

Velocitat de la llum i relativitat dels moviments

Albert Gras Martí

Físic · Membre de l'IEC

Els moviments són relatius

Si la **xiqueta** camina mentre bufa, veu la pilota quieta, a sobre de l'embut. Nosaltres, però, veiem que la pilota es mou en línia recta.

Quan viatgem en un tren sembla que els arbres del paisatge es mouen en sentit contrari. Si un tren ràpid ens avança, sembla com si nosaltres estiguérem parats. Tampoc notem que la Terra viatja a 100-mil km/h! al voltant del Sol. Diguem que els moviments són relatius, i que la descripció del moviment depèn de l'observador: per a un arbre, els trens es mouen; vist des de la Lluna, l'arbre es mou. Si anem en un tren a 70 km/h i llancem una pilota cap endavant a 10 km/h, un observador a l'andana dirà que la pilota es mou a 80 km/h.

Per a la llum, la regla de sumar la seua velocitat amb la del tren en marxa, com la de la pilota i el tren, no s'aplica perquè la llum té la mateixa velocitat independentment de quin observador inercial la mesure. Així, si engegum una llanterna dins d'un tren en marxa tant nosaltres, com l'observador de l'andana, com un observador que viatge en qualsevol altre tren, tots veurem que la llum es mou a la mateixa velocitat.

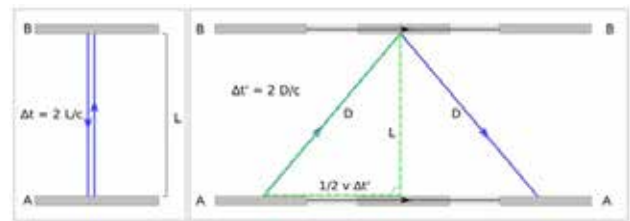
Quan les velocitats de què parlem són comparables a la velocitat de la llum, 300-mil km *per segon*, les nostres intuïcions fallen i les descripcions dels moviments han de ser ben diferents. A més a més, des del punt de vista de la llum, aquesta *no es mou, no 'viatja' entre dos punts*.



Xiqueta camina bufant. (Font: <https://www.mombrite.com>)

Relativitat Especial: Dilatació del temps, i contracció de les longituds

Einstein ens va explicar les conseqüències del fet experimental que la velocitat de la llum és la mateixa per a tots els observadors que es mouen a velocitat relativa constant: tant les distàncies entre dos punts com els intervals de temps que transcorren entre dos fets són relatius, i els resultats de les mesures depenen de quin observador les faça. Vegem-ho.



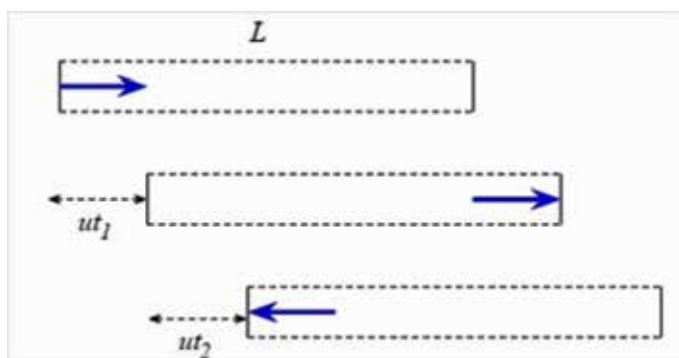
Relotge de llum. (Font: <https://en.wikipedia.org/>)

La figura representa un 'rellotge de llum': El viatger d'un tren engega una llanterna des del punt A cap al sostre, B, a distància L , on hi ha un espill que reflecteix la llum cap avall. La llum recorre dues vegades la distància al sostre i triga un temps $\Delta t = 2 \cdot L/c$, que depèn de la velocitat de la llum, c . Tanmateix, una persona que ho observa des de l'andana de l'estació veu que la llum recorre un trajecte més llarg, $2 \cdot D$, perquè el tren està en marxa i la llum arriba al sostre del vagó quan aquest s'ha desplaçat una mica, i torna al terra del vagó que es troba una mica més endavant. Per a la persona de l'andana, el temps que transcorre és $\Delta t' = 2 \cdot D/c$. Com que la velocitat de la llum ha de ser la mateixa per a la persona del tren i la de l'andana, i $D > L$, l'interval de temps entre que la llum ix de la llanterna i torna al terra, mesurat des de l'andana, és més llarg que el que mesura la persona que està en moviment. La persona de l'andana ho anomena dilatació del temps: el pas del temps és més lent per a l'observador en moviment.

D'aquest efecte relativista ve l'anomenada paradoxa dels bessons: si un bessó viatja en una nau espacial a gran velocitat (per exemple, a 99 % de c), quan aquest bessó torna a la Terra troba el seu germà molt envellit: si per al bessó viatger han passat 10 anys (el seu rellotge va més lent), per al terrestre n'han passat 70.

Si ara s'enfoca la llanterna cap a la paret davantera del vagó, on hi ha un espill, la distància que recorre la llum fins que torna

a la llanterna és el doble de la distància de la llanterna a la paret. Tanmateix, per a un observador a l'andana, la llum ha de recórrer una distància una mica més gran que la distància entre la llanterna i la paret (perquè la paret s'allunya) i una distància més curta que la del vagó en el viatge de tornada de la llum rebotada, perquè la llanterna s'està movent en sentit contrari a aquesta llum. Com que la velocitat de la llum ha de ser la mateixa per a les dues persones, resulta que l'observador del tren mesura una longitud del vagó més curta. S'anomena contracció de longituds: les distàncies entre dos punts que mesura un observador en moviment són més curtes que les que mesura un observador a l'andana.



Un raig de llum observat des d'un vagó en marxa i des de l'andana.
(Font: <https://physics.stackexchange.com>)

La relativitat dels temps i de les distàncies són conseqüència del fet experimental que la velocitat de la llum és la mateixa siga qui siga qui la mesure.

Aplicació: Vida d'un muó

Podem veure les conseqüències de la Relativitat Especial amb unes partícules elementals, anomenades muons, que són inestables: al cap d'una vida mitjana ($T_{1/2} = 2.2$ milionèsimes de segon) només en queden la meitat. Al cap de dues vides mitjanes s'hauran desintegrat la meitat de la meitat dels muons, etc.

Els muons que impacten sobre la Terra són creats pels raigs còsmics a les capes altes de l'atmosfera i viatgen a velocitats properes a la de la llum. Si multipliquem aquesta velocitat per la seua vida mitjana, obtenim que en uns 600 m se'n desintegraran la meitat. L'extensió de la capa atmosfèrica, L , d'uns quants quilòmetres, equival a moltes vides mitjanes i, per tant, s'haurien de reduir a gairebé zero el nombre de muons que ens arriben a la superfície. Tanmateix, cada metre quadrat de superfície terrestre (inclòs el nostre cos) és colpejat per deu-mil muons cada minut, un nombre semblant al de muons creats en les capes altes de l'atmosfera.

La teoria d'Einstein permet entendre el fet experimental que sobreviuen moltíssims més

muons dels que esperariem. Posem que es un factor que cal aplicar per dilatar el temps o per contraure longituds és 10. Aleshores:

- Des del punt de vista dels muons, el seu temps de vida és $T_{1/2}$, però el gruix de l'atmosfera s'acurta molt, $L/10$ (contracció de longituds) i poden recórrer-la sense desintegrar-se apreciablement.

- Des del punt de vista d'una persona a la Terra, el gruix de l'atmosfera és L però la vida mitjana dels muons s'allarga molt, $10 \cdot T_{1/2}$ (dilatació del temps) i viuen molt més temps que quan no viatgen a velocitats tan elevades. Tenen temps, per tant, de travessar la capa atmosfèrica L i arribar a la Terra.

Des dels dos punts de vista obtenim la mateixa conclusió, que molts muons arriben a la Terra sense desintegrar-se, tot i que les explicacions del mateix fet varien en funció de quin observador en parle.

La llum no "viaja", el temps no passa per a la llum

La llum és un viatger molt peculiar. Què passa si un vehicle es mou a la velocitat de la llum i engega els fars? L'acció d'engegar els fars no té sentit: des de la perspectiva de la llum, el temps no passa. No transcorre temps entre que el 'cotxe' surt del garatge i arriba a la seua destinació.

El factor que permet calcular quant es contrau una longitud o quant es dilata el temps creix quan augmenta la velocitat d'allò que estem observant. Si els muons de l'exemple anterior es mogueren a la velocitat de la llum, el factor esdevindria infinit. I això li passa a la llum. Des del sistema de referència de la llum, el temps es dilata de manera infinita, i els rellotges s'aturen. El temps s'atura i, des del punt de vista de la llum, l'espai (l'Univers) es contrau a un punt, no hi ha distàncies a altres punts de l'Univers. Per a un fotó, tot l'Univers està concentrat en un punt i l'edat de l'Univers és zero. Per això la llum no 'viaja', arriba de manera 'instantània', perquè no ha d'anar enlloc.

Si engegum una llanterna, podem dir que ha trigat un temps en viatjar cap a l'altre extrem de la cambra. Per a la llum, però, el temps que ha trigat és zero perquè el temps que transcorre entre que engegum la llanterna i la llum 'arriba' a l'altre extrem és zero: el punt on hem engegat la llanterna i l'altra paret estan al mateix lloc.

Nosaltres diem que la llum s'emeta i viatja del Sol a la Terra i triga 8 minuts. Aquests fets es narren des d'una perspectiva externa, la nostra, la dels observadors per als quals el temps sí que passa. La llum és la part de l'Univers que és absoluta. La resta, l'espai, el temps, la massa, són totes relatives, depenen de la velocitat a què es mouen. El temps és allò que li passa a la matèria quan es mou per l'espai. La llum, però, no experimenta el pas del temps. La llum no té massa, pots moure's instantàniament entre qualsevol dos punts.