

*Pendant que le monde
bavarde
A rien d'important
On pourrait dormir sous les
arbres
Le reste du
temps..(F.Cabrel)*



La llum i el temps

Paraules claus: esdeveniment, celeritat, velocitat, sistema de referència inercial, simultaneïtat, durada, relativitat, dilatació de les durades, GPS

1) El llamp i el llampec

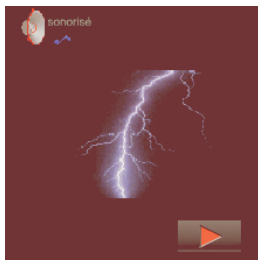
La llum es desplaça a una velocitat $c = 300000 \text{ km/s}$ o $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Aquest valor extremament elevat és independent de la velocitat de la font. És un dels postulats enunciats per Einstein en la teoria de la Relativitat Especial.

Ho podem comparar amb la velocitat del so que és prop de 300 m/s .




 La velocitat de la llum és:

| | | | | | | | |
|-----------|-----------|----------|--------|--------|-----|----------|-------------|
| 10^{-3} | 10^{-3} | cent mil | 10^5 | 10^6 | mil | un milió | mil milions |
|-----------|-----------|----------|--------|--------|-----|----------|-------------|

vegades més elevada que la del so. Triar la resposta correcta.



Arran d'una tempesta, quan cau el llamp, si estem situats a 15 km del fenomen, no percebem el llampec (senyal lluminós) i el tro (senyal sonor) al mateix temps.

-  Què ens arriba primer, el tro o el llampec?
-  Quina durada té el decalatge entre el llampec i el tro?
-  Són simultanis el tro i el llampec? Sinó, quina durada els separa?

La durada que separa el llamp del llampec és tan feble que tenim costum de considerar aquests dos esdeveniments com simultanis. No és, però, el cas del llamp i del tro.

Recordem:

Un esdeveniment està definit per un lloc (coordenades x, y, z), i per l'instant en què es produeix (t), per tant, per les coordenades d'espai-temps (x, y, z, t)

El llamp és un esdeveniment, el llampec o el tro són d'altres esdeveniments.

 Quin és el punt comú dels esdeveniments llampec i tro?

A menys que estiguem sota l'impacte d'un llamp! (l'expressió "coup de foudre" en català és també una fiblada d'amor), el llampec ens informa del llamp. La llum és el "missatger" de l'esdeveniment llamp.

És un missatger extremament ràpid. Extremament, significa que cap altre missatger pot anar tan ràpid.

La velocitat de la llum, en el buit, és una velocitat límit. Cap objecte material pot arribar a aquest límit.

Tanmateix és un valor finit i com ho mostra el llamp i el llampec, això planteja el problema de la simultaneïtat de dos esdeveniments.

El llamp, és massa prop. Prenem distància.

La nebulosa del Cranc:



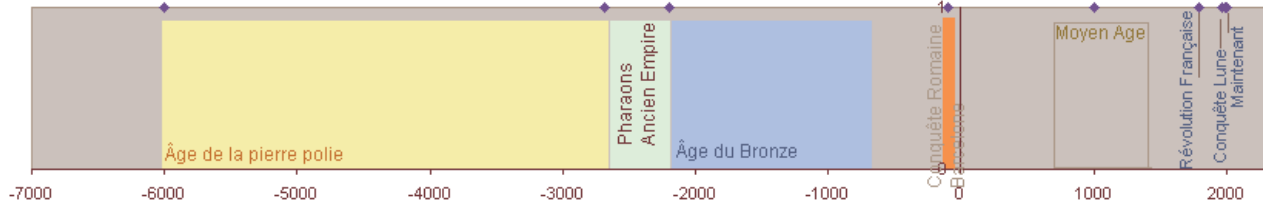
En 1054, els astrònoms xinesos observen una estrella nova (nova) tan lluminosa que és visible fins i tot a ple dia (supernova). Actualment resta d'aquesta explosió d'estrella una traça anomenada nebulosa del Cranc.

La nebulosa del Cranc està situada a 6000 anys llum de la Xina.

✎ Què és un any llum?

✎ L'esdeveniment observat pels astrònoms xinesos i l'explosió de l'estrella són simultanis?

✎ Si la foto de sobre va ser presa cap a l'any 2000, situa sobre l'escala cronològica de sota en quina data la llum que ha impressionat la foto ha estat emesa:



Per això, veure lluny, és veure en el passat.
Espai i temps estan indissociablement lligats.
Veiem també que **temps** i **moviment** estan igualment lligats.

2) El postulat de la relativitat especial

Sistemes de referència inercials

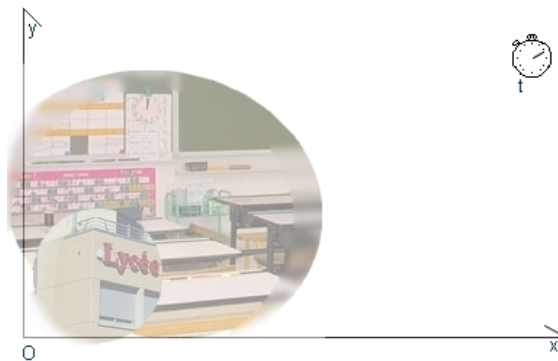
Suposem dos observadors en translació rectilínia uniforme un respecte a l'altre.

Un està en una nau espacial moguda per una velocitat \vec{v} respecte a l'altre (nosaltres mateixos dins de l'aula).

Els esdeveniments són detectats pel primer amb l'ajut de les coordenades d'espai (x' , y') i de temps t' .

Els esdeveniments són detectats pel segon amb l'ajut de les coordenades d'espai (x , y) i de temps t .

Aquests dos observadors estan en sistemes de referència inercials diferents.



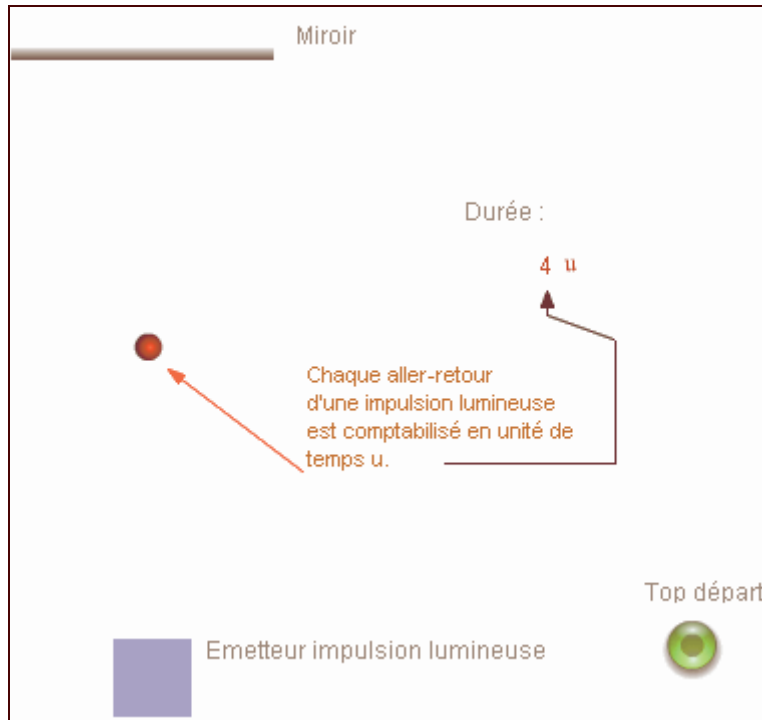
Invariància de la velocitat de la llum

El postulat de la relativitat especial:

La velocitat de la llum és la mateixa en tots els sistemes de referència inercials.

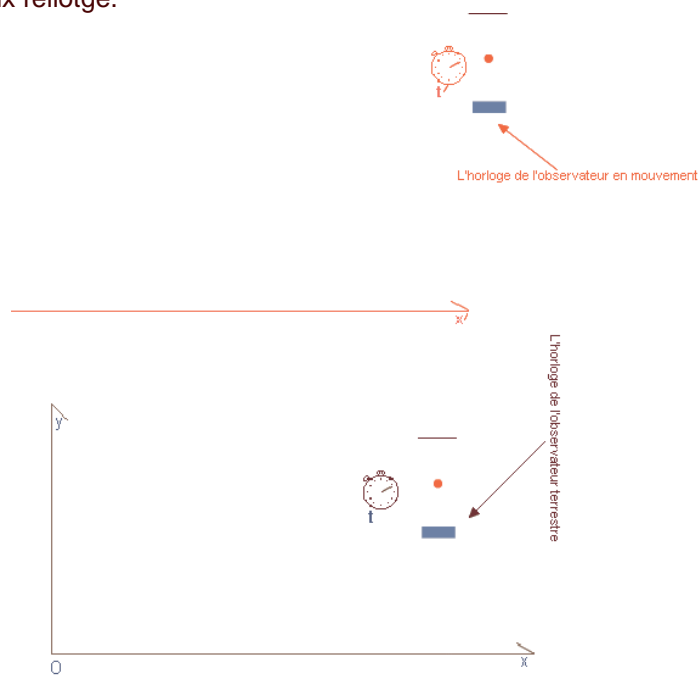
3) Un rellotge lluminós:

Imaginem un rellotge lluminós on el vaivé d'una impulsio lluminosa serveix per mesurar el temps.



Pitja sobre "Top départ" per accionar el rellotge (cal proveir-se d'uns auriculars o d'altaveus)

Els dos observadors dels nostres sistemes de referència inercials de sota estan proveïts del mateix rellotge.

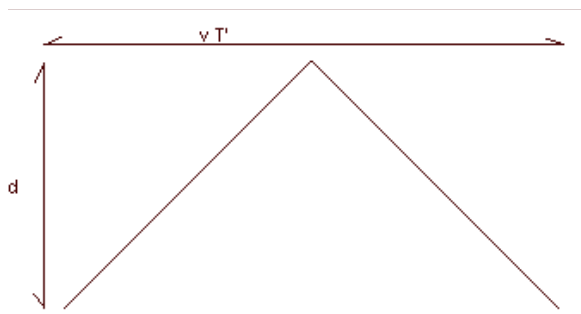


dilatació de les durades:

Situem-nos en el punt de vista de l'observador immòbil que observa el rellotge de l'observador mòbil.

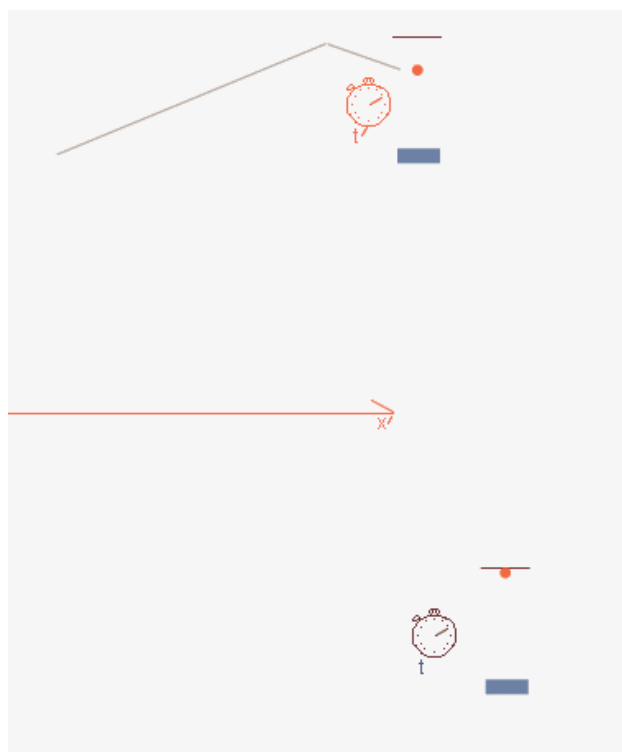
El vaivé de la impulsió lluminosa del sistema de referència mòbil li apareix així.

(Clica sobre el botó Acció per visualitzar el camí de la impulsió lluminosa.)



d és la distància emissor - mirall del rellotge.

$v T'$ és la distància recorreguda per l'emissor entre un moviment de vaivé. T' és el temps d'aquest moviment de vaivé per l'observador immòbil.



Amb l'ajut d'aquestes dades i del teorema de Pitàgores:

mostra que la distància recorreguda és: $2\sqrt{d^2 + \left(\frac{vT'}{2}\right)^2}$

si c és la velocitat de la llum, mostra que $cT' = 2\sqrt{d^2 + \left(\frac{vT'}{2}\right)^2}$

si c és la mateixa sigui el que sigui el sistema de referència inercial, tenim el mateix en el sistema referencial de l'observador immòbil:

$$2d = cT$$

Dedueix:
$$T' = \frac{T}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Una aplicació numèrica simple:



$$v = 0,85 c \text{ això fa que } v^2/c^2 = 0,72 \approx 3/4 \text{ i } 1 - v^2/c^2 = 1/4 \text{ o sigui } T' = 2T$$

Quan el rellotge mòbil fa un moviment de vaivé ($T=1$), el de l'observador fix en fa 2 ($T' = 2$).

El rellotge mòbil és alentit respecte al de l'observador fix; és la **dilatació de les durades**.


El recíproc és cert. Per a l'observador "mòbil", l'observador "fix" es desplaça amb la velocitat $-v$ i el fet de canviar v per $-v$ en la relació anterior no canvia res al resultat numèric.

Els dos observadors fixos, cadascú dins el seu propi sistema referencial, observen un alentiment del rellotge de l'observador en moviment.


Fes d'altres aplicacions numèriques amb l'ajut del fitxer Excel  adjunt o, si no teniu Excel, del fitxer html .

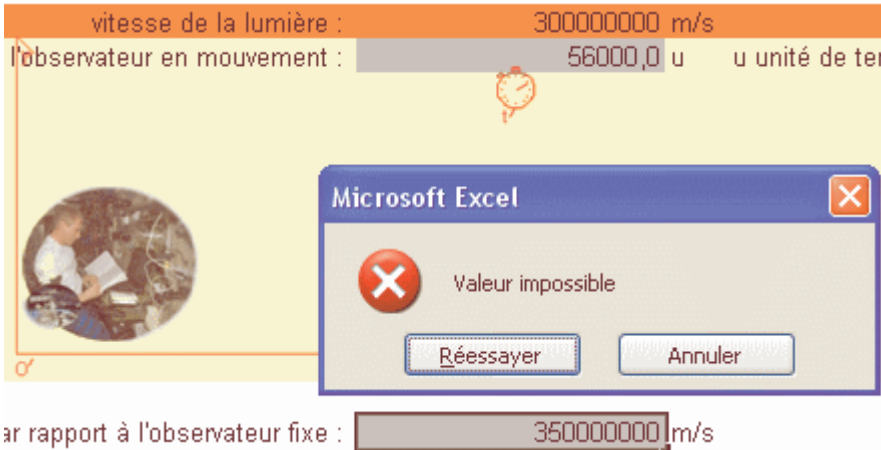
 Completa el següent quadre:

| T' (observador mòbil) | v velocitat de l'observador mòbil | T (observador fix) |
|-----------------------|--------------------------------------|--------------------|
| 1000 | 30000 | |
| 1000 | 250000000 | |
| 1000 | 280000000 | |
| 1000 | -2,8E8 | |
| 1000 | | 1001,00 |
| 1000 | | 2000 |
| 2000 | | 3000 |
| 3600 | 300 (<i>velocitat del so</i>) | |
| 3600 | 600 (<i>avió supersònic Mach2</i>) | |
| 3600 | 30 (<i>automòbil</i>) | |

 En aquest quadre, per quin valor v de la velocitat de l'observador la durada ha estat dilatada de solament 1/1000 del seu valor inicial?

 Per què podem dir que segons les 3 darreres línies del quadre "l'hora, és l'hora"?

 Explica l'error mostrat per Excel:



The screenshot shows a simulation window with the following text:

- vitesse de la lumière : 300000000 m/s
- l'observateur en mouvement : 56000,0 u u unité de ter
- ar rapport à l'observateur fixe : 350000000 m/s

An Excel error dialog box is overlaid on the simulation, with the following text:

- Microsoft Excel
- Valeur impossible
- Réessayer
- Annuler

4) El temps del GPS:

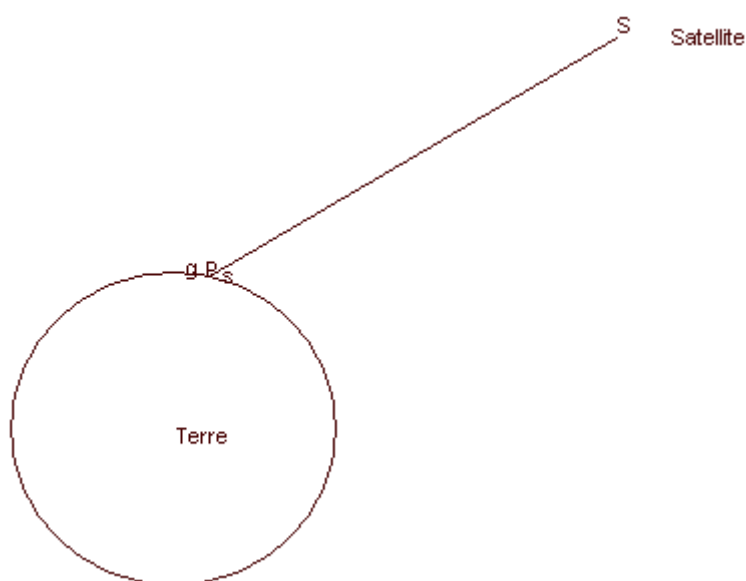


El funcionament del GPS està basat en la detecció de satèl·lits situats en òrbita a una altitud de 20 000 km i que tenen una velocitat orbital de 14 000 km/h o sigui 3900 m/s aproximadament, i el seu període és de 12h.

Estem lluny de la velocitat de la llum i això que...
Respecte a un rellotge idèntic, situat a la Terra, el rellotge del GPS s'endarrereix prop de 8 μs per dia. És un efecte de la relativitat especial.

 Busca aquest resultat mitjançant el càlcul.

El principi de la localització:



El satèl·lit envia un senyal electromagnètic, que es propaga a la velocitat de la llum, a l'instant t_0 (del rellotge atòmic del satèl·lit) que és rebut a l'instant t_1 pel GPS. El GPS determina la seva posició respecte al satèl·lit:

$$PS = c(t_1 - t_0)$$

Tot va bé si el rellotge del satèl·lit no endarrereix.

L'error en la posició:

Si el rellotge endarrereix 8 μs, l'error en la distància PS és de: $8 \cdot 10^{-6} \times 3 \cdot 10^8$ és a dir 2400m o **2,4 km**. Inacceptable per un GPS.

Els mètodes de càlcul, per al GPS, de posicionament de punts a la superfície de la Terra corregeixen les derives relativistes dels rellotges a bord del satèl·lit. Retard per la relativitat especial o avançament per la relativitat general, però això és una altra història...

Material: ordinador amb Internet Explorer (o FireFox), programari Excel 2003 (o posterior), GPS, auricular o altaveu