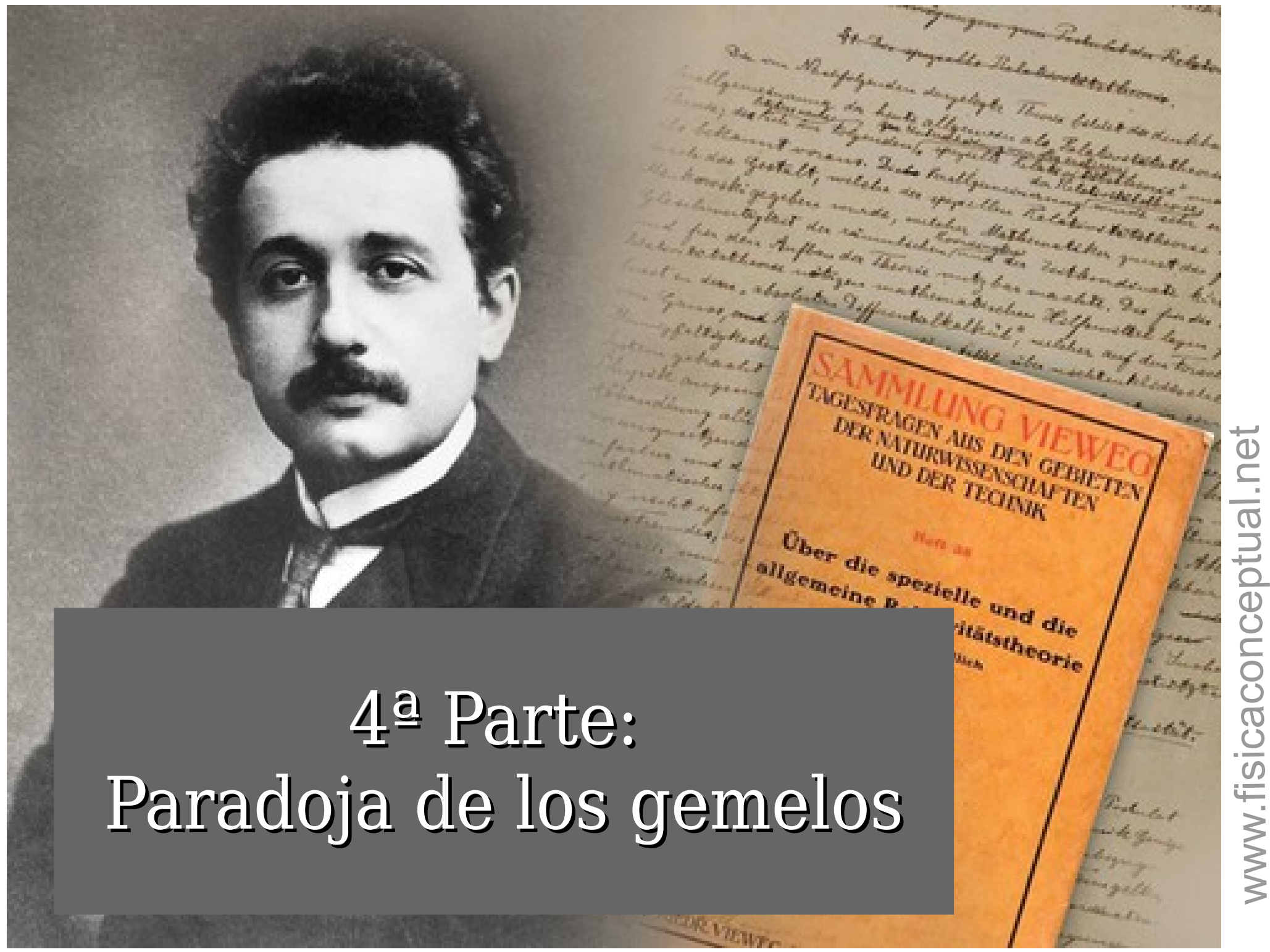


Esta presentación está publicada bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>)

Permisos más allá del alcance de esta licencia se pueden solicitar en: <http://www.fisicaconceptual.net>

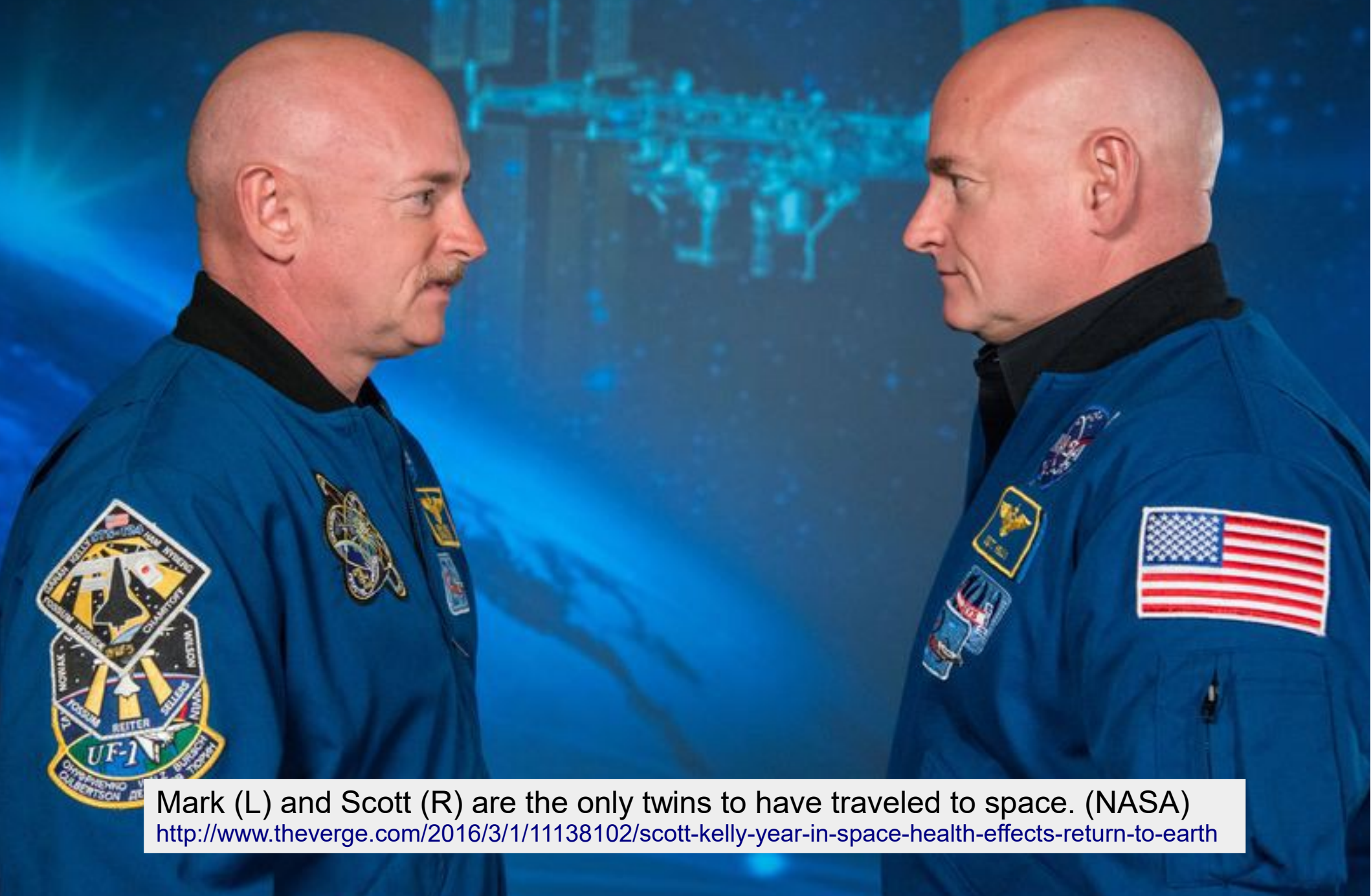
A composite image featuring a black and white portrait of Albert Einstein on the left. On the right, there is a photograph of the cover of a book titled 'SAMMLUNG VIEWEG TAGESTRAGEN AUS DEN GEBIETEN DER NATURWISSENSCHAFTEN UND DER TECHNIK'. The book cover is orange and contains the text 'Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie' by 'A. Einstein'. The background of the entire image is a faded, handwritten document in German, likely related to Einstein's work on relativity.

Introducción Conceptual a la Relatividad Especial



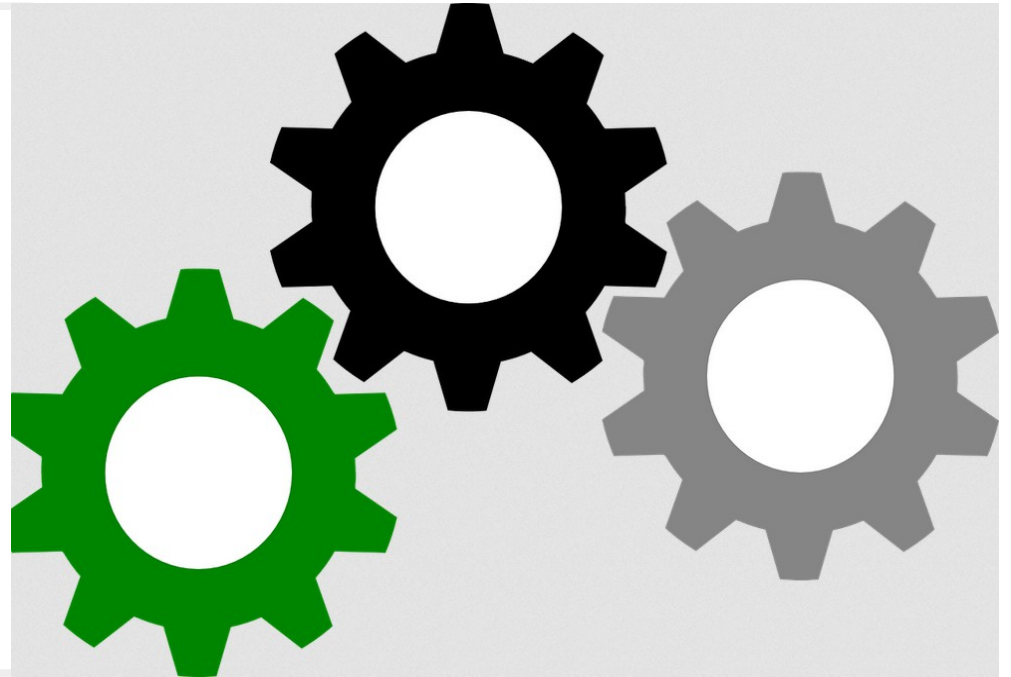
4ª Parte: Paradoja de los gemelos

Paradoja de los gemelos



Mark (L) and Scott (R) are the only twins to have traveled to space. (NASA)
<http://www.theverge.com/2016/3/1/11138102/scott-kelly-year-in-space-health-effects-return-to-earth>

Seguimos
profundizando en
las consecuencias
de los postulados
asumidos



Veremos que las consecuencias de la
teoría, lejos de provocar contradicciones,
nos permiten resolver con claridad una
de las más famosas paradojas de la
Relatividad Especial



Paradoja de los gemelos

Un gemelo hace un viaje espacial mientras que el otro gemelo se queda en la Tierra.

Visto desde la Tierra, el gemelo viajero envejece más despacio. Pero visto desde la nave espacial es la Tierra la que se mueve y es el gemelo terrestre el que envejece más despacio.

¿Qué sucede cuando se encuentran ?

En primer lugar debemos destacar que la situación no es simétrica. Es el gemelo viajero el que experimenta aceleración (por ejemplo, para poder volver).

Debido a esa aceleración se hace un “reajuste” en lo que se ve desde la nave, de manera que ambos observadores coinciden en que el gemelo terrestre envejece más.

Pero...

¿Qué sucede realmente? ¿Cómo se “arregla” esa distinta visión del transcurso del tiempo?

Aviso: la resolución de esta paradoja que se suele ofrecer en las obras que tratan sobre la Relatividad Especial reviste cierta complejidad.



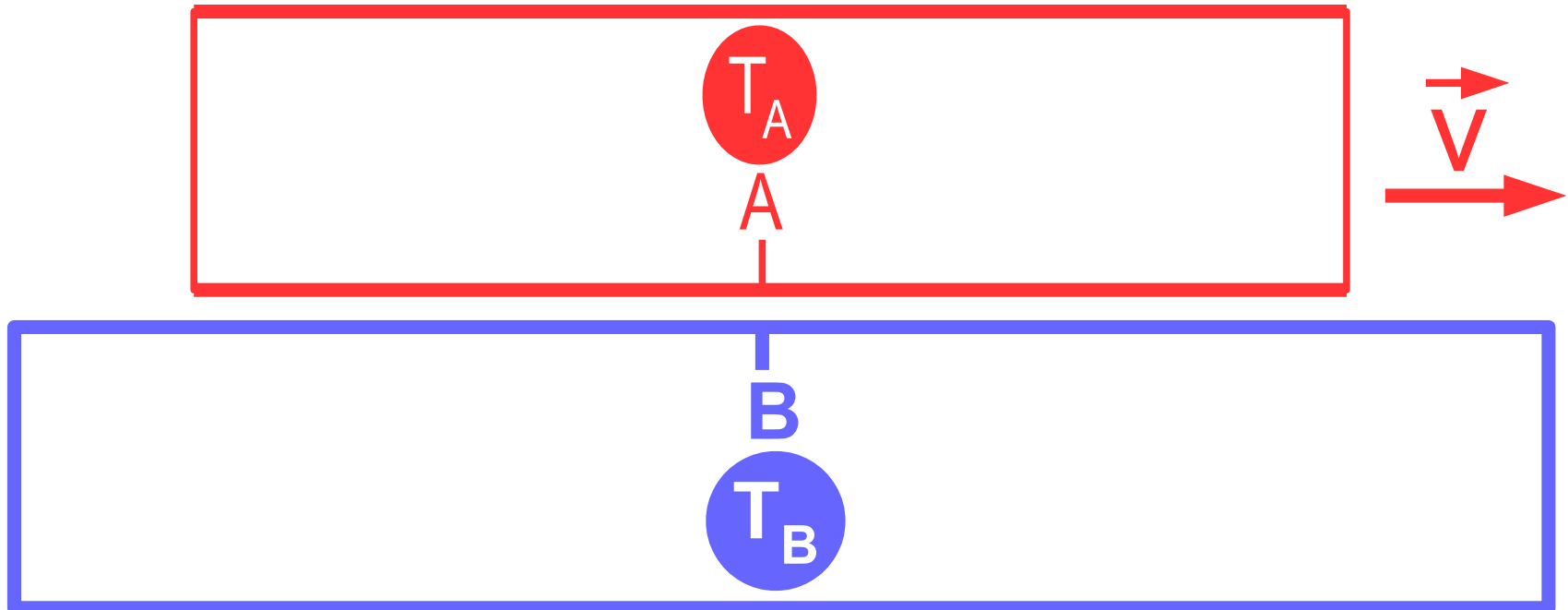
En lo que sigue, para una máxima claridad, se plantea un experimento mental donde se ilustra lo que realmente ocurre de la manera más sencilla y visual posible.

Para ello se ha elegido un caso concreto ideal para esa representación gráfica sencilla: la velocidad relativa entre los dos observadores es $0,866c$. Por tanto, el espacio del otro s.r. se contrae a la mitad y el tiempo en el otro s.r. avanza la mitad de rápido.

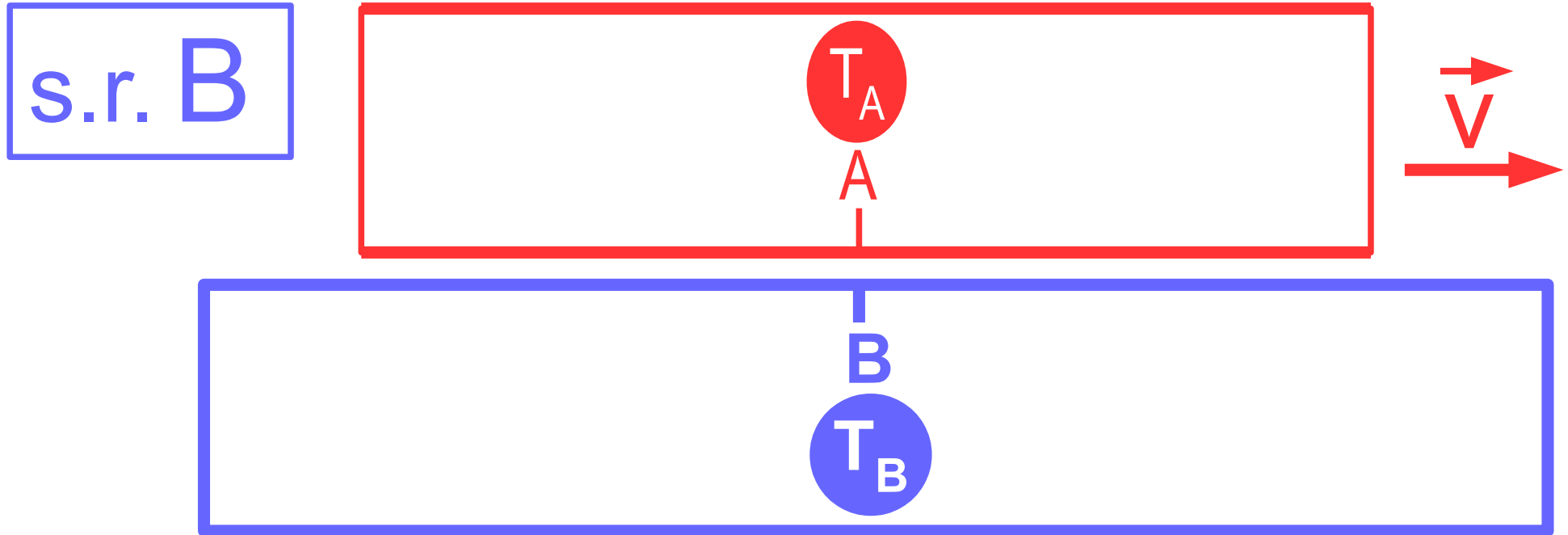
Antes de seguir, hagamos un pequeño inciso, para exponer un resultado que vamos a utilizar:

s.r. B

Supongamos que, desde el s.r. B, cuando la marca A coincide con la marca B, el reloj en A marca T_A y el reloj en B marca T_B .



Los rectángulos rojo y azul son dos objetos que, en reposo, tienen la misma longitud.



Resultado importante: “Ley de Conexión”

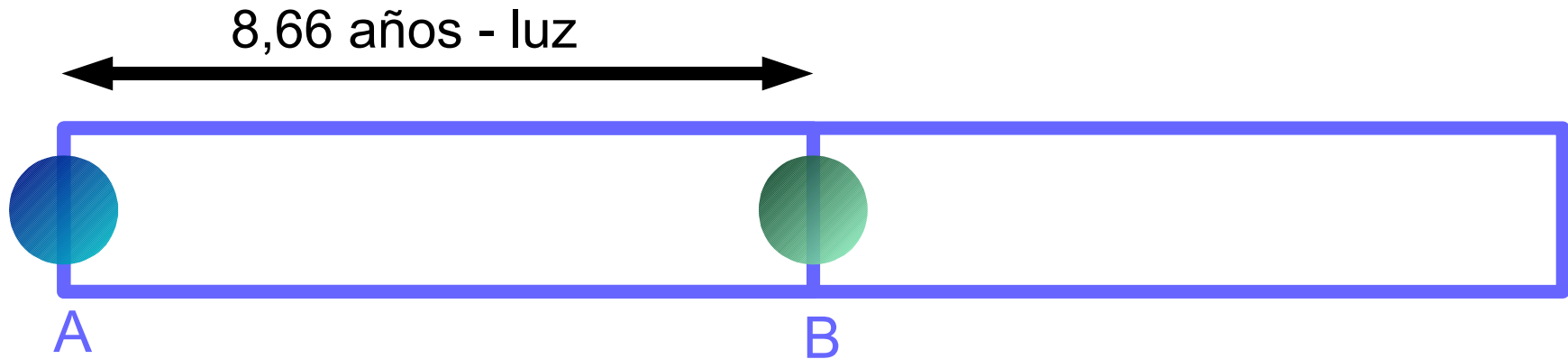
Cuando la marca **A** coincide con la marca **B**, el reloj en **A** y el reloj en **B** tienen un valor que no depende del s.r. desde el que se mire.

(la demostración en el Anexo)

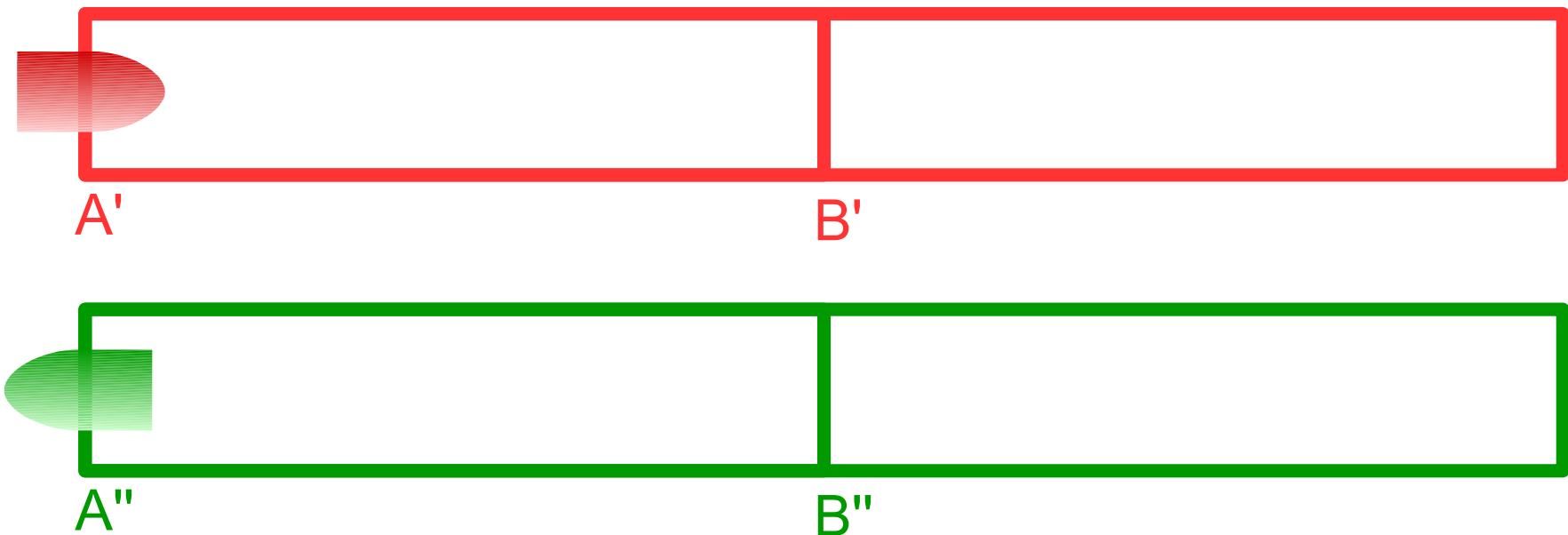
Ya podemos volver a la Paradoja de los Gemelos...

Presentamos a los protagonistas de nuestro razonamiento:

La Tierra (A) y otro planeta habitado (B):



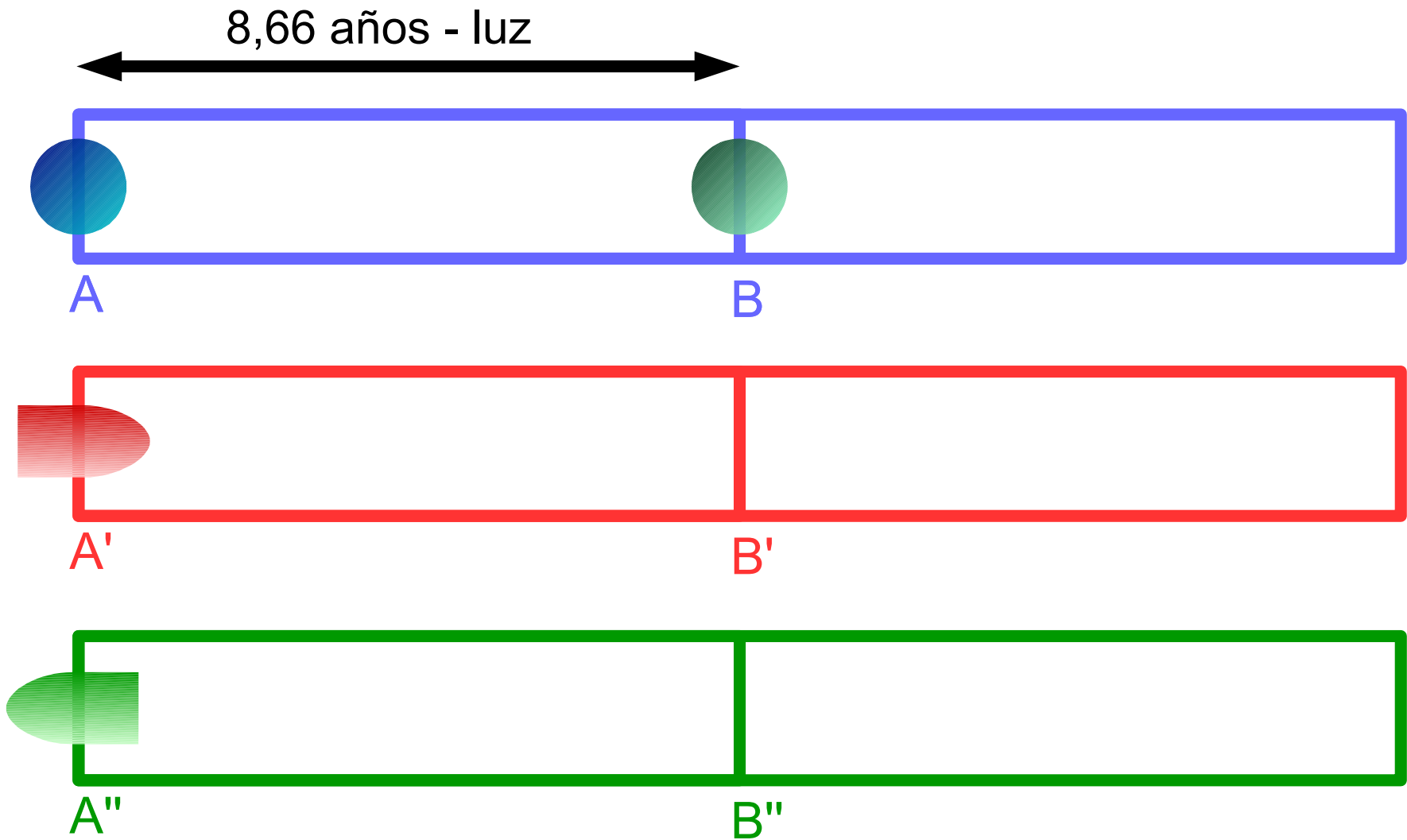
Una nave espacial (A') y otra en sentido contrario (A'')



¿Qué representan los rectángulos?

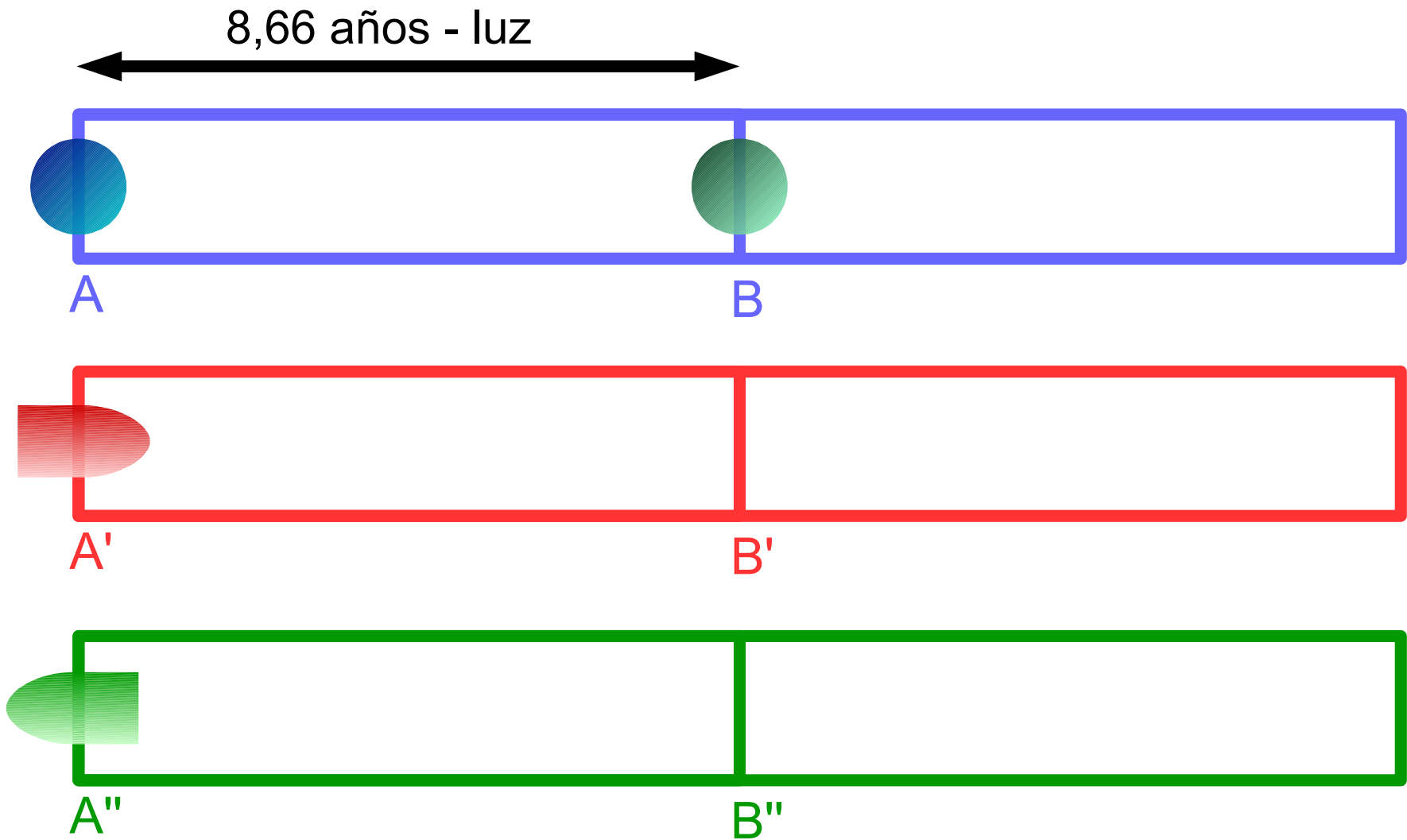
Los rectángulos representan el espacio de cada s.r.

¡El espacio es relativo! Desde cada s.r. ve un espacio.

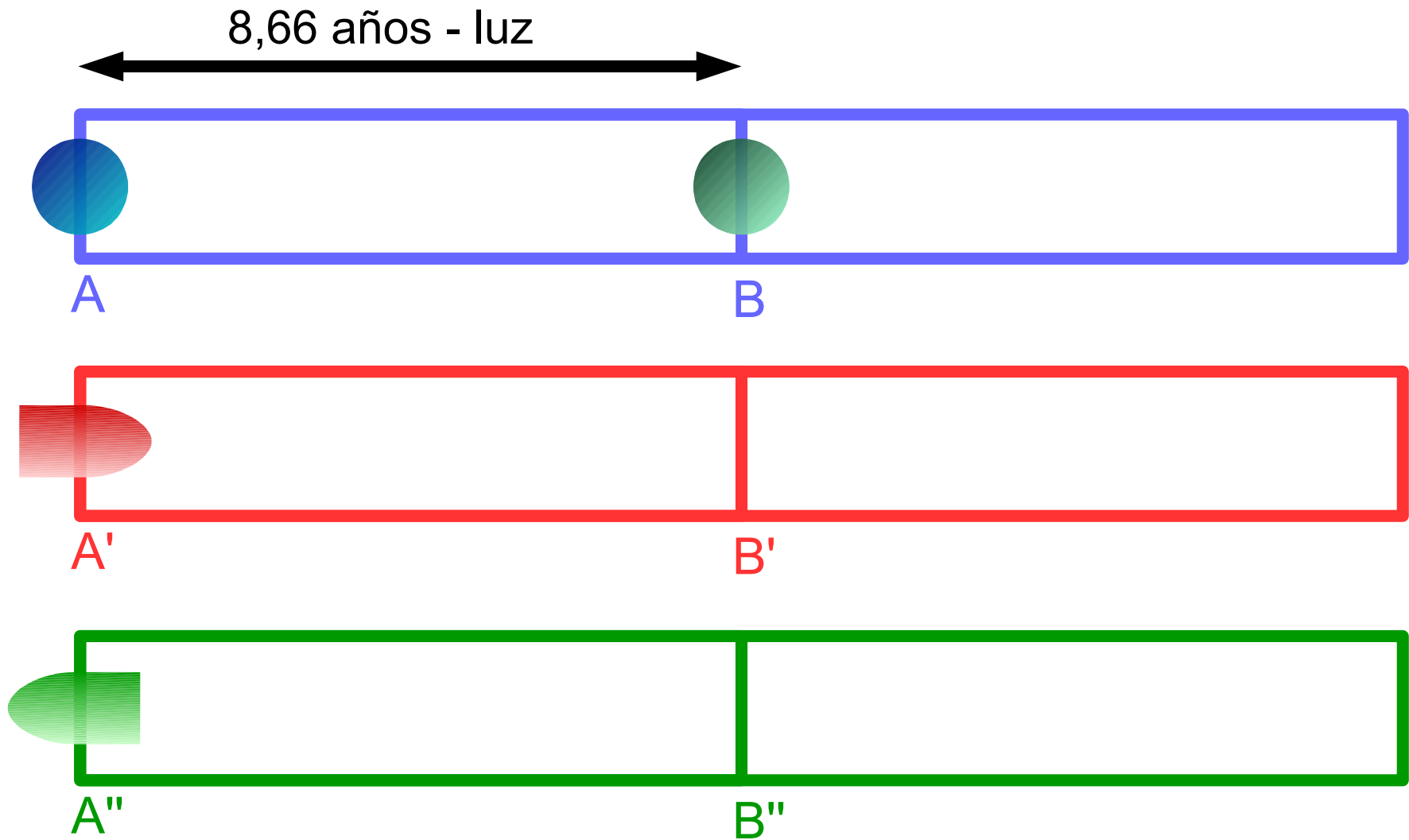


El **rectángulo azul** representa el espacio, tal y como se vería desde el **s.r. de A** (o desde el **s.r. de B**).

El **s.r. de A** es el mismo s.r. que el **s.r. de B** puesto que **A** no se mueve respecto a **B** (van a la misma velocidad)

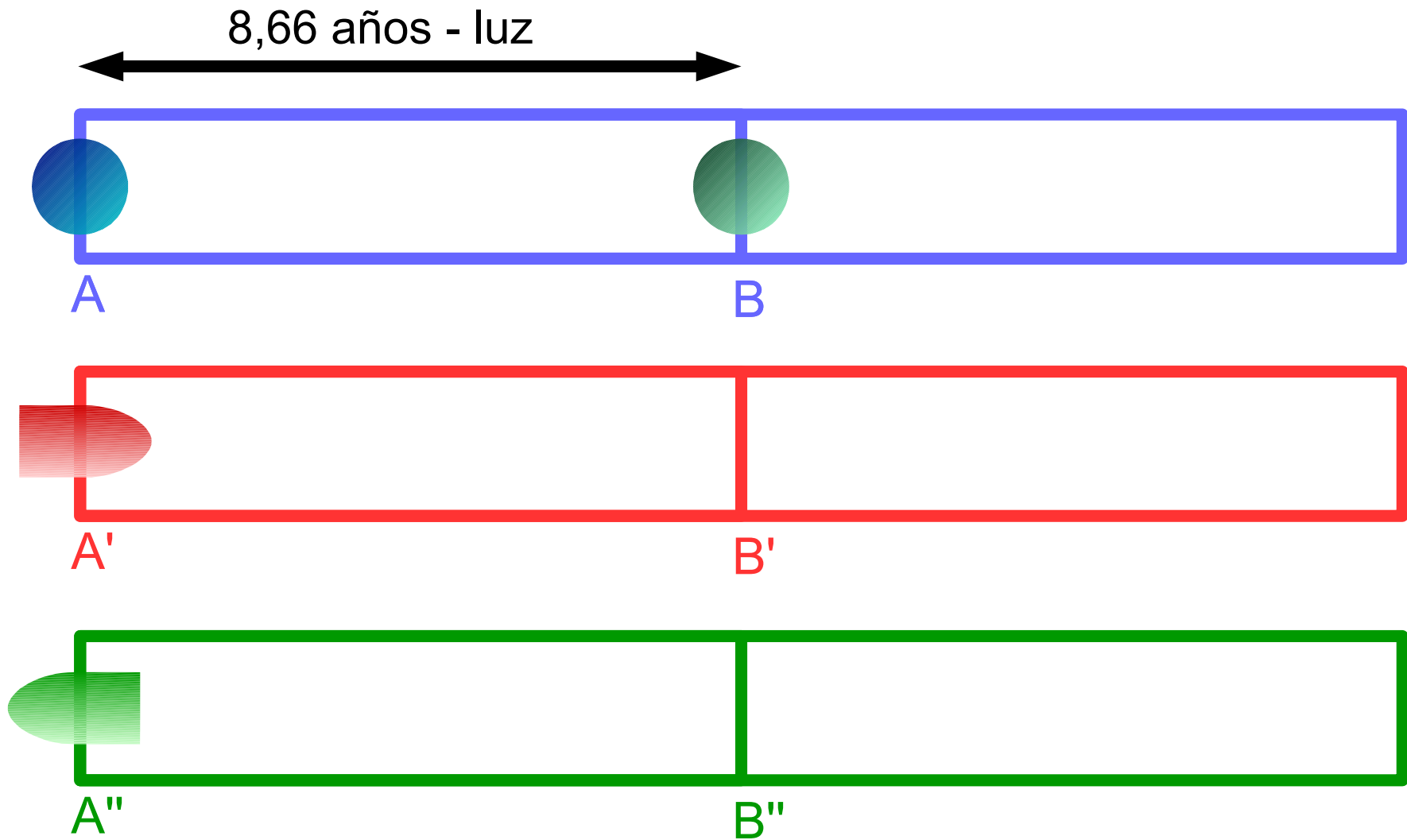


El **rectángulo rojo** representa el espacio, tal y como se vería desde el **s.r. de A'**. Por ejemplo, el punto imaginario **B'** está siempre a 8,66 años-luz de **A'**, visto desde **A'**.



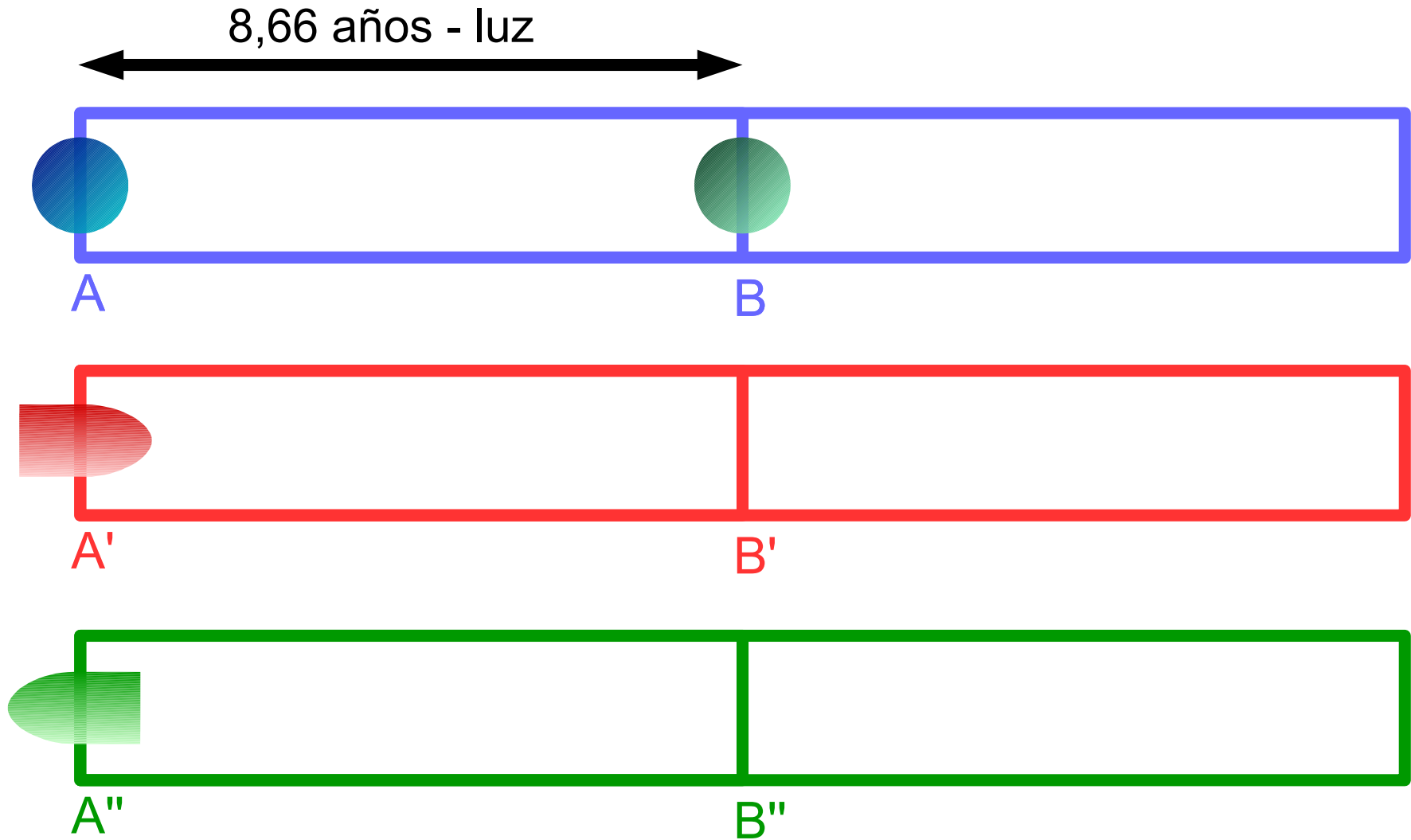
Si nos facilita la comprensión, podemos ver los rectángulos como una estructura material real:

El **rectángulo azul** es como una estructura que une a los planetas **A** y **B** prolongándose hacia la derecha.

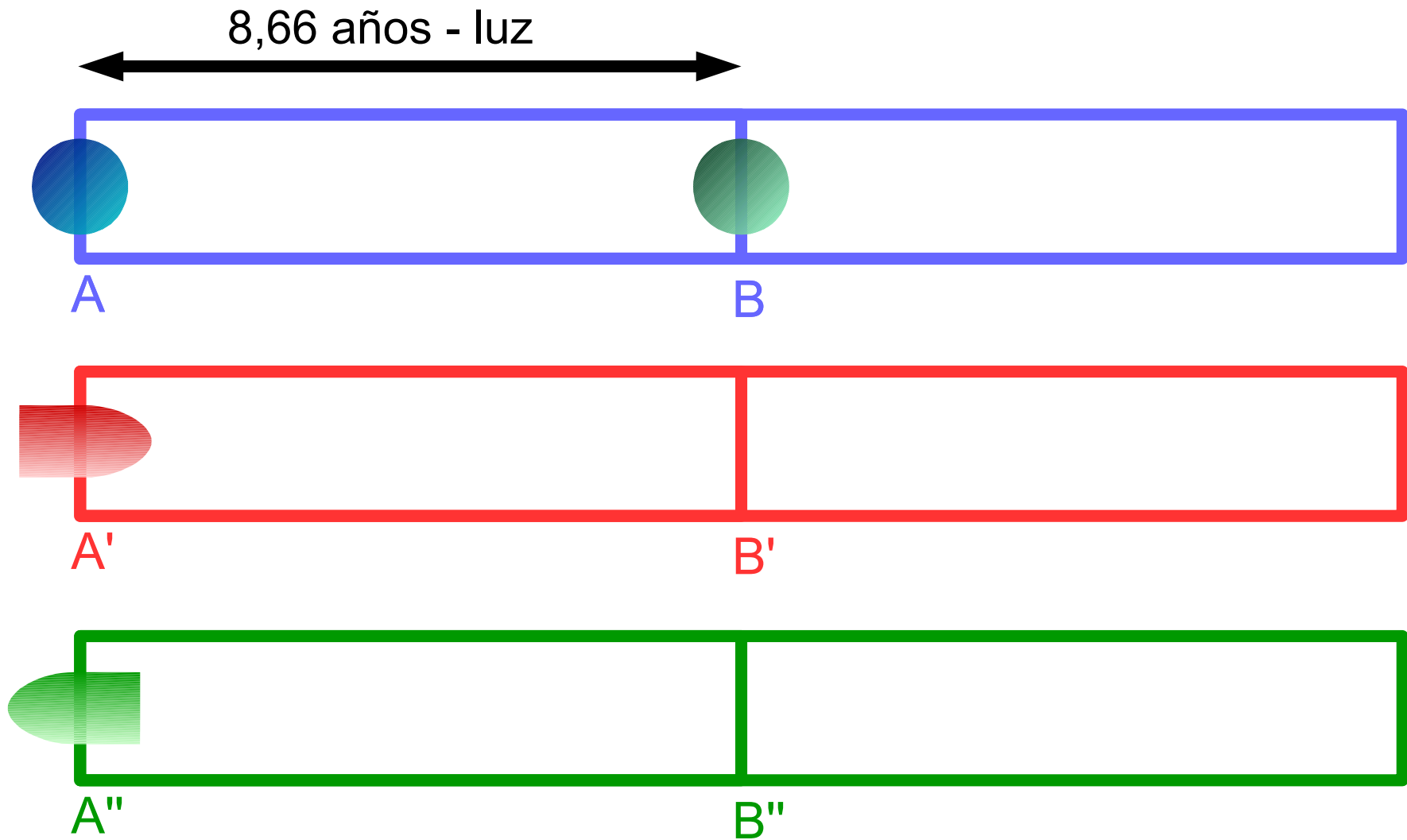


El **rectángulo rojo** es como una prolongación de la **nave roja** que, por tanto, se moverá con ella.

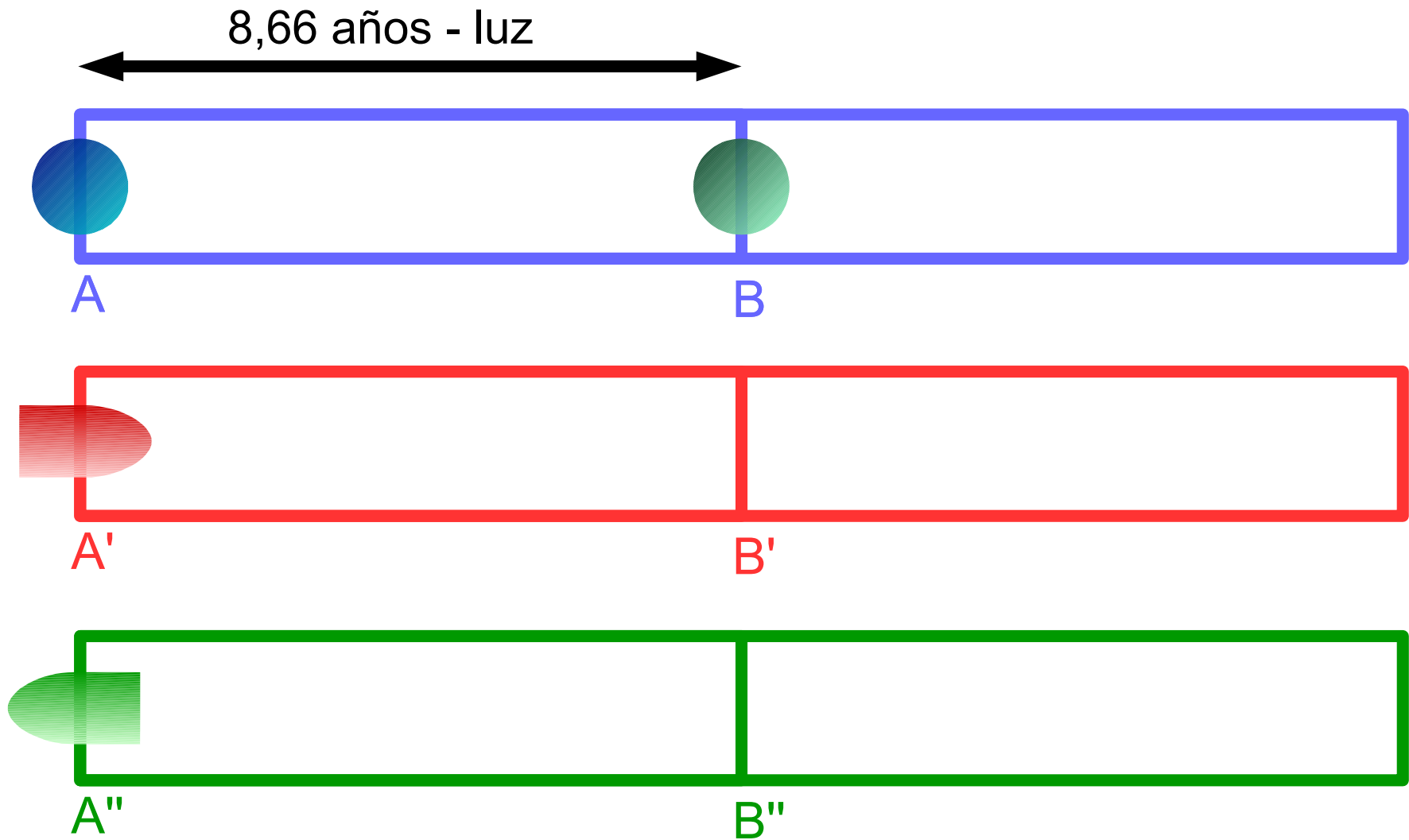
El **rectángulo verde** es como una estructura que se moverá con la **nave verde**.



¡Sí! Estas estructuras imaginarias (la azul, la roja y la verde) tendrían, cada una de ellas, una longitud enorme: el doble de 8,66 años-luz. Pero no nos preocupa, ya que esto es un experimento mental.

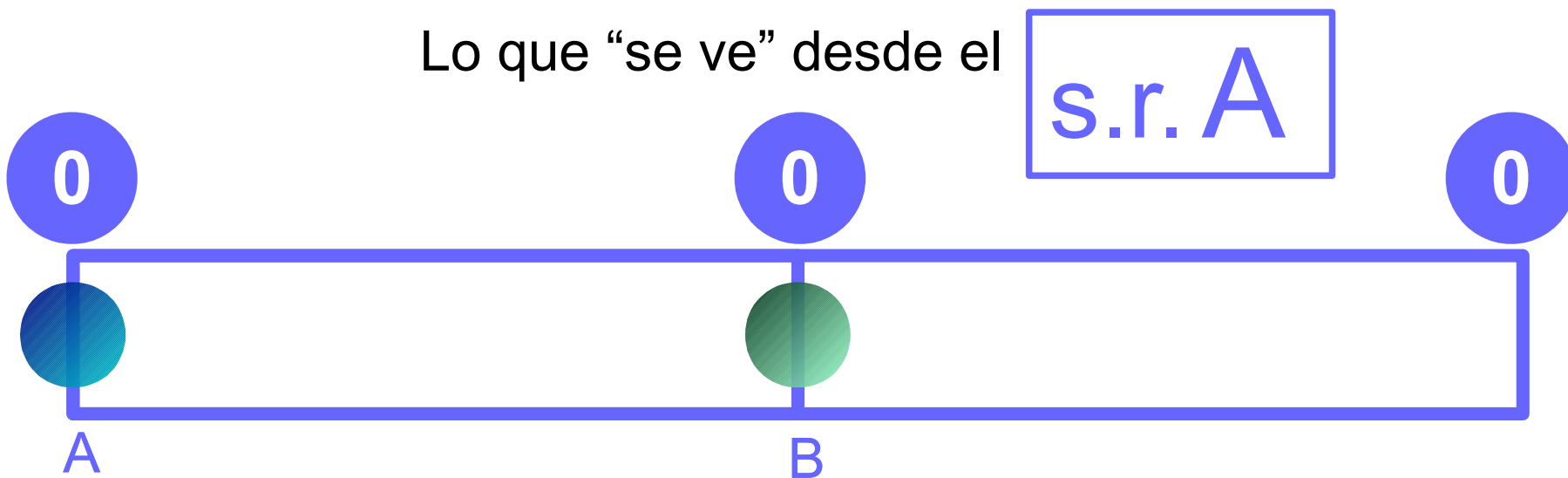


El s.r. de A' es el mismo s.r. que el s.r. de B' puesto que A' no se mueve respecto a B' (van a la misma velocidad). Igualmente el s.r. de A'' es el mismo s.r. que el s.r. de B'' puesto que van a la misma velocidad.

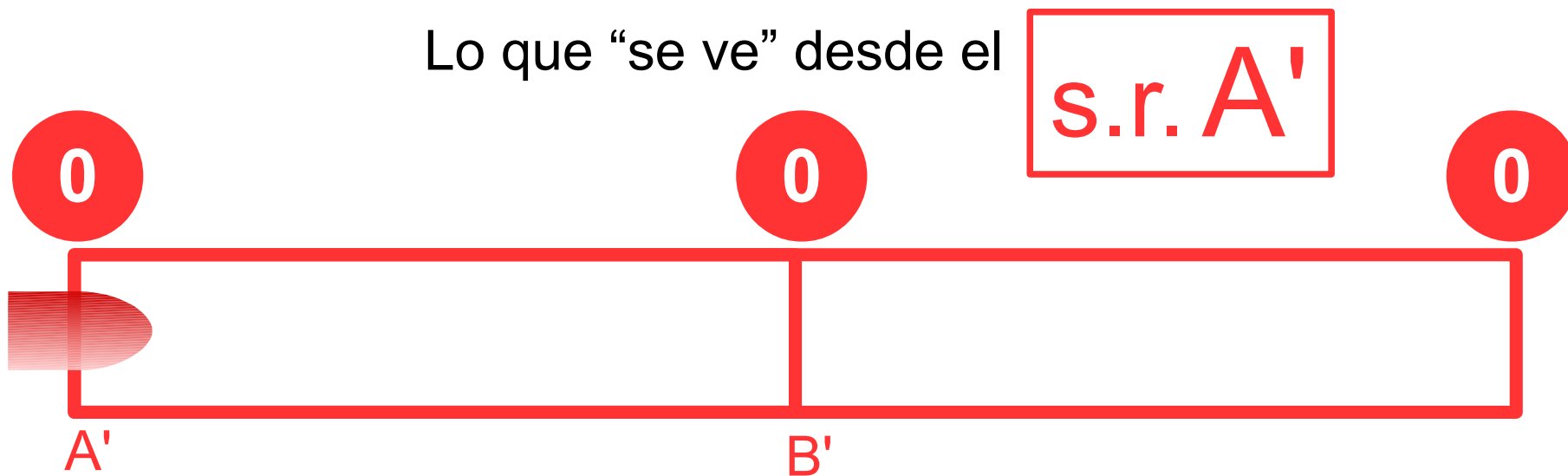


Visto desde un s.r. cualquiera,
los relojes **de ese mismo s.r.** están sincronizados:

Lo que “se ve” desde el



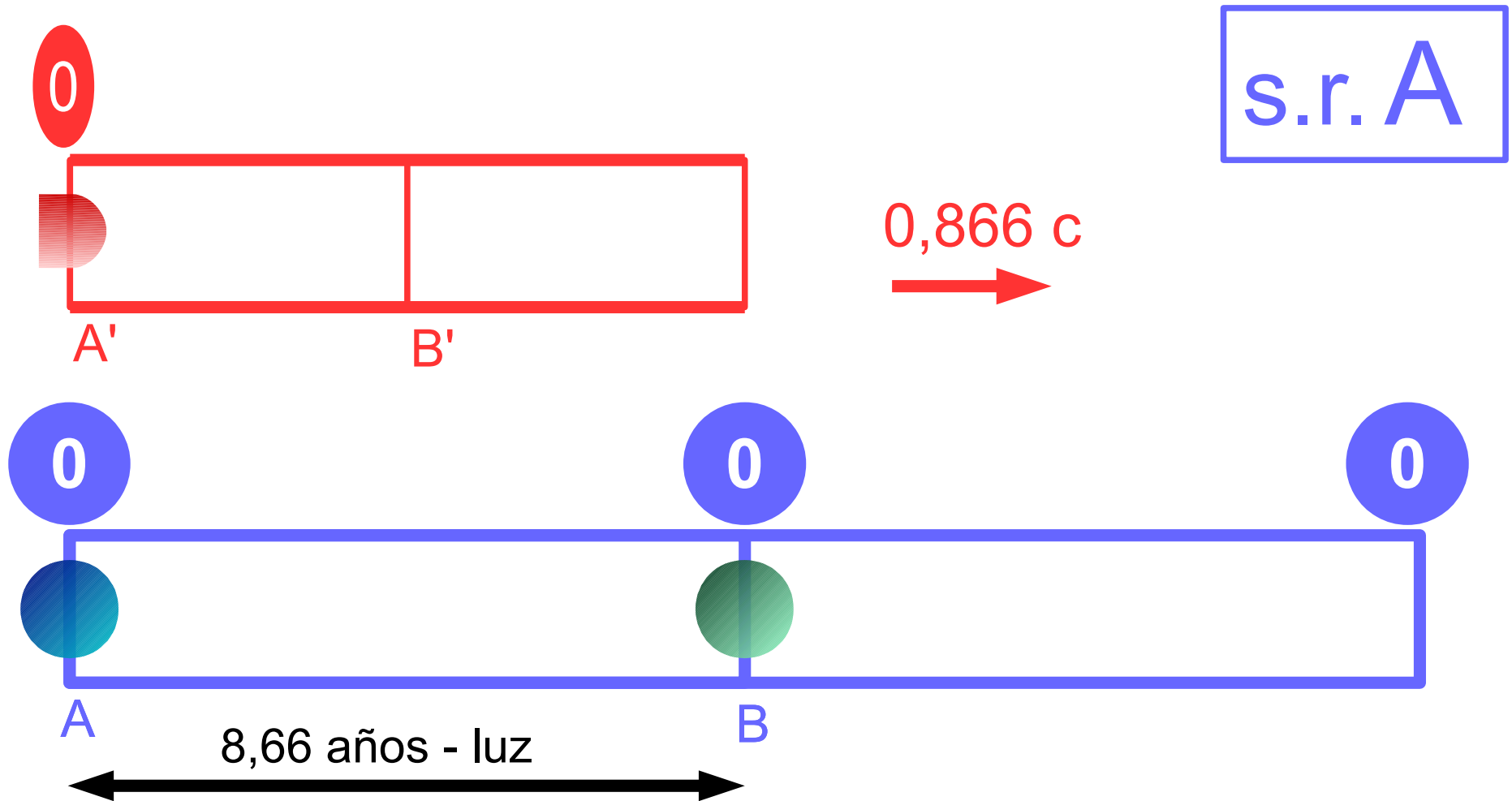
Lo que “se ve” desde el



El viaje visto desde el s.r. del gemelo terrestre (A)

Las distancias en el s.r. de A' se contraen a la mitad.

Suponemos que cuando A' está delante de A sus respectivos relojes marcan 0.

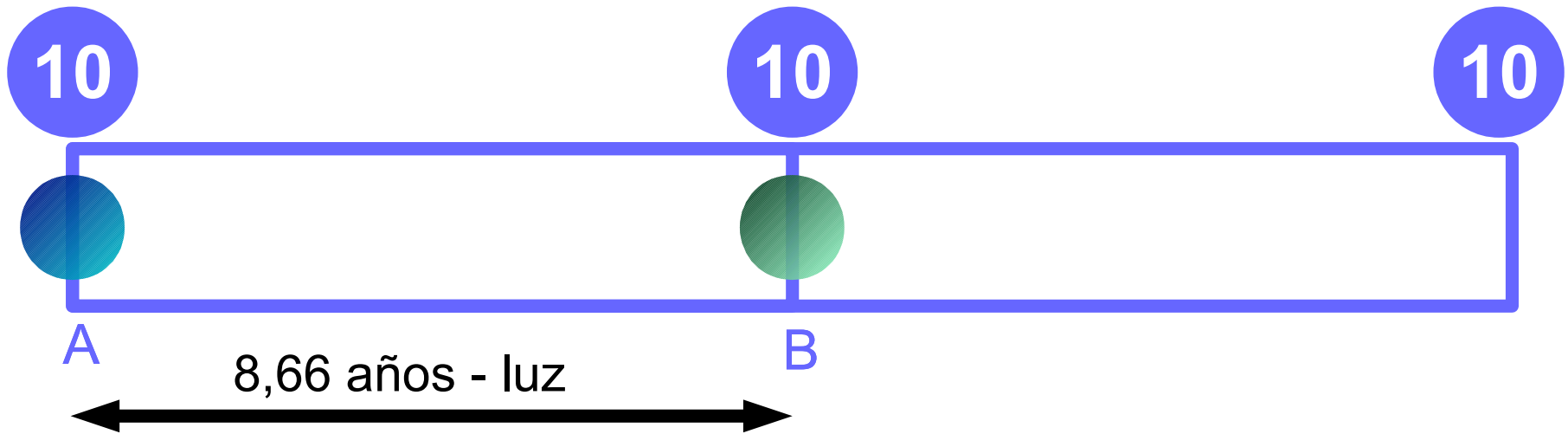
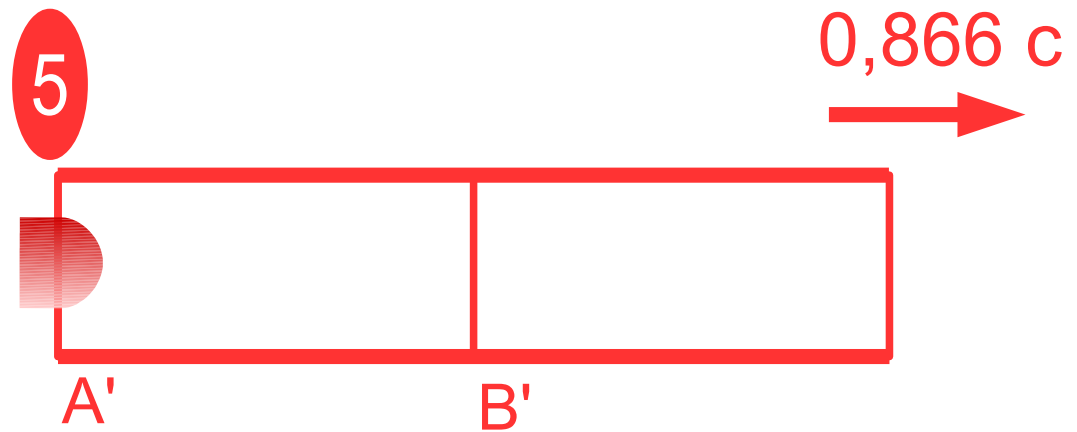


El viaje para el gemelo terrestre (A) dura 10 años: $t = \frac{e}{v}$

Si pudiera ver el reloj del gemelo viajero (A') vería que avanza la mitad de rápido.

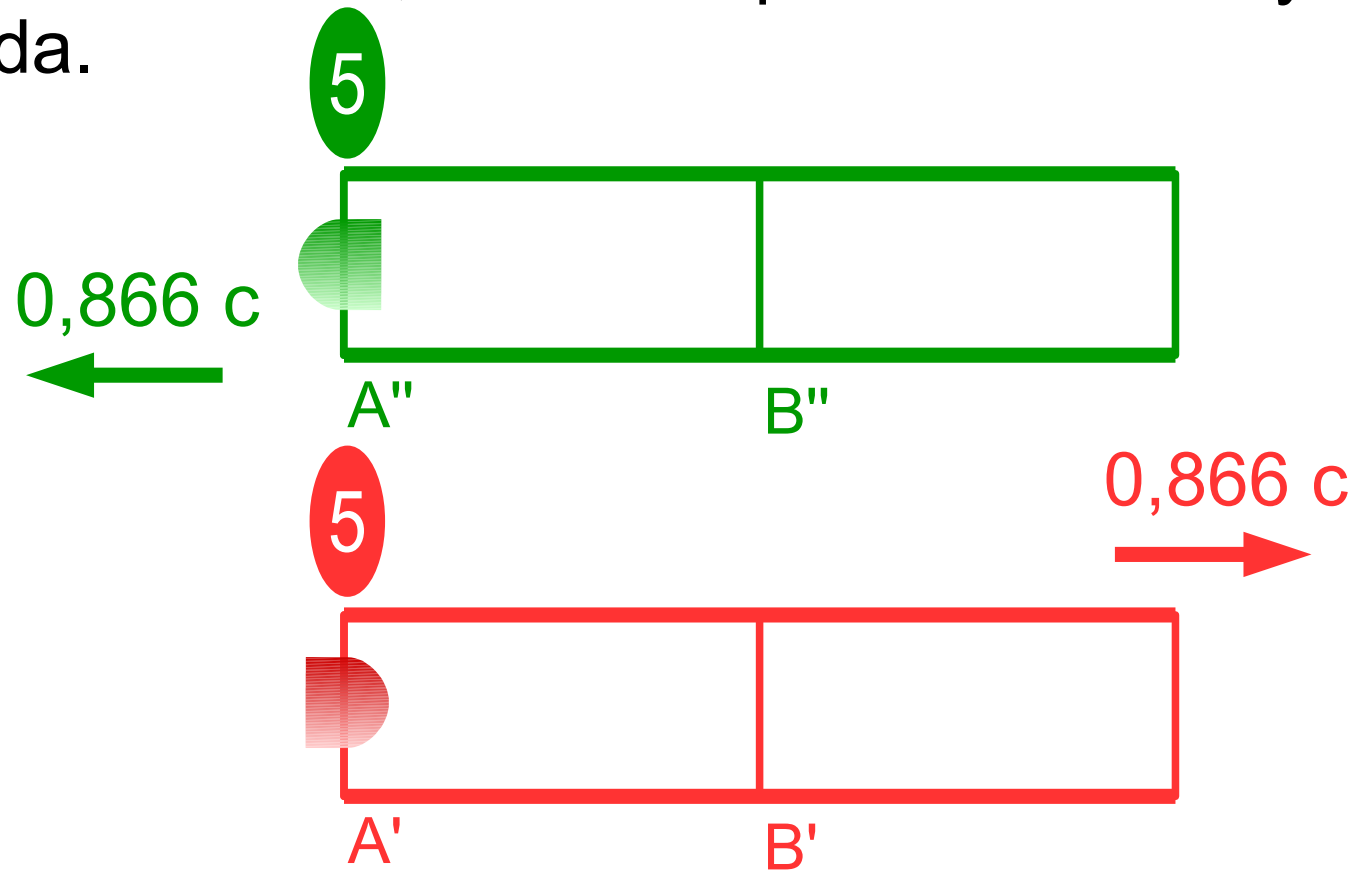
Cuando A' llega a B su reloj marca 5 años.

Tanto el observador de A' como el de B están de acuerdo en lo que marcan sus respectivos relojes.



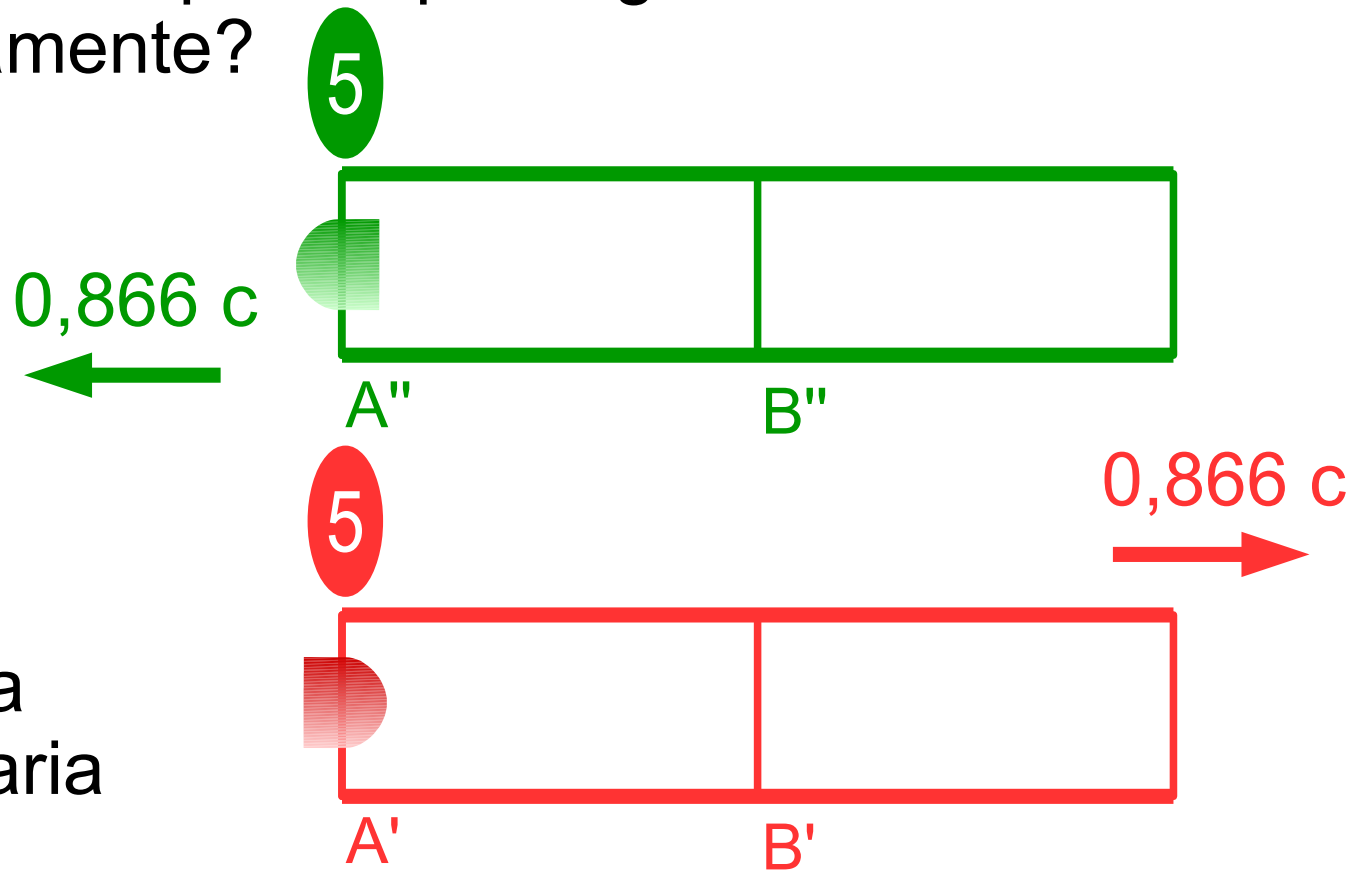
Entra en escena la nave verde, con su espacio asociado y la velocidad indicada.

Suponemos que el gemelo salta instantáneamente de A' a A'' con su reloj. Ahora en A'' marca 5 años.



Reflexión: ¿Es válido suponer que el gemelo salta de A' a A'' instantáneamente?

Podemos objetar que, por la velocidad relativa, eso es imposible, y que si pasara en muy poco tiempo la aceleración necesaria sería enorme.

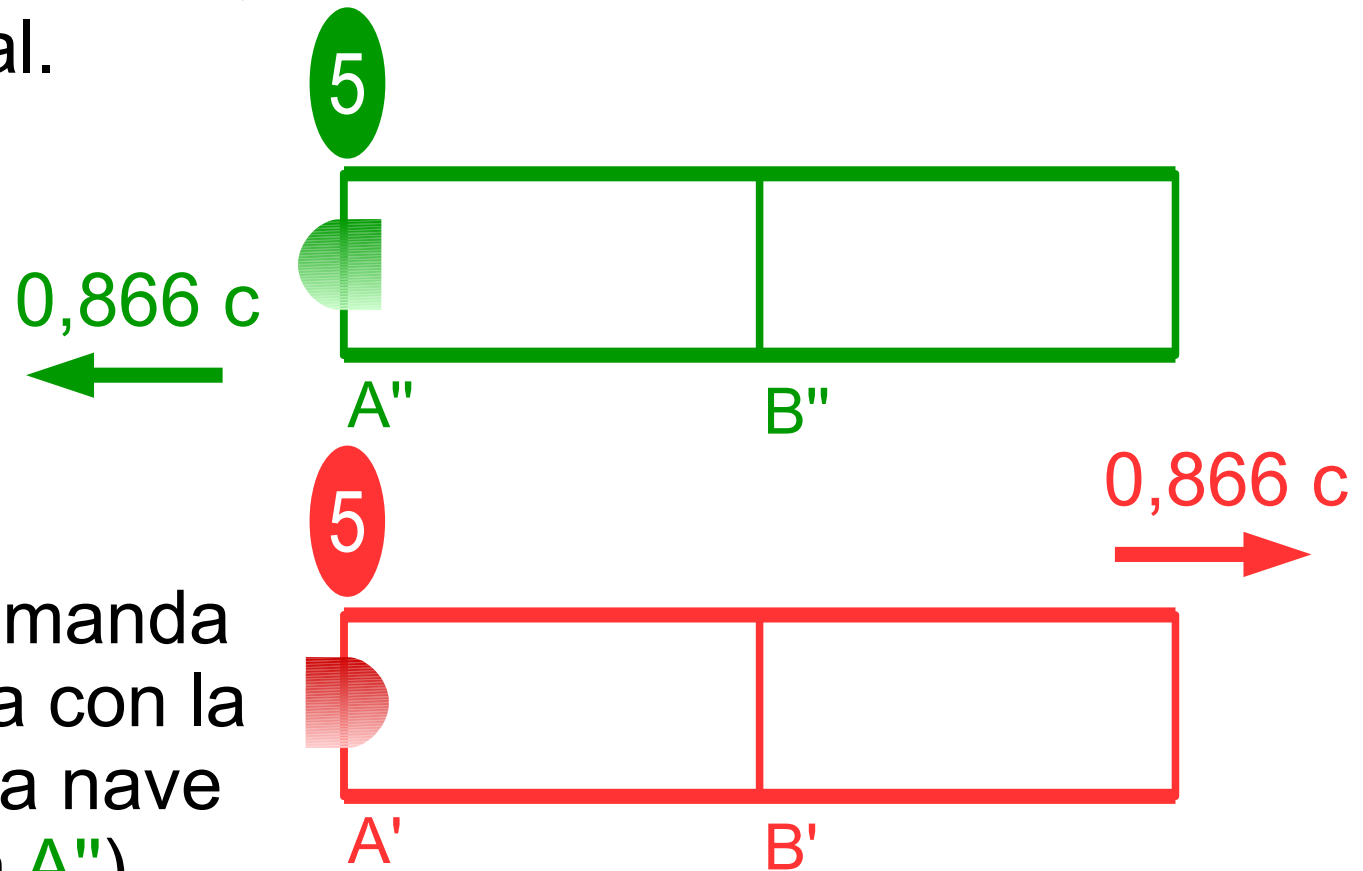


¿Se puede ignorar las implicaciones que podría tener esa aceleración?

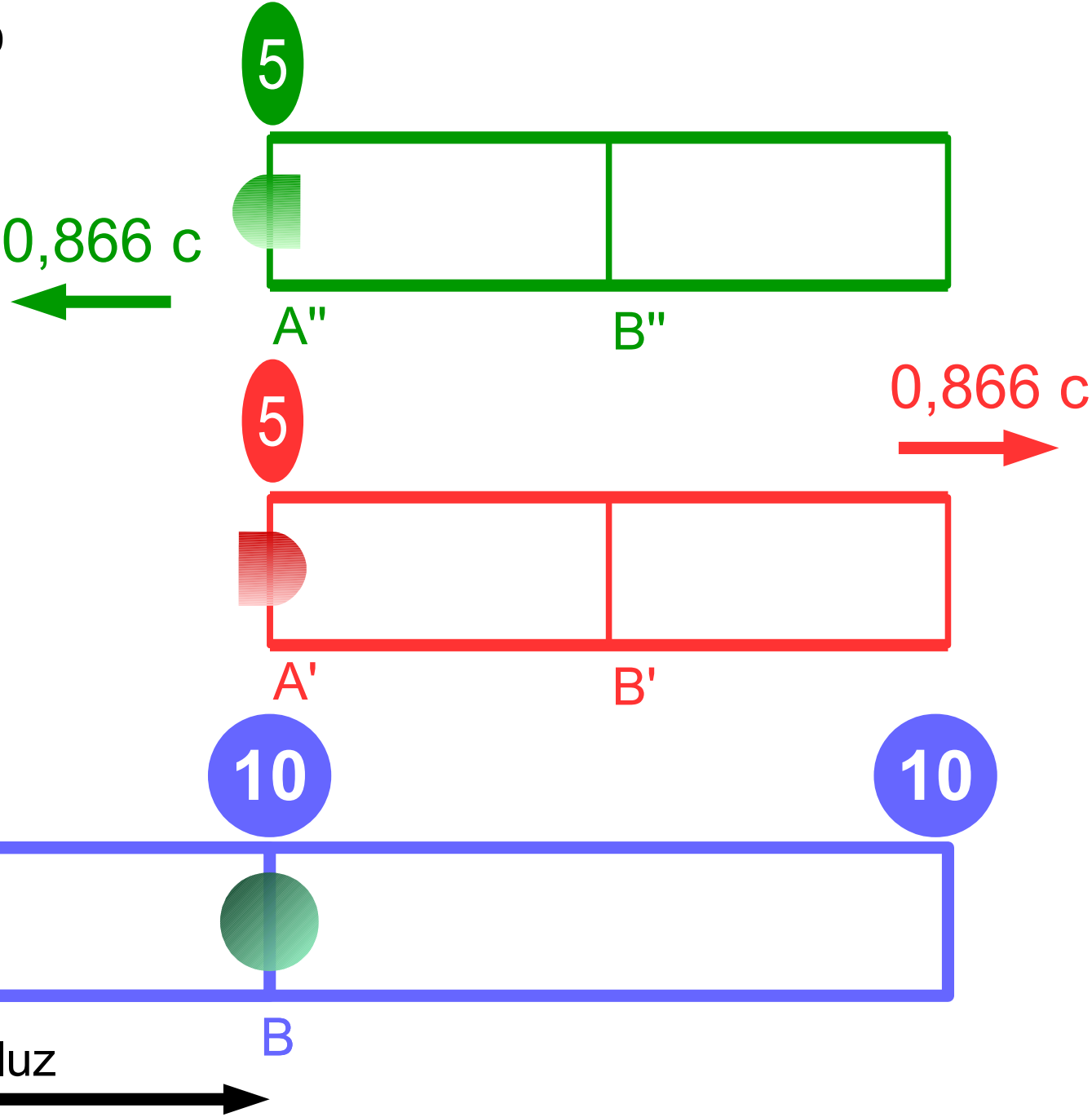
Para evitar este problema, vamos a modificar nuestro experimento mental.

Supondremos ahora que, en vez de saltar el gemelo a la otra nave, en la situación dibujada manda una señal luminosa con la hora de su reloj a la nave verde (que está en A'')

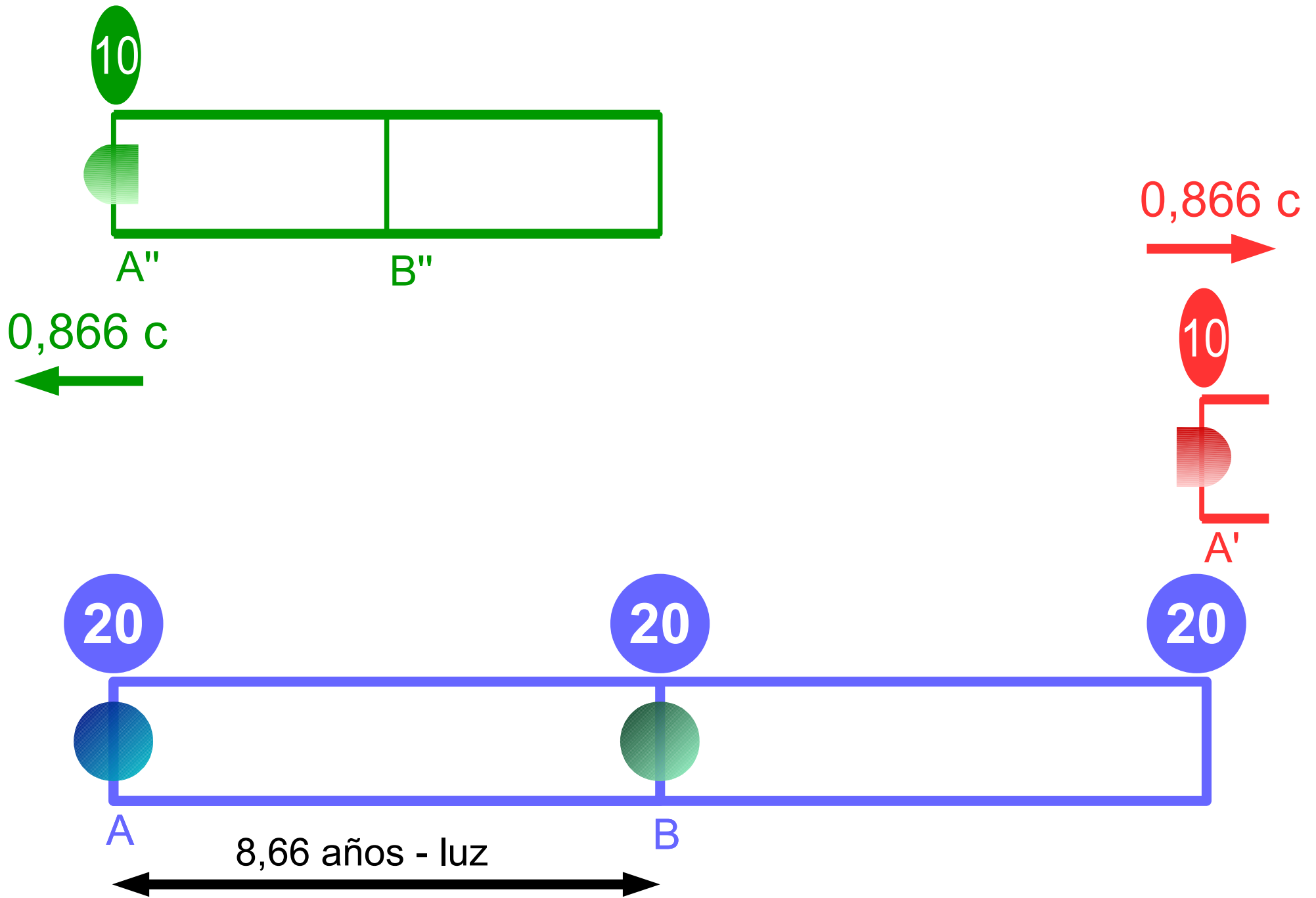
Como la luz no necesita aceleración, y A' está muy cerca de A'' , la luz llega casi al instante. De esta forma es razonable suponer que en la situación dibujada los relojes indican los valores indicados



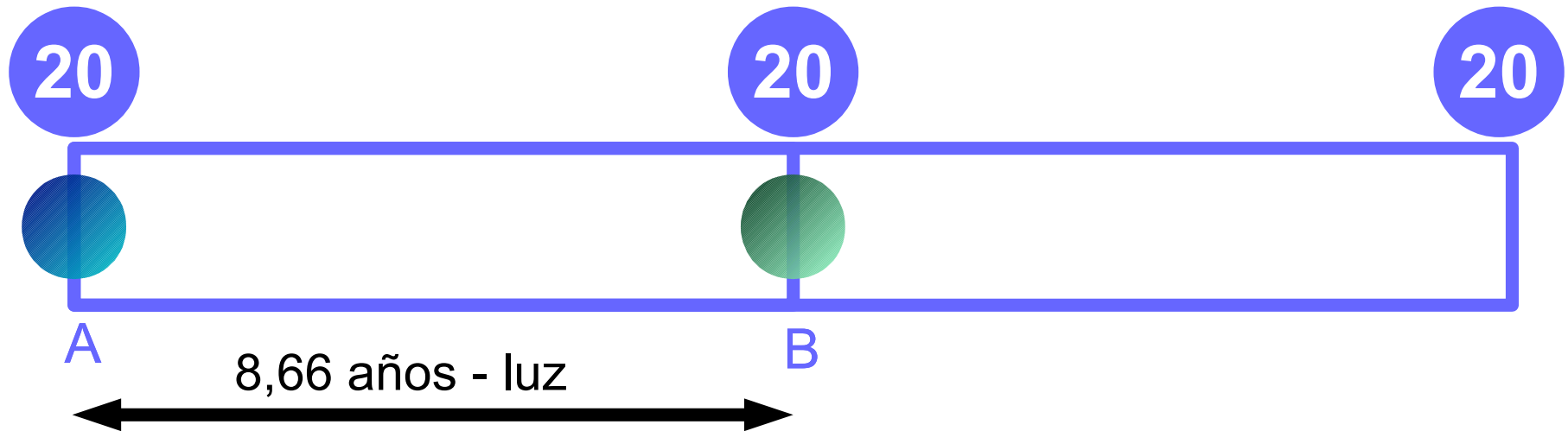
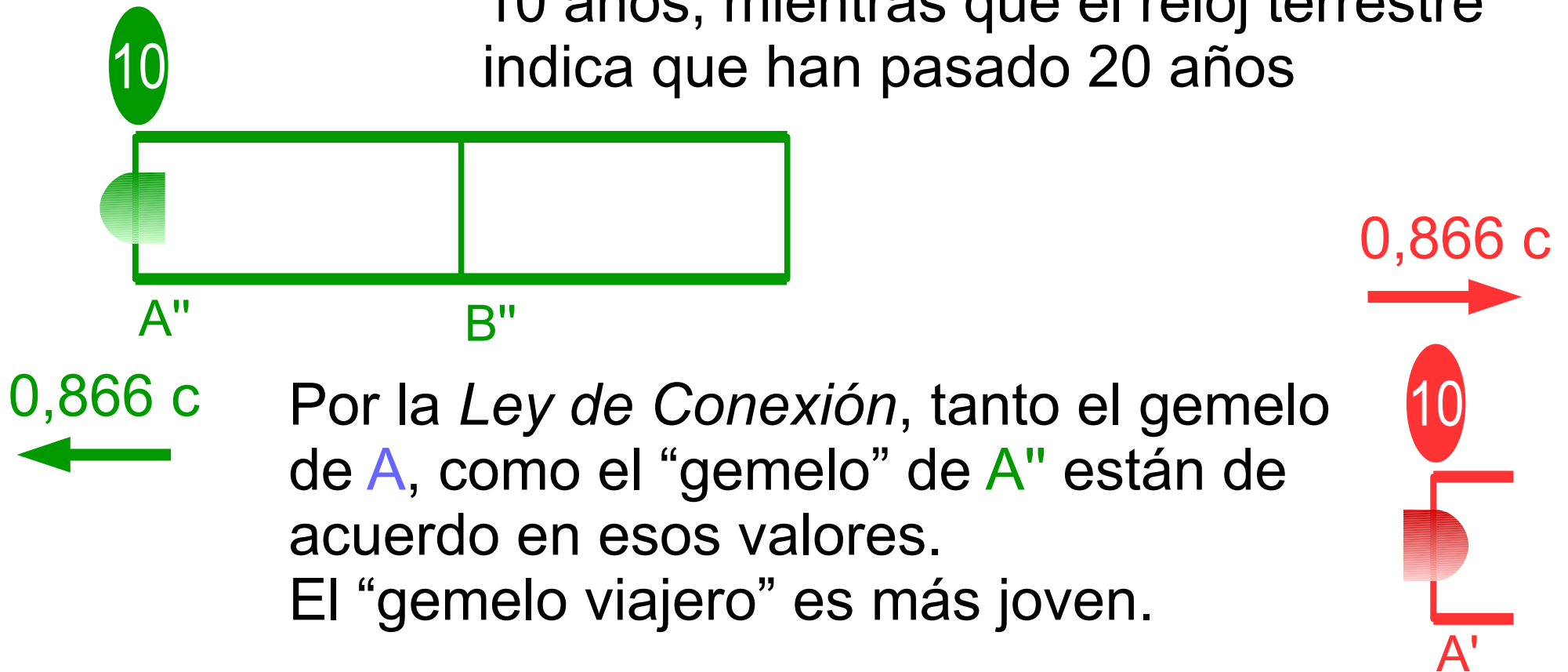
El reloj de A'' marca, por tanto, el tiempo de viaje desde que A' partió de A



Como la "vuelta" es simétrica:

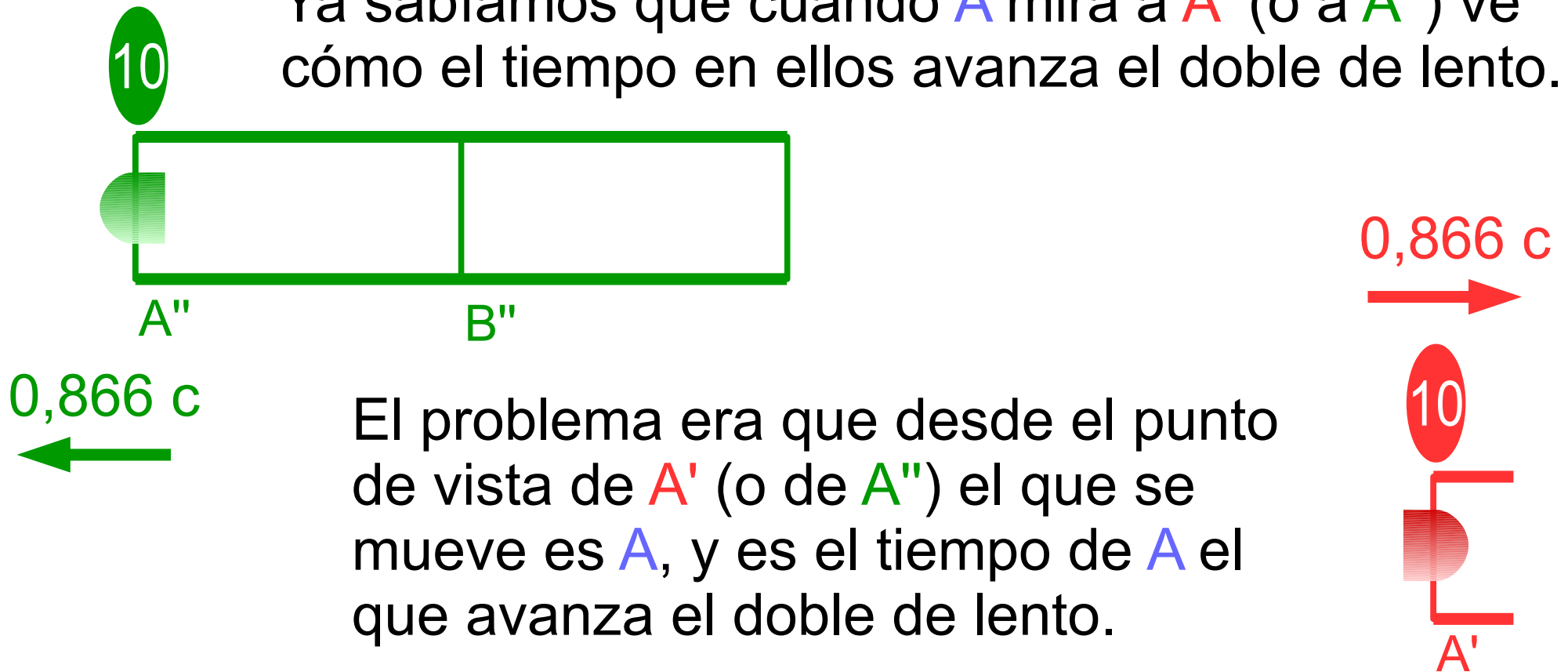


Por tanto, el “reloj viajero” contabiliza 10 años, mientras que el reloj terrestre indica que han pasado 20 años

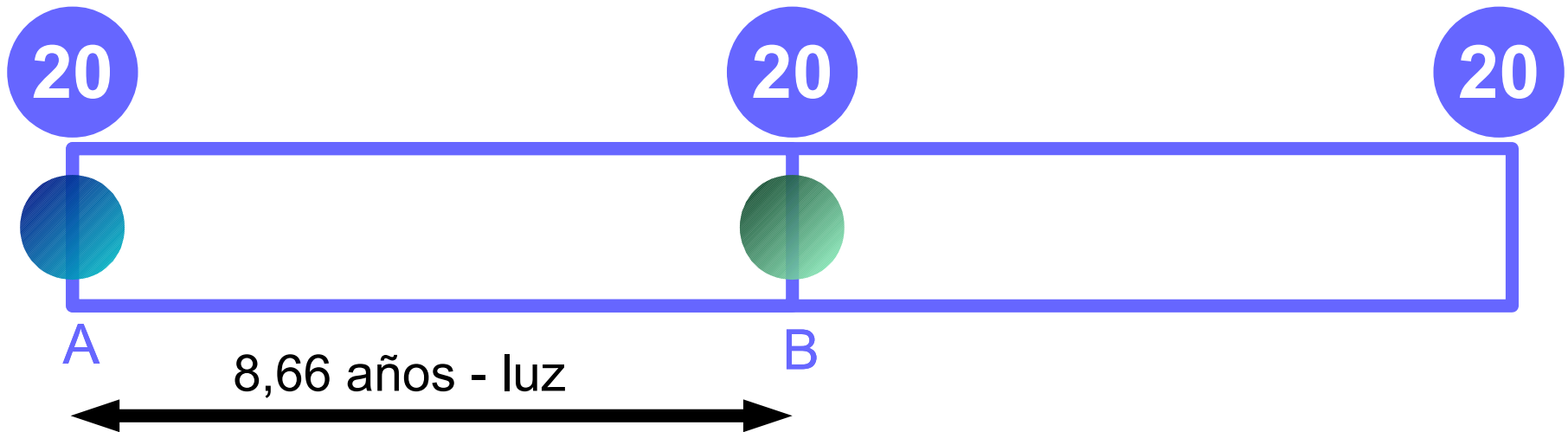


Hasta aquí no hay nada nuevo.

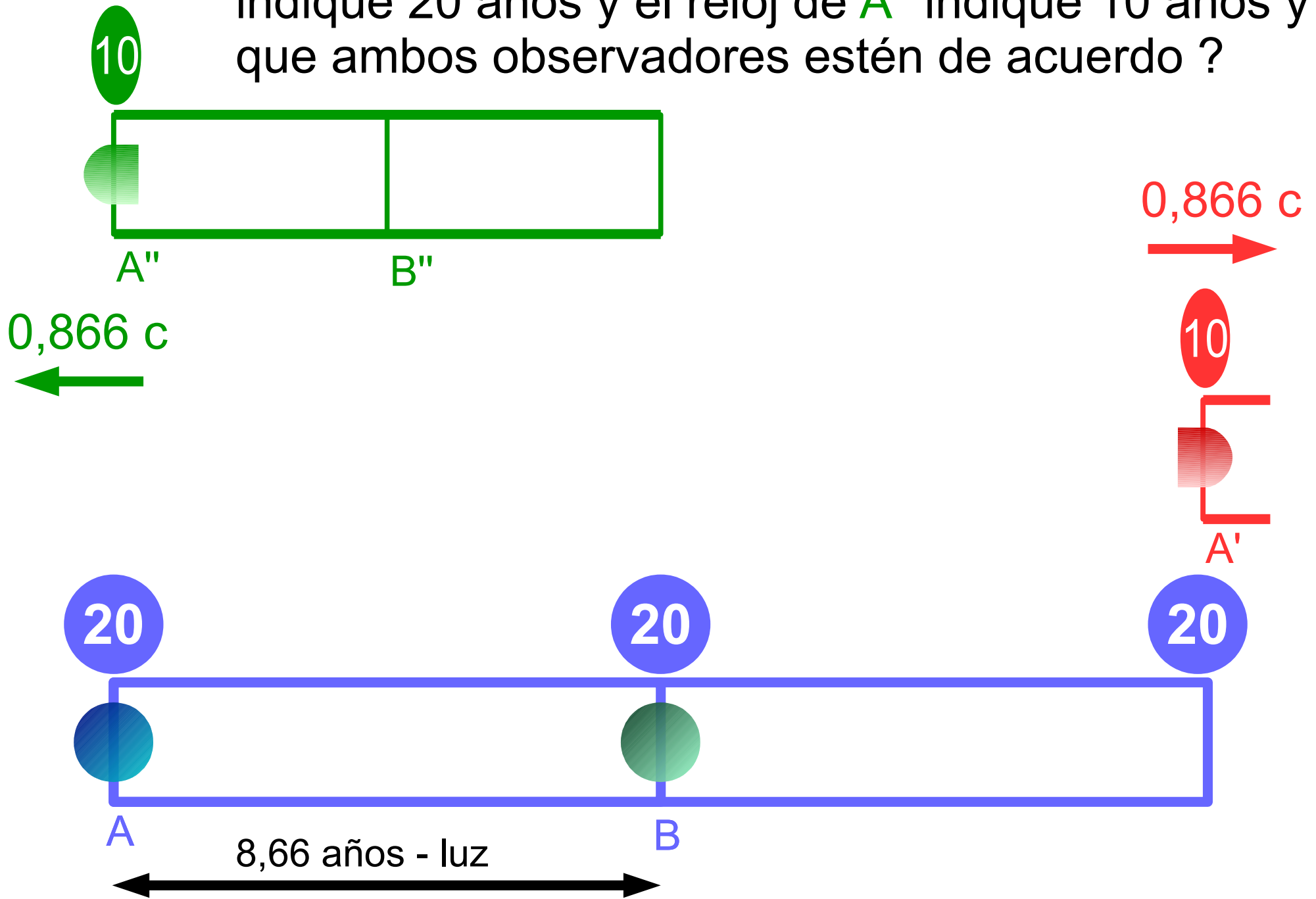
Ya sabíamos que cuando A mira a A' (o a A'') ve cómo el tiempo en ellos avanza el doble de lento.



El problema era que desde el punto de vista de A' (o de A'') el que se mueve es A , y es el tiempo de A el que avanza el doble de lento.



¿Cómo es posible entonces que el reloj de A indique 20 años y el reloj de A'' indique 10 años y que ambos observadores estén de acuerdo ?



Para entender lo que ocurre tendremos que mirar desde varios s.r. Empecemos considerando

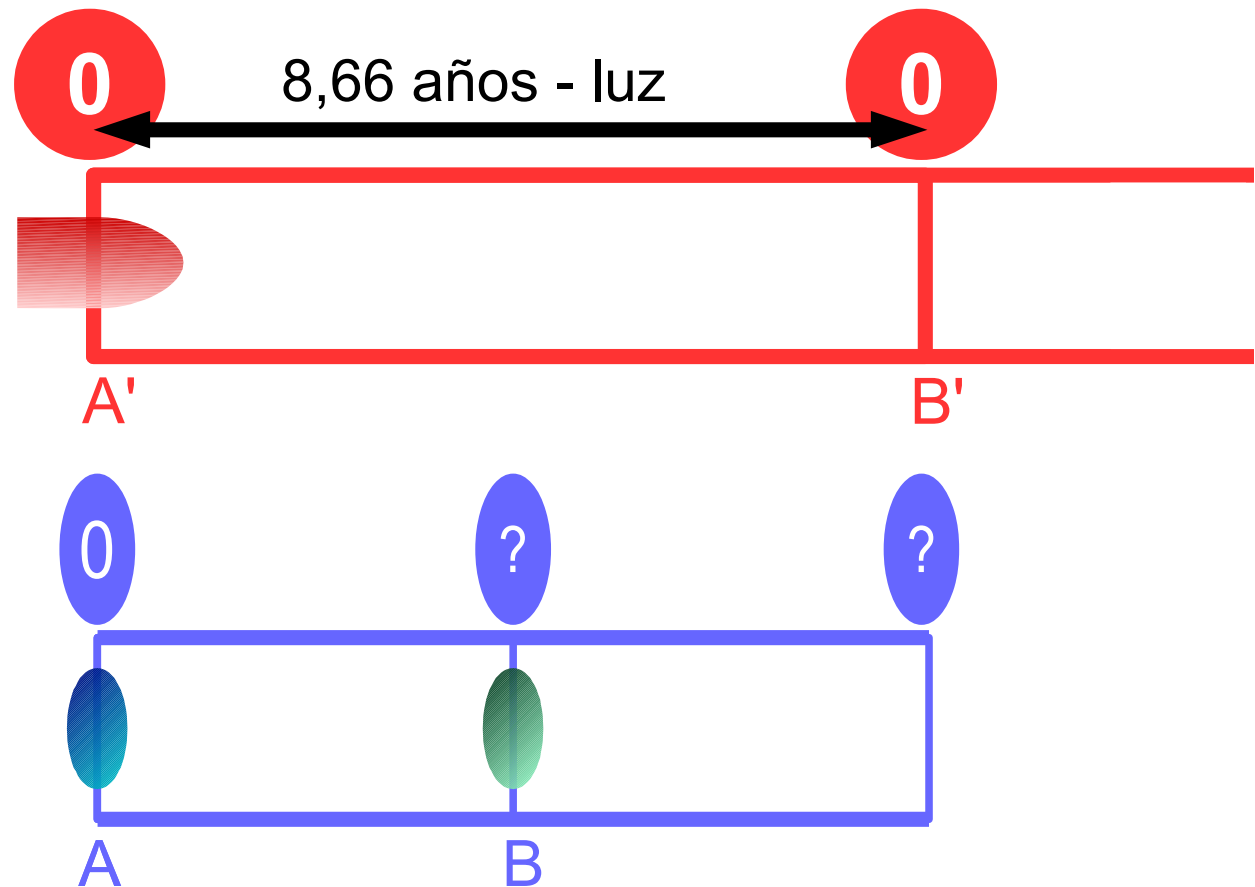
lo que se ve desde el **s.r. de A'** :

Tal y como se había establecido, y por la *Ley de conexión*, cuando **A** está delante de **A'** sus respectivos relojes marcan 0.

Todos los relojes del **s.r. de A'** están sincronizados:

s.r. A'

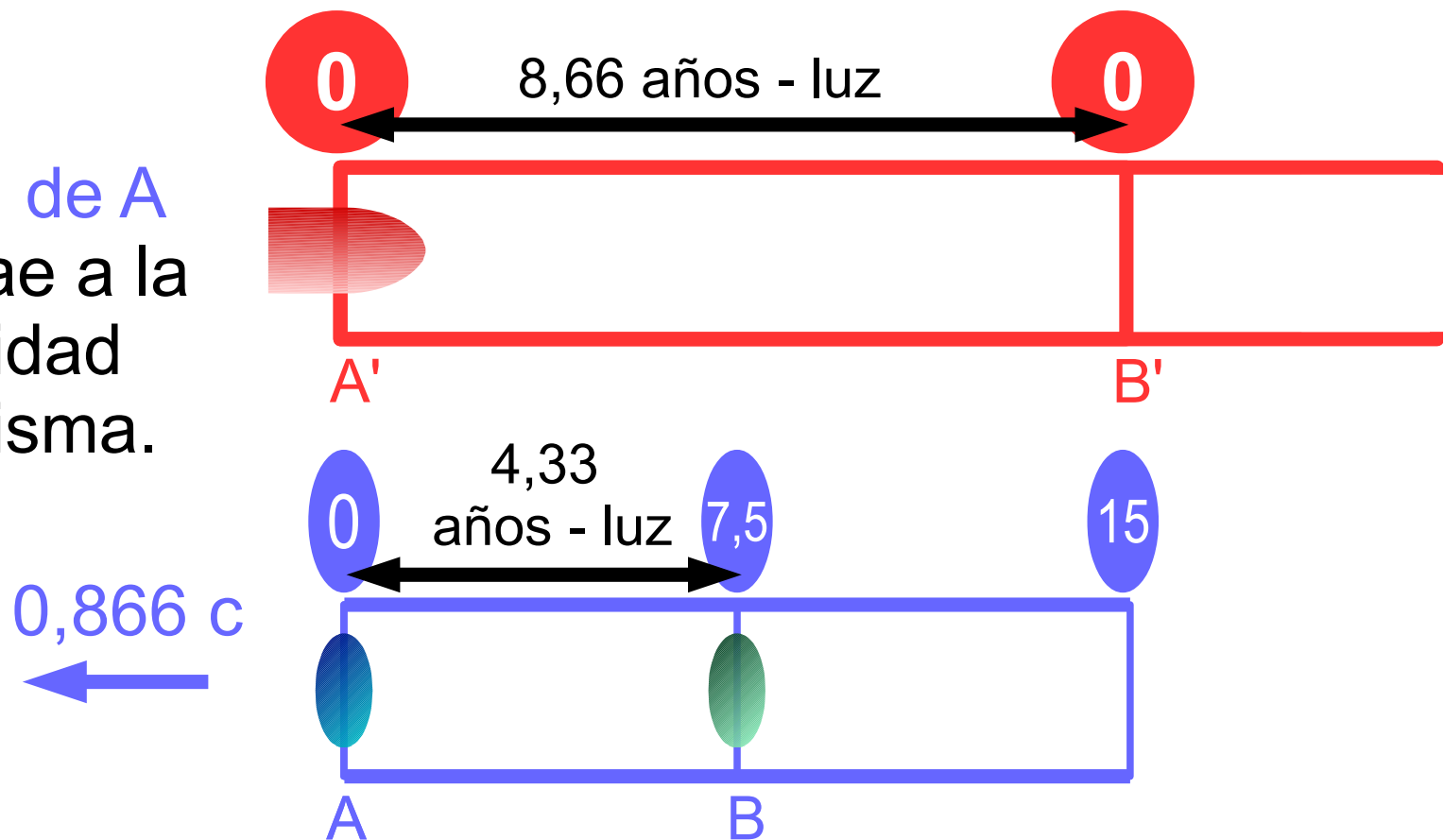
$0,866 c$



Sin embargo, y tal como ya hemos comentado, lo que es simultáneo en el **s.r. de A**, por ejemplo cuando todos sus relojes marcan 0, no lo es visto desde el **s.r. de A'**

Visto desde el **s.r. de A'**, para los valores de velocidad y distancia escogidos, los relojes del **s.r. de A** marcan lo que indica el dibujo (ver anexo).

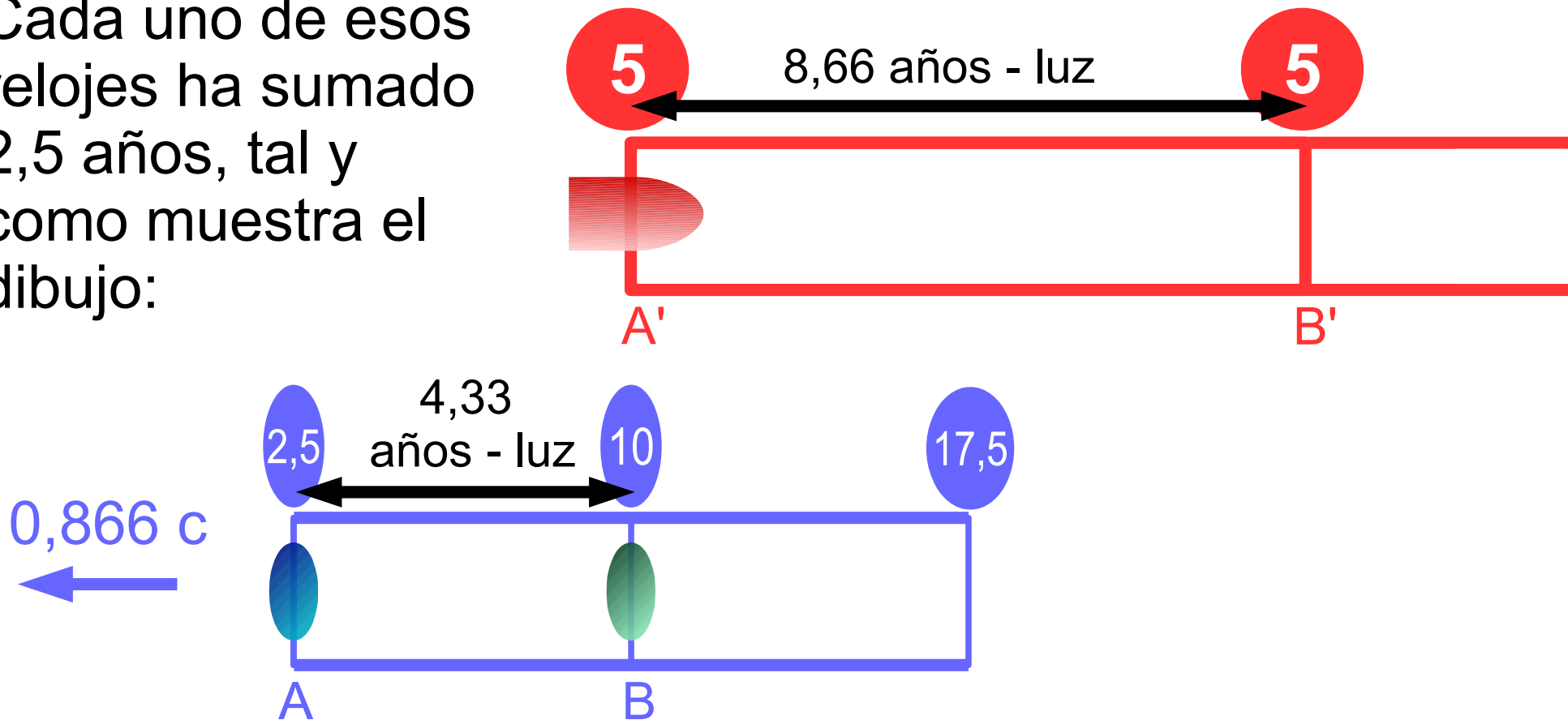
Ahora, es el **s.r. de A** el que se contrae a la mitad. La velocidad relativa es la misma.



Aplicando $t=e/v$, visto desde el **s.r. de A'**, el viaje de la nave al **planeta B** ha durado 5 años. Ese valor queda reflejado en los relojes del **s.r. de A'**

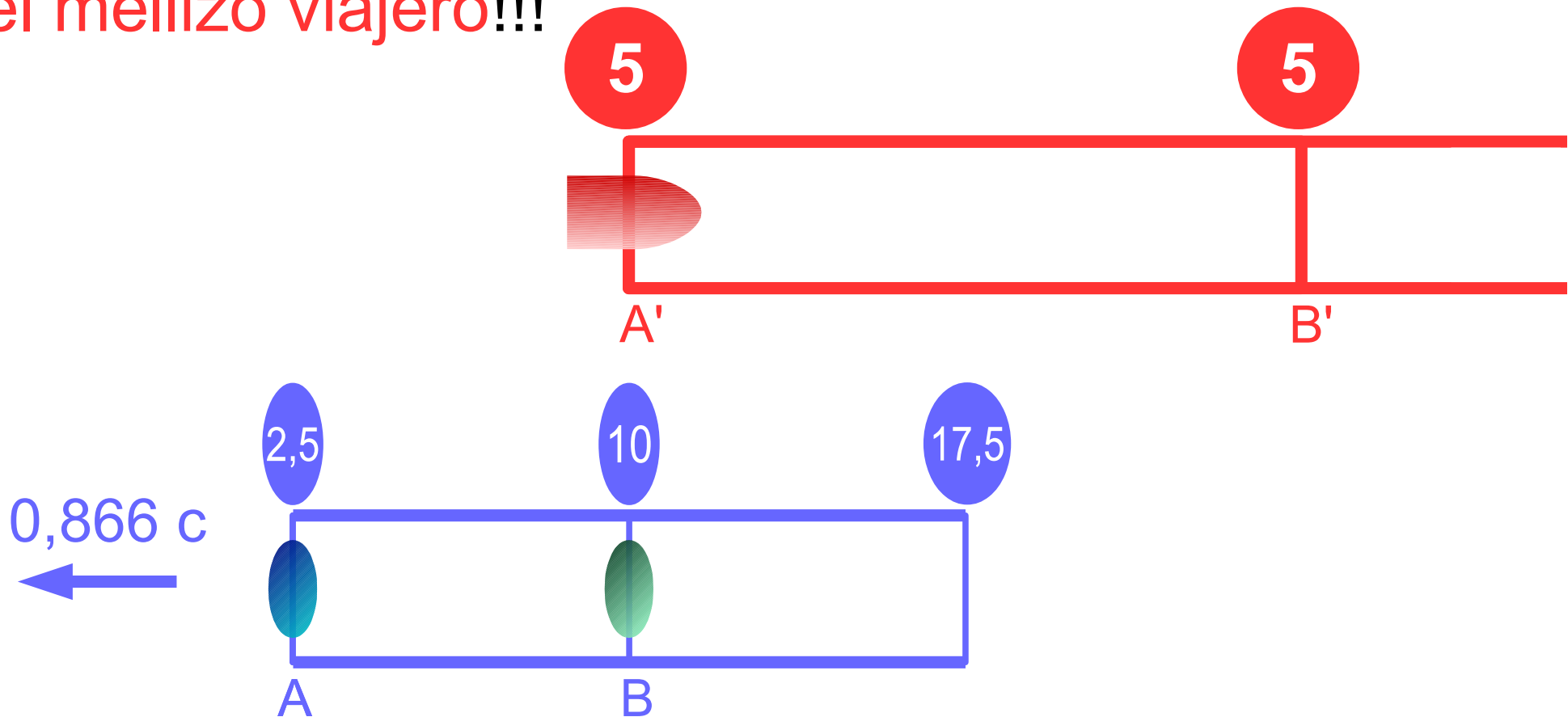
Visto desde el **s.r. de A'**, cada reloj del **s.r. de A** ha avanzado a la mitad de velocidad.

Cada uno de esos relojes ha sumado 2,5 años, tal y como muestra el dibujo:



Visto desde el **s.r. de A'**, y tal y como debía ocurrir (*Ley de Conexión*), cuando **A'** coincide con **B** los respectivos relojes marcan lo mismo que se veía desde el **s.r. de A** (5 para **A'** y 10 para **B**)

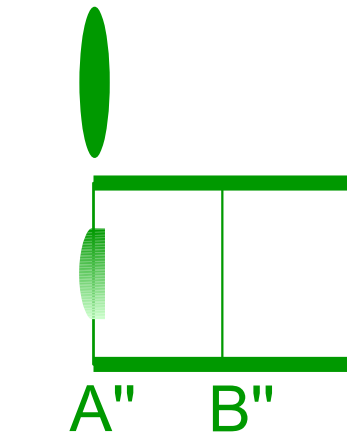
¡¡¡Por ahora, **el mellizo terrestre** es más joven que **el mellizo viajero**!!!



Ahora entra en juego el **s.r. de A''**, que se desplaza a $0,866 c$ hacia la izquierda respecto del **s.r. de A**

Aplicando la Ley de composición de velocidades relativista, obtenemos, respecto al **s.r. de A'**, la velocidad indicada.

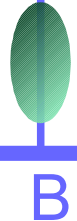
$0,98974 c$



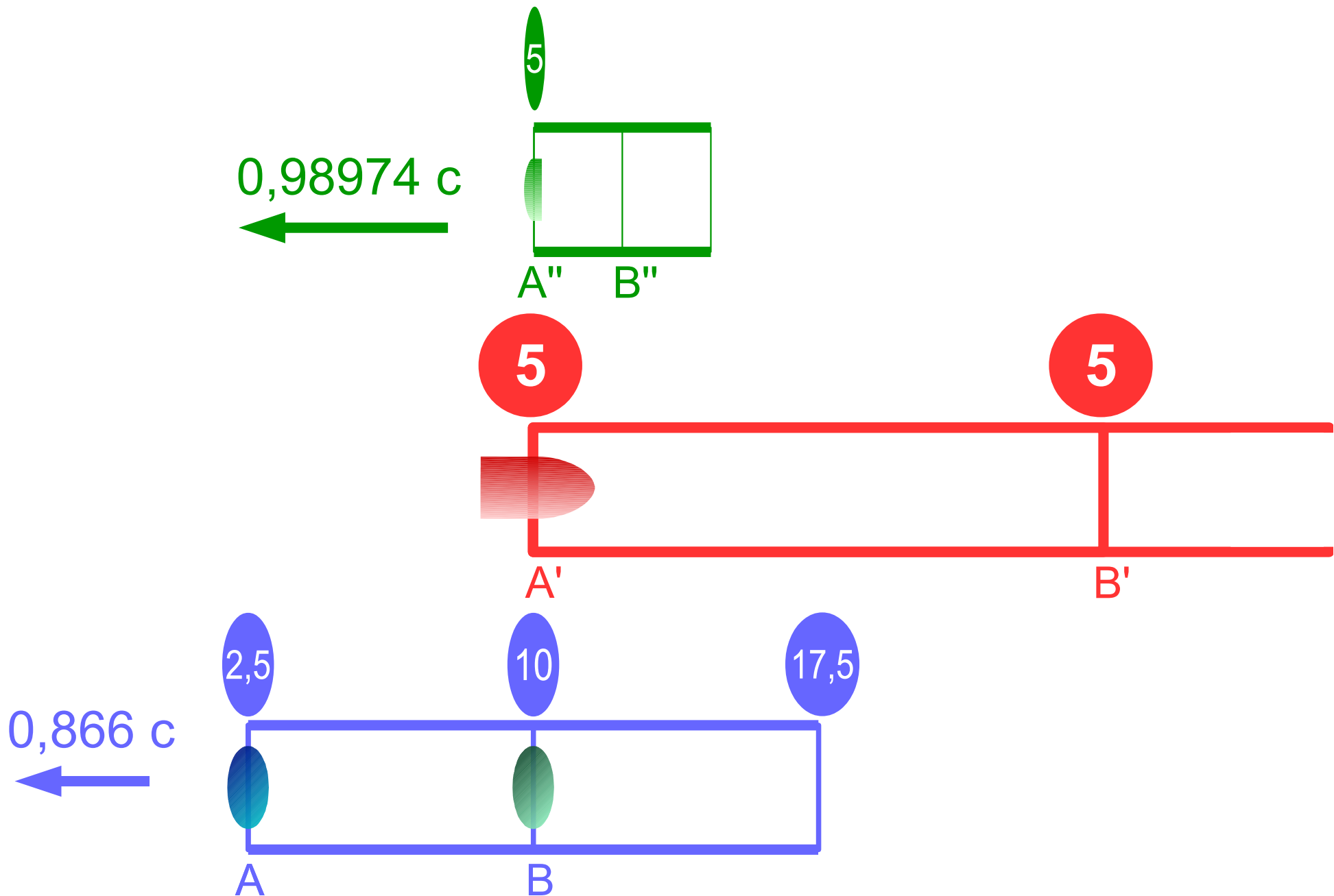
Vemos ahora las longitudes del **s.r. de A''** reducidas a poco más del 15%



$0,866 c$



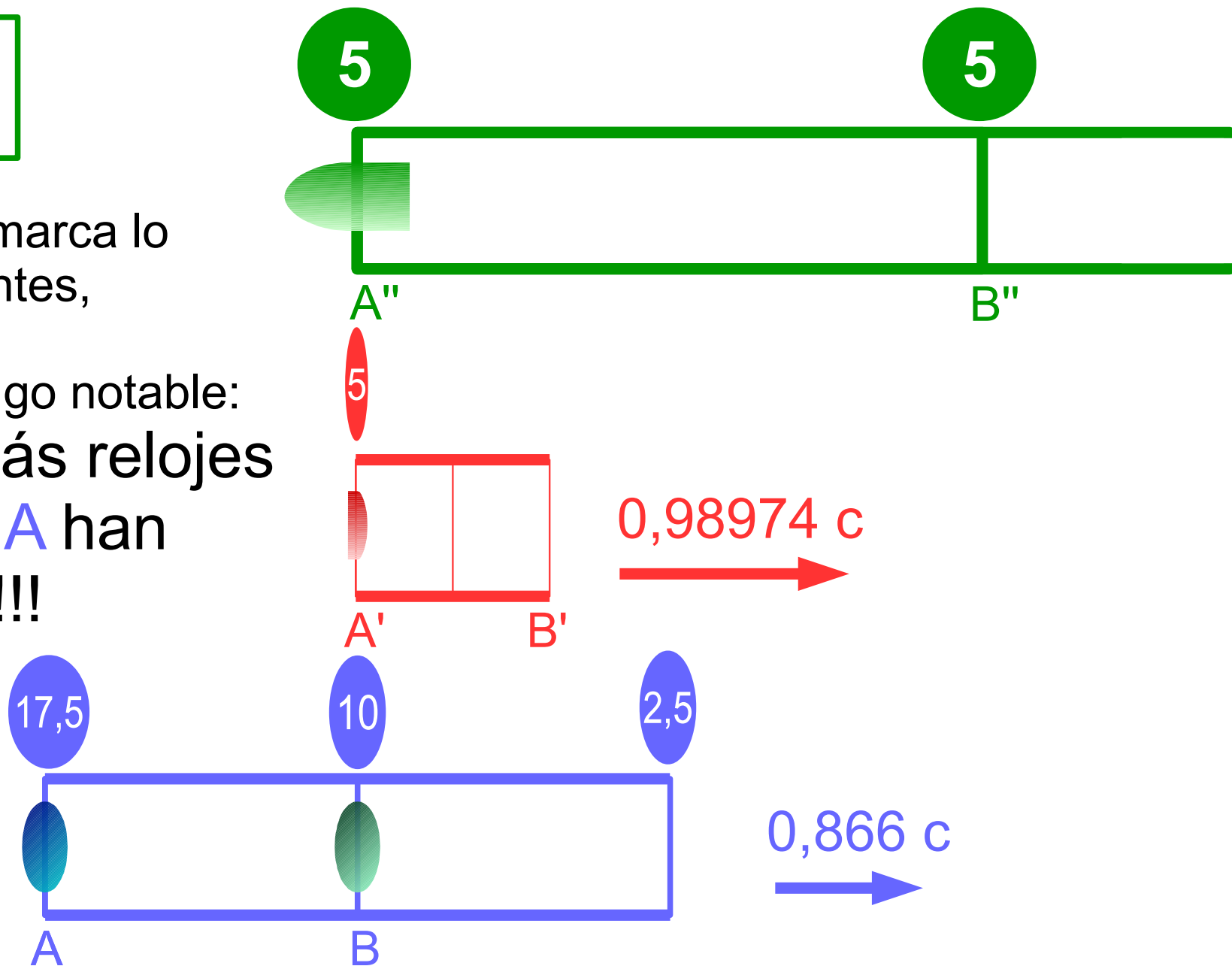
En este momento el mellizo viajero salta al s.r. de A'' ,
llevando consigo su reloj. El reloj de A'' ahora marca 5



Dibujamos ahora la situación, tal y como se vería desde el s.r. de A'' :

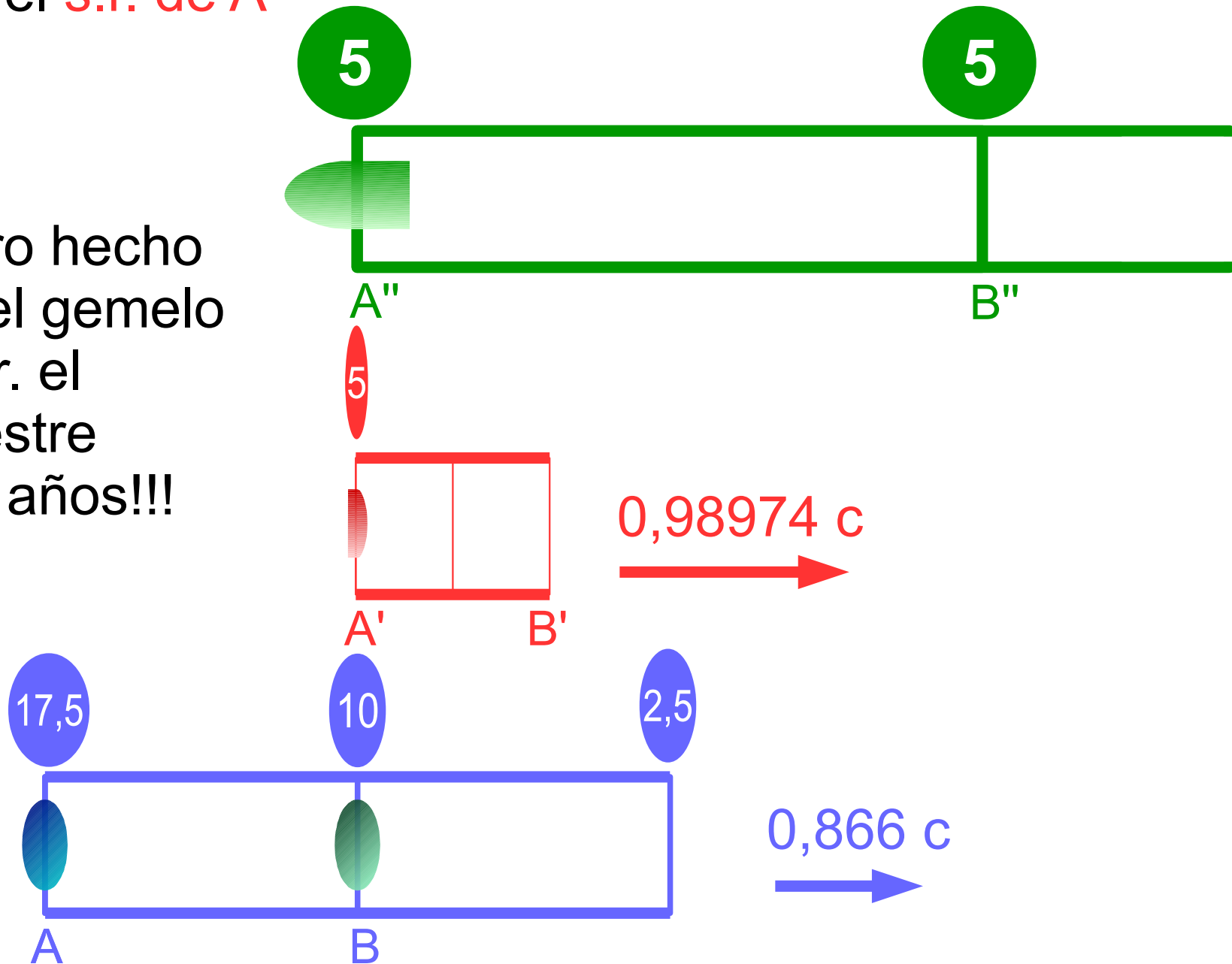
s.r. A''

El reloj de B marca lo mismo que antes, pero ahora ha ocurrido algo notable: ¡¡¡los demás relojes del s.r. de A han cambiado!!!

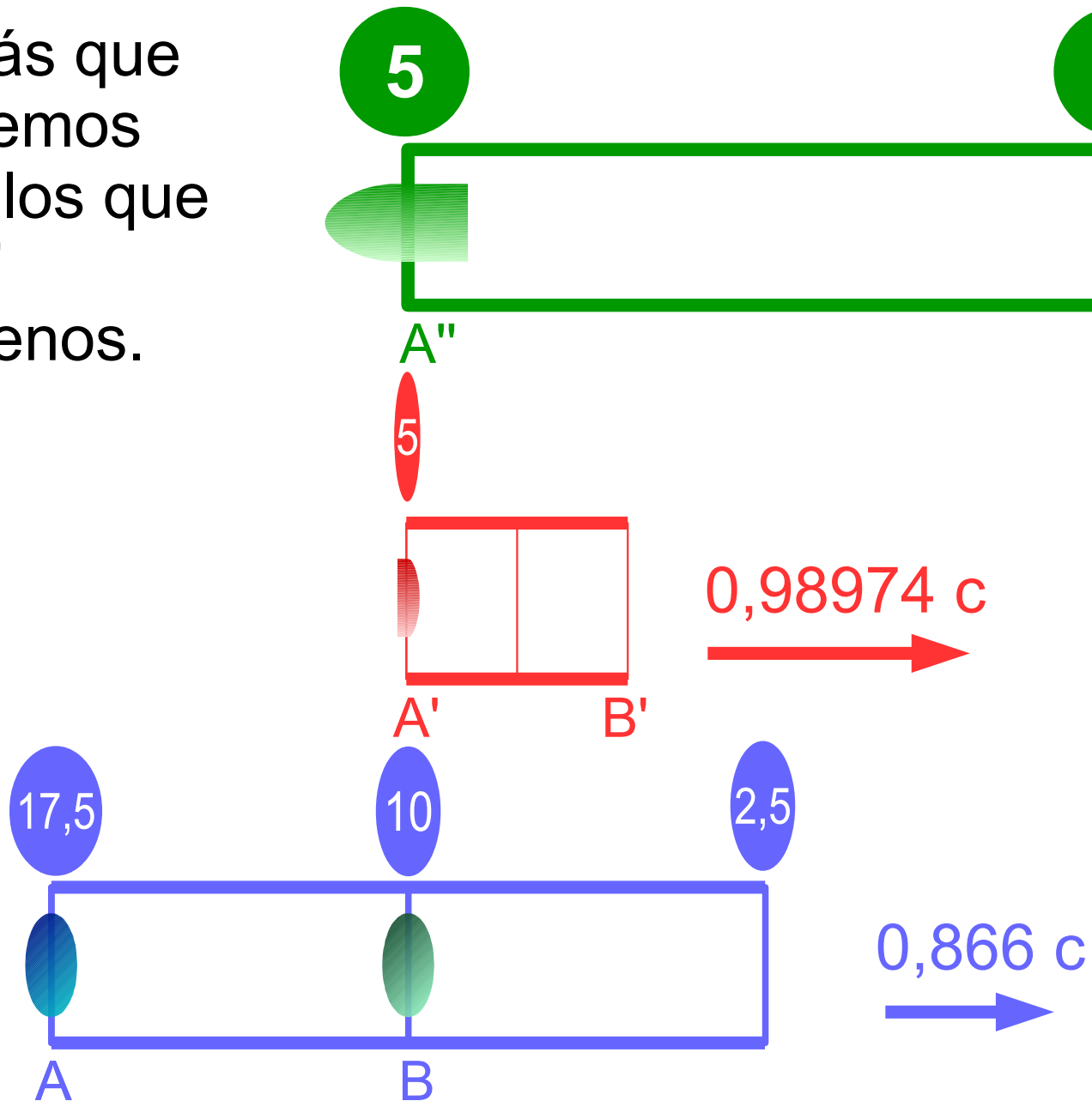


Dicho de otra forma: cuando B, A' y A'' coinciden, desde el s.r. de A'' el gemelo terrestre es 15 años más viejo que desde el s.r. de A'

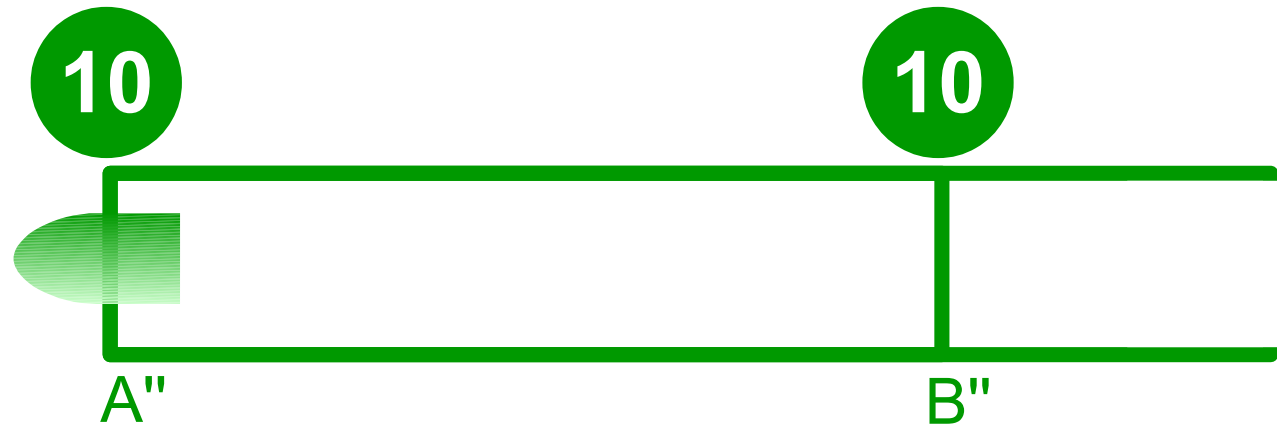
!!! Por el mero hecho de cambiar el gemelo viajero de s.r. el gemelo terrestre envejece 15 años!!!



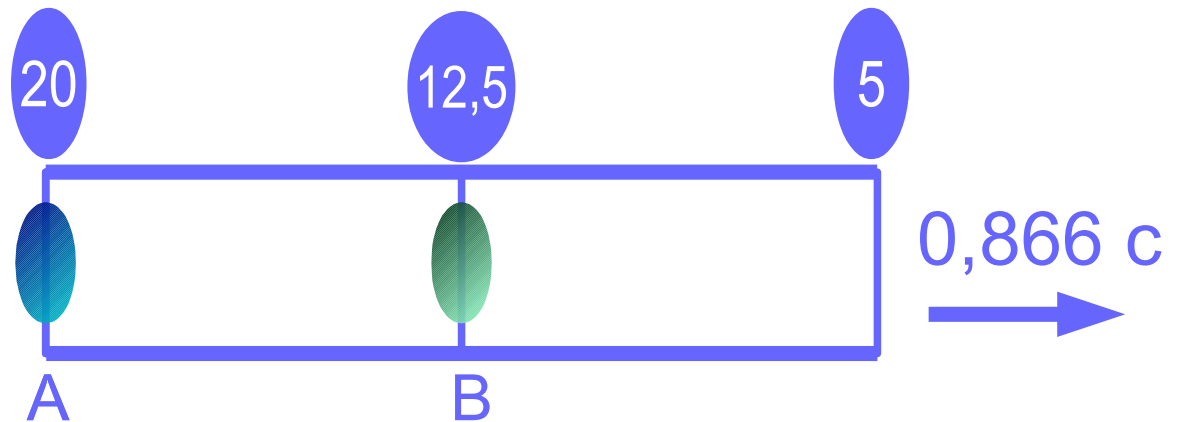
Este resultado puede parecer sorprendente. En el anexo justificamos que los relojes que (desde un s.r.) se “ven venir” marcan más que el que tenemos “al lado” y los que “se alejan” marcan menos.



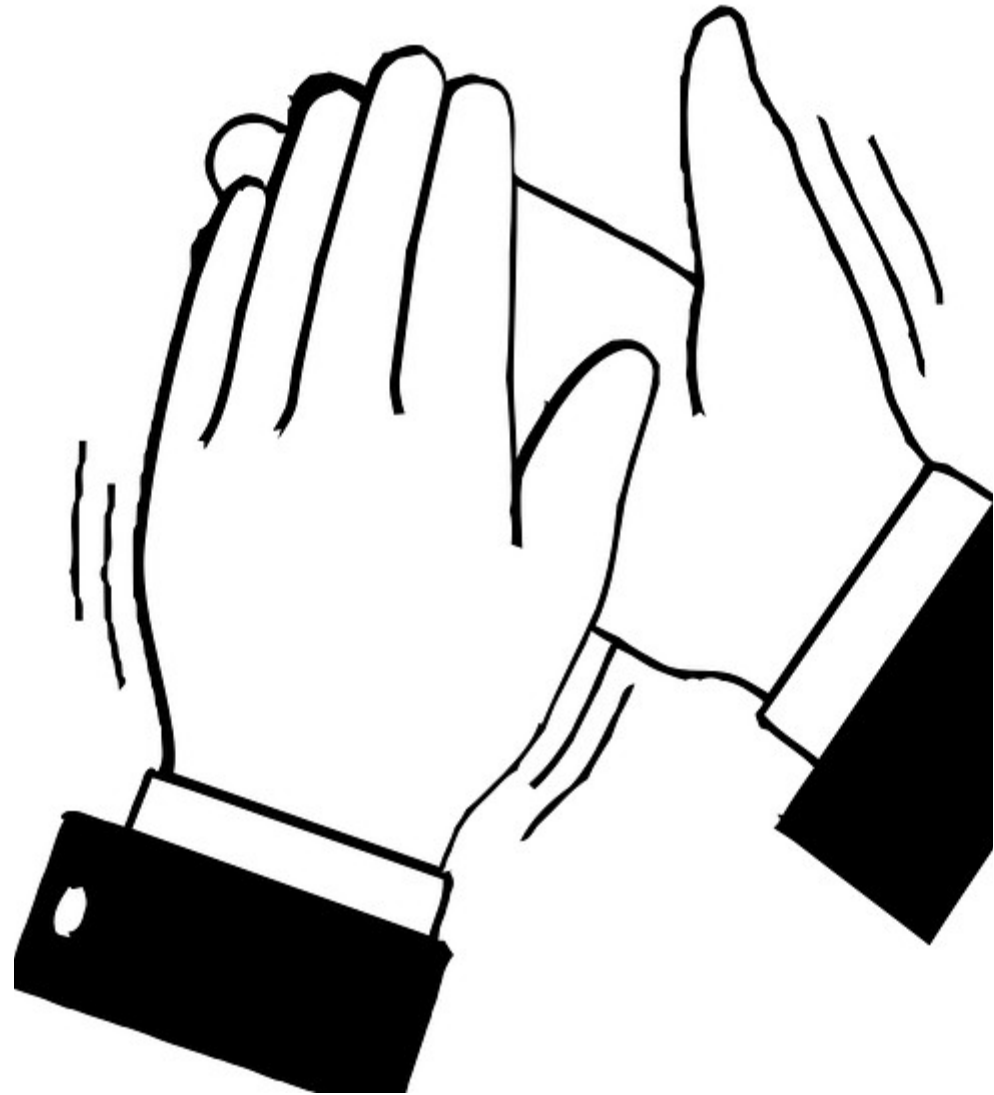
A partir de aquí, lo que sigue es bastante sencillo:
 A'' deshace el camino en 5 años y, desde el punto de vista del s.r. A'' ,
 los relojes del s.r. A
 avanzan el doble
 de lentos:



Cuando el gemelo viajero llega a la Tierra, no se sorprende de que su hermano gemelo sea mayor.



Debe de quedar ahora claro la diferencia clave entre lo que vive cada gemelo: el gemelo terrestre nunca cambia de s.r. mientras que el gemelo viajero cambia de s.r. para poder volver.



Esto es lo que permite resolver la paradoja.

Resuelta la paradoja, se comprueba nuevamente la coherencia interna de la teoría...

¡Felicidades!

Aquí termina esta introducción
a la Relatividad Especial

Pero para los que quieran más,
pueden seguir profundizando en el
anexo que sigue...




Autor: Juan Antonio Martínez-Castroverde Pérez
Licenciado en Física
Profesor de Secundaria y Bachillerato

Traducción al Inglés: María José Lorenzana Sánchez

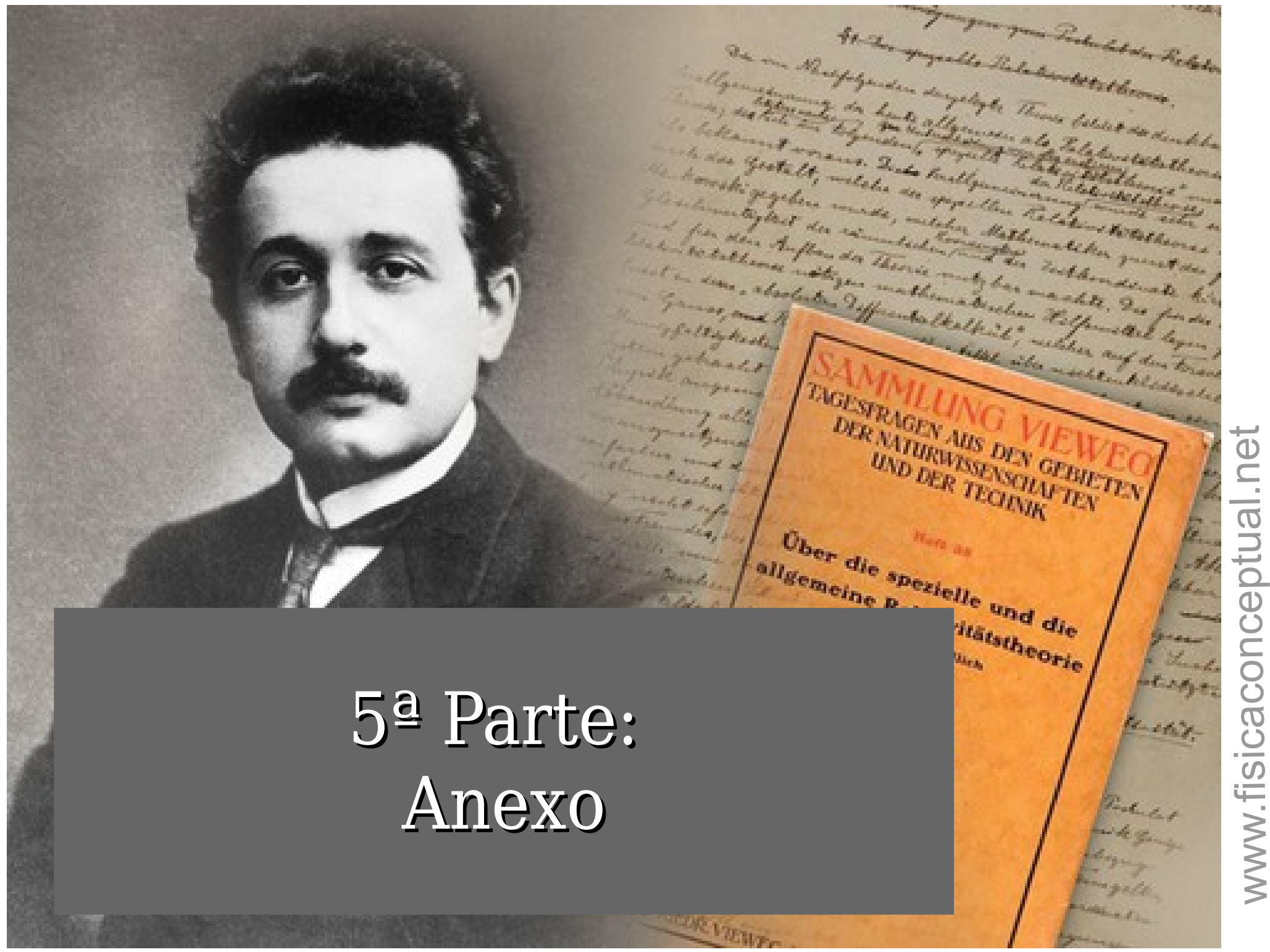


Esta presentación está publicada bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>)

Permisos más allá del alcance de esta licencia se pueden solicitar en: <http://www.fisicaconceptual.net>

A composite image featuring a black and white portrait of Albert Einstein on the left. On the right, there is a photograph of the cover of a book titled 'SAMMLUNG VIEWEG TAGESTRAGEN AUS DEN GEBIETEN DER NATURWISSENSCHAFTEN UND DER TECHNIK'. The book cover is orange and contains the text 'Herausgegeben von der Naturforschenden Versamml. der Naturwissenschaftler in Wien', 'Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie', 'Vom Gemeinverständlich', 'Von A. Einstein', and '1. Auflage'. The background of the entire image is a faded, handwritten document in German, with visible words like 'Relativitätstheorie' and 'Mathematiker'.

Introducción Conceptual a la Relatividad Especial



5ª Parte: Anexo

Anexo

Para el que quiera seguir profundizando

¿Tienes alguna pregunta?

Quizá encuentres la respuesta
en lo que sigue



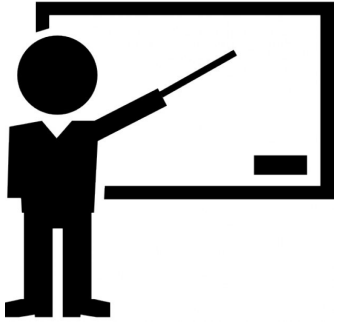


Duda:

Si desde una nave espacial A, vemos acercarse otra nave espacial B a una velocidad v , un observador de B, ¿está de acuerdo en que nuestra nave se acerca a la suya a esa misma velocidad v ?

Probablemente jamás hubiéramos dudado de esto, pero ya no podemos fiarnos de nada...

La respuesta es que sí: los dos observadores están de acuerdo en que su respectiva velocidad relativa es v . Este resultado ya lo habíamos utilizado en razonamientos previos.



Demostración:
La demostración tiene que ver
con el Primer Postulado:
no hay ningún s.r. privilegiado.

Como los dos s.r. son iguales a todos los efectos
estamos ante una situación simétrica.

No hay, por tanto, ningún motivo por el que un
observador mida una velocidad distinta a la del otro.

Así las cosas, la única posibilidad lógica es que
los dos midan lo mismo (v).



Duda:

¿Se mantiene el Principio de Causalidad?
Es decir: ¿Todo efecto viene precedido
por la causa que lo provoca?

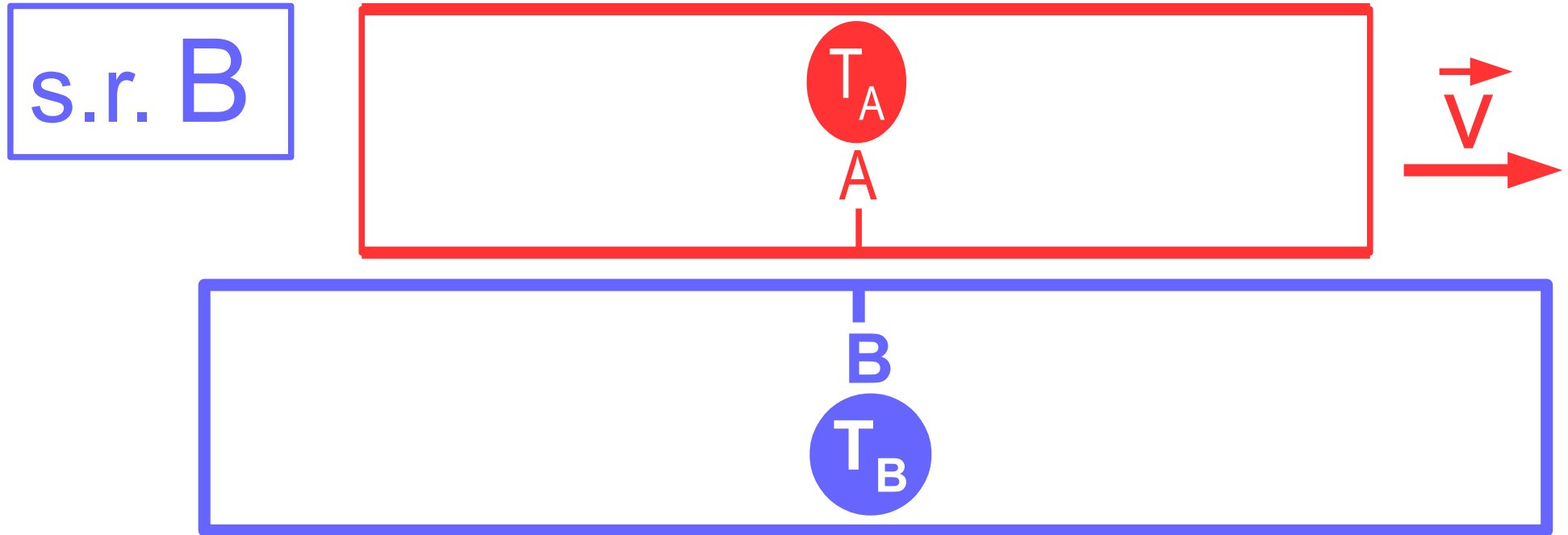
Respuesta: Sí. El Principio de Causalidad es tan básico que no se cuestiona. De hecho, en lo que sigue, se utilizará este principio para hacer deducciones.

Además, una de las pruebas a las que se somete a la Teoría Especial de la Relatividad, es comprobar que sus conclusiones no violan nunca el Principio de Causalidad.



Duda:

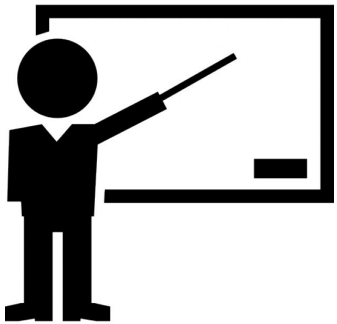
Supongamos que, desde el s.r. B, vemos que cuando la marca A coincide con la marca B el reloj en A marca T_A y el reloj en B marca T_B .



Desde el s.r. A, cuando la marca B coincide con la marca A

¿Veríamos que el reloj en A marca T_A
y el reloj en B marca T_B ?

Respuesta: Sí. Cuando la marca **A** coincide con la marca **B** el reloj en **A** y el reloj en **B** tienen un valor que no depende del s.r. desde el que se mire.



Demostración:

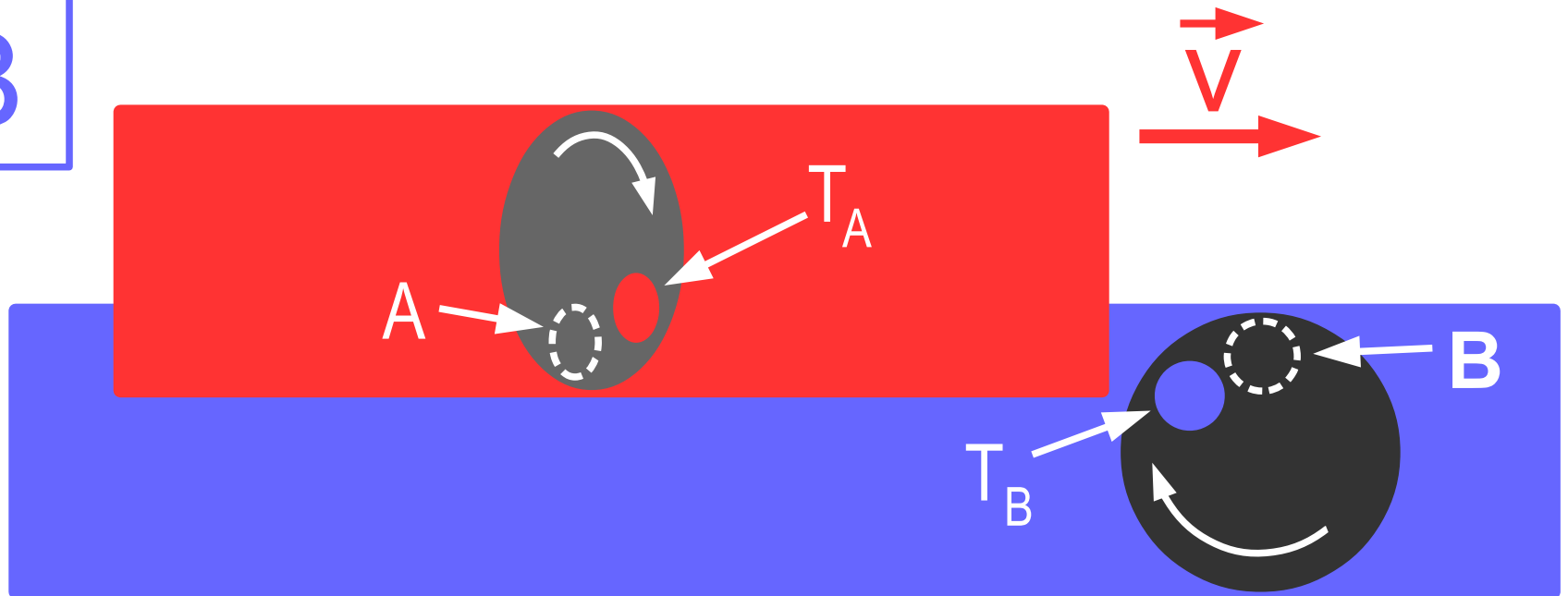
Debe ser así por el Principio de Causalidad. Si no fuera cierto, podríamos encontrar situaciones donde se violaría este principio.

Imaginemos, por ejemplo, el siguiente experimento mental:

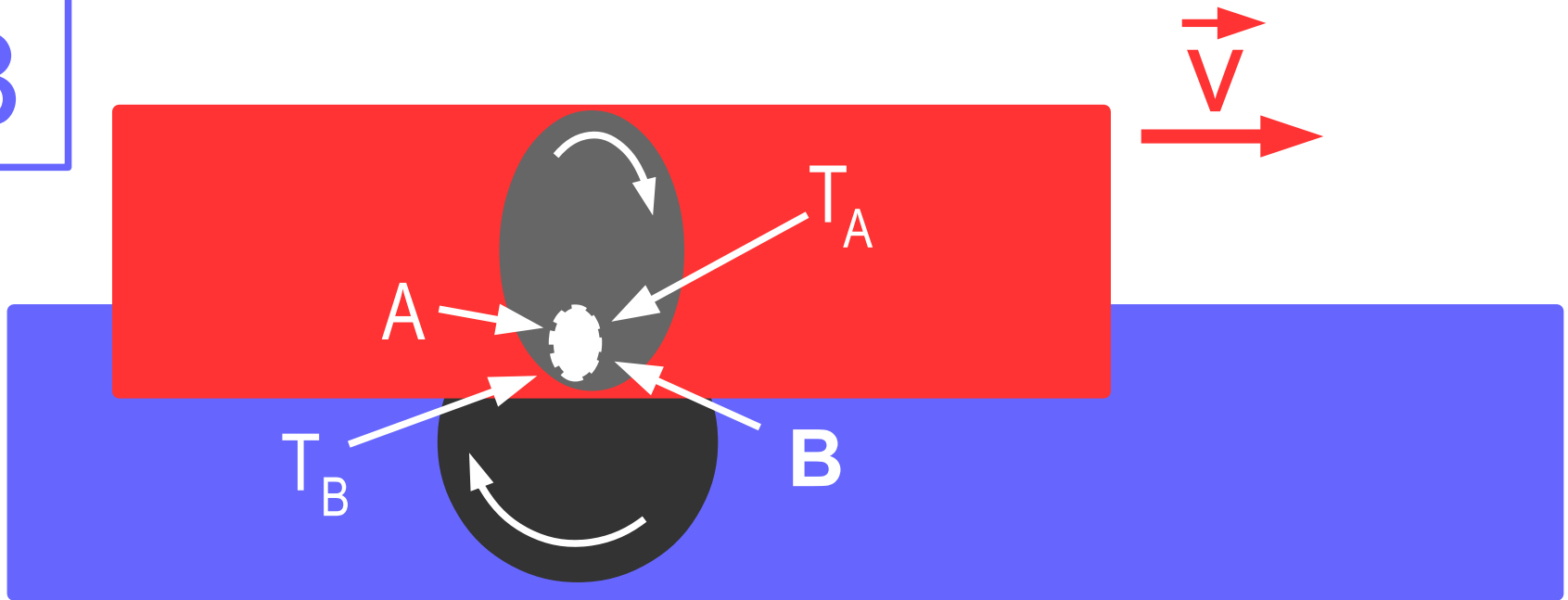


El punto **A** y el punto **B** son ahora dos agujeros y los relojes que marcan T_A y T_B son ahora dos círculos grises con sendos agujeros que giran, indicando con el giro el tiempo transcurrido.

s.r. B



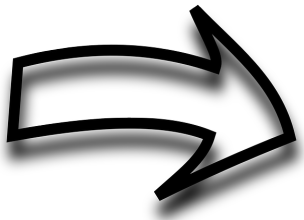
s.r. B



Supongamos que desde el **s.r. B** los 4 agujeros coinciden, dejando pasar luz por el agujero común.

Supongamos que esa luz que pasa activa un mecanismo que produce una explosión.

Ahora bien, esa explosión debe ocurrir desde cualquier s.r., y como no puede haber efecto (la explosión) sin causa (la coincidencia de los 4 agujeros), esa causa debe estar presente en todos los s.r.



Por tanto, en cualquier s.r. cuando el agujero A coincide con el agujero B las horas en sus respectivos relojes serán T_A y T_B .

A este resultado le hemos llamado **Ley de Conexión**, ya que “conecta” el valor de relojes que están en distintos s.r.



Duda:

¿El tiempo en todos los puntos de un s.r., visto por un observador de ese s.r., es siempre el mismo?

Respuesta:

Sí, si consideramos que eso quiere decir que podemos hacer que todos los relojes de ese s.r. estén sincronizados para un observador de ese s.r.

En la práctica esto se puede conseguir de la siguiente forma: hay muchos observadores en ese s.r. cada uno con un reloj. Cuando todos vean que el primer observador pone su cronómetro a cero, todos lo pondrán. Como la luz tarda un tiempo en llegarles deberán sumar en su reloj ese tiempo.



Duda:

¿Qué marcan los relojes en otro s.r.?

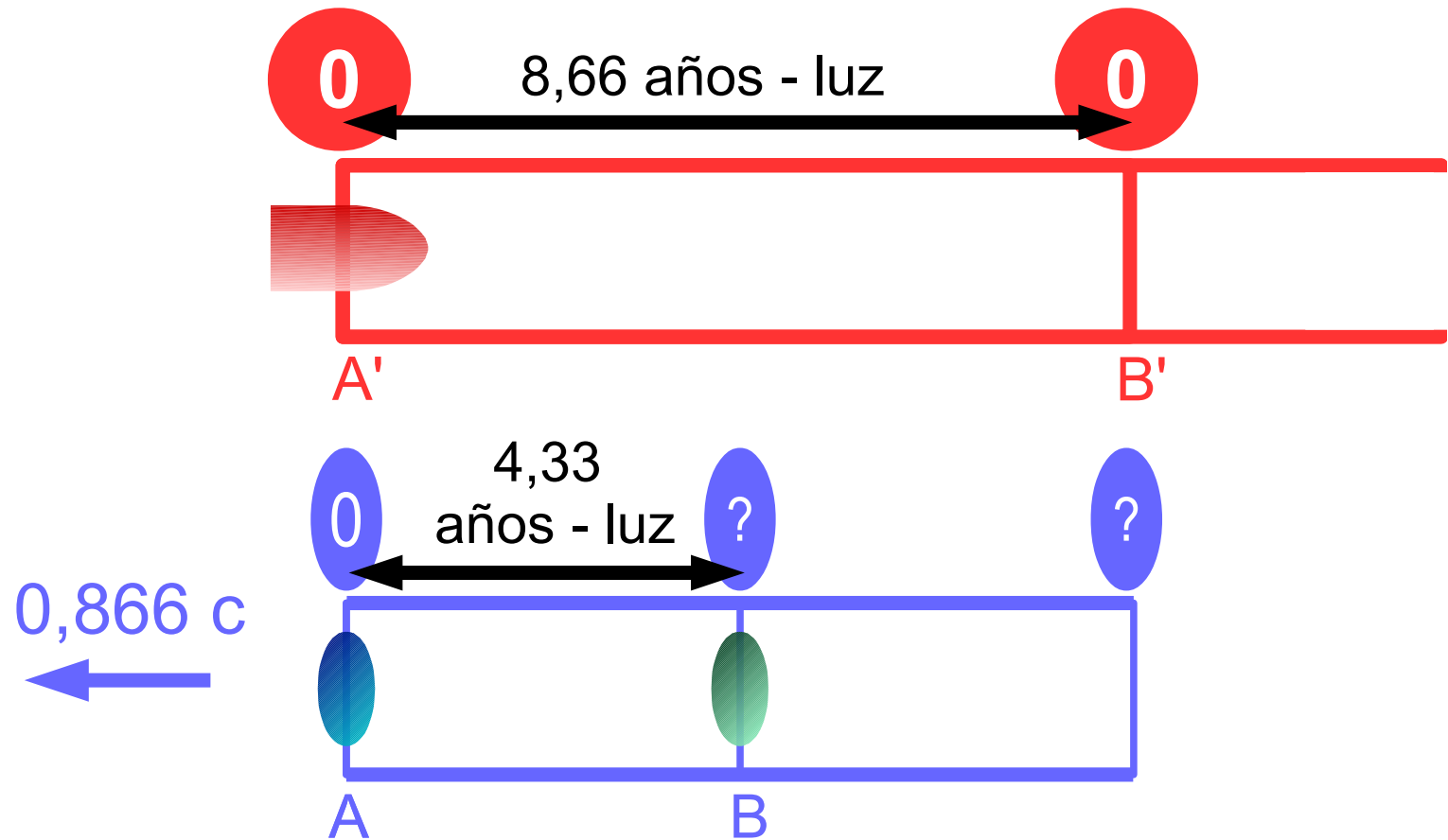
Para resolver la paradoja de los gemelos, además de cambiar de s.r. el gemelo viajero, ha sido clave los valores que tenían los distintos relojes en el s.r. de los planetas.

¡Importante! No olvidemos que esos relojes han sido previamente sincronizados.

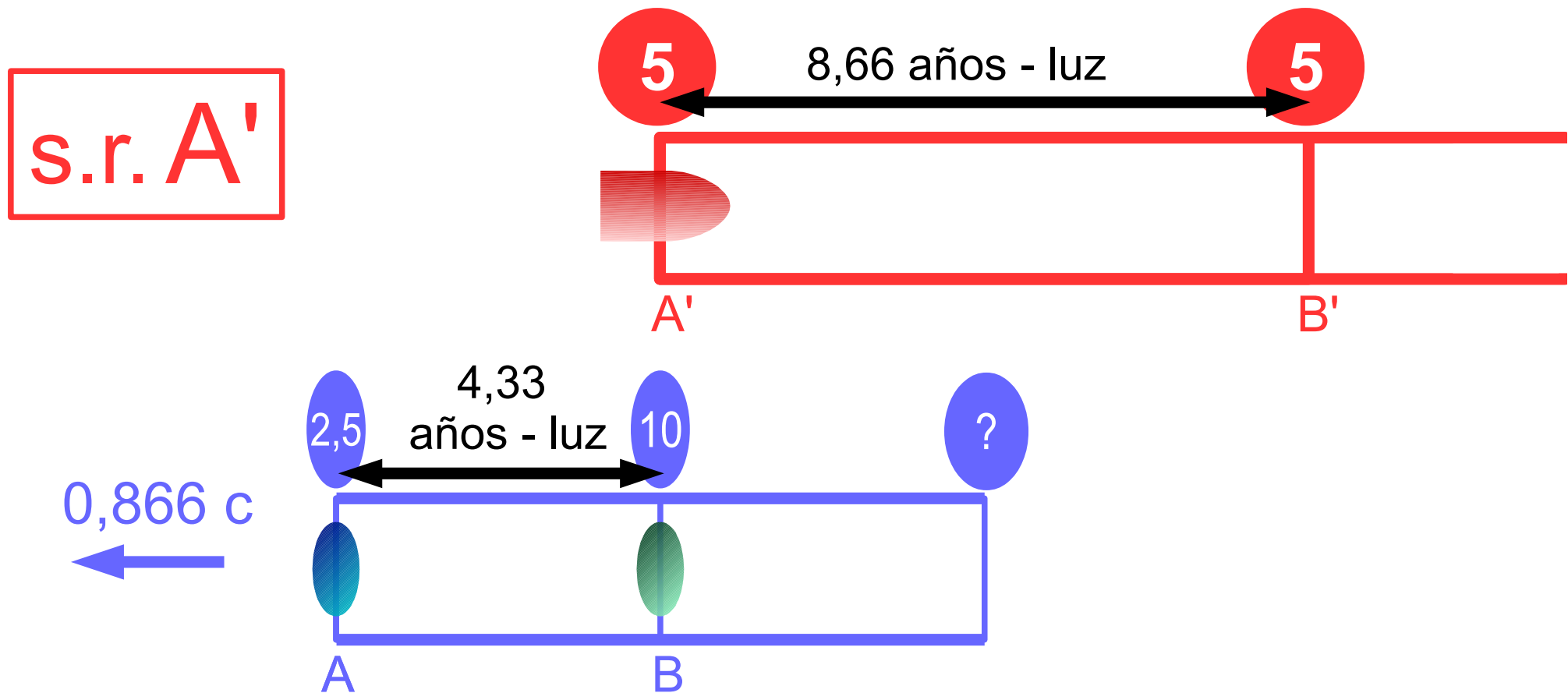
Lo que ocurre es tan sorprendente, sobre todo cuando el gemelo viajero cambia de nave, que no está de más comprobar que los valores mostrados eran correctos, y que no podían ser otros.

Al partir de la Tierra, visto desde el **s.r. de A'**, los relojes de los dos s.r. marcan lo indicado (el cronómetro se pone a cero cuando **A** coincide con **A'**):

s.r. A'

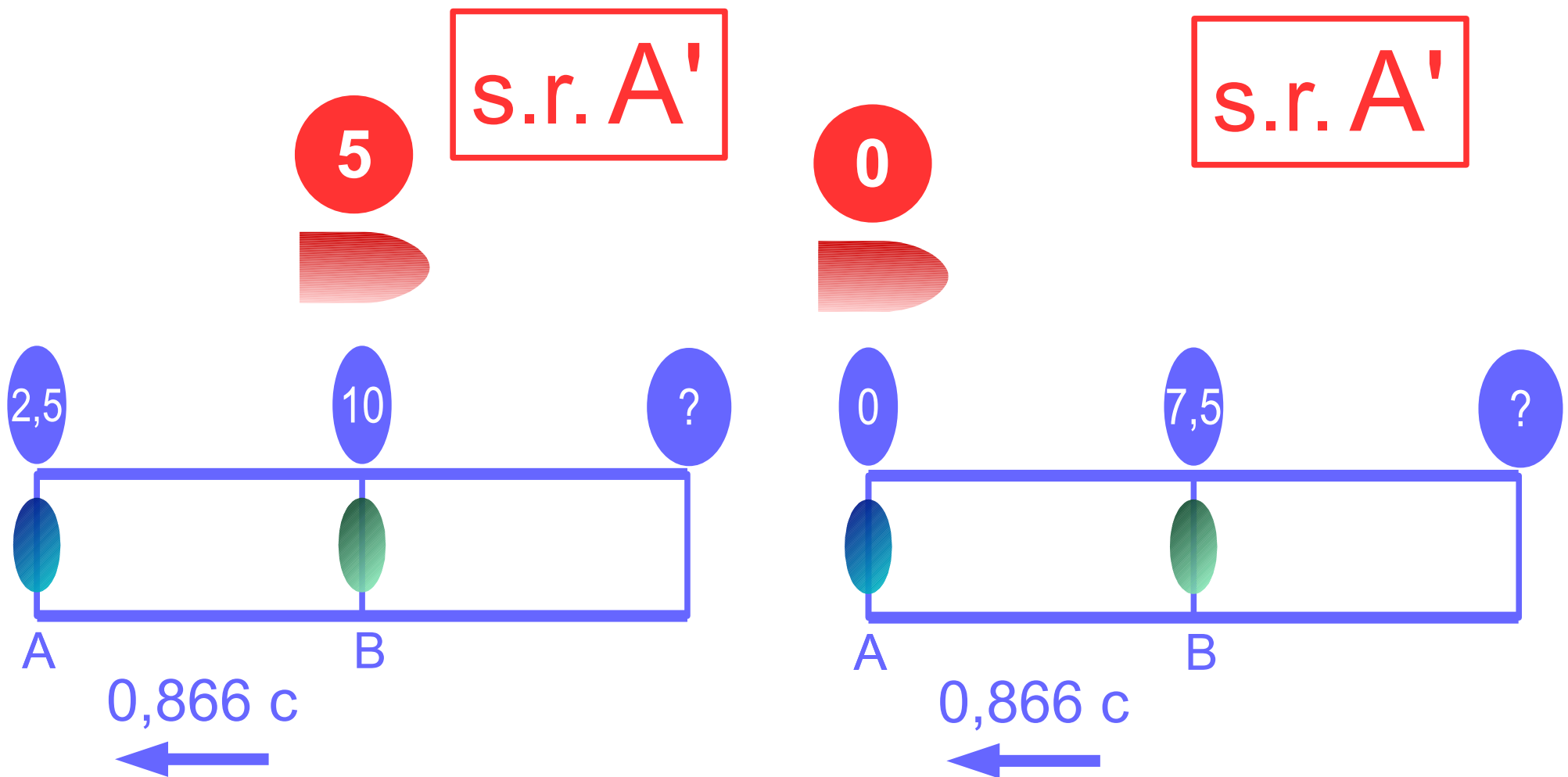


Al llegar al planeta B, visto desde el **s.r. de A'**, los relojes de los dos s.r. marcan lo indicado. Que en B marque 10 es necesario por la Ley de Conexión (un observador del **s.r. A** ve esos valores para B y A')

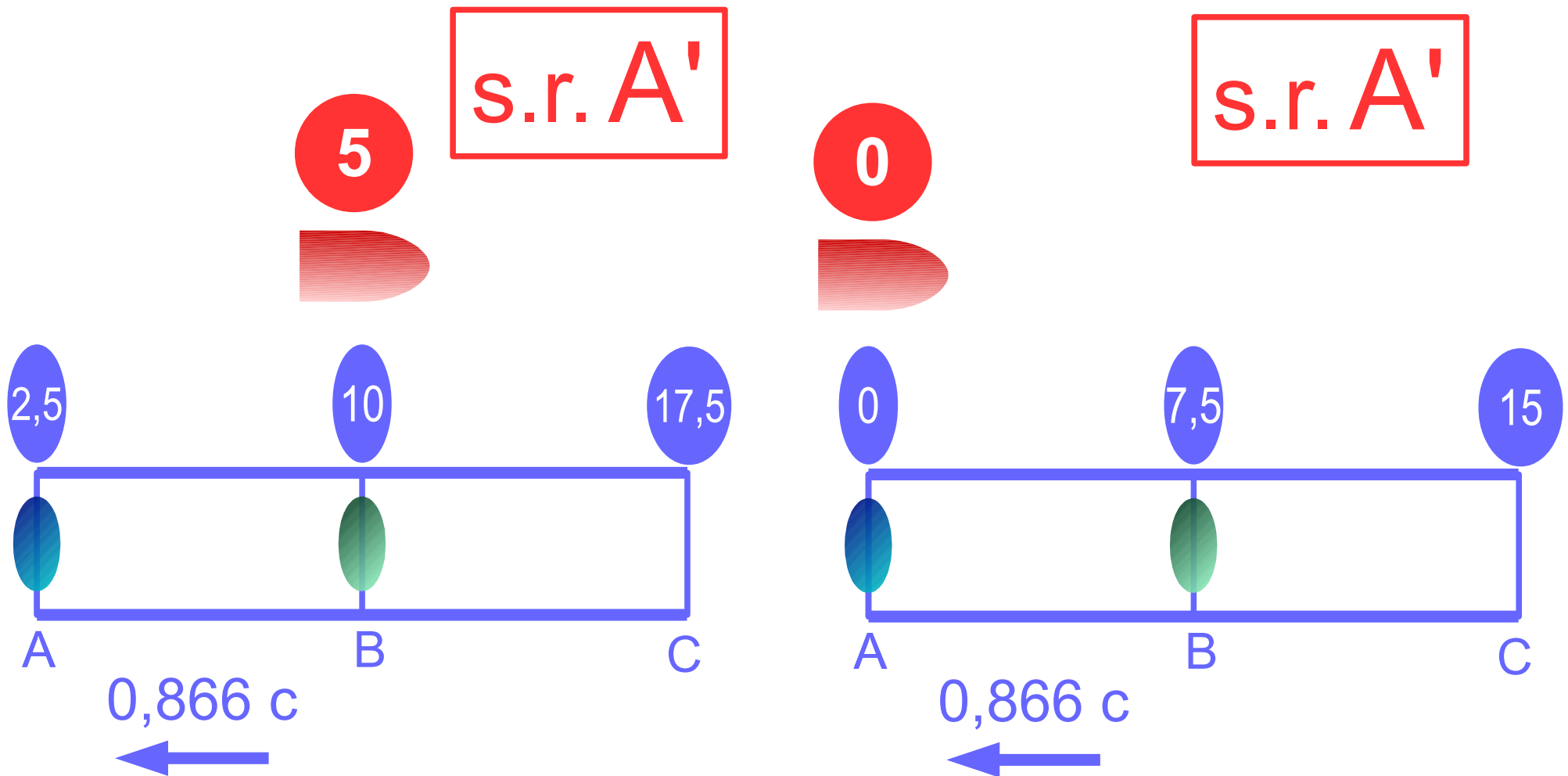


En **A** marca 2,5 porque, visto desde el **s.r. de A'**, el reloj de **A** avanza la mitad de rápido (y pasa de 0 a 2,5).

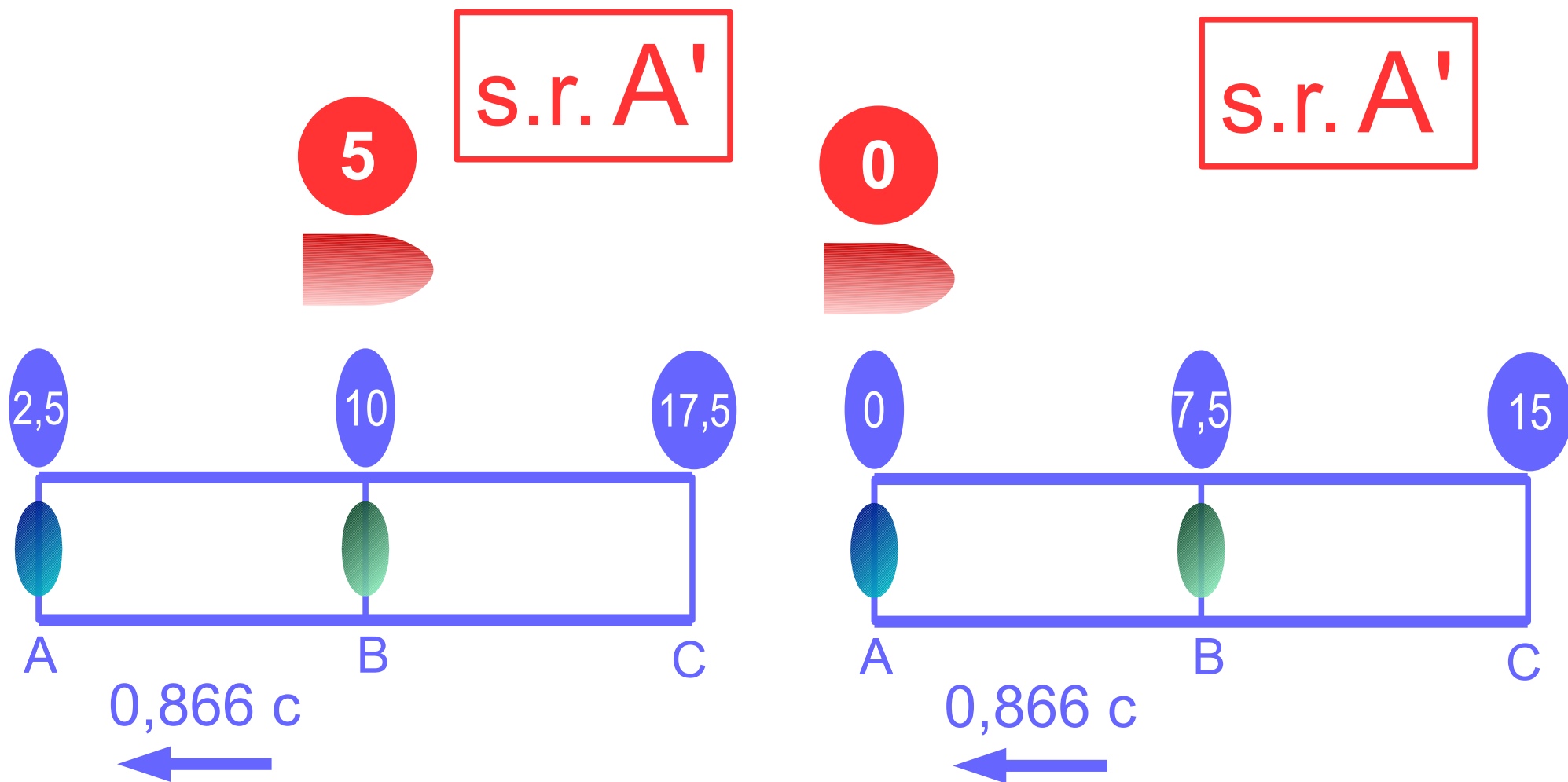
Al igual que el reloj de **A** pasa de 0 a 2,5 (visto desde el **s.r. de A'**) el reloj de **B** también ha avanzado la mitad de rápido que el de **A'** y su valor se incrementó en 2,5 años, luego al partir de la Tierra debía marcar 7,5 años...



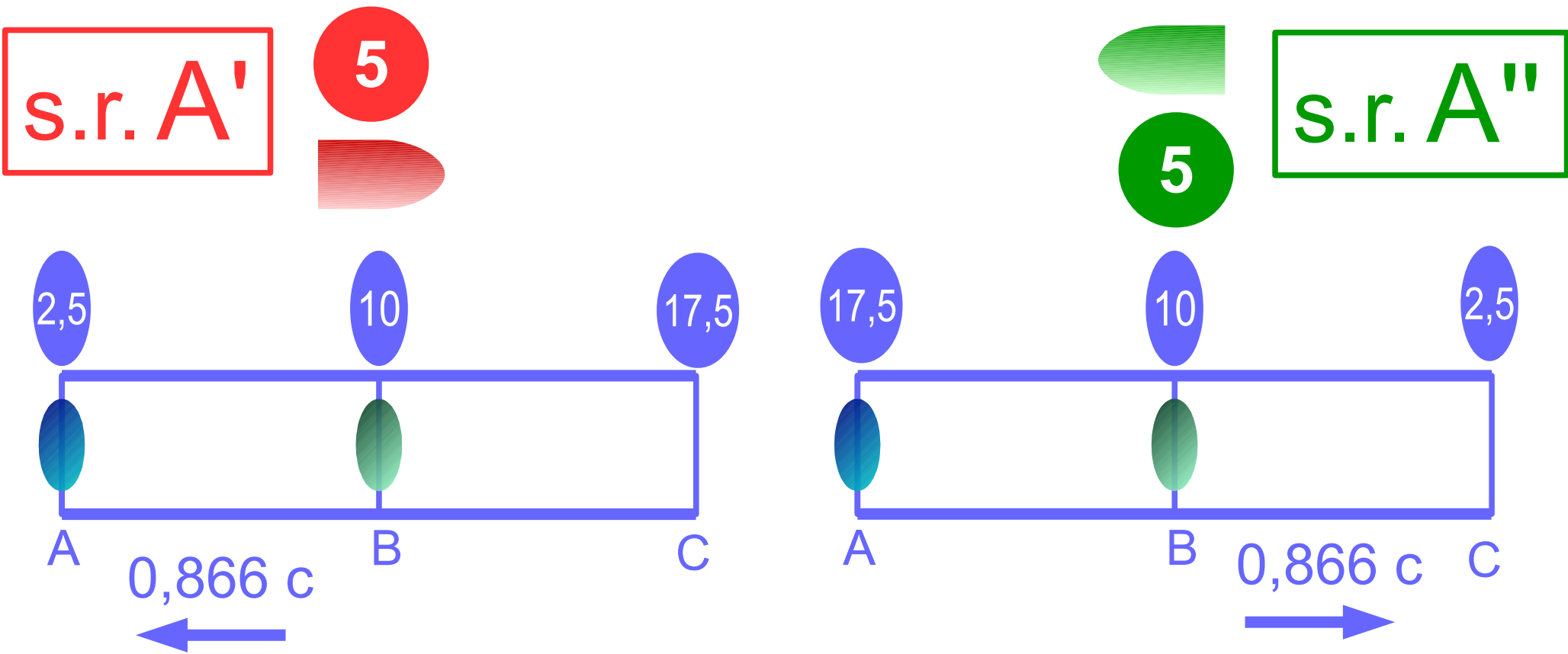
El valor de los relojes del punto **C** lo ponemos por simetría (si de **A** a **B** avanza 7,5 años, no hay ningún motivo para que de **B** a **C** varíe de distinta forma)



Vemos que los relojes que “están por venir” marcan más años (7,5) que el reloj que tenemos al lado, mientras que los relojes “que ya pasaron” siempre marcan menos años (7,5 menos) que el de al lado.



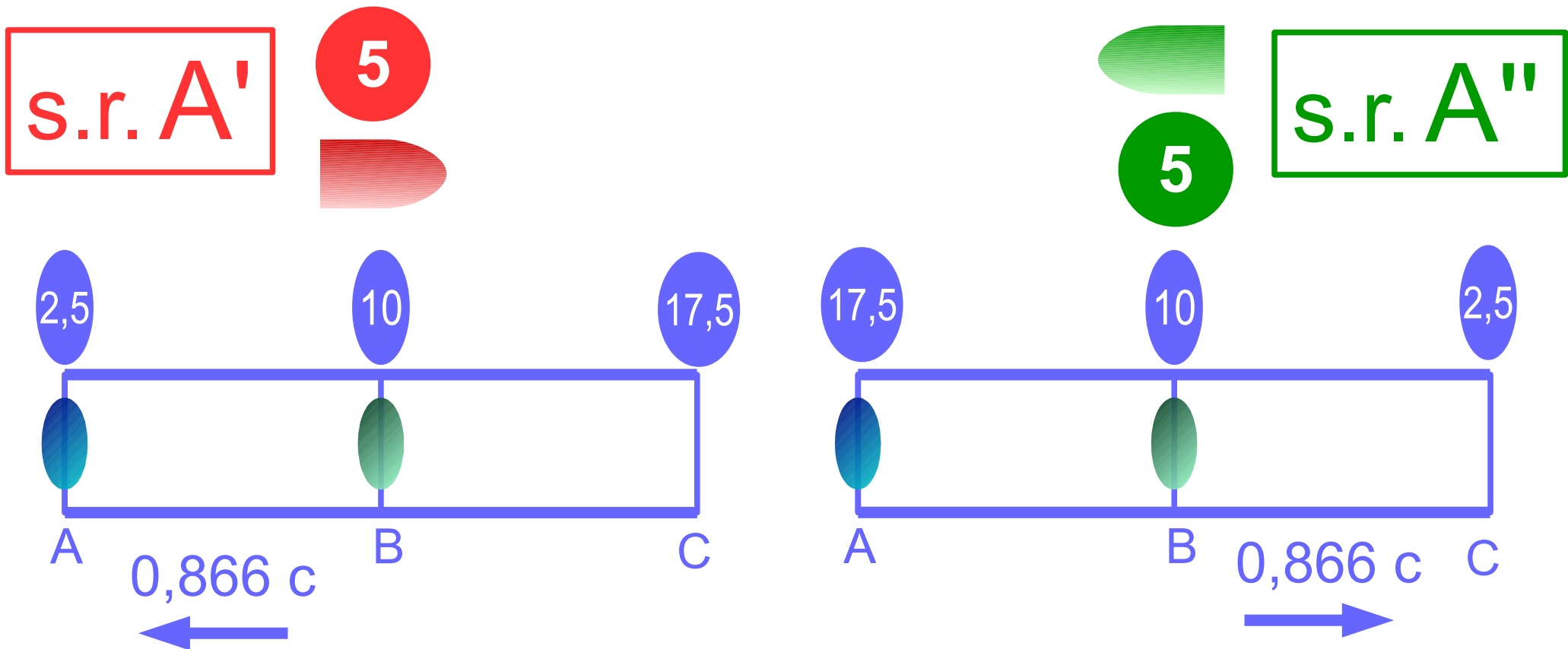
Por eso, al cambiar de nave, el gemelo terrestre debe envejecer “de golpe” según lo ve el gemelo viajero. No hay otra posibilidad. Otra forma de verlo: según la Ley de Conexión, al finalizar el viaje, ambos gemelos verán que en el reloj de la Tierra han pasado 20 años y en el de la nave 10. Para conseguir esto es necesario que la nave verde emprenda el regreso “viendo” 17,5 en el reloj de A.



Resumiendo:

La Ley de Conexión (y, por tanto, el Principio de Causalidad) junto con la dilatación del tiempo, implican que los relojes “del otro s.r.” varían su valor de forma análoga a lo que hemos comentado.

De paso, hemos vuelto a probar que la simultaneidad es relativa (los relojes, en el s.r. A, están sincronizados).



Y ahora sí...

The End

A continuación, los créditos.

Créditos



<http://www.agenciasinc.es/Entrevistas/Diez-preguntas-para-entender-la-teoria-de-la-relatividad-general-de-Einstein> licencia

Creative Commons BY 3.0



F.A.Q. <http://humewoodcouncil.com/f-a-q/>



Imagen del faro: <http://elfarofomentolector.blogspot.com.es/>



Imagen del paracaidista:

<https://recortespalomon.wordpress.com/2013/06/28/que-empiezen-las-susto-olimpiadas/>



Diana: <https://www.timtul.com/>

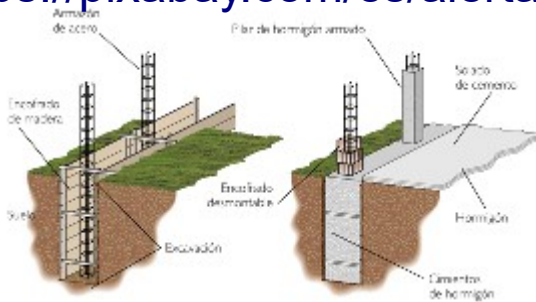


Flecha <https://pixabay.com/es/derecho-flecha-siguiente-297788/>



Exclamación (alerta)

<https://pixabay.com/es/alerta-bot%C3%B3n-se%C3%B1al-s%C3%ADmbolo-ic%C3%B3n-309217/>



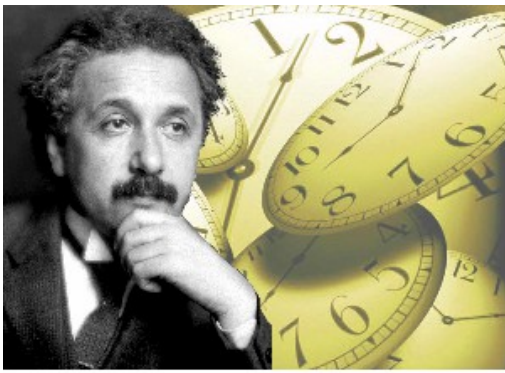
Cimientos:

<http://elmaestrodecasas.blogspot.com.es/2011/06/construccion-de-cimientos.html>

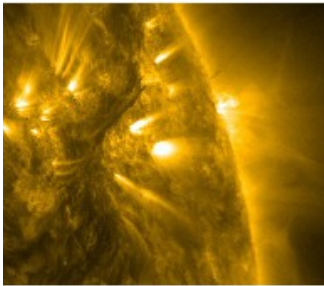


Engranajes:

<https://pixabay.com/es/pi%C3%B1ones-engranajes-parrillas-gris-306402/>



<https://sciencesprings.wordpress.com/2014/04/18/from-fermilab-proving-special-relativity-episode-3/>



Dark Filament of the Sun

<https://apod.nasa.gov/apod/ap100522.html>

Créditos: NASA / Goddard / SDO AIA Team



Cerebro y cabeza:

<http://icon-icons.com/es/icono/la-cabeza-el-cerebro-las-ciencias-la-ciencia/53022#96>

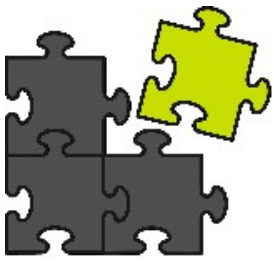


Interrogante:

<https://pixabay.com/es/ayuda-info-pregunta-questionmark-147419/>



Pensar <http://educainternet.es/pictures/3568>



Puzzle

<https://pixabay.com/es/rompecabezas-piezas-pieza-concepto-308908/>



Botón de Verificación

<https://pixabay.com/es/aprobado-bot%C3%B3n-de-verificaci%C3%B3n-151676/>



Blue Marble, Eastern Hemisphere

Credit: NASA

<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=84214>



Botón HELP

<https://pixabay.com/es/ayuda-bot%C3%B3n-rojo-de-emergencia-153094/>



Paracaídas que no se abre:

<https://glubdark.files.wordpress.com/2010/08/c2a1mi-paracaidas-no-se-abreeeee.png>



Banco para sentarse:

<https://pixabay.com/es/banco-banco-del-parque-sentarse-1992997/>



Aplauso

<https://pixabay.com/es/aplausos-palmas-manos-negro-bravo-297115/>



The End is Near:

<http://onlyconnectparke.blogspot.com.es/2015/05/the-end-is-near-do-you-agree.html>



Espeleóloga:

<https://pixabay.com/es/otras-cosas-gurtov-astronauta-metro-978064/>

Cueva:

<https://pixabay.com/es/cueva-taladro-monta%C3%B1a-145615/>



Trabajador con dudas

http://www.freepik.es/vector-gratis/trabajador-con-dudas_834551.htm



Profesor apuntando pizarra

http://www.freepik.es/iconos-gratis/profesor-apuntando-pizarra_726348.htm

The End

The End <https://openclipart.org/detail/246761/the-end>

Autor: Juan Antonio Martínez-Castroverde Pérez
Licenciado en Física
Profesor de Secundaria y Bachillerato

Traducción al Inglés: María José Lorenzana Sánchez



Esta presentación está publicada bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>)

Permisos más allá del alcance de esta licencia se pueden solicitar en: <http://www.fisicaconceptual.net>