

DILATACIÓN DEL TIEMPO CONTRACCIÓN DE LONGITUDES

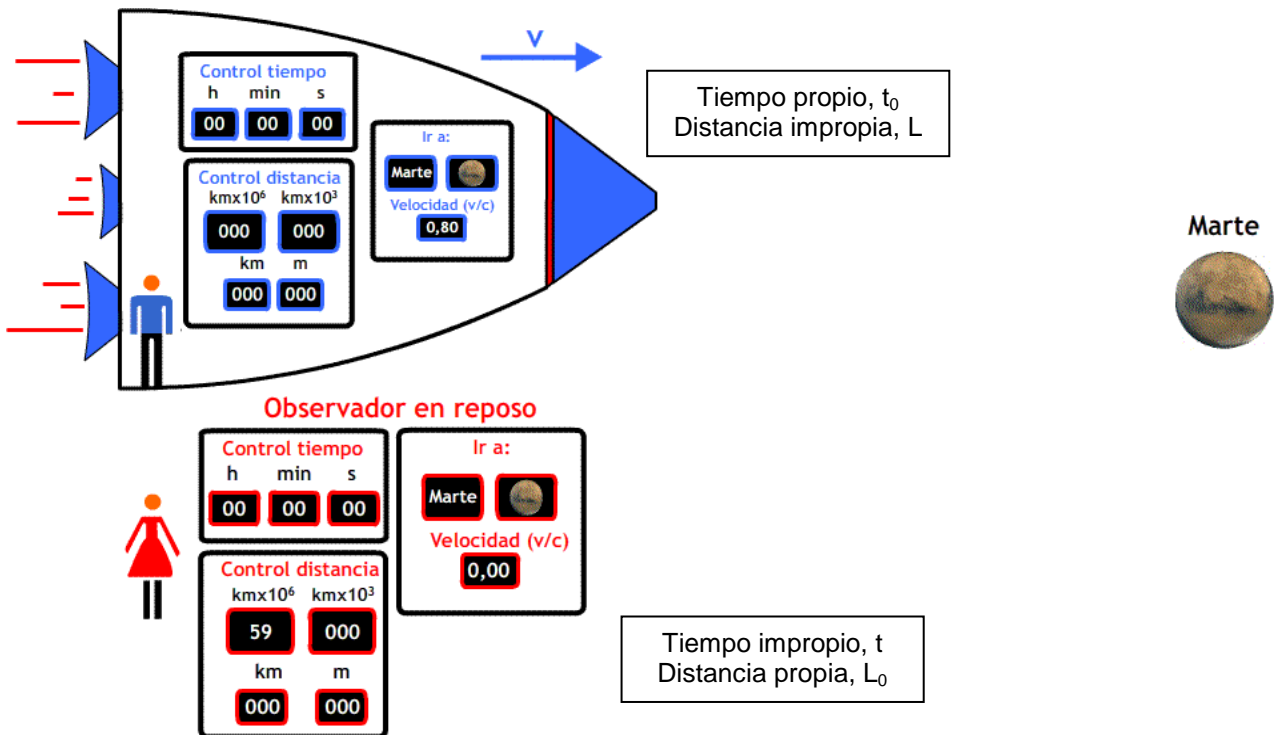
IES La Magdalena.
Avilés. Asturias

(Mi agradecimiento y más expresivas gracias a **Manuel F. Alonso Sánchez⁽¹⁾**, verdadero experto en la enseñanza de la Relatividad, por la revisión de estas notas y sus valiosísimas sugerencias para mejorarlas)

Una de las consecuencias más sorprendentes que ofrece el desarrollo de los postulados de Einstein para la Teoría de la Relatividad Especial es **la pérdida del carácter absoluto del tiempo**. Esto es, **el tiempo no transcurre igual para dos observadores que se muevan uno respecto del otro**.

Trataremos de aclarar este hecho sorprendente con un ejemplo.

Imaginémonos a una observadora en reposo, **Lise** (en recuerdo de Lise Meitner) que dispone de un amplio panel con el que controlar distancias, tiempo, velocidades y posibles destinos (ver imagen) de cualquier nave espacial. Lise se pone de acuerdo con **Alberto** (Albert Einstein) que viaja en su nave a la increíble velocidad de 0,80 c. Esto es, a 240 000 km/s (864 · 10⁶ km/h). Ambos acuerdan que Alberto se dirija al planeta Marte, aprovechando su máxima aproximación a la Tierra. En estas condiciones Lise sabe que Marte se encuentra a 59 millones de km de la Tierra (distancia propia L₀).



Cuando Alberto pasa por donde se encuentra Lise los instrumentos que en su nave miden tiempo (propio, t₀) y distancia (impropia, L) se ponen a cero y se inicia el viaje...

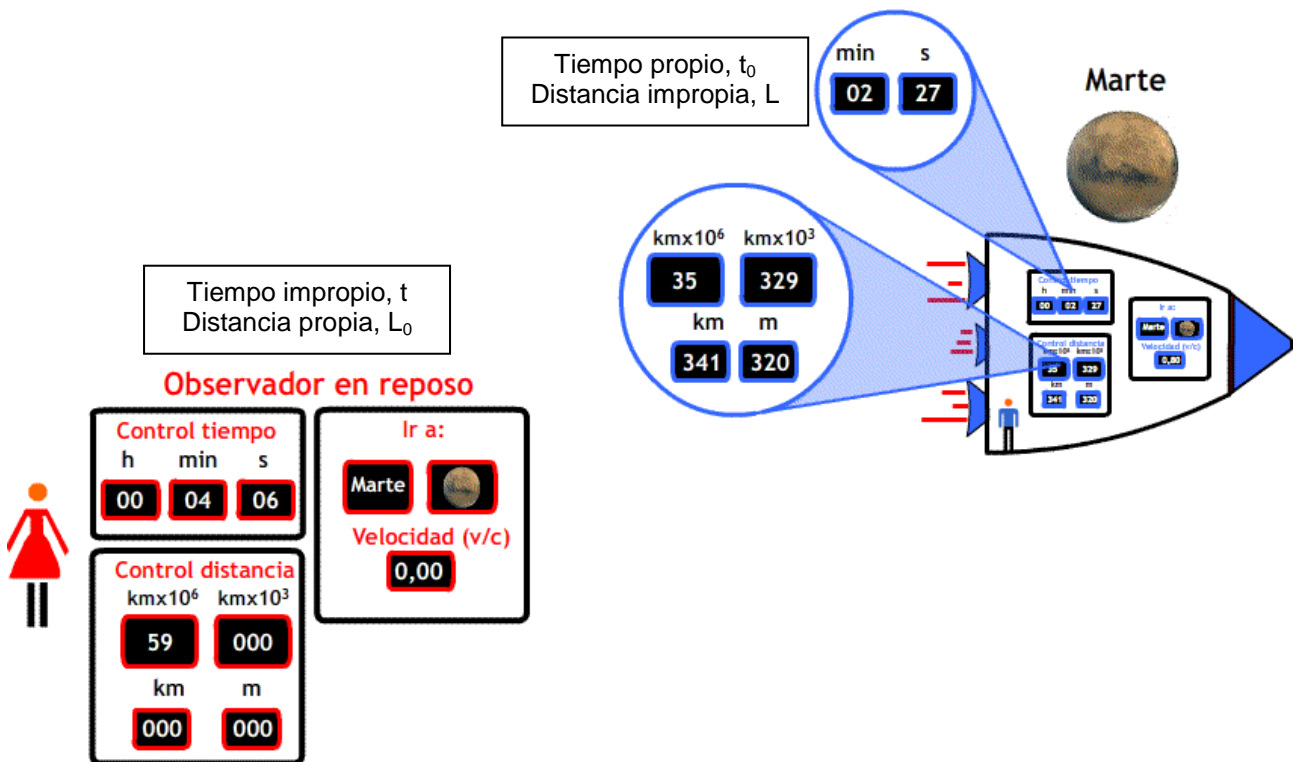
Lise realiza sus cálculos. Como conoce la velocidad de Alberto y la distancia (propia, L₀) que debe recorrer deduce que el tiempo (impropio, t) empleado en el viaje deberá de ser:

$$\Delta t = \frac{\Delta L_0}{v} = \frac{59 \cdot 10^6 \frac{\text{km}}{\text{km}}}{2,4 \cdot 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}}} = 246 \text{ s} = 4 \text{ min } 6 \text{ s}$$

Ambos se han puesto de acuerdo en que cuando Alberto llegue a su destino envíe información a Lise sobre las lecturas de los instrumentos de a bordo (la información no llegará inmediatamente ya que al ser transmitida mediante ondas electromagnéticas viaja a la velocidad de la luz con lo que tardará 196,67 s en llegar. Esto es, 3 min 17 s).

⁽¹⁾ Manuel F. Alonso, Vicent F. Soler Selva, Construyendo la Relatividad, Equipo Sirius, 2002.
<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/construyendo-relatividad.htm>

Cuando Lise recibe la información de los paneles de la nave comprueba **que ni el tiempo transcurrido ni el espacio recorrido** coinciden con sus mediciones.



Los instrumentos de medida de su nave muestran que Alberto ha invertido en su viaje 2 min y 27 s frente a los 4 min 6 s calculados por Lise. **El reloj de Alberto ha ido considerablemente más despacio que el que usa Lise. El tiempo en la nave (tiempo propio) se ha dilatado respecto al medido por el observador en reposo (tiempo impropio).**

Esto podría resultar paradójico. ¿Cuál de los dos observadores lleva razón? ¿Cuál es el tiempo verdadero?

La respuesta a estas preguntas puede resultar sorprendente: **ambos tienen razón. Ambas medidas de tiempo son correctas.**

¿Cómo es posible? Si aceptamos como buenos los cálculos realizados por Lise (y no hay ninguna razón que nos induzca a considerarlos erróneos) y su tiempo es correcto, ¿cómo es posible que el tiempo que Alberto da también lo sea?.

La razón podemos hallarla en el dato de distancia recorrida. Alberto ha recorrido, **según sus medidas**, no los $59 \cdot 10^6$ km que mide Lise, sino sólo 35 329 341,320 km. Es decir, la distancia medida desde su sistema de referencia (distancia impropia) es menor que la medida por el observador en reposo (distancia propia). **Las distancias se contraen (en la dirección de la velocidad) cuando se miden por un observador en movimiento. La distancia propia siempre es inferior a la distancia impropia.**

Efectivamente los cálculos que Alberto realiza coinciden con lo que muestran sus paneles de datos:

Tiempo empleado (propio): 2 min 27 s (147,2 s)

Velocidad: 240 000 km/s

Distancia recorrida (impropia):

$$\Delta L = v \Delta t_0 = 2,4 \cdot 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}} \cdot 147,2 \text{ s} = 35\,329\,341,320 \text{ km}$$

Alberto, por tanto, justifica el menor tiempo empleado en el viaje como consecuencia de que la distancia recorrida es menor de $59 \cdot 10^6$ km.

Según la cinemática relativista (ver apuntes en FisQuiWeb) el tiempo propio (t_0) y el impropio (t) vienen relacionados por la expresión:

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t_0 = \gamma \Delta t_0 \quad \text{Donde:} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \boxed{\gamma \geq 1}$$

Y las distancias propia (L_0) e impropia (L) por:

$$\Delta L_0 = \gamma \Delta L = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta L$$

En este caso:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0,80^2 c^2}{c^2}}} = 1,67$$

Por tanto:

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t_0 = \gamma \Delta t_0; \quad \Delta t_0 = \frac{\Delta t}{\gamma} = \frac{246 \text{ s}}{1,67} = 147,3 \text{ s} = 2 \text{ min } 27 \text{ s}$$

$$\Delta L_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta L = \gamma \Delta L; \quad \Delta L = \frac{\Delta L_0}{\gamma} = \frac{59 \cdot 10^6 \text{ km}}{1,67} = 35 \ 329 \ 341,32 \text{ km}$$

Resultados que coinciden plenamente con lo observado.

La consideración de la velocidad de la luz como un invariante (segundo postulado) nos conduce a concluir que **el espacio y el tiempo no son absolutos (la medida efectuada para cada una de estas magnitudes no es independiente del estado de movimiento del observador que realiza la medida). Además, no son independientes, ambos están ligados formando lo que se llama un continuo espacio-tiempo.** Si dos observadores no miden el mismo tiempo eso lleva implícito que tampoco medirán el mismo espacio, ya que ambas magnitudes deben de estar ligadas si queremos preservar la invarianza de c .

Lo que Lise interpreta como una dilatación del tiempo (el tiempo transcurre más lentamente en la nave), es interpretado por Alberto como una contracción de la distancia Tierra-Marte.

Conviene aclarar que la dilatación del tiempo no es debida a un mal funcionamiento del reloj, sino que **el propio tiempo transcurre más lentamente.** Todo en la nave va más lento (desde el punto de vista de Lise): los procesos metabólicos de Alberto o el ritmo al que late su corazón, también. Al final del viaje Alberto es 1 min y 39 s más joven que Lise.

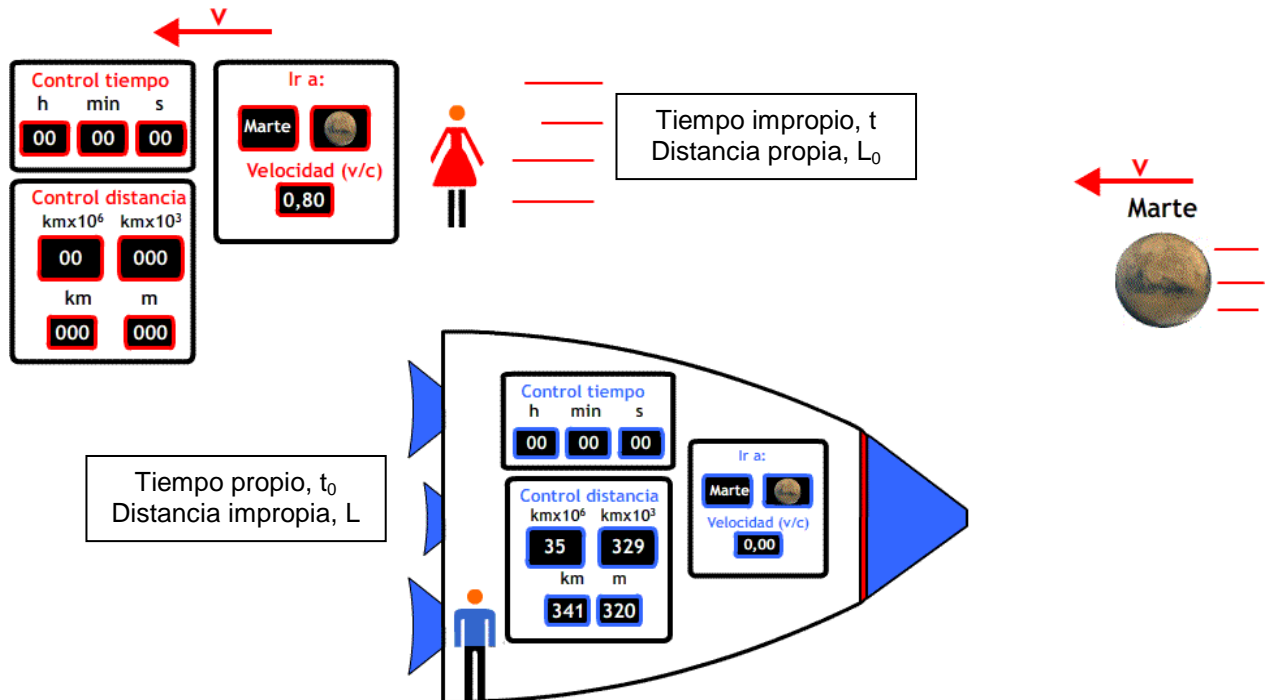
Esta manera de ver las cosas es completamente contraria a los conceptos de espacio y tiempo manejados en la física newtoniana.

Según Newton tanto espacio como tiempos son conceptos absolutos. Es decir, el valor de un intervalo de tiempo o uno espacial son independientes del estado de movimiento de los observadores. Un observador en reposo y otro en movimiento respecto del primero obtendrán la misma medida. **Además son conceptos independientes, no ligados entre sí.**

La física newtoniana se acomoda mucho mejor a nuestro sentido común. Este, no obstante, sólo es la foma de razonar **dependiente de nuestras experiencias. Nuestro sentido común nos indica la manera que esperamos que sucedan las cosas como resultado de las experiencias que tenemos,** pero nuestras experiencias no han sido adquiridas a velocidades próximas a las de la luz.

Describamos la situación ahora desde el punto de vista de Alberto.

Alberto ve a Marte acercándose con una velocidad igual a 0,80 c. Alberto mide un tiempo propio (t_0) y sus instrumentos le dan la distancia impropia (L). Marte está a 35 329 341,320 km.



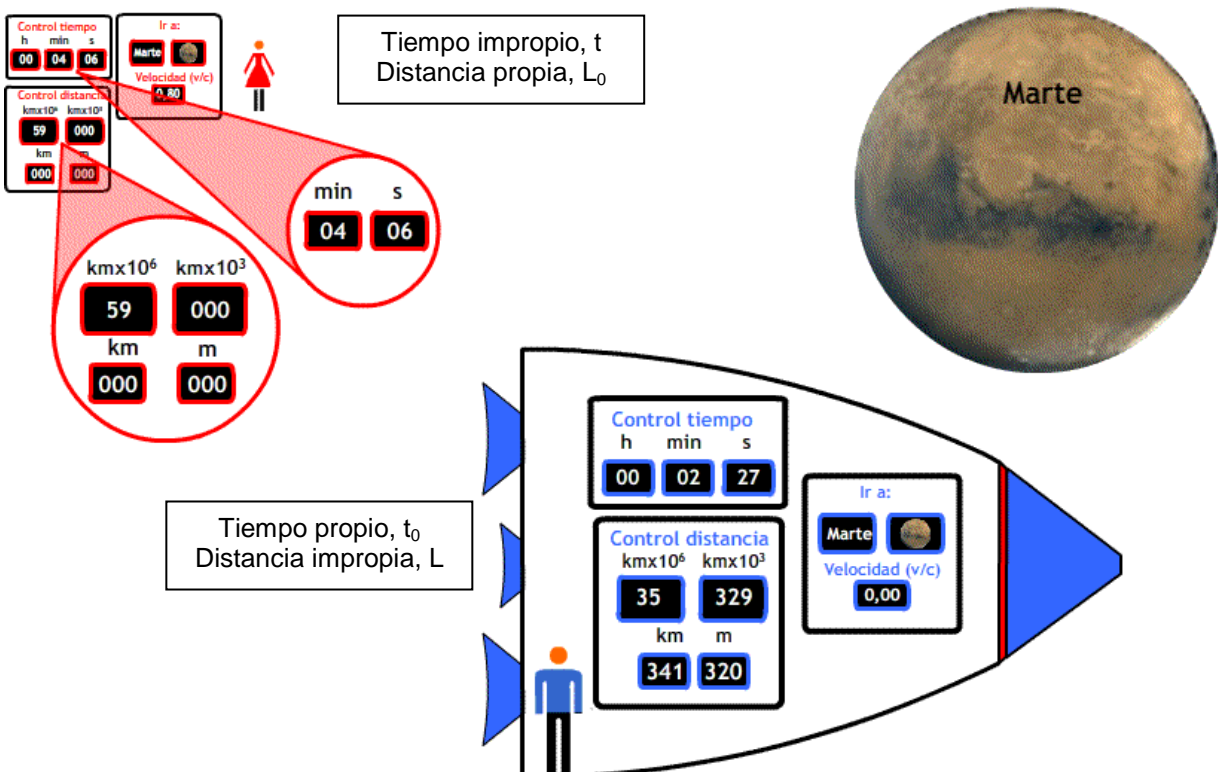
Hace sus cálculos y encuentra que al cabo de 147, 2 s Marte habrá recorrido esa distancia habiendo, por tanto, llegado a su destino:

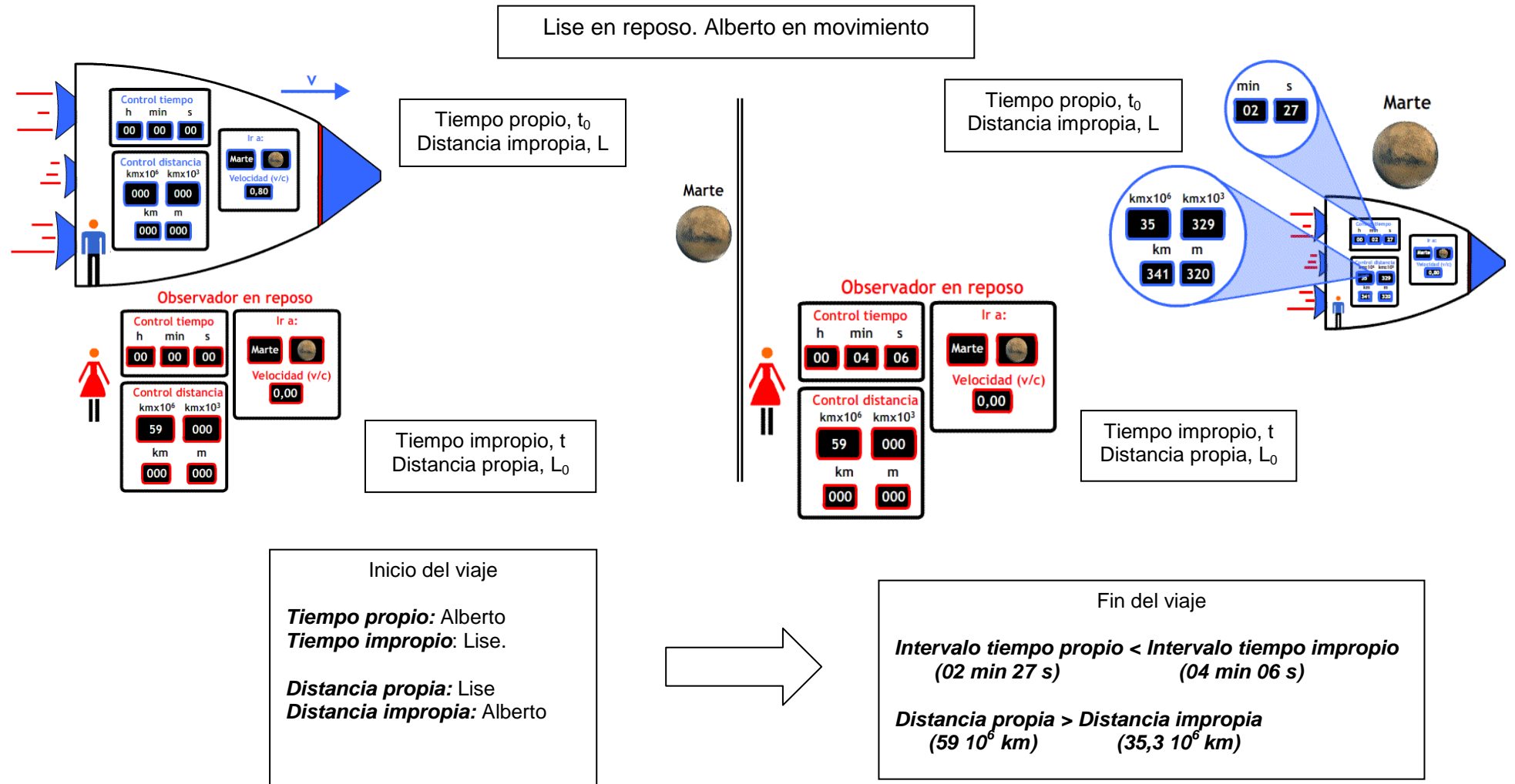
Para Lise las cosas son algo diferentes. Para ella han pasado (tiempo impropio, t):

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 = 1,67 \cdot 147,2 \text{ s} = 245,8 \text{ s} \quad (\Delta t > \Delta t_0)$$

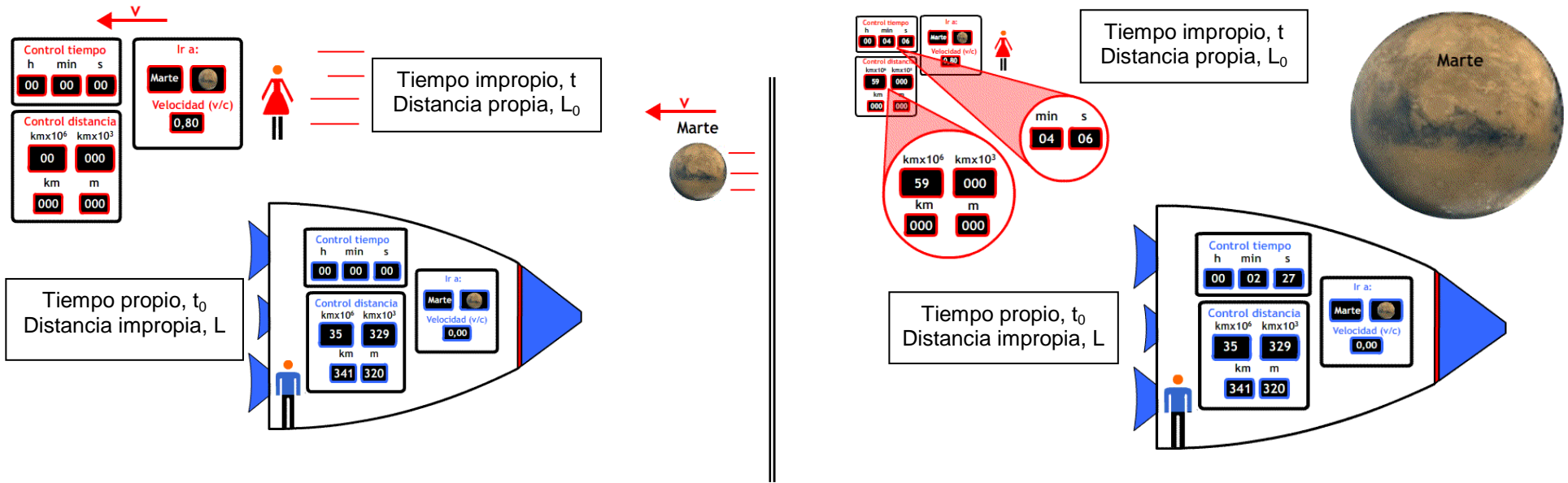
y según sus instrumentos Alberto ha recorrido (distancia propia, L_0):

$$\Delta L_0 = v \Delta t = 2,4 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 245,82 \text{ s} = 59 000 000 \text{ km} \quad (\Delta L_0 > \Delta L)$$





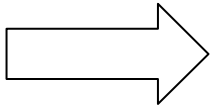
Lise en movimiento. Alberto en reposo



Inicio del viaje

Tiempo impropio: Lise
Tiempo propio: Alberto

Distancia impropia: Alberto
Distancia propia: Lise



Fin del viaje

Intervalo tiempo propio < Intervalo tiempo impropio
(02 min 27 s) (04 min 06 s)

Distancia propia > Distancia impropia
(59 10⁶ km) (35,3 10⁶ km)

Lise observa la nave pasar frente a ella a una velocidad igual a 0,80 c. ¿Cuál es la longitud de la nave según Lise?

Si Lise trata de medir la longitud de la nave, medirá una longitud impropia (L), ya que la nave está en movimiento respecto de ella. El tiempo medido será sin embargo un tiempo propio (t₀) ya que el suceso (medida de la longitud de la nave) se inicia cuando la proa pasa delante de ella y finaliza cuando lo hace la popa. Lise mide, por tanto, ambos instantes en el mismo lugar (o usando un único reloj).

Alberto, por su parte, mide una longitud propia (L₀). Supongamos que 100,00 m, ya que la nave no se mueve desde su punto de vista (y por tanto sus extremos están fijos), y el tiempo medido es ahora tiempo impropio (t) ya que el principio (popa) y final (proa) de su nave se encuentran en distintos lugares.

Por tanto Lise verá la nave contraída (respecto de la medida que hace Alberto):

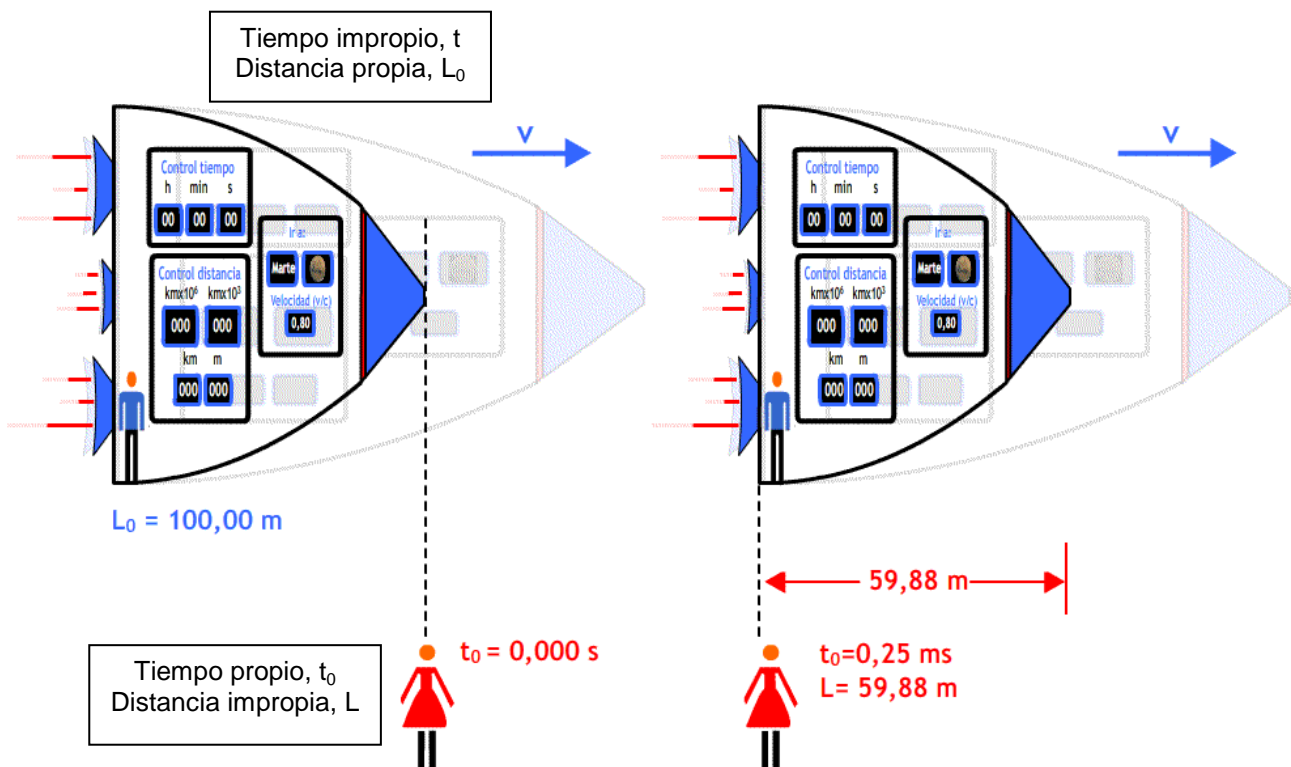
$$\Delta L_0 = \gamma \Delta L ; \Delta L = \frac{\Delta L_0}{\gamma} = \frac{100,00 \text{ m}}{1,67} = 59,88 \text{ m}$$

y tardará en pasar ante ella (t₀):

$$t_0 = \frac{e}{v} = \frac{59,88 \text{ m}}{240\,000 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2,510^{-4} \text{ s} = 0,25 \text{ ms}$$

El tiempo (impropio, t) para Alberto será:

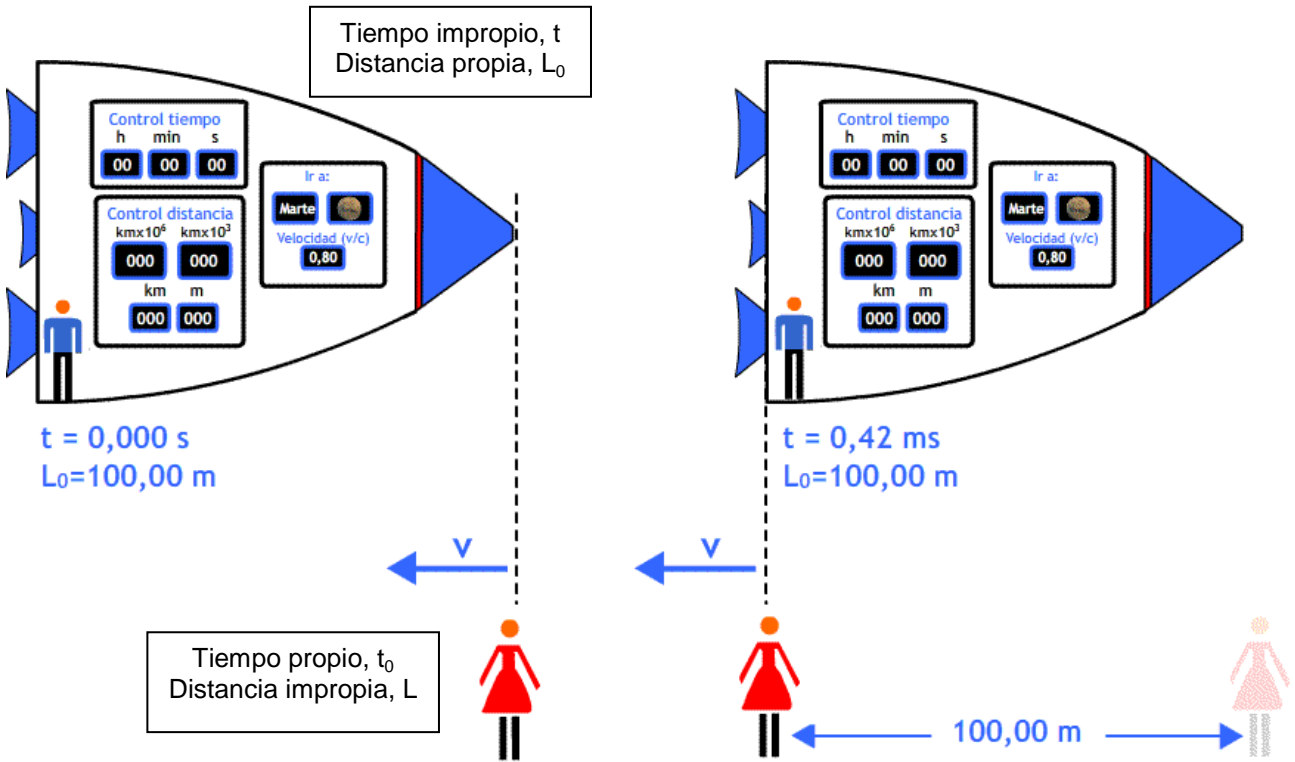
$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 = 1,67 \cdot 0,25 \text{ ms} = 0,42 \text{ ms}$$



Cualquier observador, inmóvil respecto a su reloj (y que, en consecuencia, mide un tiempo propio) verá **que se adelantan** los relojes que se desplazan respecto de él.

Si describimos la situación respecto del observador situado en la nave, comprobamos que mide una distancia propia (L_0) y un tiempo impropio (t) y ve a Lise moviéndose desde la proa de la nave hacia la popa y que tarda en pasar ante su nave (100,00 m de longitud) 0,42 ms.

Evidentemente las medidas de tiempo y espacio no coinciden para ambos observadores.



En la figura de la derecha se muestra una imagen de la contracción sucesiva que observaría alguien situado fuera de la nave (y que se considera en reposo) si suponemos que la nave aumenta su velocidad a razón de $0,05 c \text{ m/s}^2$

La nave se contrae más y más a medida que aumenta su velocidad .

Si ahora comenzara a frenar, el observador exterior observaría un progresivo alargamiento en la dirección de la velocidad.

