

Es pot viatjar a més velocitat que la llum en el buit?

Miguel Ángel Sanchis-Lozano

Departament de Física Teòrica, IFIC, Centre mixt CSIC · Universitat de València

Nicolás Sanchis-Gual

Instituto Superior Técnico · CENTRA · Universidade de Lisboa

Segons la mecànica newtoniana un cos material augmenta la seua velocitat respecte a l'anomenat espai absolut en transferir-li energia cinètica, i pot igualar o inclús superar la velocitat de la llum en el buit (c), uns 300 000 km/s. Com es ben conegut, els experiments de **Michelson-Morley**, al segle XIX, varen demostrar que no cal parlar d'un sistema de referència privilegiat associat a l'espai absolut i, a més a més, la velocitat de la llum és sempre la mateixa independentment del moviment de la font i de l'observador. **Albert Einstein**, en la teoria de la relativitat especial, refereix el moviment de qualsevol cos físic, la llum inclosa, a un sistema de referència inercial, és a dir, sense acceleració. Aleshores, la llei d'adició de velocitats de **Galileu** queda substituïda per una nova llei tal que mai un objecte material no pot superar la velocitat de la llum en el buit, en qualsevol sistema inercial de referència.

De fet, el paradigma actual de la física afirma que és impossible enviar cap partícula ni ona d'un punt a un altre de l'espai amb una velocitat superior a c . A banda, només els cossos sense massa en repòs, com el fotó (quantum de la llum), poden viatjar a la velocitat c . Si un cos té una certa massa en repòs (com, per exemple, un protó) i el volem accelerar (com en el col·lisionador LHC del CERN), al principi és fàcil, però a mesura que adquireix velocitat cada vegada requereix més energia per a accelerar-ho (podem dir que la seua "massa en moviment" augmenta) i mai no pot assolir la velocitat de la llum. Seria necessària una energia infinita.

Per tant, la velocitat de la llum, com a la velocitat límit per a la transmissió de senyals (de qualsevol tipus, partícula, llum o el que siga), és a dir, d'informació, és una constant fonamental de la natura i determina les relacions causa-efecte entre els esdeveniments de qualsevol tipus del nostre univers. Per exemple, podem estar segurs que l'assassinat de **Juli Cèsar** a Roma ha estat connectat causalment amb el naixement de **Brutus** (un dels magnicides) uns anys abans, però no

tingué res a veure amb l'explosió d'una supernova detectada per astrònoms xinesos l'any 1054.

Una vegada dit tot això, l'amable lector deu estar convençut que la velocitat de la llum és una frontera insalvable per a la transmissió de senyals, d'acord amb multitud d'observacions experimentals fins hui.

Ara bé, recordem que la teoria especial de la relativitat es refereix sols a sistemes de referència inercials en un espai-temps uniforme i estable amb una mètrica de **Minkowski** o pseudoeuclidiana. Però, què passa en el nostre univers? Està descrit per un espai-temps prou diferent del de la relativitat especial. Segons la hipòtesi tradicional del *Big Bang*, es va produir una singularitat en l'instant "zero" que va crear el temps i l'espai que va començar a créixer amb un ritme diferent al llarg de la història del cosmos. Molt poc després de la Gran Explosió, l'univers cresqué d'una manera exponencial: passà de la grandària d'un àtom al d'una taronja en una menudíssima fracció de segon. Fou l'època inflacionària de l'univers.

Seguidament, l'univers va continuar creixent, però ja a un ritme molt més "tranquil", durant els següents 10000 milions d'anys, en una època dominada successivament per la radiació i per la matèria. En el present, 13800 milions d'anys després de la Gran Explosió, la situació ha canviat i ens trobem en una època dominada per l'anomenada energia fosca que genera una antigraetat que de nou accelera l'expansió de l'univers i de la qual ningú no té ni idea de què és (l'energia del buit o un camp de força desconegut).

És clar que, al contrari de l'espai-temps de Minkowski, on qualsevol desplaçament espacial o temporal de l'origen no ha de canviar la descripció dels fenòmens físics, l'univers en expansió no gaudeix d'una invariància sota tals desplaçaments. Entre altres coses això vol dir que l'energia total de l'univers no té per què conservar-se (!) i que cal repensar el concepte de moviment dels cossos i de la llum.

En efecte, com a conseqüència d'aquesta



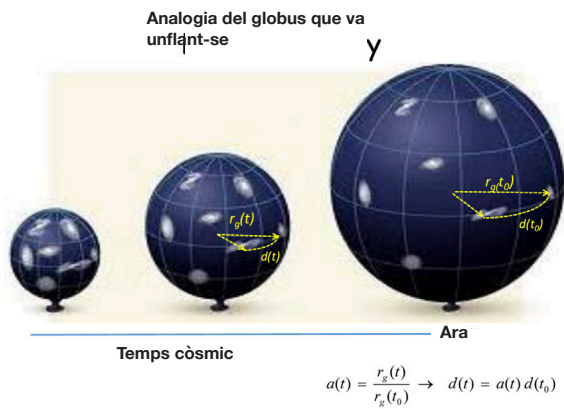


Figura 1. Analogia de l'expansió de l'univers mitjançant un globus que s'infla. El radi del globus creix proporcionant el factor d'escala de comparació de distàncies entre el present i un temps cosmològic anterior. És important destacar que la grandària dels objectes (grans o menuts) de l'univers no canvia com a conseqüència de l'expansió de l'espai perquè les forces d'atracció (gravitatòria, electromagnètica o nuclear) són prou fortes per a mantenir-los lligats (sempre que l'energia fosca fantasma no "s'empodere" de l'univers i pugui trencar els enllaços químics i físics de la matèria, fins i tot els protons i neutrons, que es desintegrarien en quarks).

expansió de l'espai cal distingir dos grans tipus de moviment dels cossos celestes. D'una banda, el moviment causat per l'expansió de l'espai mateix (anomenat *comòbil*); D'altra, l'anomenat moviment "peculiar" referit a un sistema de referència local, és a dir, a prop del cos que estem observant. A aquest moviment s'aplica la relativitat especial i per tant mai no superarà *c*. Aleshores, escrivim la velocitat (radial) de qualsevol cos de l'univers (diguem-ne, respecte a la Terra) com la suma de dues velocitats: peculiar i d'expansió, respectivament:

$$\mathbf{v}_{\text{tot}} = \mathbf{v}_{\text{pec}} + \mathbf{v}_{\text{exp}}$$

on el valor positiu correspon al sentit d'allunyament de la Terra.

L'exemple d'un globus que està inflant-se es prou adequat per a entendre el significat i conseqüències de l'expansió de l'univers (figura 1). La superfície de l'esfera representa l'univers (bidimensional, la tercera dimensió de la figura sols té sentit per a facilitar la visualització). Les taques representen galàxies que s'allunyen unes de les altres a mesura que s'infla el globus com es mostra a la seqüència d'imatges. Assenyalem que totes les galàxies s'allunyen unes de les altres i no cal buscar cap punt privilegiat sobre el globus corresponent a l'origen de la Gran Explosió.

És important també assenyalar que la grandària de les galàxies, i en general de qualsevol cos (siga un bacteri, una pedreta, el Sol o el sistema solar), no canvia com a conseqüència de l'expansió de l'espai mateix, perquè les forces de lligam (gravitatòries,

electromagnètiques o nuclears) són prou fortes per a aconseguir mantenir la distància entre molècules, àtoms o electrons i nuclis atòmics, segons les lleis de la física i la química. És per això que podem ser conscients de l'expansió de l'univers, ja que qualsevol regle de mesurar, i aleshores la unitat de longitud (figura 2 és una constant al llarg del temps cosmològic. Si no fóra així, no tindria gens de sentit parlar d'expansió.

La primera prova experimental de l'expansió de l'univers és deguda a l'astrònom americà **Edwin Hubble** (el satèl·lit porta el seu nom) quan va mesurar la velocitat d'allunyament de les galàxies respecte a la Terra mitjançant el desplaçament cosmològic de la llum cap al roig. Quantitativament la llei de **Hubble-Lemaître** s'escriu com:

$$v = H_0 d$$

on *v* es la velocitat de retrocés de la galàxia causada per l'expansió còsmica, *H*₀ és la constant de Hubble (≈ 70 km/s/Mpc) i *d* la distància actual entre nosaltres i la galàxia observada.

Res impedeix matemàticament que, per a valors prou grans de la distància *d*, *v* pugui superar a *c*. De fet, es defineix el radi de Hubble (*R*_h) com la distància a què les galàxies (o qualsevol cos celeste) retrocedeixen respecte a nosaltres (per exemple) amb exactament la velocitat de la llum, és a dir, quan es compleix

$$R_h = c/H_0$$

Aquest radi defineix una esfera (també anomenada de Hubble) que separa virtualment les galàxies que s'allunyen de nosaltres a velocitats supralumíniques d'aquelles amb una velocitat inferior a *c*. Hom podria pensar que les velocitats superiors a *c* estan prohibides en la física relativista d'Einstein, però això no és cert perquè localment cada galàxia sempre tindrà una velocitat peculiar inferior a *c* (de fet, no relativista). La raó de moure's

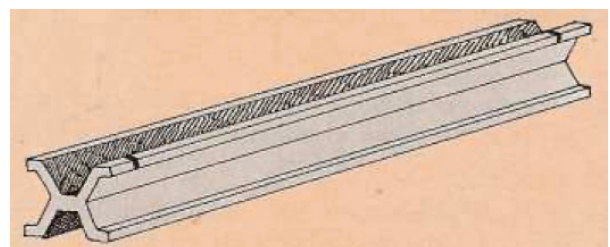


Figura 2. El metre patró original definit mitjançant unes marques en una barra de platí-iridi no s'altera a causa de l'expansió de l'espai, perquè les forces atòmiques no ho permeten. Tampoc l'actual definició de metre a partir de la distància recorreguda per la llum en el buit en una fracció 1/299792458 de segon tampoc no canviarà quan serà absolutament menyspreable l'expansió de l'univers en eixa fracció de segon. Perquè el "regle" per a mesurar longitud ens permet adonar-nos de l'expansió cosmològica a escales de milions d'anys, ja que roman inalterable.

amb velocitats relatives tan elevades és que l'espai mateix creix, sense acceleració dels cossos. Com més allunyades estiguen dues galàxies, més espai hi haurà entre elles, acumulant-s'hi els increments d'espai, i per això, augmentant la seua velocitat relativa i sobrepasant c .

Podríem pensar, també, que l'esfera de Hubble coincideix amb l'anomenat univers observable perquè les galàxies que viatgen a una velocitat major a la de la llum mai es podran observar des de la Terra. Amb aquest raonament mai no podríem aconseguir veure galàxies supralumíniques. Ara bé, això no és correcte en general, i dependrà del ritme i sentit de l'acceleració cosmològica, com veurem tot seguit.

Suposem, per exemple, que l'univers està expandint-se a un ritme elevat, com seria el cas d'un univers dominat per l'energia fosca. Llavors, fotons emesos dins de l'esfera de Hubble en un

temps cosmològic anterior, han de patir l'efecte de l'expansió accelerada i ser arrossegats més enllà de l'esfera de Hubble. En efecte, un fotó emès en direcció de la Terra (sentit negatiu) tindrà una velocitat combinada com hem comentat adés:

$$v_{\text{foto}} = -c + v_{\text{exp}}$$

Si la velocitat causada per l'expansió de l'univers v_{exp} , en aquest cas suposadament accelerada, esdevé superior a c , el fotó serà arrossegat per sempre i mai no arribarà a ser vist a la Terra.

En canvi, en el cas d'un univers en expansió desaccelerat, un fotó emès per una galàxia supralumínica en un temps cosmològic determinat, podria acabar trobant-se dins de l'esfera de Hubble (quan c supere v_{exp}) i al cap d'un temps, més o menys llarg, acabarà arribant a la Terra, ja que v_{foto} esdevindrà negatiu.

Racó matemàtic

Com hem comentat, en el moviment dels cossos celestes cal considerar el creixement de l'espai mateix en un univers en expansió (o decreixement en el cas d'una eventual contracció). Per això s'introdueix en cosmologia l'anomenat factor d'escala, $a(t)$, per a tindre en compte la variació de les distàncies deguda a l'expansió. En l'analogia de la figura 1.a, $a(t)$ és pot identificar intuïtivament amb el quocient dels radis del globus en diferents temps cosmològics.

En alguns models cosmològics habituals, el factor d'escala presenta una dependència de tipus potencial amb el temps

$$a(t) \approx t^n \quad (n > 0)$$

el radi de l'esfera de Hubble (respecte a la Terra, per ser concrets) adopta la forma:

$$R_H = ct/n$$

Aleshores la superfície de l'esfera de Hubble s'allunya de nosaltres amb velocitat $v_H = c/n$

Observem que per a $n=1$ correspon a un univers en expansió lineal (velocitat constant) amb $v_H = c/n$, per tant, el nombre de galàxies dins (i fora) de l'esfera de Hubble es mantindrà sense variació. En canvi, en un univers dominat per la matèria amb $n=2/3$, l'esfera de Hubble s'expandeix amb velocitat $3c/2$ "atrapant" i sobrepasant galàxies amb velocitat $c/2$ relativa a nosaltres que passen a ser observables. En un univers dominat per la radiació $n=1/2$, l'esfera de Hubble s'expandeix amb velocitat $2c$ sobrepasant galàxies amb velocitat c relativa a nosaltres. Tot això ocorre perquè els universos d'aquests dos tipus estan desaccelerant-se i regions que no eren visibles passen a ser-ho.

En canvi, en un univers en expansió accelerada es compleix

$$a(t) = a_0 \exp(t-t_0)$$

En aquest cas el radi de Hubble roman constant amb el temps (el mateix resultat s'obté en el límit $n \rightarrow \infty$ de l'expressió anterior). Llavors, les galàxies creuaran la superfície de Hubble i ja no seran mai visibles des de la Terra. No ho veurem, naturalment (falten milers de milions d'anys) però el cel es quedarà fosc sense estrelles de nit. Una llàstima, sobre tot per als poetes i per als astrònoms!

