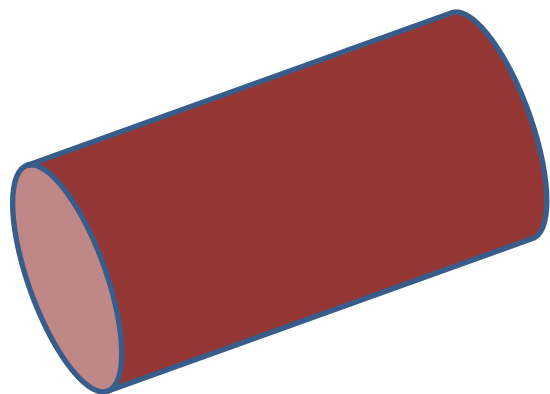
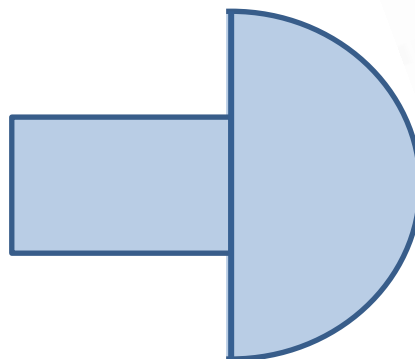
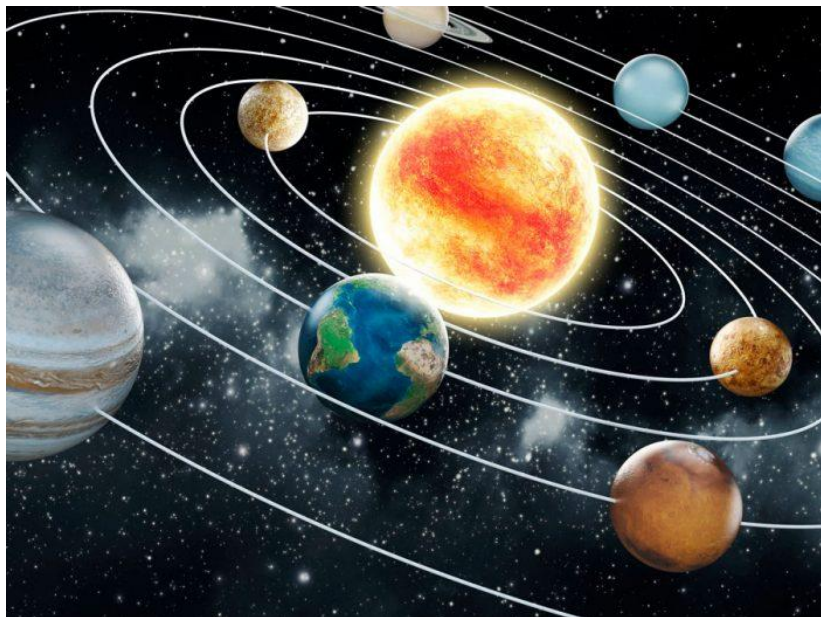




CURS DE RELATIVITAT

Per: Joan Antoni Ros



Guió

- La Física abans de...
 - L'experiment de Michelson-Morley.
 - No hi ha un sistema de referència absolut
 - c és una constant Universal.
 - La relativitat Especial. (contracció de l'espai, dilatació del temps, simultaneïtat...)
 - Paradoxa de "The Pole and the Barn".
 - Paradoxa de "The Bug, the Hole and the Rivet.
 - Diagrames espai-temps. Invariança Lorentz
 - Increment de la massa
 - Principi de Causalitat,...
 - Principis de conservació.
-
- La Relativitat General. Principi equivalència.
 - Curvatures, torsions, ... Tensor de Riemann
 - Equació d'Einstein

Relativitat Especial

- No hi ha un Sistema de Referència absolut.
- c és una constant Universal.
- La contracció de la Longitud.
- La dilatació del Temps.
- La relativitat de la simultaneïtat.
- Paradoxa de “The Pole and the Barn”
- Paradoxa de “The bug, the Hole and the Rivet”
- Diagrames Espai-Temps.
- L'increment de la massa.
- L'adició de velocitats.
- El principi de causalitat.
- Els principis de conservació.
- ...

La Teoria de la Relativitat

“ Si intenteu aprendre Relativitat penseu que, lluny d'entendre la natura, només us apareixeran preguntes , dubtes i mal de caps...

I tot allò que vosaltres pensàveu que sabíeu de la natura, se us girarà potes en l'aire... ”

La Física abans de...

La Física abans de...

- L'espai és (era) absolut:

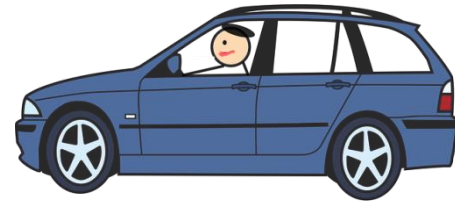
“Tothom està (estava) d'acord en la longitud de la barra”



Aparells de mesura



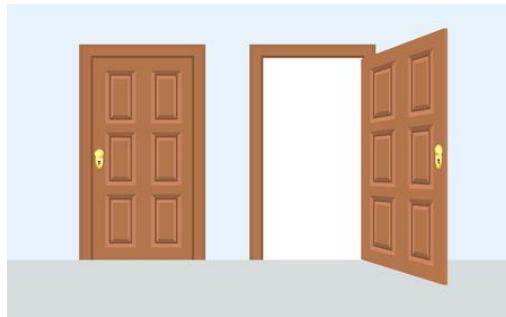
Observadors



La Física abans de...

- El Temps és (era) absolut:

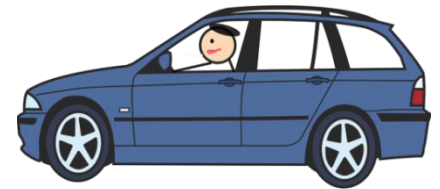
“Tothom està (estava) d’acord en interval de temps”



Aparells de mesura



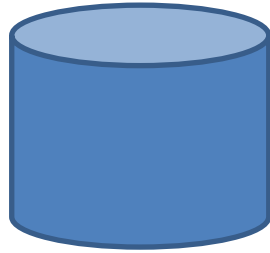
Observadors



La Física abans de...

- La Massa-Energia és (era) absoluta:

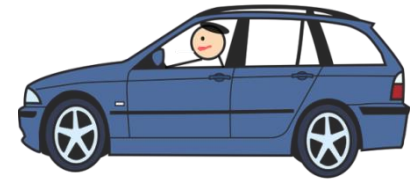
“Tothom està (estava) d’acord en la massa del objecte”



Aparells de mesura



Observadors



La Física abans de...

- L'adició de velocitats és (era) absoluta

“Tothom està (estava) d'acord en la suma de velocitats”

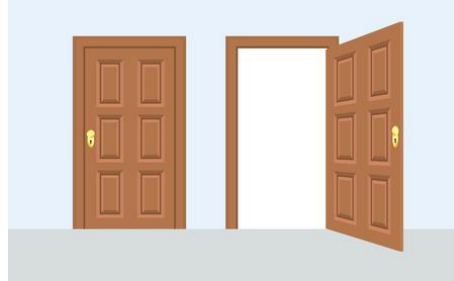
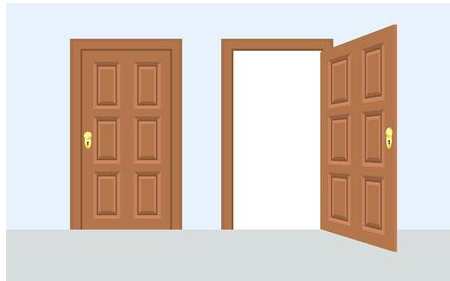


$$50 + 50 = 100$$

La Física abans de...

- La simultaneïtat és (era) absoluta:

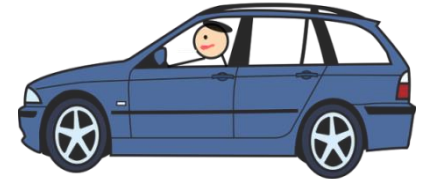
“Tothom està (estava) d’acord en que dos fets són simultanis”



Aparells de mesura

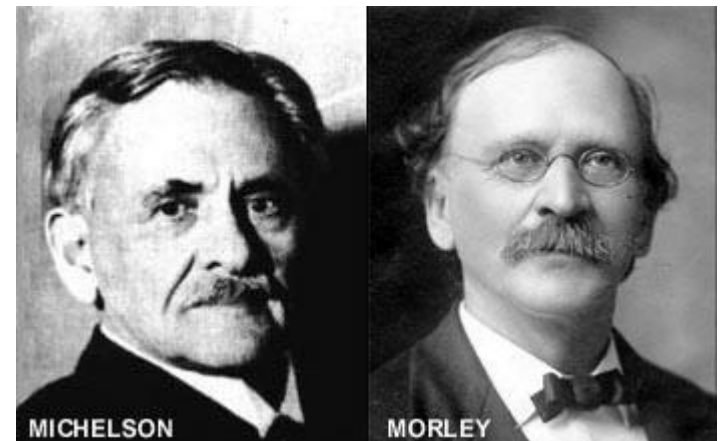
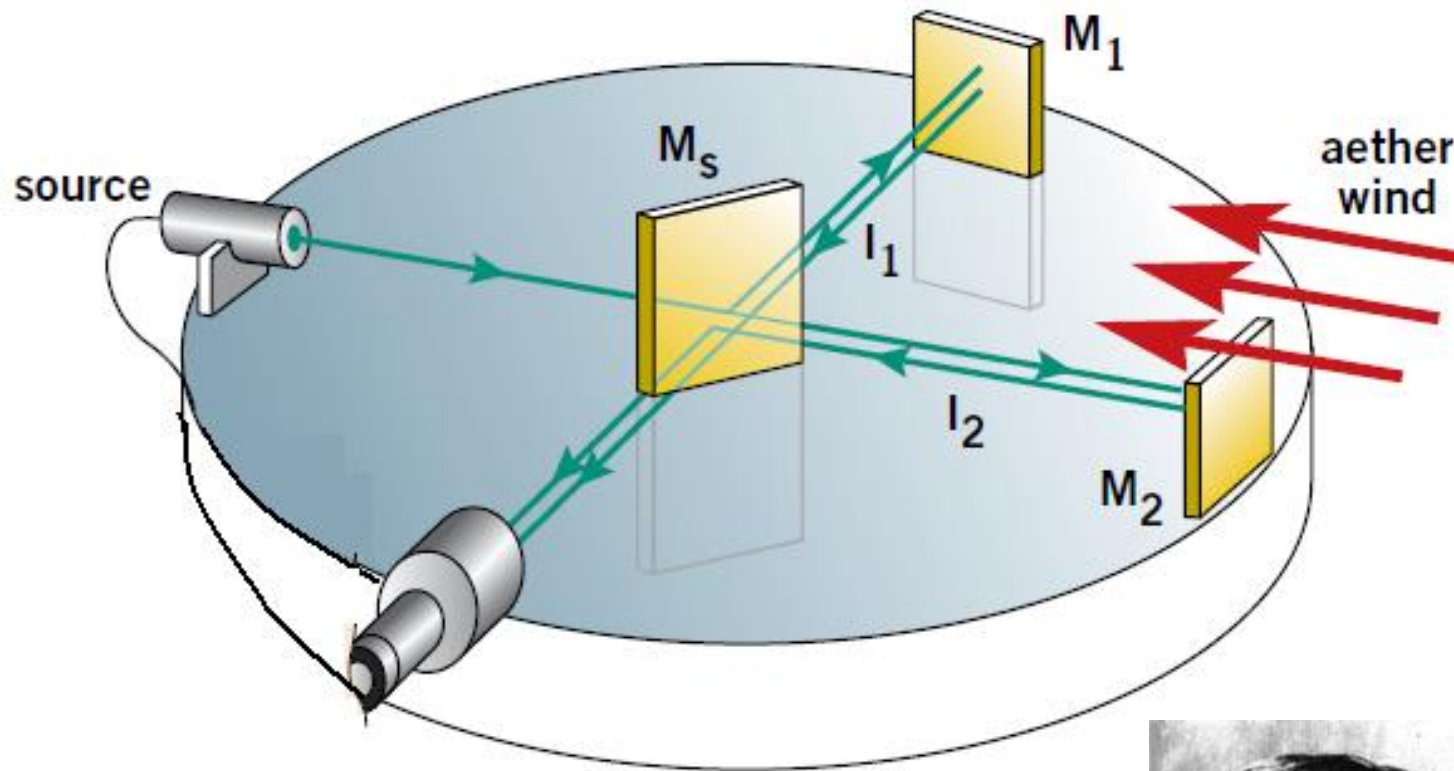


Observadors

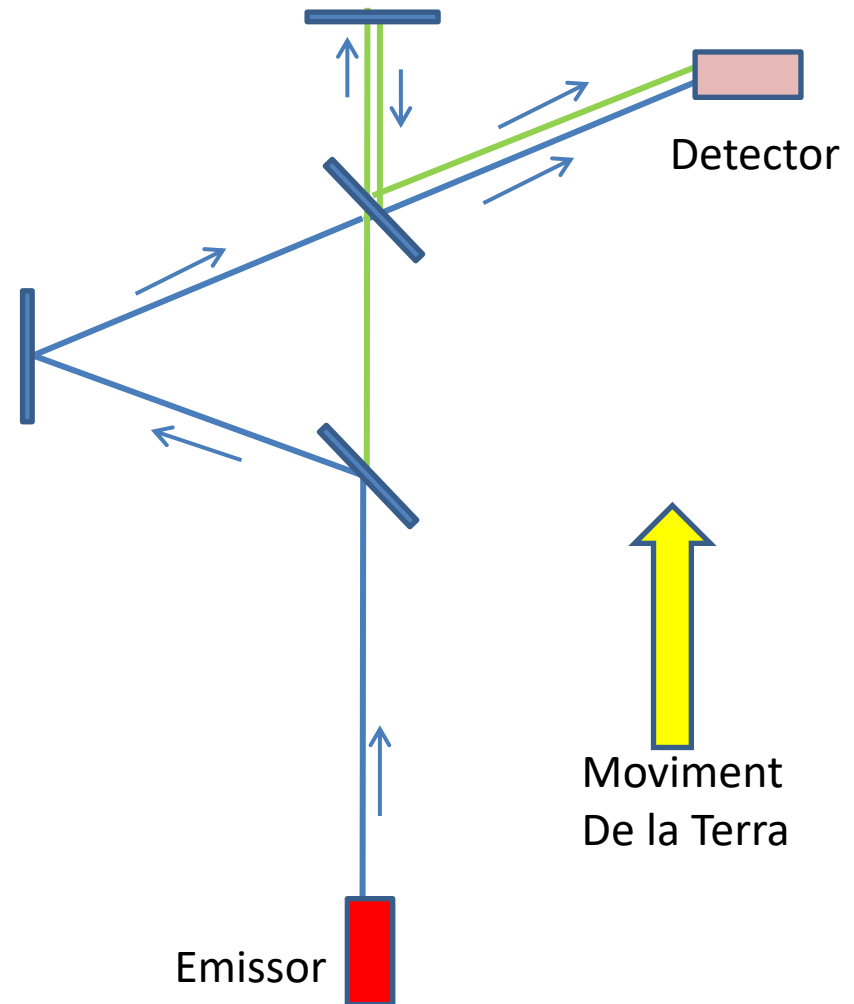
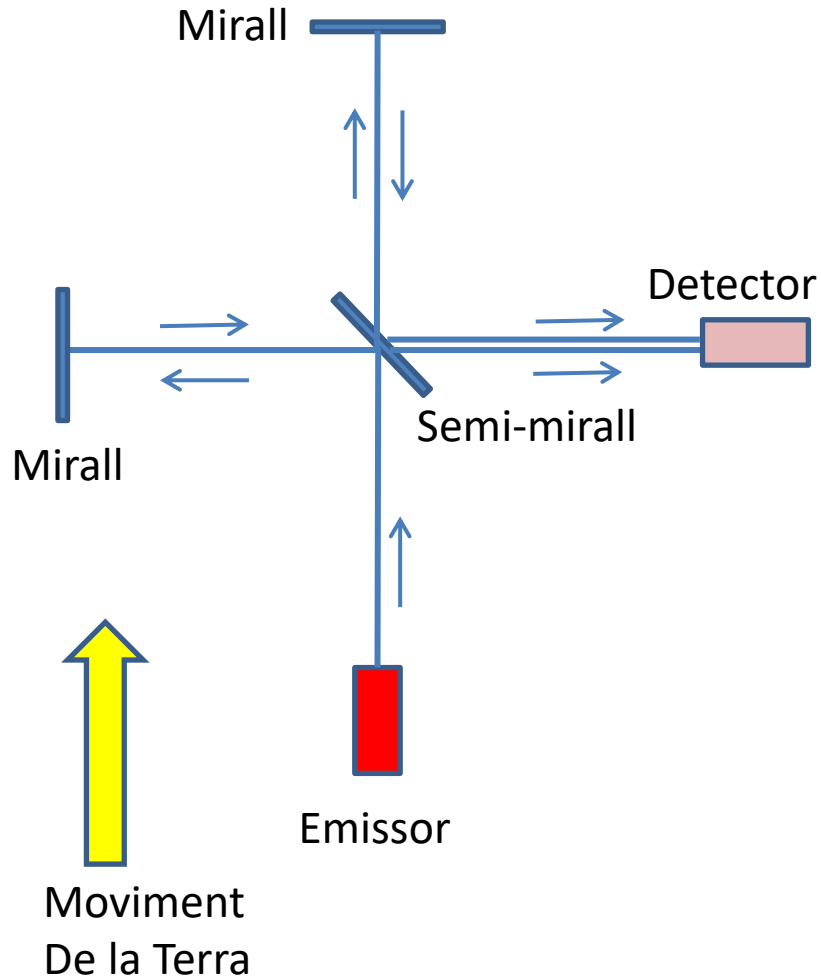


Els experiments de Michelson-Morley...

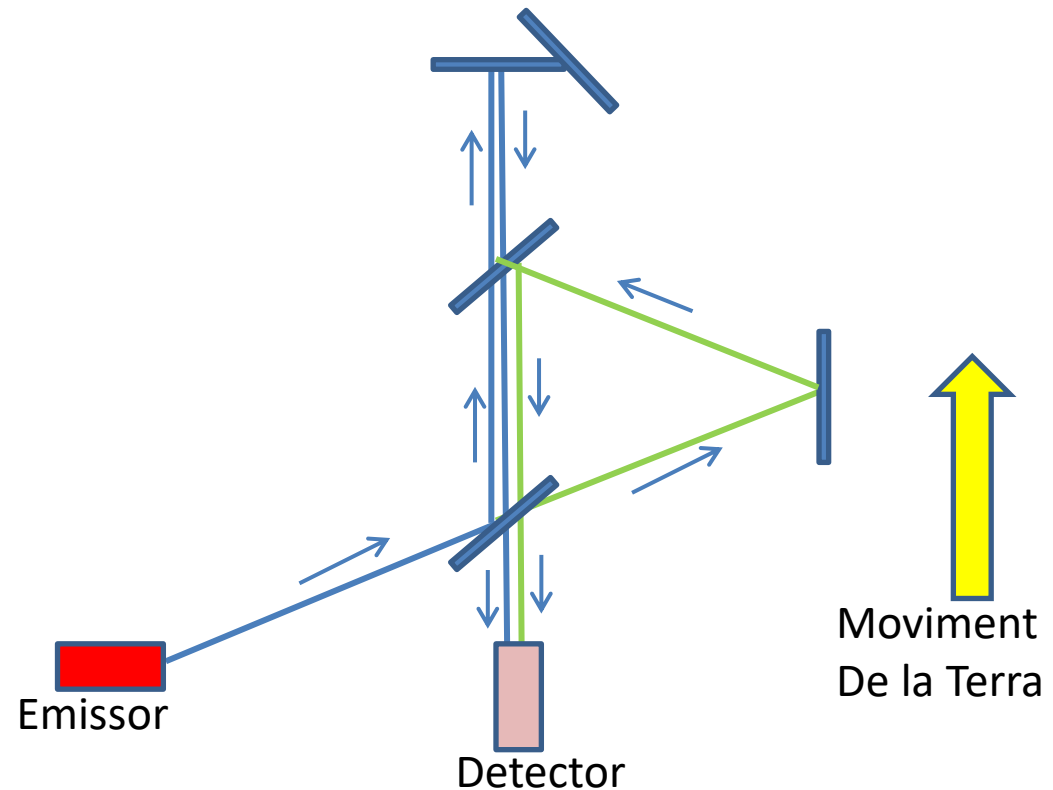
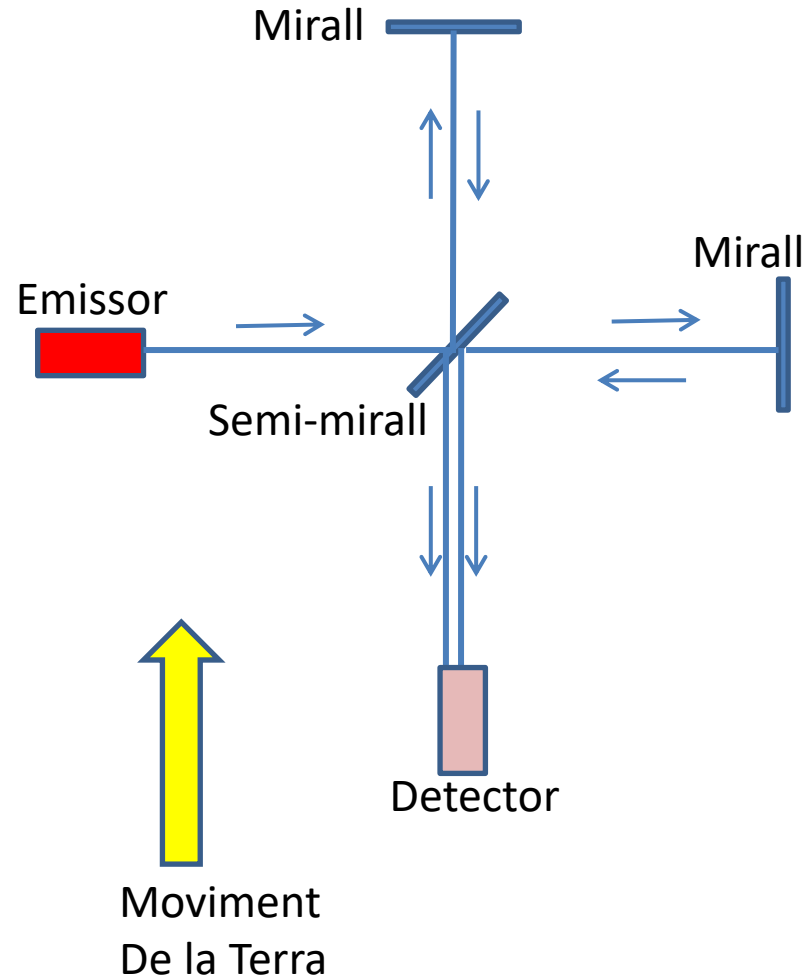
Experiments de Michelson-Morley



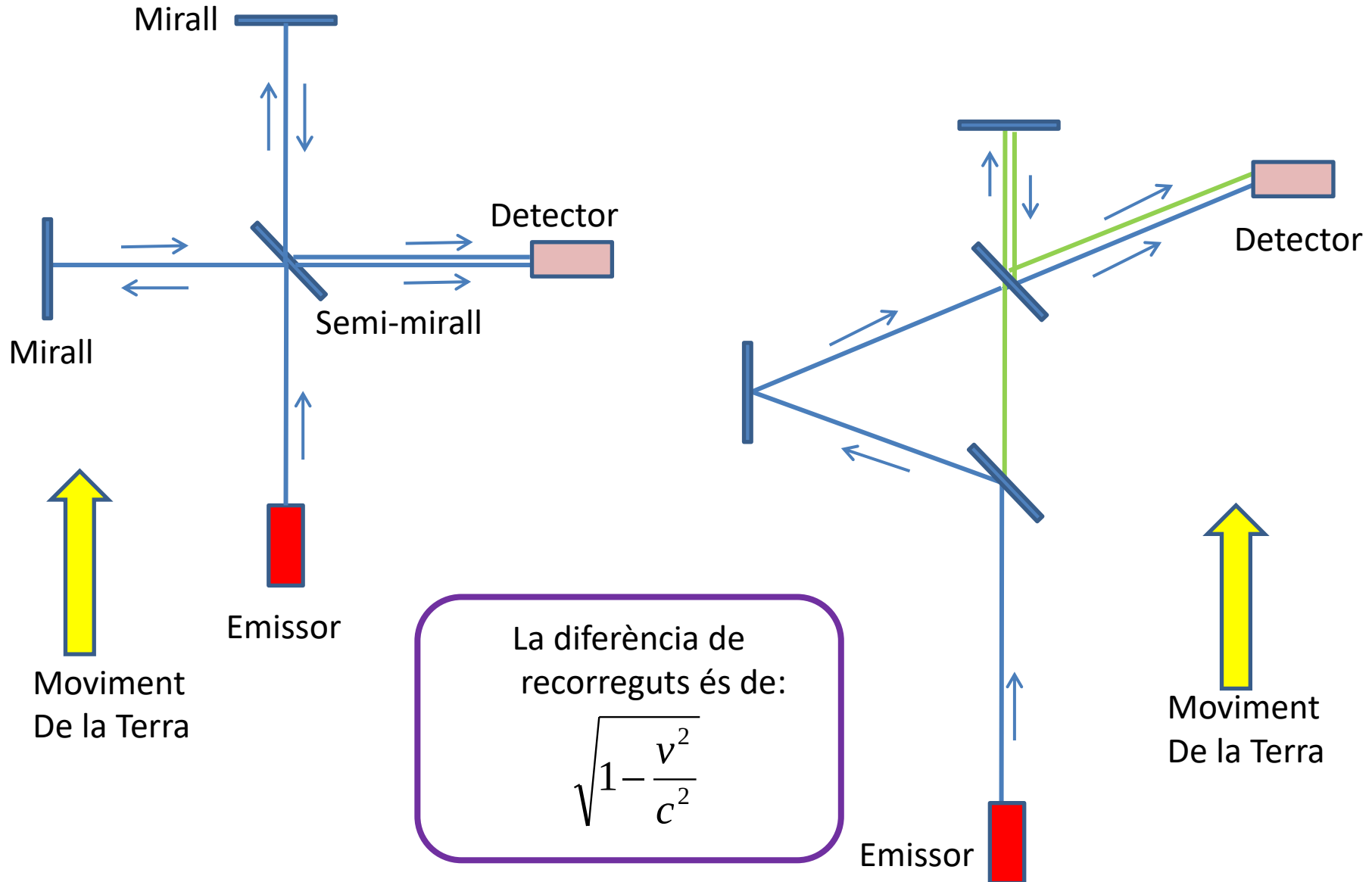
L'experiment de Michelson-Morley



L'experiment de Michelson-Morley



L'experiment de Michelson-Morley



1905 Relativitat Especial

- No hi ha un sistema de referència absolut.
(Postulat 1 de la Relativitat)

Relativitat Especial

- Nosaltres es movem a la Terra...



100 km/h

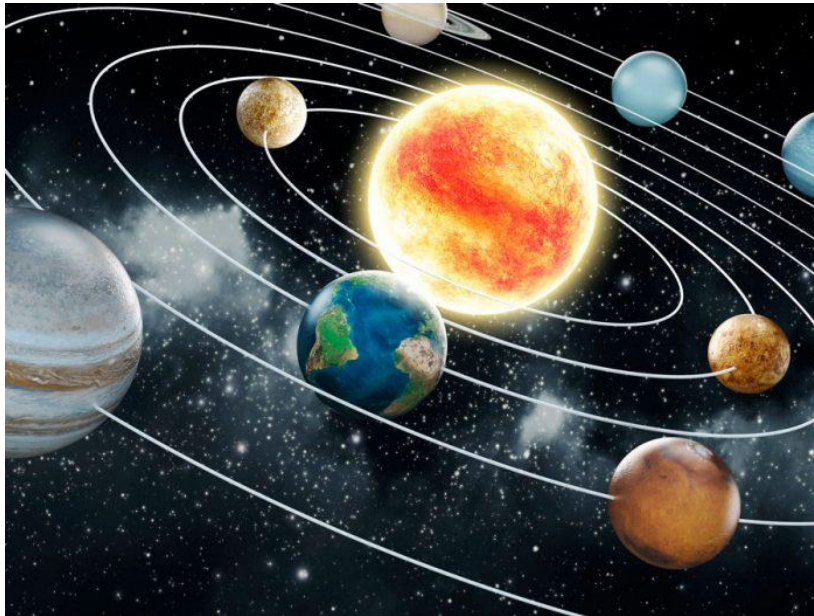
Relativitat Especial

- Els experiments es fan en relació a la Terra...



Relativitat Especial

- La Terra es mou al voltant del Sol...



107.000 km/h

Relativitat Especial

- El Sol es mou al voltant de la Via Làctia...



792.000 km/h

Relativitat Especial

- La Via Làctia també es mou en relació a l'entorn...



2.000.000 km/h

Relativitat Especial

- No tenim cap referència que estigui aturada...



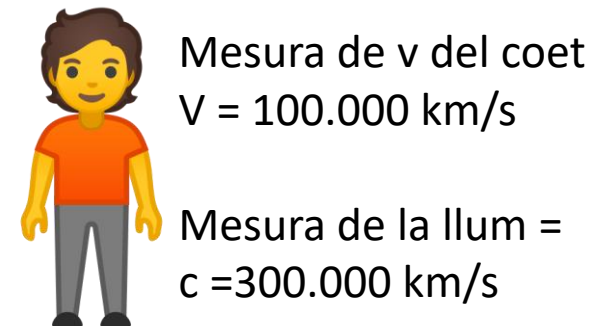
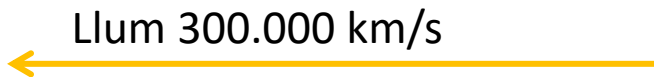
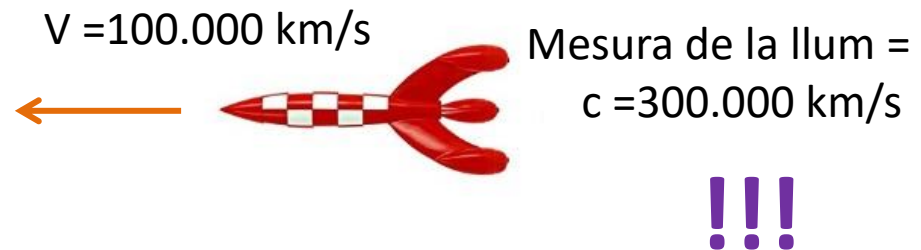
1905 Relativitat Especial

- No hi ha un sistema de referència absolut.
- c és una constant Universal.

Tots els observadors sempre mesuraran la velocitat de la llum en el buit “ **$c = 300.000$ km/s**” independentment del seu estat, posició o velocitat... (Postulat 2 de la Relativitat)

1905 Relativitat Especial

- c és una constant Universal.



1905 Relativitat Especial

- No hi ha un sistema de referència absolut.
- c és una constant Universal.

Com a conseqüència dels dos postulats anteriors surten els següents fets:

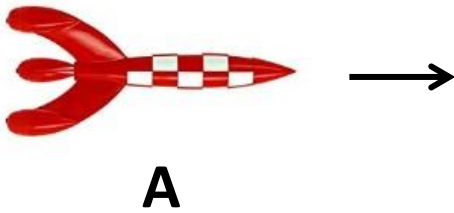
- La contracció de la longitud.

Relativitat Especial

- No hi ha un Sistema de Referència absolut.
- c és una constant Universal.
- La contracció de la Longitud:
“La longitud d’un objecte es contrau en la direcció del seu moviment segons:

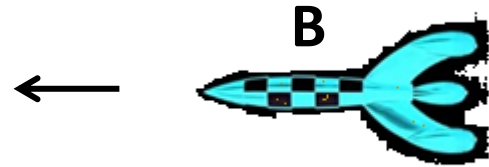
$$L' = L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = L \sqrt{1 - \beta^2}$$

Una mica de Relativitat...



La nau A viatja a velocitat constant...

Una mica de Relativitat...



La nau B viatja a velocitat constant...

Una mica de Relativitat...

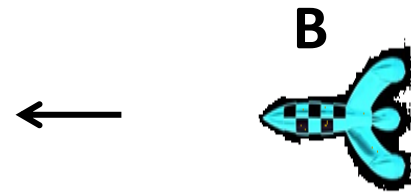
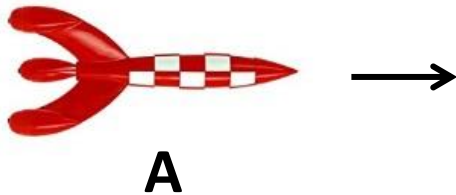
$$v_{A-B} = 0,86 c$$



La velocitat entre les dues naus és de $0,86c$...

Una mica de Relativitat...

$$v_{A-B} = 0,86 c$$



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

Observant des de la nau A...

Aquest coeficient el va posar Lorentz abans de la relativitat
I surt de Michelson-Morley

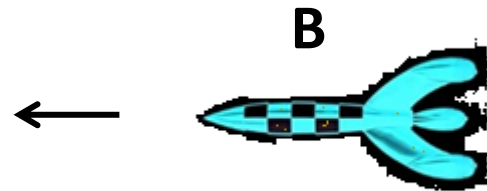
Una mica de Relativitat...

$$v_{A-B} = 0,86 c$$

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



A



B

Observant des de la nau B...

La contracció de l'espai...

- Si volem transformar un punt de l'espai:

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

- Si volem transformar una longitud:

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

La contracció de la longitud

- Actualment no disposem de tecnologia suficientment precisa per a poder mesurar directament la contracció relativista de cap objecte

La contracció de l'espai..

- Quan una nau es mou a velocitats relativistes en relació a varis observadors, els ocupants de la nau NO observen cap fet estrany a la nau: les mides dels objectes, les mides dels ocupants, ...
- En canvi cada diferent observador SI mesurarà diferents llargades de la nau, cadascú en funció de la seva mesura de velocitat de la nau...
- Això ens planteja quina és la realitat? Hi ha múltiples realitats?
- Per a cada observador, les seves mesures són la seva realitat. La “realitat” és única i els “fets” han de concordar SEMPRE. Les mesures d'espais i llargades són diferents.

1905 Relativitat Especial

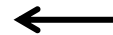
- No hi ha un sistema de referència absolut.
- c és una constant Universal.
- La contracció de la longitud.
- La dilatació del temps.

Una mica de Relativitat...

$$v_{A-B} = 0,86 \, c$$



A



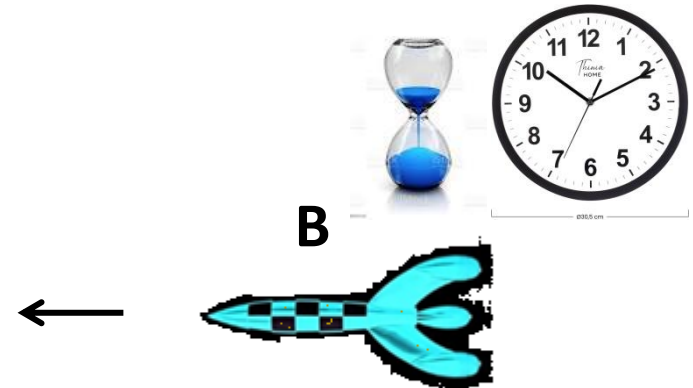
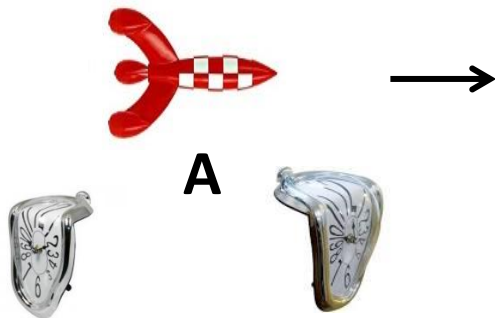
$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Observant des de la nau A...

Una mica de Relativitat...

$$v_{A-B} = 0,86 c$$

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



Observant des de la nau B...

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

“Quan veiem un objecte movent-se a velocitats relativistes, Observarem que els seus rellotges van més lents...”

La dilatació del temps...

- Si volem transformar un punt del temps:

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

- Si volem transformar un interval de temps:

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

La dilatació del temps i la desintegració del muó

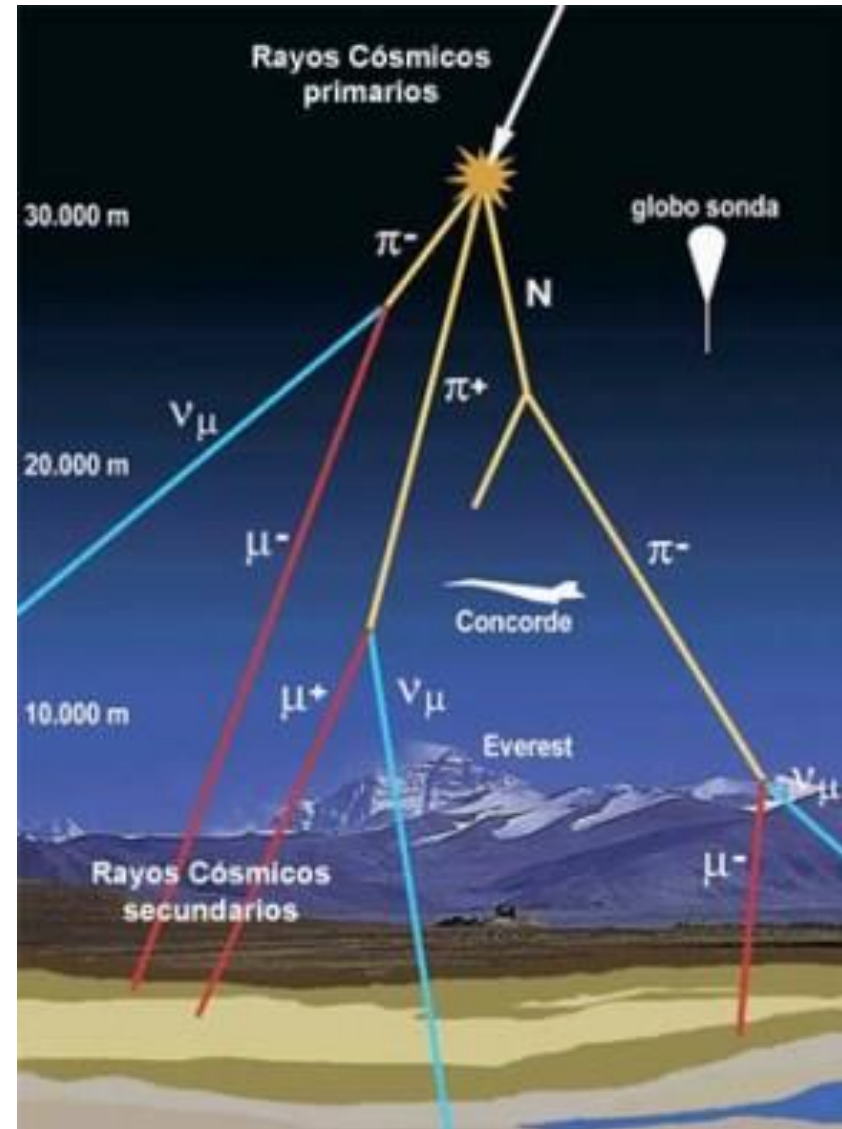
Rossi i Hall (1941)

- El muó va ser descobert per Anderson al 1936.
- Cinc anys després Rossi i Hall van fer mesures molt detallades i van verificar la dilatació del temps...

La dilatació del temps i la desintegració del muó

Rossi i Hall (1941)

- Experimento de Rossi-Hall
- En el experimento original llevado a cabo por Rossi y Hall, en 1941, se registraron un promedio de 563 muones/hora a una altura de 2.000 metros, y se detectaron unos 400 muones/hora a nivel del mar. Teniendo en cuenta el tiempo de vida media y la velocidad de los muones se esperaban unos 25 muones/hora en la superficie terrestre. **¡Se encontraron muchísimos más muones de los esperados!**
- L'explicació és la dilatació del temps dels muons en moviment relativista“



La dilatació del temps...

- Quan una nau es mou a velocitats relativistes en relació a varis observadors, els ocupants de la nau NO observen cap fet estrany a la nau: els rellotges funcionen amb normalitat, el batec dels seus cors és normal, el decurs del temps és normal també ...
- En canvi cada diferent observador SI observarà que els rellotges de la nau van més lents, que tots els marcadors de temps de la nau van més lents, cadascú en funció de la seva mesura de velocitat de la nau...
- Això ens planteja quina és la realitat? Hi ha múltiples realitats?
- Per a cada observador, les seves mesures són la seva realitat. La “realitat” és única i els “fets” han de concordar SEMPRE. Les mesures de temps són diferents.

Transformacions de Lorentz

De l'espai:

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

Del temps:

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

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

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

Transformacions de Lorentz en forma matricial

$$\begin{bmatrix} ct \\ \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

1905 Relativitat Especial

- No hi ha un sistema de referència absolut.
- c és una constant Universal.
- La contracció de la longitud.
- La dilatació del temps.
- La simultaneïtat...

1905 Relativitat Especial

- La simultaneïtat és relativa:

“Si un observador veu simultaneïtat els altres NO”



Aparells de mesura



Observadors



La simultaneïtat...

- Quan una nau es mou a velocitats relativistes en relació a varis observadors, la nau o bé qualsevol dels observadors pot observar dos fets que siguin simultanis, la resta NO observarà simultaneïtat ...
- Això és un fet molt característic de totes les situacions relativistes...
- Això ens planteja quina és la realitat? Hi ha múltiples realitats?
- Per a cada observador, les seves mesures són la seva realitat. La “realitat” és única i els “fets” han de concordar SEMPRE. Les observacions de simultaneïtat sempre són relatives (un observador veu simultaneïtat i la resta NO).

La Relativitat Especial

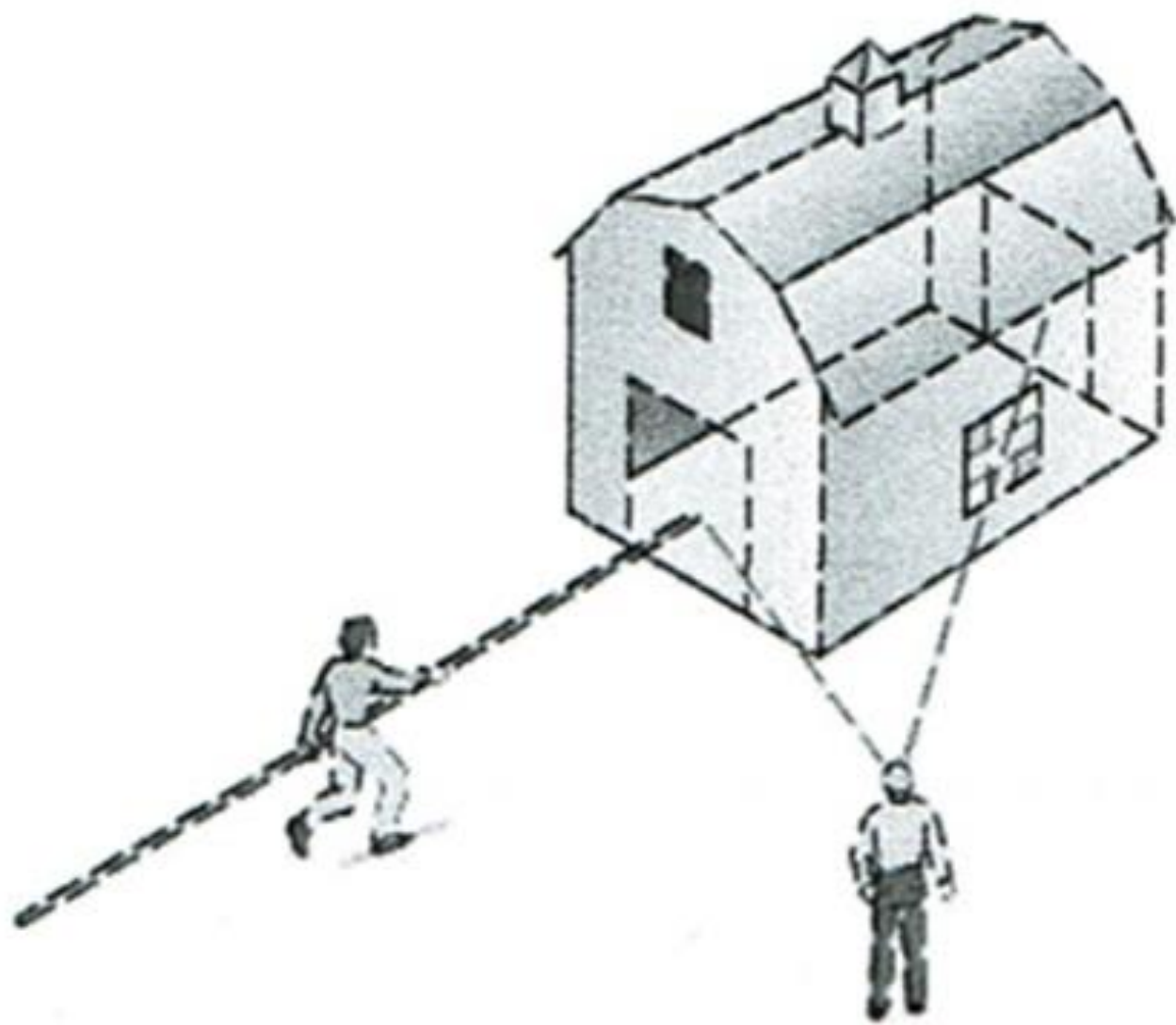
- Per a asentar aquestes idees i intentar entendre les seves conseqüències ara veurem dues paradoxes molt representatives i conegudes...
- A l'excel les teniu les dues i podeu “probar” els valors que vulgueu i a veure que passa...

Una Paradoxa Relativista: The Pole and the Barn

(La barra i el magatzem)

Una Paradoxa...

- Paradoxa: afirmació d'aparença contradictòria amb la opinió general o amb allò que s'acaba de dir.





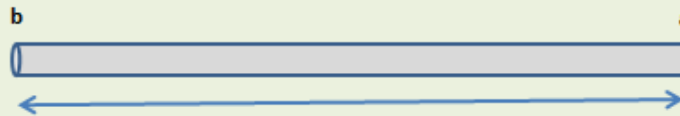
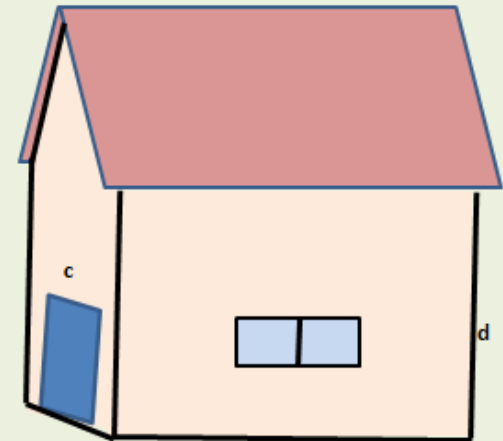
Plantejament

El Tub i el Magatzem

Plantejament...

$$t' = \gamma \cdot \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

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



Longitud del tub (L)

Profunditat del Magatzem (P)

Quan està tot en repòs

El Tub i el Magatzem

Quan està tot en repòs...

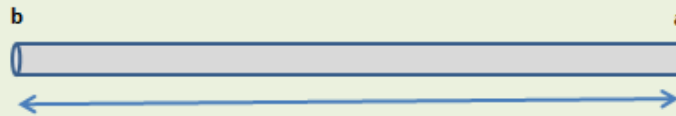
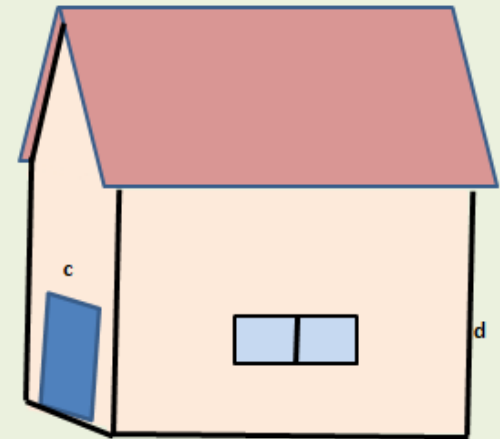
Quan està tot en repòs...

Longitud del Tub (L) = 20 m.

Profunditat del Magatzem (P) = 10 m.

$$t' = \gamma \cdot \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

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



Longitud del tub (L)



Profunditat del Magatzem (P)

Quan està tot en repòs

Vist des del Magatzem

El Tub i el Magatzem

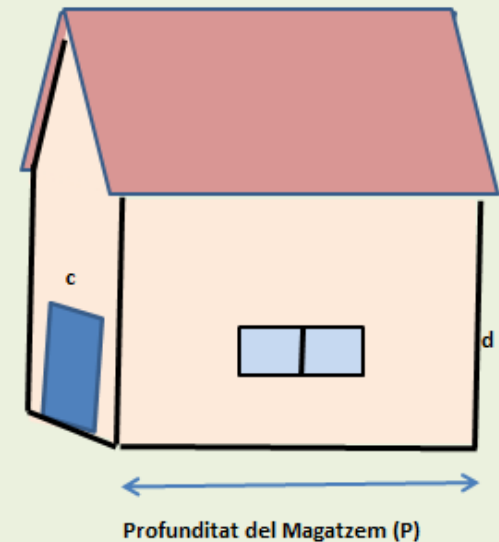
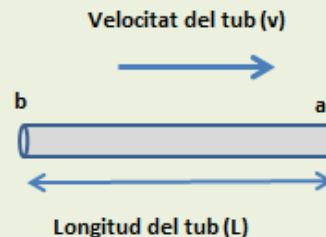
Vist des del Magatzem...

Longitud del Tub (L) =	20 m.
Profunditat del Magatzem (P) =	10 m.
Velocitat del Tub (β) =	0,9
Velocitat del Tub (v) =	269813212 m/s
Velocitat de la Llum (c) =	299792458 m/s
Factor de Lorentz (γ) =	2,2941573

$$t' = \gamma \cdot \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

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

Vist des del magatzem



El Tub i el Magatzem

Vist des del Magatzem...

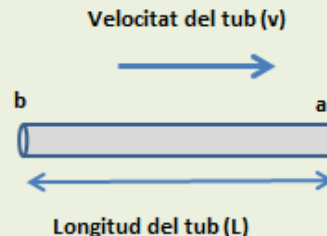
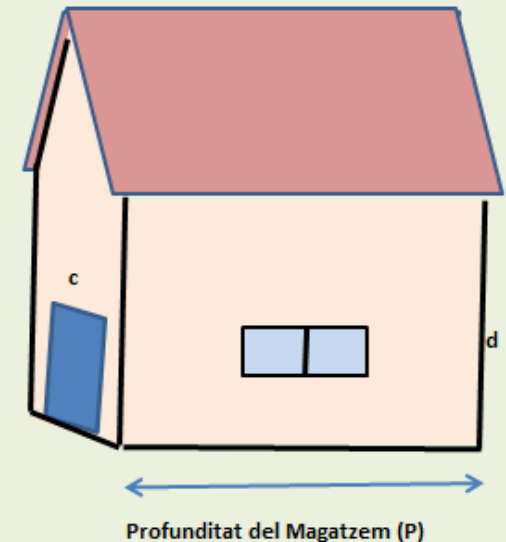
Longitud del Tub (L) =	20 m.
Profunditat del Magatzem (P) =	10 m.
Velocitat del Tub (β) =	0,9
Velocitat del Tub (v) =	269813212 m/s
Velocitat de la Llum (c) =	299792458 m/s
Factor de Lorentz (γ) =	2,2941573

Sistema de referència del Magatzem...

El Tub s'escurça... (L1) =	8,71779789 m.
El Magatzem no canvia... (P1) =	10 m.
El Tub (a) entra a la porta (c) (t0) =	0 s.
El final del Tub (b) passa per (c) (t1) =	32,3104929 ns.
El front del Tub (a) passa per (d) (t2) =	37,0626772 ns.
El final del Tub (b) passa per (d) (t3) =	69,3731702 ns.
Durant 4,752 ns. podem tenir les dues	portes tancades

$$t' = \gamma \cdot \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

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



Vist des del magatzem

Vist des del Tub

El Tub i el Magatzem

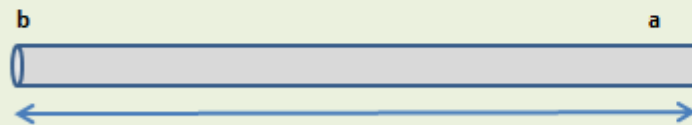
Vist des del Tub...

Longitud del Tub (L) =	20 m.
Profunditat del Magatzem (P) =	10 m.
Velocitat del Tub (β) =	0,9
Velocitat del Tub (v) =	269813212 m/s
Velocitat de la Llum (c) =	299792458 m/s
Factor de Lorentz (γ) =	2,2941573

$$t' = \gamma \cdot \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

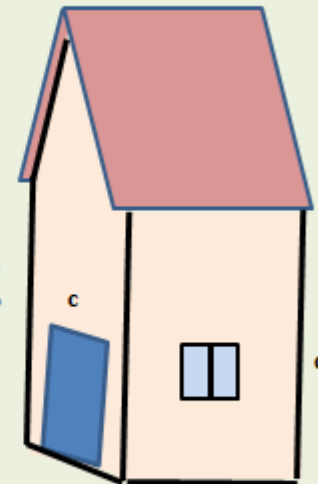
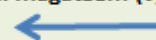
$$l' = l \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Vist des del tub



Longitud del tub (L)

Velocitat del magatzem (v)



Profunditat del Magatzem (P)

El Tub i el Magatzem

Vist des del Tub...

Sistema de referència del Tub...

El Tub no canvia... (L2) = 20 m.

El Magatzem s'escurça... (P2) = 4,35889894 m.

El Tub (a) entra a la porta (c) (t0')= 0 s.

El front del Tub (a) passa per (d) (t2')= 16,1552465 ns.

El final del Tub (b) passa per (c) (t1')= 74,1253545 ns.

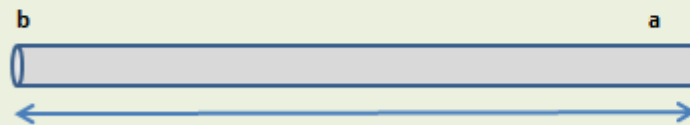
El final del Tub (b) passa per (d) (t3')= 90,280601 ns.

Aparentment, sembla que no es poden
tancar les dues portes a l'hora...

$$t' = \gamma \cdot \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

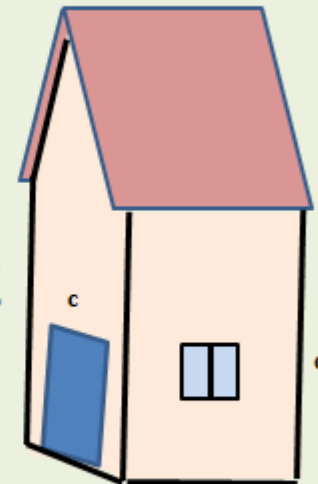
$$l' = l \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Vist des del tub



Longitud del tub (L)

Velocitat del magatzem (v)



Profunditat del Magatzem (P)

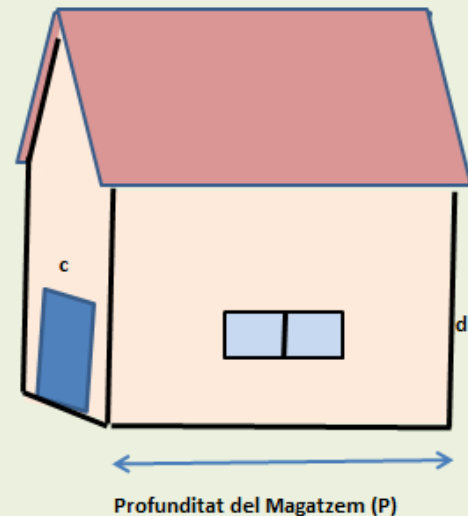
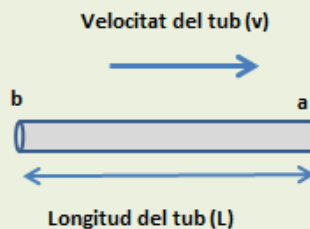
És coherent ?

És coherent ?

$$t' = \gamma \cdot \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

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

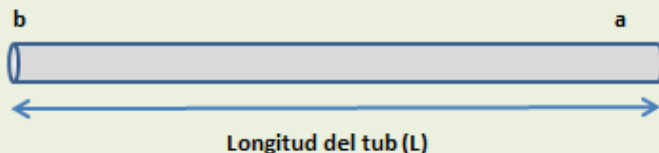
Vist des del magatzem



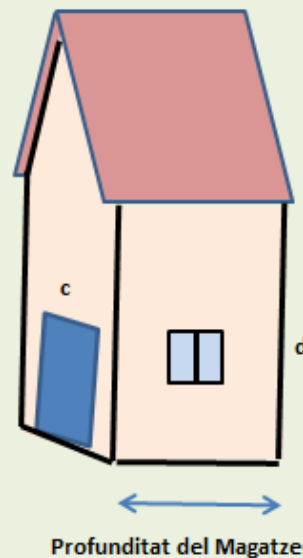
$$t' = \gamma \cdot \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

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

Vist des del tub



Velocitat del magatzem (v)



Comparativa temporal

El Tub i el Magatzem

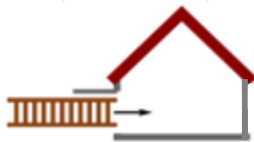
Comparativa 1...

Si posem ordenadament els fets:...

Des del Magatzem...

El tub (a) entra a la porta (c) =

$t_0 = 0 \text{ s.}$



Des del Tub...

El tub (a) entra a la porta (c) =

$t_0' = 0 \text{ s.}$



El front del Tub (a) arriba a (d)...

I la porta (d) s'ha d'obrir...

$t_2' = 16,16 \text{ ns.}$



El Tub i el Magatzem

Comparativa ...2...

Des del Magatzem

El final del Tub (b) passa per (c)...
i podem tancar les portes (c) i (d) ...
 $t_1 = 32,31 \text{ ns.}$



El front del Tub (a) arriba a (d)
i s'ha d'obrir la porta (d) =
 $t_2 = 37,06 \text{ ns.}$



Des del Tub

Les portes poden
tancar durant 4,75 ns.

El Tub i el Magatzem

Comparativa ...3

Des del Magatzem

El final del Tub (b) arriba a (d)
i finalitza el pas =

$$t_3 = 69,37 \text{ ns.}$$



Des del Tub

El final del Tub (b) passa per (c)...
i podem tancar la porta (c) ...

$$t_1' = 74,13 \text{ ns.}$$



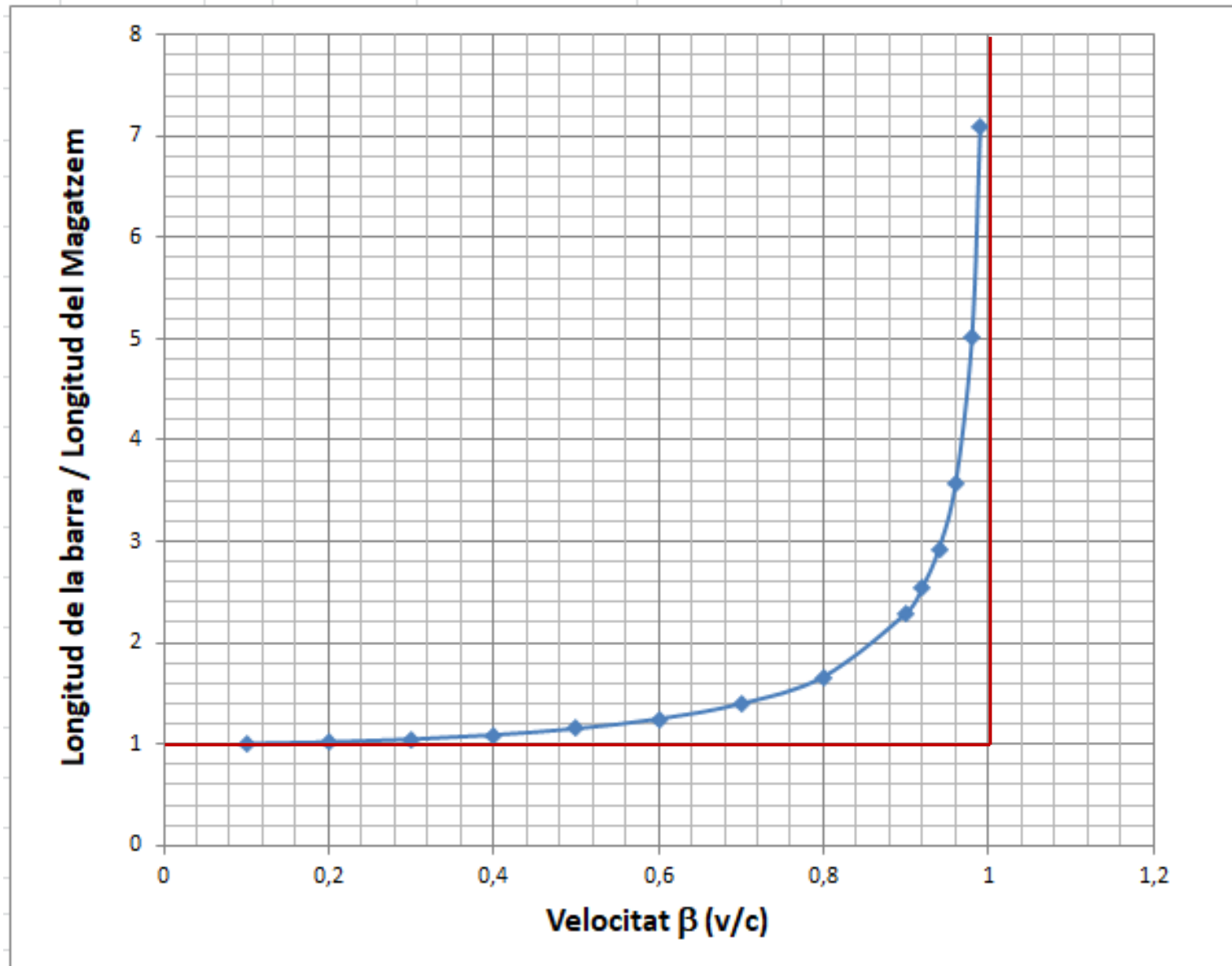
El final del Tub (b) surt de (d)...

$$t_3' = 90,28 \text{ ns.}$$

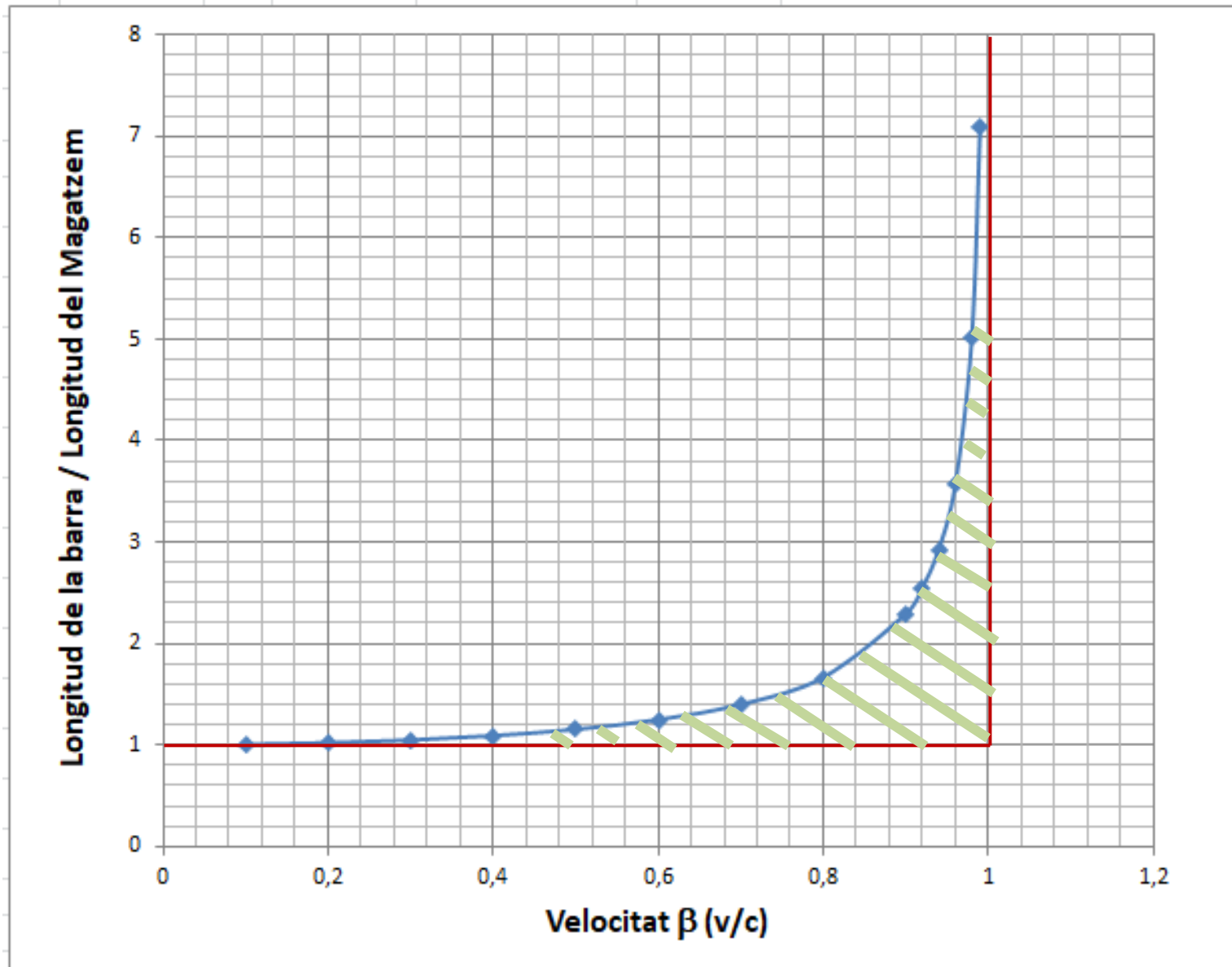


La solució...

La solució...



La solució...



Continua...