

# Expansió de l'Univers

**Ricardo Moreno, Susana Deustua, Rosa M. Ros**

International Astronomical Union, Colegio Retamar (España), Space Telescope Science Institute (USA), Universitat Politècnica de Catalunya (Espanya)

## Resum

Aquest taller conté set activitats senzilles de realitzar, en les que treballarem els conceptes clau de l'expansió de l'Univers: a la primera veurem de què es tracta l'efecte Doppler, en la segona, tercera, quarta i cinquena experimentarem qualitativament amb l'expansió d'un filferro, una goma, d'un globus i d'una superfície de punts respectivament. En la sisena activitat veurem de forma quantitativa, l'expansió d'una superfície i fins i tot calcularem la constant d'Hubble per a aquest cas. En la setena detectarem la radiació de fons de microones. L'última activitat es simulen lents gravitacionals que serveixen per analitzar com es detecta la matèria fosca.

## Objectius

- Comprendre què és l'expansió de l'Univers.
- Comprendre que no hi ha un centre de l'Univers.
- Comprendre què és la Llei d'Hubble.
- Comprendre el significat de la matèria fosca i simular lents gravitacionals

## L'Origen de l'Univers

La teoria sobre l'origen de l'Univers més acceptada avui dia es coneix amb el nom de Big Bang: hi va haver un esdeveniment singular original, que va iniciar una expansió de l'propri espai. Però no són les galàxies les que es mouen "a través de l'espai", sinó que és l'espai entre elles el que s'expandeix, arrossegant a les galàxies. Per aquesta raó no es pot parlar d'un centre de l'Univers, com no es pot parlar d'un país que estigui al centre de la superfície terrestre.

La velocitat de recessió d'una galàxia i la distància a la qual estan de nosaltres és proporcional. La constant que les relaciona és l'anomenada constant d'Hubble. La llei de Hubble relaciona de manera lineal la distància d'una galàxia amb la velocitat amb que s'allunya.

La primera prova del Big Bang va vi amb l'observació del desplaçament al vermell en els espectres de les galàxies. La prova que va donar el recolzament definitiu a la teoria del Big Bang, va ser la detecció de la radiació de fons de microones.

## Desplaçament al roig

Si en el laboratori mirem amb un espectroscopi la llum que ens arriba d'una gas calent, per exemple hidrogen, veurem unes línies de colors que són típiques d'aquest gas, a unes longituds d'ona fixes. Si fem el mateix amb la llum que ens arriba des d'una remota galàxia, veiem aquestes línies però desplaçades (figura 1). És l'anomenat desplaçament a l'vermell, ja que per a la majoria de les galàxies el desplaçament és cap a aquest color.

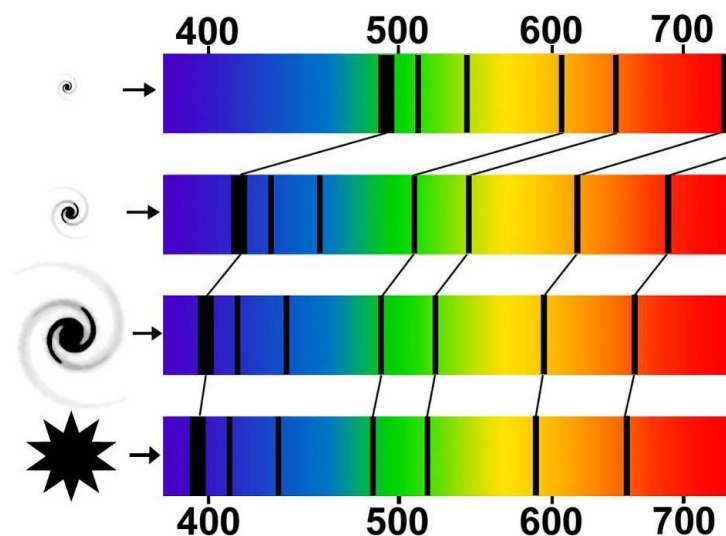


Fig.1: Com més allunyada està la galàxia, el seu espectre es desplaça més cap al vermell, el que ens diu que s'allunya a major velocitat de nosaltres.

Aquest desplaçament a l'vermell de la llum és causa de l'allunyament de la galàxia respecte a nosaltres, de manera similar a un xiulet d'una locomotora o d'com una moto canvia el seu to segons s'apropi o s'allunyi de nosaltres. Com més gran sigui aquest desplaçament, major serà la velocitat.

Estudiant l'espectre de les galàxies del nostre grup local, s'obté que el Gran Núvol de Magallanes s'allunya de nosaltres a 13 km/s, i el Petit s'apropa a 30 km/s. Andròmeda s'acosta a 60 km/s mentre que M32 (una de les seves galàxies satèl·lit) s'allunya a 21 km/s. En altres paraules, les galàxies properes tenen moviments relatius petits i de forma irregular.

Però si anem a l'cúmul de Virgo, a una distància mitjana de 50 milions d'a.l., veurem que totes s'allunyen de nosaltres a velocitats entre 1.000 i 2.000 km/s. I en el supercúmul de Coma Berenice, a 300 milions de a.l., les velocitats d'allunyament oscil·len entre 7.000 i 8.500 km/s. Però si mirem en direcció oposada, obtenim que M74 s'allunya de nosaltres a 800 km/s i M77-1130 km/s. I si apuntem a galàxies més llunyanes i febles, la velocitat de recessió és encara més gran: NGC375 s'allunya a 6.200 km/s, NGC562-10.500 km/s i NGC326-14500 km/s. Mirem cap a on mirem, totes, excepte les molt properes, s'allunyen de nosaltres. Estaran enfadades amb la nostra? El desplaçament a l'vermell de les línies espectrals, pot mesurar-se mitjançant l'anàlisi espectroscòpic. Els astrònoms usen un instrument una mica més sofisticat, però essencialment igual que el que es mostra i construeix al taller de l'espectre solar.

## Activitat 1: L'Efecte Doppler

L'efecte Doppler és el que fa variar la longitud d'ona d'un so quan la font està en moviment. El experimentem en el so de motos o cotxes en una cursa: el so és diferent a l'apropar-se i a l'allunyar-se. O en un cotxe de bombers que passa al costat de nosaltres, al xiulet d'un tren en moviment, etc.

Es pot reproduir fent girar en un pla horitzontal un bronzidor, per exemple un rellotge despertador. Introduïm el rellotge en una bossa de tela (figura 2a) i el lliguem amb una corda. A l'fer-ho girar sobre els nostres caps (figura 2b), es pot sentir que quan s'acosta a l'espectador, la l s'escurça i el so és més agut. Quan s'allunya, la l s'allarga i el so és més greu. El que està en el centre de gir no detecta cap variació.



Fig. 2a: Rellotge despertador, bossa i corda .



Fig. 2b: Ho fem girar sobre els nostres caps. Els espectadors senten la diferència de to

Aquest és l'efecte Doppler a causa de el desplaçament. Però no és el que tenen les galàxies amb l'expansió. Les galàxies no es mouen a través de l'espai, sinó que és l'espai entre elles el que s'expandeix.

## Activitat 2: El "estirament" dels fotons

L'Univers, a l'expandir-se, "estira" els fotons que hi ha en ell. Com més temps dura el viatge de l'fotó, més estirament pateix. Es pot fer un model d'aquest estirament amb un cable semirígid, de què es fa servir en les instal·lacions elèctriques encastades de les cases. Es talla aproximadament un metre, i es doblega amb la mà fent diversos cicles d'una sinusoide, representant diverses ones (figura 3a).

Es pren el cable amb les dues mans i s'estira (figura 3b) i s'observa que la longitud d'ona augmenta, com passa en la radiació que ens arriba des d'una galàxia. Com més lluny està de nosaltres, més temps ha tingut per estirar-se i s'ha desplaçat més cap al vermell ( $\lambda$  majors).

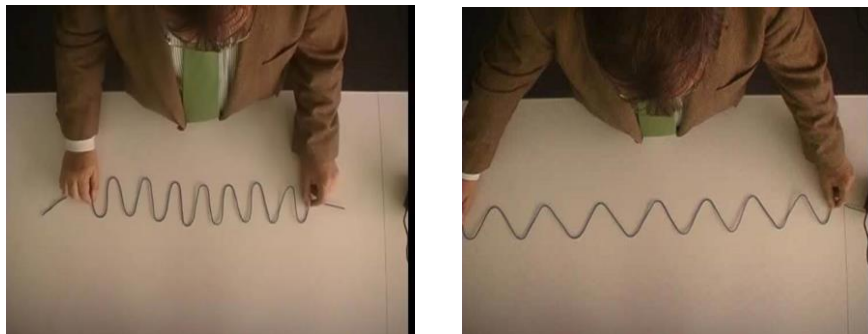


Fig. 3a: Ones fetes amb cable semirígid Fig. 3b: Les mateixes ones, estirades, amb una longitud d'ona major

## Llei d'Hubble - Lemaître

Va ser Edwin Hubble (figura 4) qui es va donar compte en 1930 de l desplaçament a l'vermell de les galàxies, i va establir la llei que porta el seu nom: com més llunyana està una galàxia, més de pressa sembla que s'allunya de nosaltres. Això indica que l'Univers s'expandeix en totes direccions, de manera que tots els cossos que estan en ell es van allunyant els uns dels altres. El que veiem allunyar-se de nosaltres a totes les galàxies no vol dir que estiguem en el centre: el mateix observaria un extraterrestre des de qualsevol lloc de l'Univers, com passa en una explosió d'uns focs artificials: totes les partícules lluminoses es van separant entre si mogudes per l'explosió de la pólvora.

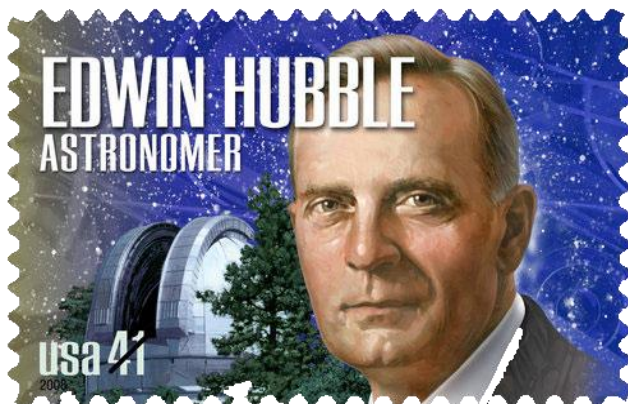


Fig.4: Edwin Hubble

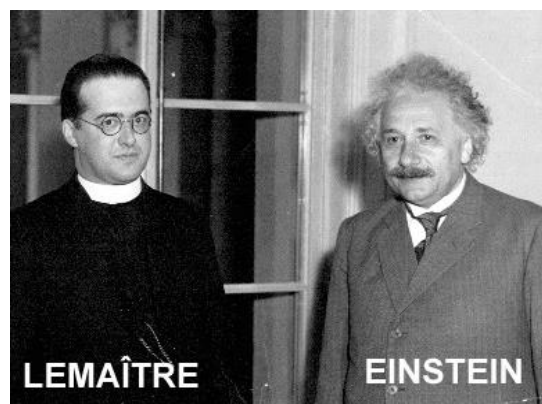


Fig. 5: George Lemaître i Albert Einstein

No obstant això, el model real no és el d'unes galàxies movent-se a través d'espai, sinó que és l'espai entre elles el que s'expandeix, arrossegant a les galàxies.

Si l'espai s'expandeix en totes direccions, vol dir que fent marxa enrere a el temps, la matèria va haver d'estar concentrada en algun moment inicial en què tot va començar.

Així va ser com George Lemaître (figura 5) va establir el model de l'Univers més acceptat avui dia: hi va haver una gran explosió original i en ella estem muntats encara. En aquesta expansió és el propi espai el que va dilatant-se.

Per entendre això imaginem un globus de goma amb una sèrie de punts dibuixats en la seva superfície, que representen les galàxies (figura 6). Segons el anem inflant, l'espai de goma elàstica entre les motes va augmentant. De la mateixa manera segons passa el temps, l'espai va expandint-se, i la matèria continguda en ell va separant entre si.

Per tant, la velocitat aparent de recessió d'una galàxia i la distància a la qual estan de nosaltres és proporcional. La constant que les relaciona és l'anomenada constant d'Hubble. La llei d'Hubble-Lemaître relaciona la distància d'una galàxia amb la velocitat aparent amb que s'allunya:

$$v=H \cdot d$$

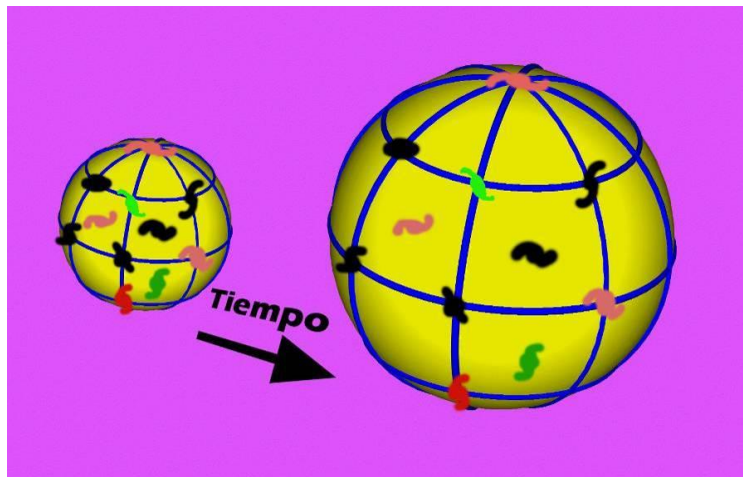


Fig. 6: Segons passa el temps, l'espai va expandint i la matèria continguda en ell va separant entre si.

Per determinar el seu valor seria suficient saber la velocitat i la distància d'algunes galàxies. La velocitat amb que una galàxia sembla allunyar-se és fàcil de mesurar amb precisió pel desplaçament a l'vermell, però la distància a la qual està, especialment en el cas de les més llunyanes, és més difícil. Els científics no es posen d'acord en el valor de la constant de Hubble. Segons s'usi un mètode o un altre surten uns valors, que en general oscil·len entre 50 i 100 km/s per Megaparsec. El valor més acceptat actualment és aproximadament 70, el que indica una edat de l'Univers de 13.700 milions d'anys.

### Activitat 3: L'Univers en una goma elàstica

Edwin Hubble va descobrir que totes les galàxies semblen allunyar-se de nosaltres. Com més lluny estan, més ràpidament ho fan. L'anomenada Llei d'Hubble-Lemaître estableix que la velocitat aparent d'allunyament d'una galàxia respecte a nosaltres és proporcional a la seva distància. No és que les galàxies es moguin per l'espai, és el mateix espai que hi ha entre elles el que s'engrandeix. La Llei d'Hubble-Lemaître és, per tant, una conseqüència lògica de l'expansió de l'Univers. I encara que totes les galàxies semblin allunyar-se de nosaltres, no vol dir que estem en el centre de l'Univers.

Per realitzar aquesta experiència, cal fer unes marques sobre la goma cada cm amb un retolador. Cadascuna representarà una galàxia (l'A, B, C, etc.). La nostra galàxia serà la primera.

Situa la goma prop de la regla (figura 7a). Fes que la nostra galàxia coincideixi amb la marca de l'0 cm. Les altres galàxies A, B, C, ... coincidiràn amb les marques 1, 2, 3, 4 ... cm. Estira la goma (figura 7b) de tal manera que la nostra galàxia es mantingui en la marca de 0 cm, i que la següent (l'A) es situï sobre la de 2 cm. La distància d'aquesta galàxia a la nostra s'ha

duplicat. Què ha passat amb la distància entre les altres galàxies B, C, D i la nostra?, també s'han duplicat?



Fig. 7a: Goma sense estirar.

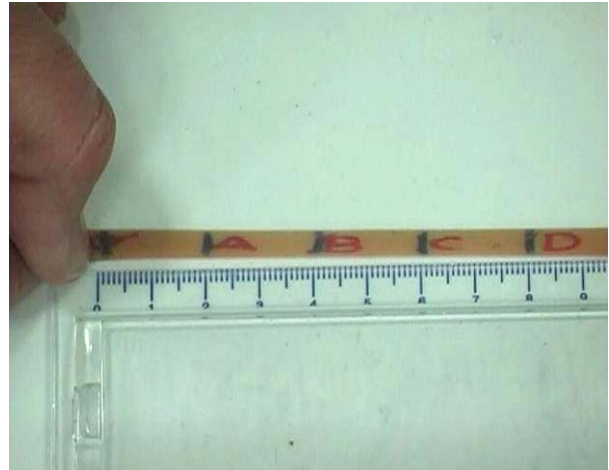


Fig. 7b: Goma estirada.

Suposa que el temps que ha durat l'estirament de la goma ha estat 1 segon. Les velocitats amb que augmenten la distància de les altres galàxies respecte de la nostra ¿són totes iguals o unes s'allunyen més de pressa que altres?

Per simular el que veuria un habitant d'una "galàxia" veïna, pots mantenir fix en l'estirament la galàxia B. Com veurà la nostra i les altres galàxies? ¿També li sembla que totes s'allunyen de la seva?

#### Activitat 4: L'Univers en un globus

En l'expansió de l'Univers, és l'espai entre les galàxies el que s'expandeix. Les pròpies galàxies no s'expandeixen, no canvien de mida. El que està unit fortament per la gravetat, no augmenta la seva dimensió.



Fig. 8a: Els trossos de porexpan enganxats al globus a mig inflar



Fig. 8b: Els trossos de porexpan s'allunyen quan el globus està més inflat

Hi ha un senzill experiment que permet mostrar aquest aspecte. Només cal fer servir un globus que el inflem una mica a el principi. Després enganxem sobre la seva superfície amb adhesiu uns quants trossets de porexpan (també valen monedes). A continuació seguim inflant el globus fins a arribar a el màxim que puguem. Els trossets de porexpan s'aniran separant els uns dels altres (figures 8a i 8b). Alguns semblaran allunyar-se més que d'altres, però cap s'acostarà ni canviarà de mida. És un model molt senzill de l'expansió de l'univers.

## Activitat 5: Càlcul de la constant de Hubble

La Llei d'Hubble-Lemaître diu que la velocitat aparent d'allunyament d'una galàxia  $v$  és proporcional a la distància  $d$  a la qual estigui de nosaltres:

$$v = H \cdot d$$

La velocitat  $v$  realment és la velocitat d'augment de la distància que hi ha des d'aquesta galàxia a nosaltres, ja que la galàxia sembla moure, però realment és l'espai entre ella i nosaltres el que s'expandeix. La constant  $H$  es diu constant d'Hubble, i es pot calcular sabent distàncies i velocitats de l'augment de distàncies a algunes galàxies. Si aïllem en la fórmula anterior:

$$H = \frac{v}{d}$$

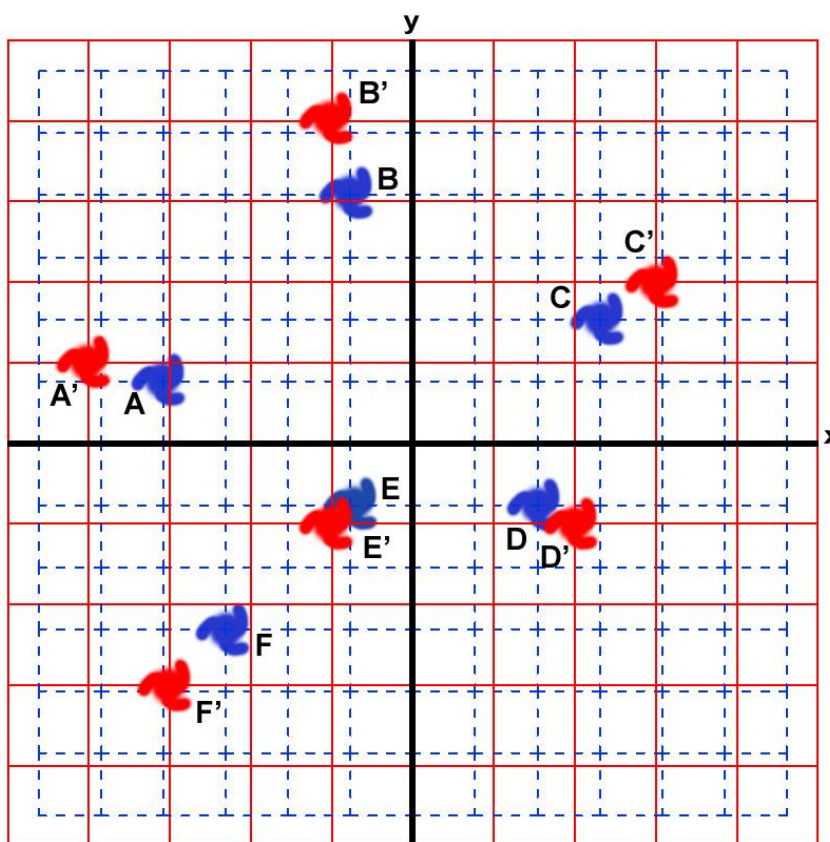


Fig 9: La quadrícula de traç continu (vermell) és la mateixa que la de traç discontinu (blau) però expandida. Les galàxies estan fixes a les quadrícules.

En el diagrama de la figura 9 es mostra l'espai, representat per una quadrícula blau de línies a traços, amb nosaltres al centre i diverses galàxies en blau a certa distància de nosaltres. A el cap de cert temps, suposem 10 segons, l'espai s'ha expandit i queda representat en vermell, tant la quadrícula (en línies contínues) com les galàxies.

Galaxia	Coordenadas $x,y$	$d$ =distància al origen	$\Delta d$	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A	(-4, 1)				
A'	(-4, 1)				
B	(-1, 4)				
B'	(-1, 4)				
C	(3, 2)				
C'	(3, 2)				
D	(2, -1)				
D'	(2, -1)				
E	(-1, -1)				
E'	(-1, -1)				
F	(-3, -3)				
F'	(-3, -3)				

Tabla 1: Amb les coordenades escrites com a exemple.

Galaxia	Coordenadas $x,y$	$d$ =distància al origen	$\Delta d$	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A					
A'					
B					
B'					
C					
C'					
D					
D'					
E					
E'					
F					
F'					

Tabla 2: S'omple amb les dades de la figura 9.

Per omplir la taula 1, en cada fila es posen les dades d'una galàxia. Per exemple, les coordenades s'estimen amb les quadrícules blau (línies de traços) o vermella (línies contínues), segons sigui la galàxia A o l'A' respectivament, la distància  $d$  s'obté mesurant amb un regle la longitud en cm que hi ha des nosaltres (al centre) a el centre d'aquesta galàxia. Les dades de la columna  $\Delta d$  s'obtenen restant les distància de A' i la de A. I en l'última columna cal usar en el denominador la distància abans d'expandir-(per exemple, la de A, no la de A'). Es comprova que:

- Les coordenades de cada galàxia no varien amb l'expansió (les galàxies no es mouen a través de l'espai).
- El valor  $H$  és bastant constant, independentment de les galàxies.



## El Big Bang

Actualment, la teoria de l'origen de l'Univers com una gran explosió és la més acceptada en la comunitat científica, encara que no falten els que la posen en dubte perquè encara hi ha detalls que queden sense explicació. El 1994 la revista americana *Sky & Telescope* va fer un concurs per batejar-la de nou. Es van rebre 12.000 propostes, però cap va aconseguir desbancar la que ja tenia: teoria del Big Bang o de la Gran Explosió. El nom l'hi va posar despectivament l'astrònom Fred Hoyle, a qui, amb certs prejudicis antireligiosos, li sonava massa d'acord amb la idea d'un Creador.

De l'observació d'un Univers en expansió es dedueix que, fent marxa enrere a el temps, hi va haver un principi en el qual es va produir l'explosió, donant origen a l'espai i als el temps tal com ara el coneixem. I cal preguntar-nos què va ser el que la va produir? Per què va passar? La ciència no dona resposta, ja que només treballa amb el funcionament del que ja existeix. La ciència si intenta explicar com es van produir els fets a partir del Big Bang, però no per què existeix la matèria. Aquest tipus de preguntes correspon respondre-als filòsofs, que tracten de la metafísica (més enllà de la física).

Alguns intents d'explicar la causa per part d'alguns físics recorrent a conceptes com fluctuacions quàntiques del no-res confonen el buit amb el no-res: el buit quàntic existeix, doncs té espai i certa energia. El concepte de res no és científic, és metafísic, i significa absència de tota existència, de manera que ni tan sols hi ha en ella espai. A la res, res pot existir ni fluctuar. Altres teories parlen de múltiple-universos, però per definició, són impossibles de comprovar (si poguéssim observar d'alguna forma un altre univers, entraria a formar part de el nostre, ja que el nostre univers és tota la matèria que està al nostre abast d'alguna manera) . Per aquesta raó, aquestes teories tampoc són científiques.

Tornem a la ciència. En l'instant inicial tota la matèria i energia estaven en una singularitat infinitament petita i densa. El Big Bang va ser l'explosió de l'espai a l'començament de el temps. I a partir d'aquest moment la matèria va començar a funcionar amb unes lleis que estaven escrites en el seu interior, i que van conduir a l'Univers a la situació actual.

## Activitat 6: No hi ha un centre d'expansió

A la figura 10 apareix un dibuix amb molts punts, que simulen les galàxies en un moment determinat. Fem d'ell una primera fotocòpia en paper transparent i després una altra en un altre paper transparent, lleugerament ampliada (per exemple un 105%).

Si les superposem en un retroprojector de transparències, obtenim una imatge (figura 11a) que representa significativament l'espai a l'expandir-se amb el temps: hi ha un punt en què coincideixen les dues transparències, i s'observa molt bé el desplaçament de tots els altres punts que és radial, i tant més gran com més allunyat estigui del punt coincident. Semblaria com si els punts s'allunyessin més de pressa com més lluny estiguin de el punt coincident.

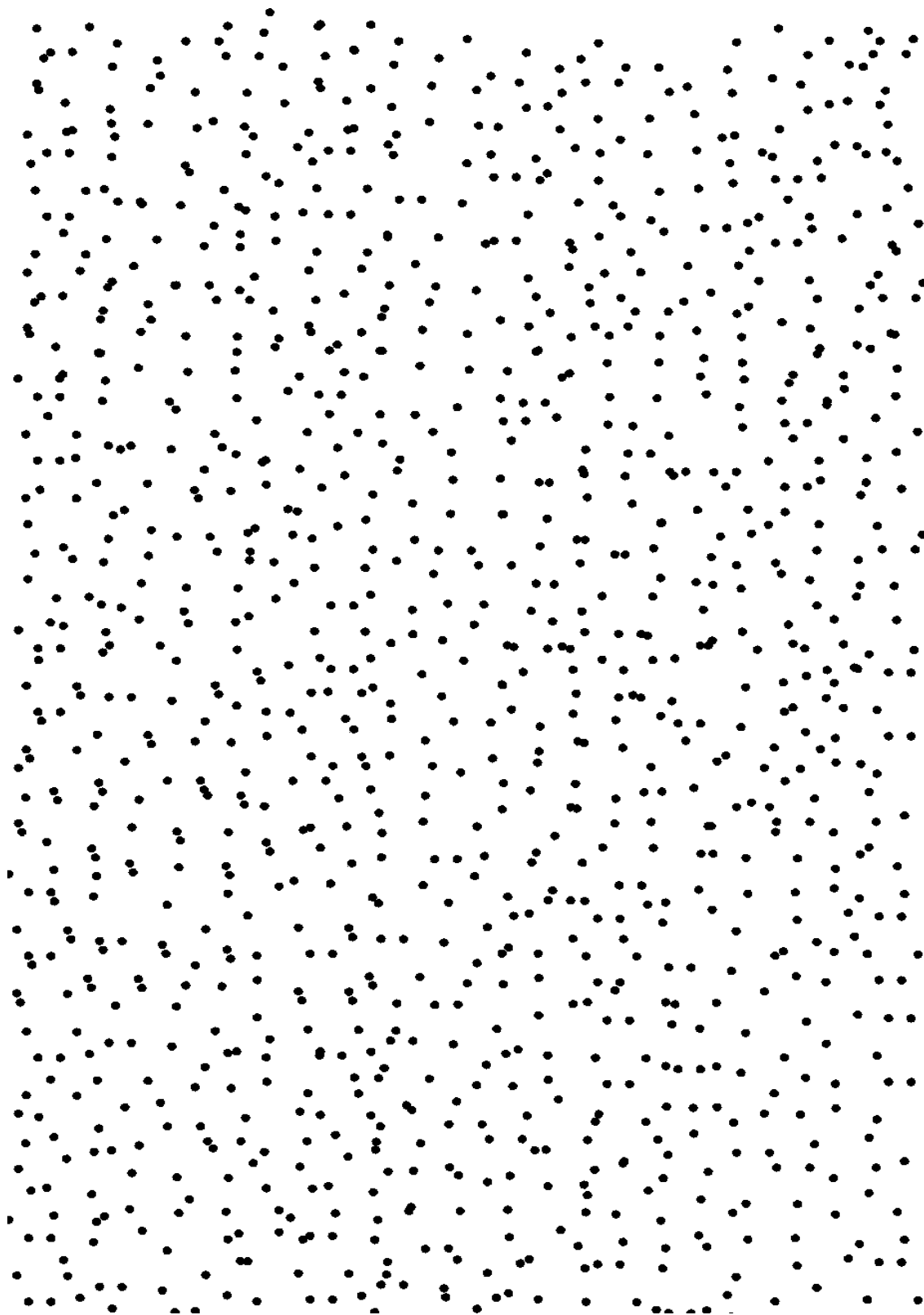


Fig. 10: Fotocopiar aquesta pàgina en una transparència, i després en una altra ampliada 105%

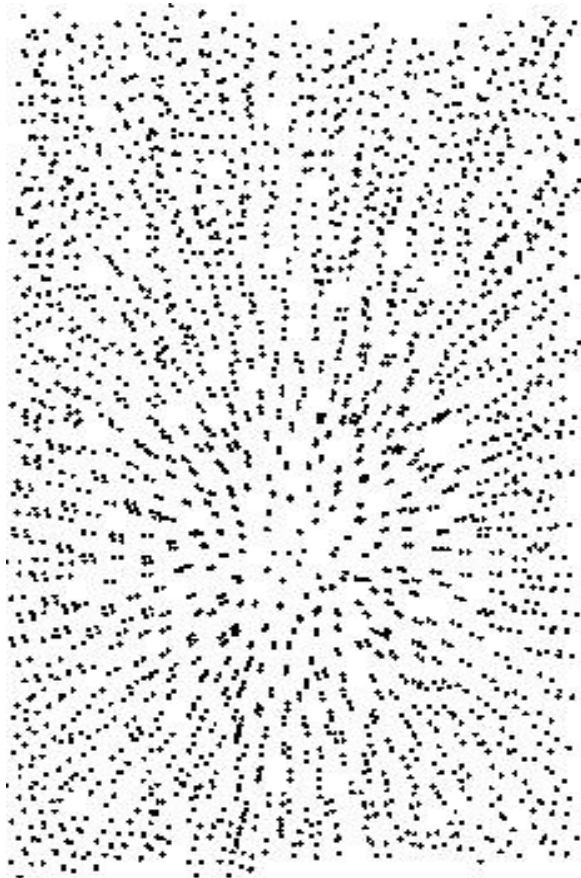


Fig. 11a: Superposició de dues transparències, una d'elles ampliada un 105%.

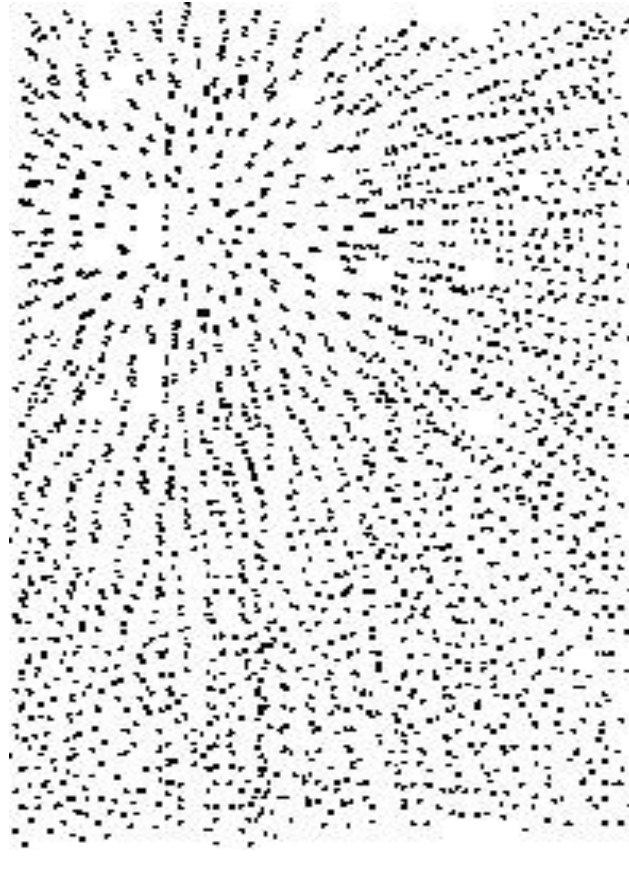


Fig. 11b: Si fem coincidir un altre punt, també sembla que tot s'allunya d'ell: no hi ha un centre d'expansió

Però si el punt coincident és un altre (figura 11b), passa el mateix. Així passa en l'espai: des de la nostra galàxia veiem que totes s'allunyen de nosaltres, i més ràpid com més lluny estigui de l'observador. Ens sembla que estem al centre de l'Univers, però no és així, ja que un observador situat en una altra galàxia veuria el mateix i li semblaria estar ell al centre. Realment no hi ha cap centre.

## Desenvolupament de l'Univers

Per fer-nos una idea de la història posterior, suposem que tot el temps des del Big Bang fins ara el comprimim en un any, de l'1 de gener a 31 de desembre (veure figura 12). Fins a l'abril no es va formar la Via Làctia. A l'agost es va formar el Sol, i la Terra va tenir forma esfèrica a finals d'aquest mes. Però no és fins a l'octubre quan l'oxigen es fa present en la nostra atmosfera. Encara que unes cèl·lules vives molt senzilles apareixen de seguida sobre la Terra, les cèl·lules amb nucli com les actuals apareixen el 2 de desembre i el dia 12 els primers organismes pluricel·lulars. El 19 apareixen els primers peixos, i el 21-22 les plantes, insectes i amfibis. El 25 apareixen els dinosaures, que duren fins al 28. En el dia 30 els mamífers viuen

ja sobre la Terra, però no és fins al 31 de desembre, a les 11 de la nit, quan apareix l'home. A les 11 h. i 57 minuts és quan viu l'home de Neanderthal i en l'últim minut quan es pinten les coves d'Altamira. Cinc segons abans de les dotze de la nit és quan neix Jesucrist. L'últim segle serien les últimes dues dècimes de segon.

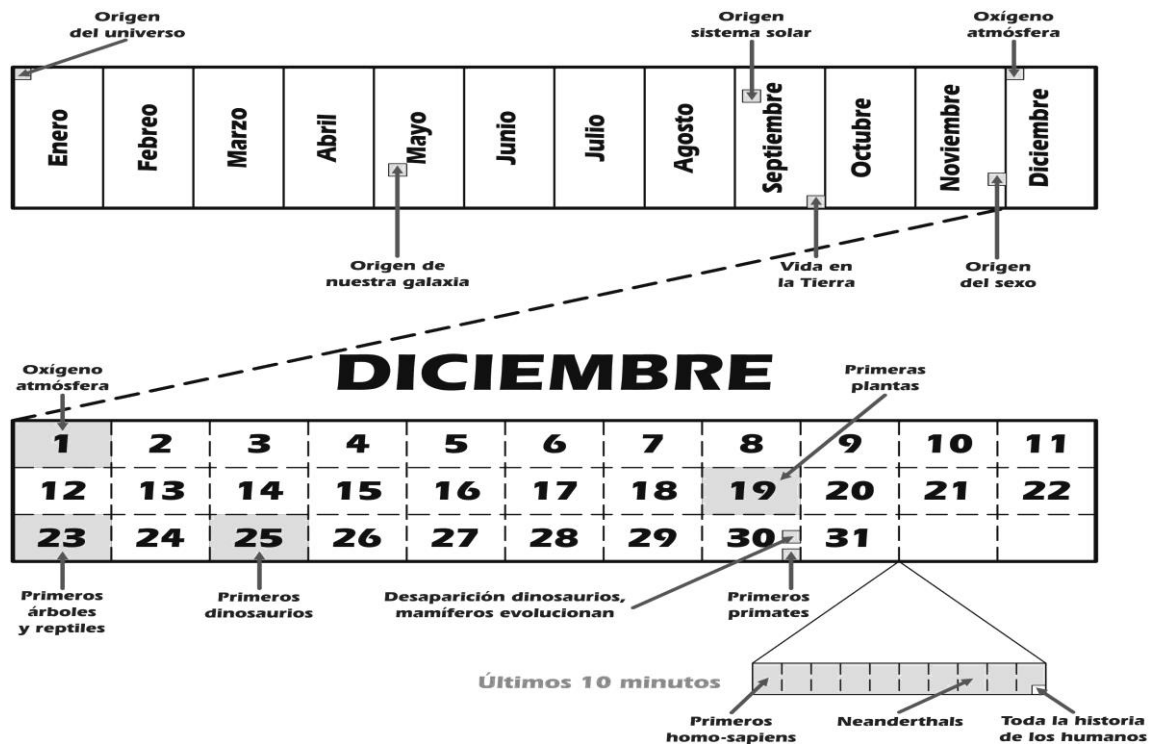


Fig.12: Calendari Còsmic. Tota la història de la civilització humana va ocórrer en els últims 21 segons.

## Radiació de fons de microones

Al començament, a temperatures elevadíssimes, les quatre forces que ara coneixem estaven unificades. La gravetat, la força electromagnètica, la força nuclear forta i la feble -aquestes dues últimes només actuen a l'interior dels àtoms, i per tant són menys famoses entre la gent-estaven unides. De seguida es van separar i es van formar els fotons, els electrons, els protons i les altres partícules elementals. Alhora que s'expandia, l'Univers s'anava refredant. A el cap de 300.000 anys la temperatura va baixar prou per poder-se formar els àtoms, principalment hidrogen i heli. La densitat va baixar i els fotons van quedar lliures per poder-se moure en totes direccions: es va fer la llum. Els científics diuen que l'Univers es va tornar transparent. Aquests fotons segueixen viatjant per l'espai actualment, tot i que aquest s'ha refredat i dilatat tant que la longitud d'ona ha augmentat moltíssim (figura 13) i s'han convertit en fotons molt més freds, que transmeten una energia de només 2,7 graus Kelvin . És l'anomenada radiació de fons de microones (Cosmic Microwave Background o CMB).

Aquesta radiació de fons va ser detectada per primera vegada el 1964 per Penzias i Wilson, als Estats Units. Estaven intentant eliminar tots els sorolls paràsits en el seu radiotelescopi quan van captar una emissió de 7,35 cm de longitud d'ona que sempre estava present,

independentment de la zona cap a la qual apuntés la gegantina antena. Es va revisar tota la instal·lació, i fins i tot es va pensar en què uns ocells que van fer niu a l'antena podien ser els causants, però no es va poder eliminar aquest soroll de fons. Es va arribar a la conclusió que procedia d'un cos emissor que tenia una temperatura de  $2,7 \square$  Kelvin -la temperatura actual de l'Univers- i que no es trobava en cap lloc determinat, sinó en tots: era l'Univers mateix el que emetia aquella radiació de fons, com una relíquia del Big Bang. Són emissions en el camp de les microones, similars a les dels forns casolans, però amb molt poca energia: només podria escalfar els aliments a  $2,7^\circ$  K.



Fig. 13: A el passar el temps, l'espai s'expandeix, i els fotons que viatjaven per ell en l'inici, s'han dilatat molt la seva longitud d'ona. És la radiació de fons de microones.

Encara que semblava una radiació extraordinàriament uniforme, G. Smoot, R. Mather i altres col·legues seus van aconseguir apreciar lleugeríssimes variacions en els mesuraments que va fer el satèl·lit COBE (figura 14a), de l'ordre de milionèsimes de grau. De forma simultània es van detectar aquestes fluctuacions des de terra en l'anomenat experiment de Tenerife, a l'Institut d'Astrofísica de Canàries. I en l'any 2001 la NASA va llançar el telescopi WMAP, per estudiar aquesta radiació de fons amb força més resolució (figura 14b).

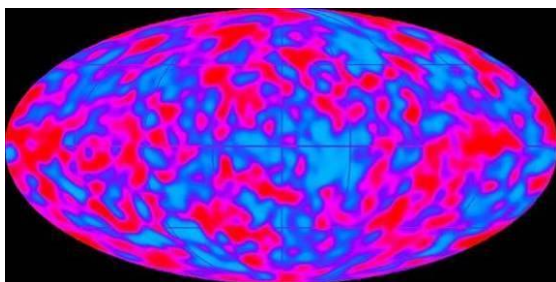


Fig. 14a: Imatge del COBE

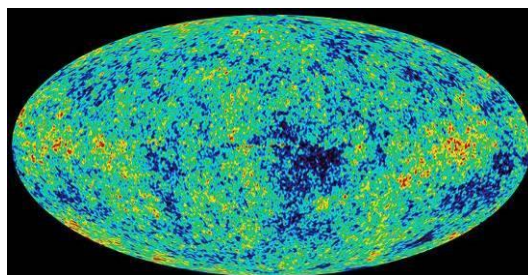


Fig. 14b: Imatge del WMAP

Encara petites, aquestes lleugeres variacions són les petjades dels grumolls de matèria a partir dels quals es van començar a formar les galàxies. Encara no sabem què va ser el que va originar aquestes fluctuacions de densitat. El que sí podem afirmar és que aquestes arrugues en la matèria es van produir, i van començar a produir-se les condensacions de les proto-galàxies, quan havien passat només uns centenars de milions d'anys des del Big Bang. Gairebé al mateix temps es van haver de formar les primeres estrelles en aquestes galàxies primitives.

## Activitat 7: Detecció de la radiació de fons de microones

Alrededor de 300.000 anys després del Big Bang, els fotons es van separar de la matèria i van començar a viatjar lliures per l'Univers. A l'expandir l'espai, aquests fotons van anar ampliant la seva longitud d'ona. Segons els càlculs, ara tindrien una longitud d'ona d'uns 2 mm, que correspon a la regió de les microones, i equival a la que emetria un cos negre que estigués a 2,7 graus Kelvin.

Com s'ha esmentat abans Penzias i Wilson, el 1964 van detectar per primera vegada la radiació de fons de microones, una radiació fòssil que procedeix molt uniformement de totes direccions. També nosaltres podem detectar aquesta radiació de fons amb un simple televisor (figura 15). Per a això, sintonitza el televisor en un canal analògic buit. La imatge està composta de multitud de punts canviant contínuament. Aproximadament un 10%, és a dir, un de cada deu prové de la radiació de fons de l'Univers.



Fig 15: Alguns punts d'una pantalla de TV analògica no sintonitzada provenen de el fons de microones

## Lents gravitacionals

Una manera de detectar la matèria fosca és a través de les lents gravitacionals. La massa d'una lent gravitacional actua com una lent òptica a l'distorsionar l'espai que l'envolta i desviar la llum d'un objecte distant. La matèria que produeix la distorsió no es veu ni es detecta amb telescopis, només és possible veure el seu efecte, l'acció de la gravetat, que és similar a el de la matèria normal de la qual estan fetes totes les coses.

La llum sempre segueix el camí més curt possible entre dos punts. Però si una massa aquesta present, l'espai es corba, i llavors el camí més curt possible és una corba com es pot veure a la figura 16a. Aquesta idea no és difícil per als estudiants. Realment podem mostrar-li-sobre un globus terrestre (figura 16c). Evidentment ells poden entendre que sobre la superfície de la Terra les distàncies entre dos punts són sempre segons una corba.



Fig. 16a y 16b: Si l'espai és corb, el camí més curt entre dos punts és una corba



Fig. 16c: El camí més curt sobre la superfície terrestre no és una recta

En general, podem imaginar les lents gravitacionals com una lent ordinària, però en la qual la desviació de la llum és produïda per una gran massa que hi ha al camí de la llum, anomenada deflector (figura 17a).

Les lents gravitacionals produeixen una curvatura en els raigs de llum que fa que els objectes, si són puntuals (estrelles o quàsars), semblin estar en un lloc diferent a on estan realment o fins i tot es produeixen imatges múltiples de l'objecte (figura 17b). Si els objectes són extensos (com les galàxies), les imatges apareixen deformades com arcs brillants (figures 18a, 18b i 18c).

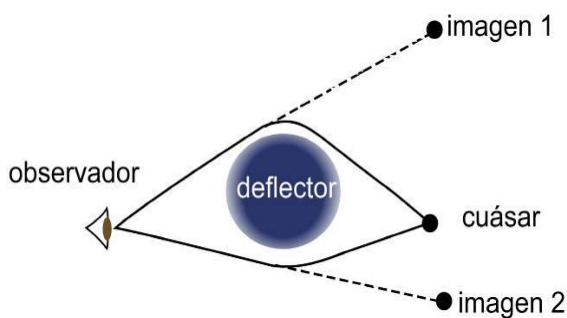


Fig. 17a: A l'observador li sembla que li arriben raigs lluminosos des de dos llocs diferents, i veu dues imatges .

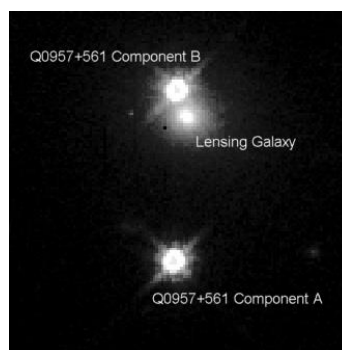


Fig. 17b: Fotografia de la imatge doble de l'Cuàsar Q0957 + 561. El deflector és la galàxia propera a el component B

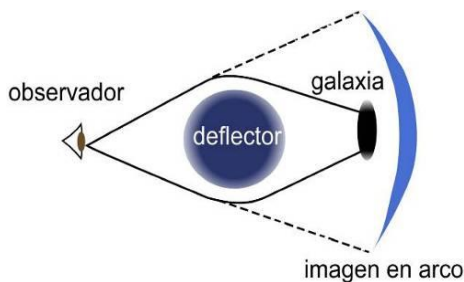


Fig. 18a: Si el cos desviat és un objecte extens, les imatges obtingudes són un conjunt d'arcs brillants o un anell complet.

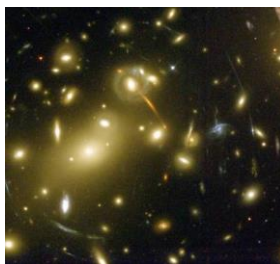


Fig. 18b: Arcs lluminosos gegants format pel cúmul de galàxies Abell 2218.



Fig. 18c: Anell complet d'una galàxia que està darrere de l'deflector brillant .

## Activitat 8: Simulació de lent gravitacional amb una copa de vi

Podem simular una lent gravitacional utilitzant una copa de vi. L'experiment permet "mostrar" com la matèria pot introduir deformacions en les imatges observades.

És fàcil comprovar que aquesta simulació dóna lloc a la "deformació de l'espai" que s'observa. Només cal situar la copa sobre un paper mil·límetrat i observar a través del vi blanc (o suc de poma) i veure aquesta deformació (figures 19a i 19b).

Vegem ara com simular l'anell d'Einstein o la multiplicitat d'imatges. N'hi ha prou prendre una llanterna, situar-la a l'altre costat de la copa de vi negre i veure el raig de la llum que passa a través d'ella.

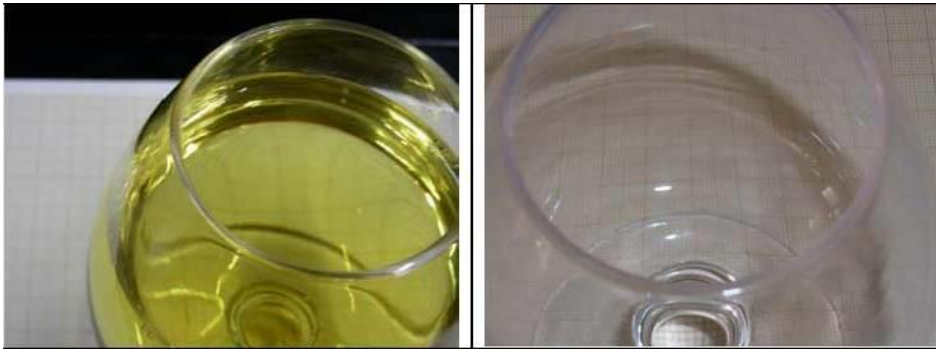


Fig. 19a y 19b: Només podem veure la deformació de la quadrícula si la copa és plena .

Podem veure i moure de dreta a esquerra i de dalt a baix la llum de la llanterna. Observem que la llum, en general, no és puntual: es produeixen imatges repetides i de dalt a baix. Observem que la llum produeix imatges repetides i en alguns casos alguns arcs. Això és a conseqüència que la copa actua com un lent que deforma la trajectòria de la llum. En particular podem observar de vegades una figura amorfa, o un punt vermell brillant, quatre punts vermells o un arc entre els punts vermells (figures 20a, 20b i 20c).



Fig. 20a: La llum de la llanterna es veu un arc entre dos punts brillants vermells, Fig. 20b: com una figura amorfa, i Fig. 20c: la creu d'Einstein.



També podem simular la lent gravitacional mirant a través del peu d'una copa. Si posem el peu de la copa sobre un paper mil·limetrat i observem a través d'ell, podem veure la deformació de la quadrícula (figura 21). Movent lentament de dreta a esquerra el peu de la copa sobre un objecte, per exemple un cercle vermell d'uns 3 cm, anirem reproduint els diferents objectes reals observats en les lents gravitacionals (figures 22a, 22b i 22c).



Fig. 21: Deformació de la quadrícula .



Fig. 22a, 22b y 22c: El peu de copa és un simulador de diversos objectes: segments d'arc, imatges de la creu i anell d'Einstein

## Per què és fosca la nit?

Aquest era el títol d'un interessant article que l'alemany Heinrich Olbers va publicar en 1823. Anteriorment ja ho havia plantejat Kepler en 1610 com a demostració que l'Univers no podia ser infinit. Edmund Halley, un segle després, va trobar al firmament algunes zones especialment brillants i va proposar que el cel no brilla uniformement durant la nit perquè -tot que l'Univers és infinit- les estrelles no es distribuïen de manera uniforme. Fins i tot l'escriptor

Edgar Allan Poe (1809-1849), va escriure sobre aquest fenomen<sup>1</sup>. No obstant això el tema va passar a la història com la Paradoxa d'Olbers.



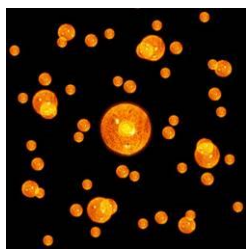
Fig. 23a: Johannes Kepler, Fig. 23b: Edmund Halley, Fig. 23c: Heinrich Olbers y Fig. 23d: Edgar Allan Poe

La resposta sembla trivial, però no és així després de llegir l'article de l'alemany. El raonament a què apuntava Olbers duia a la paradoxa que el cel nocturn havia de ser tan brillant com el més esplendorós dia. Vegem el seu argument.

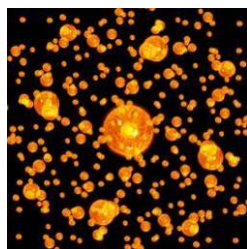
Olbers partia dels següents principis:

- 1.- L'Univers té una extensió infinita.
- 2.- El nombre de estrelles es distribueix més o menys uniformement al llarg de tot l'Univers.
- 3.- Totes les estrelles tenen una lluminositat mitjana similar al llarg i ample de l'Univers.

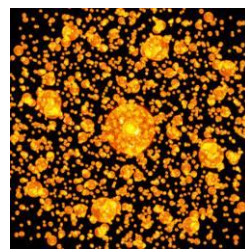
Mirem a l'Univers des de la Terra. Suposem una primera capa esfèrica d'estrelles en la volta celeste, a una distància  $R_1$ . El nombre d'estrelles que conté serà  $N_1$ . Suposem una segona capa esfèrica a una distància major  $R_2$ . Cadascuna de les seves estrelles ens il·lumina menys per estar més lluny, però alhora aquesta capa és més gran i conté més estrelles, segons el principi nº 2, i es contraresta la menor il·luminació (la intensitat de la llum disminueix proporcionalment a  $1/R^2$ , i l'àrea de la capa, i per tant el nombre d'estrelles, augmenta proporcionalment a  $R^2$ ). La conclusió és que la segona capa il·lumina la Terra exactament igual que la primera. I com segons el principi número 1 hi ha infinites capes, la conclusió és que el cel hauria d'aparèixer brillant durant la nit.



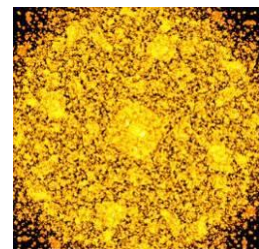
La llum que ens arriba des d'estrelles properes



Però més lluny també hi ha estrelles que ens envien la seva llum



Com més lluny, hi ha més estrelles



Des de qualsevol punt de el cel ens hauria d'arribar la llum d'una estrella

Fig. 24: Extreta de wikimedia commons

<sup>1</sup> A "Eureka", assaig científic publicat al febrer de 1848, donava la següent explicació als "buits" foscos observats entre les estrelles: "Podríem comprendre els buits que els nostres telescopis troben en innombrables adreces suposant que la distància fins al fons invisible és tan immensa que cap raig de llum procedent d'allà ha estat encara capaç de arribar-nos".

Una altra forma de plantejar-ho: si observem de nit al cel, com hi ha infinites estrelles, mirem cap a on mirem, la nostra visual sempre hauria d'acabar topant amb la superfície d'una estrella, i per tant hauríem de veure-hi un punt brillant. I si això passa en tot el cel, hauria d'aparèixer totalment brillant.

Evidentment això no és així. Aquesta paradoxa d'Olbers va desencadenar moltes controvèrsies i no es va poder resoldre correctament fins a començaments de segle XX, amb la teoria del Big Bang. El raonament en si és correcte, però fallen els principis dels quals parteix. En efecte, la llum de les estrelles llunyanes, a l'estar l'Univers en expansió, pateixen un desplaçament cap al vermell tant més intens com més lluny estan. Això comporta un debilitament en la intensitat de la seva radiació, de manera que el principi nº 3 d'Olbers no és correcte. Però sobretot, també sabem que com més lluny estigui un estel, la llum que ens arriba va partir abans, és a dir, la veiem com era fa temps. Les més llunyanes que podríem observar són les que es van formar poc després del Big Bang, però més enllà no podem observar res més, de manera que no hi ha infinites capes d'estrelles, és a dir, també és fals del principi nº 1 d'Olbers.

Al segle XX, la solució a la paradoxa d'Olbers va quedar resolta amb l'expansió i sobretot amb l'edat no infinita de l'Univers. Afortunadament, la nit podia seguir sent fosca!

## Bibliografia

- Moreno, R *Experimentos para todas las edades*, Ed. Rialp, Madrid, 2008.
- Moreno, R, *Taller de Astrofísica*, Cuadernos ApEA, Antares, Barcelona, 2007.
- Moreno, R, *Historia Breve del Universo*, Ed. Rialp, Madrid, 1998.
- Moreno, A, Moreno, R, *Taller de Astronomía*, Ediciones AKAL, Madrid, 1996.
- Riaza, E, Moreno, R, *Historia del comienzo: George Lemaître, padre del Big Bang*, Ediciones Encuentro, Madrid, 2010.
- Ros, R.M, *Experiments and exercises involving gravitational lenses*, Proceedings 1st ESO-EAAE Astronomy Summer School, Barcelona 2007.
- Ros, R.M, *Gravitational lenses in the classroom*, Physics Education, 43, 5, 506, 514, Oxford, 2008.

## Fonts Internet

- <http://www.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/index.shtml>
- <http://www.dsi.uni-stuttgart.de>
- <http://georgeslemaitre.blogspot.com/>
- <http://www-ra.phys.utas.edu.au/~jlovell/simlens>
- <http://leo.astronomy.cz/grlens/grl0.html>