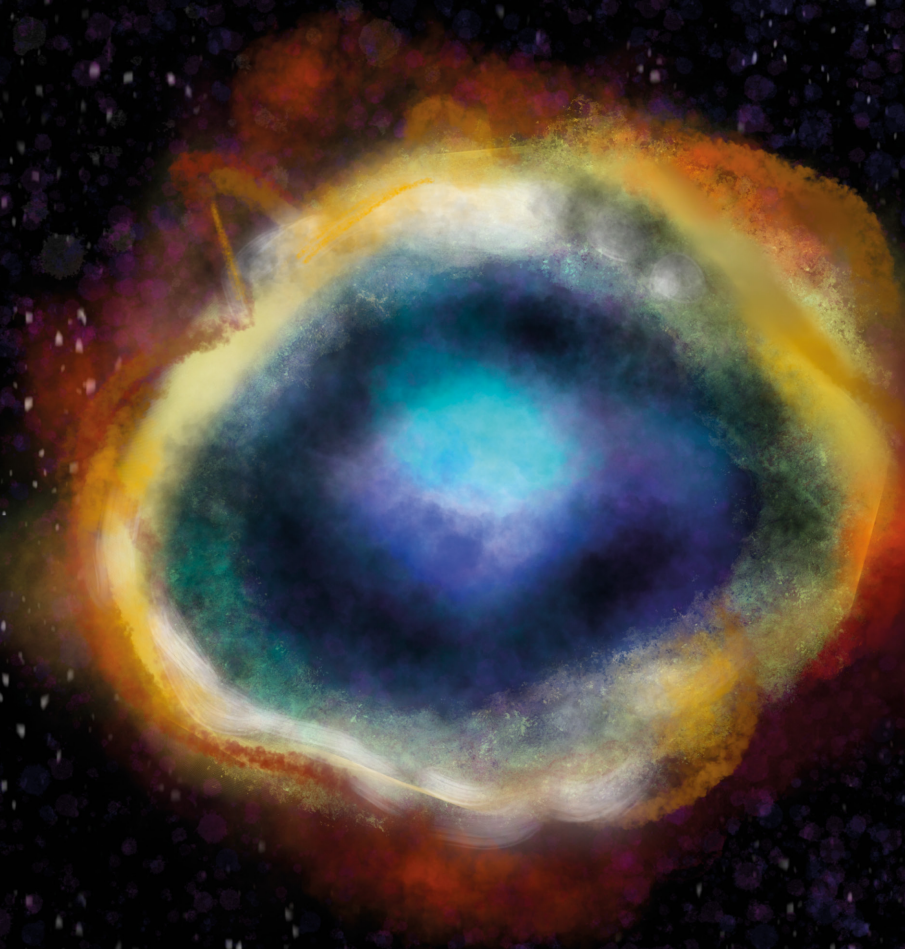


Manel Perucho Pla

sense *f*ronteres

Ecos de l'univers violent



**Finalista
Premi Europeu
de Divulgació Científica
Estudi General**

1 L'ORIGEN

L'explosió

És ben sabut que l'origen de l'univers té lloc en la gran explosió, o *big bang*. Potser l'afirmació és massa taxativa i caldria dir que tant els models com les evidències observacionals semblen indicar que l'origen de l'univers ocorre en una gran explosió, i que n'és l'explicació acceptada per la immensa majoria de la comunitat científica. Per tothom? En ciència, i la cosmologia i l'astrofísica en són un bon exemple perquè incorporen un component fonamental interpretatiu, sempre hi ha col·legues que defenen idees alternatives a les comunament acceptades. Això, tret d'excepcions recalcitrants, ha sigut i és molt útil per al desenvolupament científic, atés que els qui defenen les teories més acceptades es veuen forçats a refermar la seua posició amb noves observacions o experiments, dependent del camp. De fet, seria un greu error fer callar aquestes veus discordants.

Tot acceptant que va ser realment així, ens podem demanar què hi havia abans de l'explosió o què la va causar. Quan el professor Ramon Lapiedra va fer aquesta pregunta en el seu curs de Cosmologia, servidor va respondre:

«un pirotècnic», resposta que va fer somriure l'estimat catedràtic. Qualsevol resposta, però, és incorrecta des d'una perspectiva estrictament científica. La manera en què la física s'esmuny de respondre la pregunta és ben original: amb la gran explosió es crea l'univers, que no és més que matèria i energia en un espai i temps que les conté i que es crea també en aquell moment. Així doncs, el temps comença a córrer en el moment de l'esclat, i no hi ha un *abans*: no es pot definir. I si no hi ha un *abans*, no s'hi pot aplicar el principi de causalitat. No hi ha causa.

Llavors, què va passar? No en tenim ni idea, només hi podem especular. A més, com veurem de seguida, els nostres telescopis, per potents que siguen, no arribaran mai a poder observar l'esdeveniment. L'única cosa que podem fer, per tant, és fer-ne deduccions des de la teoria (que és una altra manera de dir *matemàtiques*) i des de les observacions més pròximes possibles a aquest hipotètic origen.

Acceptem, de moment, el cas. Hi ha una *explosió* en què l'espai i el temps inicien la seua existència i desenvolupament. Dit altrament, l'explosió no ocorre dintre d'un espai preexistent, sinó que amb ella també es crea l'espai. Així, de la mateixa manera que no té sentit preguntar sobre un *abans* del *big bang*, tampoc no en té preguntar què hi ha fora de l'univers. L'espai i el temps en què vivim, en què es desenvolupen totes les nostres glòries i misèries (segurament, més de les darreres), en què naixen i moren els astres i les galàxies, van ser creats per l'explosió. És la versió més versemblant a què podem arribar a partir de les dades de què disposem. Tanmateix, no deixa de ser una versió, la dels humans de la segona part del segle xx i primera del XXI, si volem. Abans, n'hi

havia d'altres: la creació divina en les religions monoteistes, els cicles evolutius en l'hinduisme, i moltes altres, però cap d'aquestes no requereix un fonament observacional o matemàtic; només la fe dels creients. En aquest sentit, la ciència ho té més complicat, certament.

I ara, com és que hem arribat a aquesta versió? Anem a pams.

L'expansió

Entre els anys 1927 i 1929 Georges Lemaître i Edwin Hubble van publicar articles (Lemaître, 1927; Hubble, 1929) en què l'un anticipava teòricament que l'univers s'expandeix i l'altre, mitjançant observacions, demostrava que les galàxies del Grup Local (el grup de la Via Làctia) i de cúmuls pròxims, com el de Virgo, s'allunyen de la Galàxia, i més ràpidament com més llunyana és la galàxia en qüestió. En el seu treball, Edwin Hubble va trobar una correlació entre la distància a les galàxies del nostre entorn (vegeu la figura 1.1) i la velocitat amb què aquestes s'allunyen de la nostra. Les estimacions anaven carregades d'errors de mesura i interpretació que s'han anat millorant amb el temps.¹ Tanmateix, el fet de l'allunyament ha romàs intacte.

L'allunyament es va mesurar mitjançant l'aplicació de l'efecte Doppler, equivalent al del so: tots devem haver

1. Lectura breu sobre la llei de Hubble-Lemaître i els errors comesos en la seua obtenció: <<https://astro.uchicago.edu/~kent/fnal/blunder.html>>.

observat que, quan se'ns acostava una ambulància, el seu so és més agut que quan ens passa davant i s'allunya, que el so esdevé més greu. De la mateixa manera, quan un objecte se'ns acostava, la llum que emet ens arriba més blava, i quan l'objecte s'allunya, la llum que emet ens arriba més enrogida. Aquest fenomen, l'efecte Doppler, pel nom del primer físic que el va descriure (Christian Andreas Doppler), serveix per a saber si un cos emissor de radiació s'acosta o s'allunya de nosaltres. Aquest efecte no només ocorre a la banda òptica de l'espectre electromagnètic, sinó que és general (vegeu l'apèndix A sobre radiació electromagnètica). És a dir, el concepte s'estén amb les mateixes paraules a tot l'espectre, encara que la radiació ja no siga ni blava ni roja. Per això, parlem simplement de desplaçament cap al roig o enrogiment de la radiació quan la seua longitud d'ona augmenta. De fet, arran d'aquests estudis, la mesura del desplaçament cap al roig (*redshift* en anglès) es fa servir com a indicació de la seua distància cosmològica: com més alt és aquest desplaçament, més lluny es troba de nosaltres la galàxia emissora.²

2. En realitat, no es tracta d'un efecte Doppler en el sentit estricte, atés que la separació es produeix per l'expansió de l'univers: és l'espai el que s'estira. Per això, a distàncies més enllà de les galàxies pròximes (el Grup Local en què es troba la Via Làctia i potser algun cúmulo proper, com el de Virgo), la mesura de la distància a partir del *redshift* requereix un model cosmològic, i són importants les anomenades *candees estàndard*, com, per exemple, les supernoves tipus Ia a escales cosmològiques. Vegeu l'apèndix sobre mesures de distàncies i el capítol dedicat a explosions en estels de baixa massa.

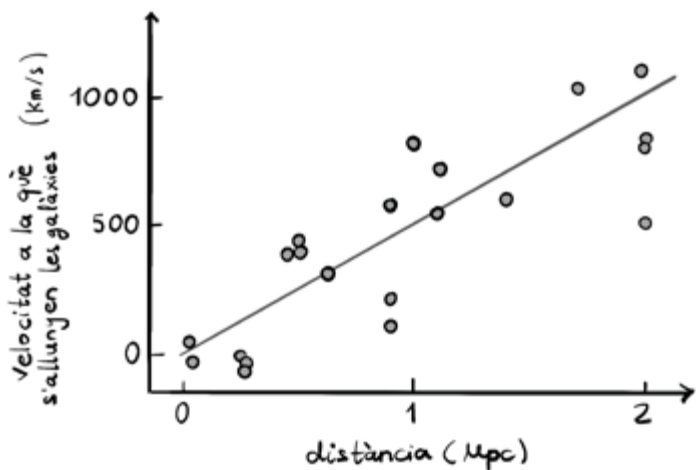


Figura 1.1. Reproducció del diagrama presentat per Hubble en el seu article (Hubble, 1929).

L'observació de Hubble té una única interpretació versemblant, però sorprenent: totes les galàxies s'allunyen de totes les altres (sempre que la gravetat, si són prou pròximes, no ho impedisca). Llavors, un astrònom que observara les galàxies del seu entorn des d'un planeta de qualsevol galàxia podria reproduir la gràfica de Hubble de manera equivalent. I veuria la nostra Via Làctia allunyar-se'n amb la mateixa velocitat radial que Hubble va determinar, recíprocament. Aquesta interpretació contenia conseqüències contundents que s'haurien d'anar desenvolupant teòricament i comprovant amb noves observacions.

La primera i més evident és que si les galàxies s'allunyen (a causa de la velocitat radial positiva), les hauríem de trobar cada vegada més a prop si poguérem fer arrere el rellotge.

Llavors, la matèria també estaria més concentrada, fins al punt que la densitat podria haver fet un univers opac a la radiació. Tenint en compte que l'element més abundant en l'univers és l'hidrogen, el moment crític devia haver sigut aquell en què la llum va deixar de ser absorbida per aquests àtoms. I, més enllà encara, potser hi hauria d'haver hagut un moment en què tota la matèria i l'energia de l'univers estaven concentrades en un sol punt. El punt d'inici: la gran explosió.

El desacoblament

Les molècules, com els àtoms, o els protons i els neutrons, no són indivisibles, sinó que les primeres estan fetes d'àtoms; els àtoms, de nuclis i electrons; els nuclis dels àtoms, de protons i neutrons, i aquests, de quarks, i... deixem-ho ací. Tots aquests són estables sempre que no siguin bombardejats amb una radiació més energètica que el que anomenem la seua *energia de lligadura*. Si ho fem, es trenquen els lligams entre àtoms en les molècules, entre electrons i nuclis en els àtoms, entre neutrons i protons en els nuclis, entre quarks en protons i neutrons...

Cadascun d'aquests fets ocorre a energies diferents. Per exemple, podem trencar molècules i separar electrons en els àtoms amb radiació infraroja, visible, ultraviolada o raigs X, depenent del tipus d'àtom o de molècula, i del nivell dels electrons que volem extraure'n (no és el mateix el cas dels electrons de les capes més allunyades dels nuclis que els més pròxims: els primers són més fàcils d'arrancar). Per a trencar els nuclis, calen raigs gamma, la radiació més energètica. Així

i tot, quan tota l'energia de l'univers estava concentrada en un volum molt petit, hi va haver un temps breu en què ni tan sols els quarks que constitueixen les partícules elementals com els protons o els neutrons podien unir-se per a formar-los. No entrarem en els detalls sobre aquests primers instants, perquè escapen a l'objectiu d'aquest text i, a més, perquè se n'ha escrit molt i molt bé (Weinberg, 1977; Fernández-Soto, 2020).

Per al que ens interessa ací i ara, podem considerar l'univers com un ens (una bola de gas, per facilitar-ho) al qual podem suposar una densitat d'energia (o, equivalentment, temperatura) i una densitat de matèria. L'expansió de la bola de gas dens i calent implica una davallada de la seua temperatura i densitat. Per altra banda, a un cos en equilibri tèrmic li correspon una emissió de radiació corresponent a la temperatura d'equilibri (vegeu l'apèndix sobre radiació).

Tal com hem dit, en els primers instants l'energia de la radiació era prou elevada perquè no s'hi pogueren formar partícules com els protons o els neutrons. En caure la temperatura i formar-se'n, encara era massa alta perquè s'ajuntaren i crear nuclis. Tan prompte com va ser possible, quan l'univers havia existit només tres minuts, els únics nuclis que es van poder formar en aquells primers instants van ser els d'hidrogen i heli, amb un i dos protons, respectivament. És a dir, es van formar els nuclis que era més senzill formar. Des d'aquell moment fins que els primers estels van arribar a les fases avançades de la seua evolució (com veurem en el capítol següent), en l'univers no hi havia cap altre element que l'hidrogen i l'heli.

Els electrons encara anaven lliures per l'espai, atès que la radiació corresponent a la temperatura d'equilibri de la bola de gas travessava l'univers amunt i avall, topant amb

qualsevol àtom que s'haguera format, separant l'electró del protó. En aquesta situació devia ser inviable formar un àtom d'hidrogen. Mentrestant, l'univers continuava expandint-se i perdent densitat i temperatura, fins que va arribar el punt en què l'energia mitjana de la radiació que l'omplia va caure per sota de la necessària per a separar els electrons dels protons.

A partir d'aquell moment, quan un electró queia en el camp elèctric d'un protó, atret irremissiblement per la seua càrrega contrària, la parella podia esdevindre estable. Per descriure la situació anterior a aquest instant, diem que la matèria i l'energia estaven acoblades, perquè es dedicaven a jugar tot el temps, col·lidint i fent i desfent àtoms d'hidrogen. En acabar el joc, els electrons es van unir amb els protons (o nuclis protó-neutró) per fer àtoms d'hidrogen. I la radiació? La radiació ja no tenia qui l'atrapara i va quedar lliure. Ja no tenia l'energia que calia per a trencar àtoms, i així va iniciar un viatge etern per l'univers, quan aquest tenia tres-cents mil anys. S'hi va fer la llum! En aquell moment, la temperatura mitjana de la nostra bola de gas era de 150.000 °C. I el temps transcorregut des de l'inici, prop de 400.000 anys, encara.

Tot el que hem explicat en els paràgrafs anteriors vindria a ser una conseqüència teòrica del fet observacional de l'expansió, i de la suposició raonable que aquesta expansió actual és conseqüència de fases prèvies, en què la matèria i l'energia de l'univers estaven comprimides en volums cada vegada més menuts.

Una de les proves fonamentals de l'expansió de l'univers –i, per tant, del seu origen en un esclat inicial– implicava detectar la radiació que s'allibera en l'instant en què l'univers travessa la línia dels 150.000 °C. I això és el que van fer, al

principi sense saber-ho, els enginyers Anzo Penzias i Robert Wilson (Penzias i Wilson, 1965), que treballaven en una antena de precisió per a detectar microones. Quan la van provar, van constatar un soroll de ràdio que no es podien explicar i que es mantenia uniforme en totes les direccions i permanent dia i nit. Van descartar tota mena d'hipòtesis sobre el perquè d'aquest soroll, incloent-hi si es tractava d'excrements de coloms que causaven interferències. Al final, tal com els va indicar el físic teòric Jim Peebles (Dicke *et al.*, 1965; Peebles, 1965), van trobar que es tractava de la radiació de microones romanent del monstruós esclafit que fou el *big bang*. O, dit en paraules més solemnes: es tractava de la primera llum del nostre univers. Aquesta llum primigènia es coneix amb el nom poc poètic de *radiació de fons de microones*. El mapa de la radiació que ens arriba de cada racó de l'univers ens dona una idea de la distribució de matèria en aquell instant (vegeu la figura 1.2). Les inhomogeneïtats que s'aprecien en el mapa ens proporcionen una informació molt interessant. Aquesta informació estarà en el centre d'interés del següent capítol.

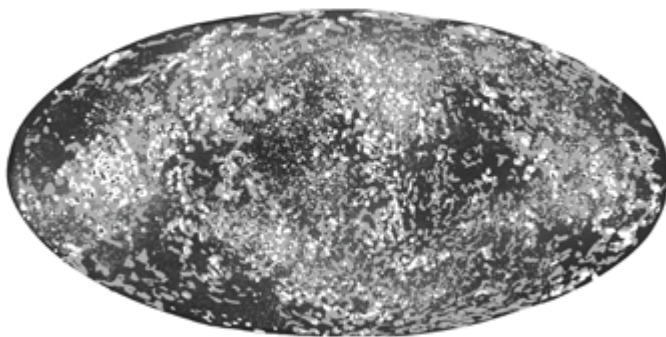


Figura 1.2. Mapa de la radiació de fons de microones. Els diferents tons indiquen inhomogeneïtats en la temperatura de la regió emissora de l'ordre d'una part entre cent mil.

Simetries o no. Matèria i energia. Nosaltres

En els paràgrafs anteriors hem explicat com la matèria no es va poder constituir com a tal fins que la temperatura de l'univers va baixar per sota dels nivells necessaris. Per altra banda, coneixem l'existència de partícules del que anomenem antimatèria, amb les mateixes propietats que la matèria..., però càrregues contràries. Del seu descobriment, relacionat amb els raigs còsmics, en parlarem més avant. També sabem que la col·lisió d'una partícula amb la seua antipartícula deriva a la conversió total en energia, mitjançant la destrucció del parell. Aleshores, com és que en el nostre món el que coneixem com a matèria domina sobre l'antimatèria?

Si pensem que les lleis físiques que coneixem expliquen el comportament de les partícules i els cossos celestes en tot l'univers, és perquè considerem que són invariants sota translacions espacials i temporals. Dit altrament: si repetim un experiment en dos llocs diferents o en dos instants diferents, el resultat hauria de ser el mateix. Un dels teoremes més importants de la física és el d'Emmy Noether, física alemanya que va demostrar que aquestes simetries impliquen conservacions de magnituds fonamentals: la simetria espacial (invariància sota translacions espacials) condueix directament a la conservació del moment lineal i la simetria temporal condueix a la de l'energia.

L'univers és simètric! *Comme ci, comme ça*. Si ho fora, el cosmos estaria constituït principalment per energia, amb matèria i antimatèria en equilibri i formació i destrucció contínua. En física de partícules hi ha altres conceptes de

simetria rellevants, com l'anomenada *paritat*, que consisteix a aplicar una rotació i una reflexió especular al sistema. També la de càrrega, que consisteix a intercanviar les càrregues de les partícules implicades. Doncs bé, alguna d'aquestes simetries no es compleix sempre i en totes les circumstàncies. Aquestes petites imperfeccions de les simetries en les escales de les partícules fonamentals són les que podrien haver fet inclinar la balança a favor d'un dels dos tipus antagonistes de matèria, que apareixeria en aquell moment inicial com una petita contaminació en un univers dominat per la radiació.

Pel que sabem o pel que ignorem ara per ara, aquesta matèria constitueix un percentatge molt menor de la composició total de l'univers, que està dominada per dos components principals, dels quals es desconeix la naturalesa. Només intuïm la seua existència pels efectes que tenen. Per una banda, hi ha la matèria fosca, que interacciona amb la matèria només mitjançant la gravetat, tal com ens van revelar les observacions de l'astrònoma Vera Rubin sobre les velocitats de rotació en galàxies pròximes. Gràcies a aquest efecte sobre la matèria visible (els estels), podem mesurar la quantitat de matèria fosca. Per l'altra, un misteriós component energètic associat al buit o al mateix espai-temps, que cal incorporar teòricament per a poder explicar la manera en què les darreres observacions de distàncies ens indiquen que s'expandeix l'univers (vegeu l'apèndix sobre mesures de distància). En aquest llibre ens limitarem a tractar el petit percentatge de l'univers que és la matèria coneguda com a bariònica, la que ens forma a nosaltres i també els estels. L'únic component fosc de l'univers de

què tractarem seran els forats negres. Tanmateix, en aquest esquifit 5% de l'univers que constitueix la matèria bariònica hi ha fets fantàstics, esgarrifosos, excitants i terribles suficients per a omplir pàgines i volums. I dintre d'aquesta petitíssima part, hi som nosaltres, intentant posar llum a tanta foscor com ens envolta.