

# **Les fronteres del coneixement**

Lliçó magistral llegida en el solemne acte  
d'obertura del curs 2012-2013

**José Bernabéu Alberola**

2012

VNIVERSITAT  
E VALÈNCIA



Aquesta publicació no pot ser reproduïda, ni totalment ni parcialment, ni enregistrada en, o transmesa per, un sistema de recuperació d'informació, en cap forma ni per cap mitjà, sia fotomecànic, fotoquímic, electrònic, per fotocòpia o per qualsevol altre, sense el permís previ de l'editorial.

© *Del text*: José Bernabéu Alberola, 2012  
© *D'aquesta edició*: Universitat de València, 2012  
*Maquetació*: Publicacions de la Universitat de València

*ISBN*: 978-84-370-8874-7  
*Dipòsit legal*: V-2258-2012  
*Impressió*: Guada Impresores, SL



# Índex

- 9 LES DUES FRONTERES DE LA FÍSICA
- 11 ESTRUCTURA DE LA MATÈRIA
- 14 L'LHC I EL CERN
- 16 DESCOBRINT EL MECANISME DE HIGGS.  
L'ORIGEN DE LA MASSA
- 18 L'UNIVERS OBSERVABLE
- 22 L'UNIVERS EN EXPANSIÓ.  
HISTÒRIA DEL TEMPS
- 28 LA SEGONA REVOLUCIÓ COPERNICANA.  
MATÈRIA I ENERGIA FOSCA
- 31 DETECCIÓ I PRODUCCIÓ DE MATÈRIA  
FOSCA FREDA
- 34 LA PERSPECTIVA CIENTÍFICA



Excel·lentíssim i Magnífic Senyor Rector de la Universitat de València,  
Excel·lentíssimes i digníssimes autoritats,  
Companys i amics de la Universitat de València,

## LES DUES FRONTERES DE LA FÍSICA

Com tants altres aspectes de la cultura occidental, el mètode científic té el seus orígens en la Grècia antiga. De la filosofia natural grega hem heretat la idea que hi ha principis racionals subjacents que governen el món natural, i que els éssers humans tenen la capacitat del pensament racional. Aristòtil creia que es pot obtenir el coneixement a partir d'una observació detallada, la qual cosa és un ingredient fonamental del que després es coneixerà com a mètode científic. La idea segons la qual el món natural és susceptible de ser conegut pels humans va ser adoptada pels filòsofs grecs com una noció que necessita un conjunt de mètodes per a ser realitzada.

És cert que els mètodes han variat en la ciència moderna, però aquesta és una variant, consistent en la combinació de teoria més experiment, d'aquella hipòtesi fonamental segons la qual el coneixement necessita un mètode. Bertrand Russell, en els seus *Fonaments de Filosofia*, assenyala:

La intenció de donar lleis a l'Univers mitjançant principis a priori ha fracassat; la lògica, en compte de ser, com era anteriorment, un mur de contenció per a les possibilitats, s'ha convertit en la gran alliberadora de la imaginació, i presenta diverses alternatives possibles, alhora que deixa a l'experiment la tasca de descobrir les lleis de la natura, entre els diversos móns que la lògica ofereix per a la nostra elecció.

L'ús que va fer del telescopi Galileo Galilei –que hi va descobrir les llunes de Júpiter, desconegudes fins en aquell moment– il·lustra la necessitat d'instruments per a objectivar les percepcions humanes i obrir nous horitzons en ciència. Els nostres sentits no són fiables en moltes situacions, i un pas important en el mètode científic modern és la complementarietat entre l'observació, l'evidència empírica i el pensament racional, representats pel telescopi de Galileu, construït el 1609. Galileu no va ser el primer a construir un telescopi, però sí que va ser el primer a usar la nova tecnologia per detectar l'existència de fenòmens prèviament inobservables. Aquells descobriments demostraren fins a quin nivell les percepcions sensorials humanes podien ser poc fidedignes, i Galileu és considerat el pare del mètode científic.

Quines són les característiques de l'avanç del coneixement en la ciència? Pensem que l'avanç es mesura en bona part pel grau de síntesi d'una nova teoria, l'explicació de nous fenòmens observats i/o la unificació que permet ampliar-ne els dominis de validesa. En aqueix esforç sempre apareixen nous problemes oberts no albirats abans, i la seua resolució condueix a explicacions més profundes i a la formulació de noves preguntes. En les meues paraules hi ha implícit que jo no tinc una visió lineal de l'avanç en la comprensió científica. Si es pretén il·lustrar una visió de l'avanç del coneixement, jo m'adheriria a la representació proposada per Peter Carruthers d'una illa de coneixement, rodejada per un mar d'ignorància, amb fronteres mòbils entre el que és conegut i el que no. En aquesta visió, les fronteres del coneixement no desapareixen mai, i els descobriments en la frontera condueixen a reestructurar el que se sol anomenar «coneixement adquirit».

Una manera molt efectiva de fer avançar el coneixement, engolint la ignorància, consisteix en la convergència de dos o més camps que abans estaven separats. Aqueix és el somni de la unificació, tan present en la història de la física: gravitació universal de Newton, electromagnetisme de Maxwell, mecànica quàntica de Bohr, Heisenberg i Schrödinger, relativitat d'Einstein. En aquests inicis del segle XXI, la unificació entre les forces febles –responsables de la generació d'energia al Sol i de la desintegració de partícules– i les electromagnètiques –responsables de la formació de l'àtom i de tota la matèria

agregada— provoca noves preguntes que discutiré més endavant. En un sentit més general, la convergència de les dues fronteres en l'escala de distàncies, com són la física de partícules i la cosmologia, representa un avanç considerable del coneixement.

Les fronteres del coneixement en l'escala de distàncies, es corresponen al fet de preguntar a la natura: de què està fet l'Univers?

Amb l'accelerador LHC, el Gran Col·lisionador d'Hadrons del CERN (el Laboratori Europeu de Física de Partícules), estem penetrant en l'estructura íntima de la matèria fins a distàncies inferiors a  $10^{-18}$  metres, per conèixer els constituents elementals de la matèria, les seues interaccions i les càrregues responsables d'aqueixes forces entre els constituents, i també la resposta a la pregunta més actual: l'origen de la massa.

En les grans escales del món cosmològic, estudiant l'Univers com un tot, hem arribat a explorar distàncies pròximes als  $10^{26}$  metres de l'Univers visible. Així és com, a causa de la velocitat finita de propagació de les senyals, pensem en els primers instants de la història de l'Univers, és a dir, que veiem com era l'Univers primitiu que ha delimitat la seua evolució d'expansió en el temps. I la conclusió més notable és que aqueixa exploració del cosmos connecta amb la investigació que s'ha dut a terme als laboratoris de física de partícules. L'Univers primitiu no era com l'actual, expandit i fred, sinó contret i calent. I, a aquelles temperatures o energies, la matèria era com la que recreem ara en forma de partícules elementals. La pregunta més actual és aquí: quin és el contingut de matèria i energia de l'Univers? És com el que ja coneixem a partir de la física de partícules?

## ESTRUCTURA DE LA MATÈRIA

Totes les civilitzacions de la història han especulat sobre la natura de les coses. Després d'algunes consideracions fetes per l'escola de filosofia natural de Milet i pels pitagòrics, els grecs van aportar algunes idees interessants sobre aquest tema. Empèdocles va inventar la teoria dels quatre elements de la ma-

tèria: terra, aire, foc i aigua. Els «atomistes», en la seua recerca de la màxima simplicitat, imaginaren que els elements vertaders eren, en essència, de natura idèntica, però amb grandàries i formes diferents que explicarien la varietat de la matèria. Els àtoms serien indivisibles i inalterables, separats pel buit, cosa que en permetria el moviment. Demòcrit, seguidor de Leucip, és reconegut per les seues idees fonamentals sobre els àtoms. Encara que serien invisibles per a l'ull humà, el món s'explicaria sobre aquesta base corpuscular. Les sensacions serien la conseqüència de la interacció dels àtoms amb els sentits.

Plató canvia la visió materialista que havia dominat la filosofia anterior. Els àtoms en moviment i en col·lisió imaginats per Demòcrit van ser substituïts pel món de les «idees» com a realitat última. Hi ha una correspondència entre objectes i idees, i «conèixer» és el camí cap a la seua essència. Aristòtil va descartar que les idees tingueren una realitat independent dels objectes. Les idees sols podrien expressar «qualitats» de les substàncies, i atribueix la realitat a les substàncies. Aristòtil renega de l'atomisme i del buit i accepta la teoria dels quatre elements, però n'hi afegeix un més: la quinta essència. Ell va dividir el món en dues parts diferents: el món terrestre, constituït pels quatre elements, i el cel, amb la quinta essència com a únic element.

L'atomisme no va reparèixer fins al naixement de la química moderna a principis del segle XIX, amb la hipòtesi atomista de John Dalton –per a explicar la llei de pressions parcials en els gasos i la llei de proporcions definides per a la combinació d'elements diferents. Aquests desenvolupaments van constituir els fonaments de la teoria atòmica de la matèria. El 1871, Mendeléiev va publicar la taula periòdica dels elements, i hi deixà buides algunes caselles per a elements que encara no eren coneguts. El descobriment posterior d'aquells elements predits va donar suport i acceptació a la teoria atòmica. Quan observem la taula periòdica sentim que el qualificatiu d'*elements* no sembla adequat per a objectes atòmics en nombre d'un centenar. La teoria dels quatre elements sembla més estètica, però és falsa, mentre que la taula periòdica dóna una explicació de l'estructura de la matèria a distàncies de més de  $10^{-10}$  metres.

El descobriment posterior de l'electró per J. J. Thomson el 1897 va proporcionar una comprensió de l'àtom com un objecte compost, i que la propie-



tat important dels «elements» de la taula periòdica era el nombre atòmic, el nombre d'electrons, i no el pes atòmic. L'electró era el constituent elemental a principis del segle XX.

La física fonamental del segle XX ha demostrat que l'àtom té una escorça d'electrons que es mouen al voltant d'un nucli central, i que en aquest nucli les partícules subatòmiques estan concentrades a distàncies menors als  $10^{-14}$  m. La massa de l'àtom es deu, sobretot, a la massa del seu nucli, ja que els electrons són molt lleugers. Això fa que el volum nuclear siga 12 ordres de magnitud més petit que el volum atòmic, mentre que la densitat nuclear és almenys 12 ordres de magnitud més gran que la densitat de l'àtom. Per tant, l'àtom és una estructura essencialment buida, i els electrons –com a partícules quàntiques– estan forçats a moure's per tot el volum atòmic. Mentre que a escales més grans que l'atòmica la matèria no té càrrega elèctrica (és a dir, és neutra), a escales subatòmiques s'observa, per a un element de nombre atòmic  $Z$ , un nucli de càrrega positiva  $Z$  i  $Z$  electrons de càrrega negativa.

A distàncies subnuclears, per sota dels  $10^{-15}$  m, els nuclis atòmics estan compostos de dues menes de partícules: els protons, que estan carregats positivament, i els neutrons, que no tenen càrrega elèctrica. Mentre que l'estructura atòmica és governada per la interacció electromagnètica entre partícules carregades, l'empaquetament dels protons i els neutrons dins el petit volum nuclear és causat per la interacció forta, de molt curt abast.

Qualsevol partícula sensible a la interacció forta rep el nom d'*hadró* (l'estudi dels hadrons és objecte de la física hadrònica). A la dècada de 1970 es descobrí que els hadrons, que cal explorar per sota dels  $10^{-16}$  m, estan formats per quarks. Per tant, els protons i els neutrons estan formats per quarks, que estan confinats al seu interior amb un potencial d'interacció que creix amb la distància. Les partícules que transmeten la interacció forta entre els quarks que formen un protó o un neutró són els gluons, que equivalen als fotons de la interacció electromagnètica. En el moment actual, en què s'ha pogut explorar l'estructura de la matèria per sota dels  $10^{-18}$  m, se sap que els quarks i els leptons –partícules que no senten la interacció forta– són els constituents elementals de la matèria. El conegut electró forma part dels leptons.

La branca de la ciència que estudia els electrons, els quarks i la resta de partícules elementals que formen la matèria és la física de partícules. Per a desenvolupar els seus objectius li calen «microscopis» cada vegada més potents, capaços de penetrar en l'interior de la matèria fins a les distàncies més petites possibles.

Quan l'èmfasi es posa en les instal·lacions necessàries per a la producció i l'anàlisi de les partícules elementals, aquest camp d'estudi s'anomena física d'altres energies, nomenclatura que fa referència al fet que cal sondar la matèria amb partícules de molt alta energia produïdes en els acceleradors artificials dels laboratoris de física de partícules o mitjançant els fenòmens naturals associats als raigs còsmics.

La necessitat d'alta energia per a crear noves partícules massives és sustentada per l'equació relativista d'Einstein:  $E = mc^2$ , que indica com es pot invertir energia ( $E$ ) a produir massa ( $m$ ), i quina és la contribució d'una massa al balanç d'energia d'un procés determinat. La connexió entre massa i energia la dona el quadrat de la velocitat de la llum ( $c^2$ ). La partícula elemental més massiva que s'ha pogut crear fins ara al laboratori és la del quark top, una partícula elemental amb una massa 180 vegades més gran que la del protó.

## L'LHC I EL CERN

En l'actualitat, l'accelerador terrestre més potent en funcionament és el Gran Col·lisionador d'Hadrons o LHC (de l'anglès Large Hadron Collider) del Laboratori Europeu de Física de Partícules (CERN). L'LHC està instal·lat en un túnel de gairebé 27 km de circumferència, enterrat a 100 m de profunditat, que passa per territori de França i Suïssa. En aquestes instal·lacions es produeixen feixos de partícules de molt alta energia capaços de penetrar a l'interior de la matèria i donar informació sobre els seus constituents, sobre noves partícules produïdes en la col·lisió dels feixos, i en general sobre nous fenòmens.

Amb energies d'uns pocs electronvolts (1 eV és l'energia adquirida per la càrrega d'un electró en aplicar-li el potencial elèctric d'un volt) és possible

ionitzar els àtoms, i deslligar els electrons del seu nucli atòmic. Energies un milió de vegades més grans,  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ , són les que intervenen en fenòmens que afecten el nucli atòmic, com ara els processos que tenen lloc en els reactors nuclears. Per a estudiar les propietats de partícules elementals es necessiten energies a partir dels gigaelectronvolts ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ). L'energia actual de l'accelerador LHC és de 8 TeV, i serà de 14 TeV en una segona fase ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ). Els detectors instal·lats a l'LHC analitzen la producció de partícules fins a deu vegades més massives que la del quark top, i exploren la matèria fins a distàncies deu vegades més petites que les que s'han analitzat fins ara; és a dir, fins als  $10^{-19} \text{ m}$ . En aquesta nova regió d'altres energies i petites distàncies hom espera trobar nova física.

El CERN és el centre de física de partícules més important del món. Està situat sobre la frontera entre França i Suïssa, prop de Ginebra. Aquest centre proporciona als físics de partícules d'arreu del món les eines per a penetrar en l'estructura de la matèria, i així avançar en el coneixement dels constituents elementals i de les forces responsables del seu comportament. Acceleradors, detectors i ordinadors són els ingredients instrumentals que produeixen feixos de partícules d'alta energia en col·lisió, i que observen els productes resultants d'aquestes col·lisions i analitzen les dades que permeten donar respostes als problemes oberts de la física fonamental.

El CERN es va fundar el 1954 i ha significat la primera gran aventura d'una Europa unida la segona meitat del segle XX. Als 20 països membres actuals s'hi afegeixen membres associats i observadors de fora d'Europa. En aquests moments fa el paper de laboratori mundial que desenvolupa l'activitat científica de l'àrea i dissenya la política científica del futur. El Consell del CERN està format per delegats dels països membres, i és el responsable no sols de l'activitat del laboratori, sinó també de la política científica per a la física d'altres energies a Europa. El director general del CERN és nomenat pel Consell.

El CERN dóna treball a gairebé 3.000 persones, entre físics, enginyers, tècnics, administradors i altres treballadors. Al voltant de 10.000 científics d'Europa i de la resta del món participen, utilitzant les instal·lacions del CERN, en els experiments de la frontera del coneixement.

Espanya és membre del CERN des de 1983. L'aportació espanyola és proporcional al seu PIB i se situa immediatament després d'Alemanya, el Regne Unit, França i Itàlia. Els grups d'investigació espanyols participen en els grans experiments de l'LHC –ATLAS, CMS, LHCb i ALICE– i són finançats pel Programa Nacional de Física de Partícules del Govern d'Espanya. L'IFIC, centre mixt de la Universitat de València i del Consell Superior d'Investigacions Científiques, participa en ATLAS i en altres experiments, i és homologable als centres d'investigació de més rellevància mundial. Tots els indicadors assenyalen que Espanya és la cinquena potencia europea en excel·lència científica en física fonamental, i la novena del món.

## DESCOBRINT EL MECANISME DE HIGGS. L'ORIGEN DE LA MASSA

En les últimes dècades, la teoria estàndard de física de partícules ha aconseguit superar totes les proves experimentals a què ha estat sotmesa perquè done compte de les interaccions entre els constituents elementals de la matèria, sondats fins a distàncies tan ínfimes com els  $10^{-18}$  metres mitjançant els acceleradors de partícules. La teoria està basada en principis de simetria de les lleis físiques, que sols són exactes quan les partícules mediadores de les interaccions són de massa nul·la, com el fotó de la força electromagnètica. En aquest procés, la força dèbil –responsable de la generació d'energia al Sol i de la desintegració de partícules– i l'electromagnètica –responsable de la formació de l'àtom i de la matèria macroscòpica– han quedat unificades, en haver-se entès quines són les «càrregues» responsables d'aquestes interaccions.

Però els mediadors de la interacció feble són partícules molt massives, cosa que explica per què aquesta interacció, a diferència de l'electromagnètica, és d'abast molt curt. La pregunta rellevant és, doncs: com és possible obtenir partícules massives mentre retenim les prediccions de la simetria per a les interaccions? En altres paraules: *quin és l'origen de la massa?*

La solució proposada pel *mecanisme de Higgs* està basada en el fet que una llei física simètrica pot donar lloc a solucions asimètriques. Per especificar

una teoria amb creació i aniquilació de partícules a partir del *buit* hem de donar no sols la llei física, sinó també quina és l'estructura d'aqueix *buit*, l'estat de més baixa energia possible. Si el buit és asimètric, mentre que les lleis responsables de les interaccions són simètriques, diem que hi ha un trencament «espontani» de la simetria. Una analogia de la vida quotidiana és la d'una taula redona de comensals amb simetria perfecta, que es trenca en el moment que un d'ells tria el pa que té situat a la seua esquerra.

Robert Brout, François Englert i Peter Higgs descobriren que un camp amb una interacció del tipus de «barret mexicà» deixa de tenir un únic buit simètric (al centre) per disposar de tot un continu de buits possibles (al fons). El trencament espontani de la simetria es produeix quan se'n tria un com «el» buit de la teoria. Més encara, tots els buits són equivalents i podem triar-ne un qualsevol. La tria d'altres buits no dona origen a teories diferents.

Si apliquem aquest mecanisme de Higgs a la teoria unificada electrofeble, els mediadors de la interacció feble adquireixen massa, mentre que el fotó es queda sense massa, i en el procés apareix un romanent del camp original: el *bosó de Higgs*. Entenem, així, com és d'important la seua existència, perquè proporciona el senyal que l'origen de la massa té lloc, en efecte, mitjançant el trencament espontani de la simetria de la interacció unificada electrofeble, trencament provocat pel mecanisme de Higgs. La recerca del *bosó de Higgs* ha de fer-se mitjançant la seua producció en acceleradors d'alta energia.

Actualment, l'accelerador més potent en funcionament és l'LHC del CERN. ATLAS i CMS són experiments dissenyats per observar un ampli espectre de partícules i nous fenòmens produïts en les col·lisions de l'LHC, com ara el bosó de Higgs, la supersimetria o les dimensions extra. A més a més, estan mesurant amb alta precisió les propietats dels quarks, dels leptons i dels bosons ja coneguts, mentre que estan pendants de qualsevol serendipitat que pugui ocórrer. Cada experiment involucra aproximadament uns 3.000 físics de 40 països. Des d'Espanya, participen en l'experiment ATLAS l'Institut de Física Corpuscular (IFIC) de València, l'IFAE de Barcelona i un grup de la UAM, i en l'experiment CMS participen el CIEMAT de Madrid, l'Institut de Física de Cantàbria, la Universitat d'Oviedo i un altre grup de la UAM. També ha

col·laborat amb València l'Institut IMB-CNM del CSIC. LHC, ATLAS i CMS començaren a construir-se el 2000, després d'un llarg període de recerca i desenvolupament, i han necessitat una dècada per a la seua construcció, instal·lació, posada a punt i operació.

En el seminari que va tenir lloc al CERN el 4 de juliol de 2012, els experiments ATLAS i CMS han presentat l'estat de la recerca del bosó de Higgs de la teoria estàndard, basada en les dades de 2011 a una energia de 7 TeV i en les primeres dades de 2012 a 8 TeV, ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ). La recerca es fa en diversos «canals» segons els productes de desintegració del bosó de Higgs, els més importants dels quals són el de dos fotons i el de dos mediadors de la interacció feble que condueix a quatre electrons o muons. Cadascun dels dos experiments ha combinat, entre altres, els resultats dels canals esmentats per a les dades de 2011 i 2012.

Els resultats donen una significança que, separatament en cada experiment, permet concloure que s'ha observat un nou bosó amb una massa de 125-126 GeV en unitats d'energia ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ). Les característiques són compatibles entre els dos experiments i els dos canals, i amb el bosó de Higgs de la teoria estàndard. Estem, per tant, en un moment històric en l'avanç del coneixement científic, que ha fet exclamar al director general del CERN: «El tenim!»

Estem en el procés d'entendre l'origen de la massa, potser el concepte més important en la frontera del coneixement. Però aquest esdeveniment és només el començament: amb l'objectiu de consolidar l'observació present calen més dades fins a finals d'any, i, amb l'LHC operant a 14 TeV a partir de 2014, podrem estudiar amb precisió la natura i les propietats de la nova partícula.

## L'UNIVERS OBSERVABLE

Si des de les distàncies macroscòpiques del metre s'ascendeix fins a les més altes escales del cosmos, s'arriba a una segona frontera de distàncies, la dels  $10^{25}$  m o més. La branca de l'astronomia que estudia l'Univers globalment

a aquestes escales –sense entrar en els detalls de la seua estructura en termes d'objectes còsmics, com ara les estrelles i les galàxies– és la cosmologia. La cosmologia, per tant, en l'escala de distàncies es troba a l'altre extrem de la física de partícules o física d'altres energies.

La conclusió més remarcable de l'estudi de les dues fronteres és que estan connectades, i que l'exploració del cosmos a les distàncies més grans enllaça amb la investigació que es du a terme als laboratoris de física de partícules.

Hi ha un principi cosmològic que estableix que, a escala global, l'Univers és essencialment uniforme i isòtrop, és a dir, que és més o menys igual en tots els punts i en totes les direccions. A més a més, actualment se sap que l'Univers no és estàtic, sinó que s'ha expandit amb el temps des d'un gran esclat inicial (*Big Bang*). Com que els senyals que transporten informació no poden viatjar a una velocitat més gran que la de la llum, l'observació ací i ara de senyals que vénen de molt lluny proporciona informació de l'Univers en el moment en què aquests senyals van abandonar la font que els va generar, és a dir, aporta informació sobre l'Univers primordial.

L'Univers primitiu era extremament dens i calent, i les partícules que el formaven tenien tanta energia que la matèria no existia en forma d'agregacions d'àtoms tal com s'observa avui. Allò que és realment interessant és que els experiments que es duen a terme als laboratoris de física de partícules per investigar la composició de la matèria a escales subatòmiques recreen les condicions sota les quals l'Univers era format per un plasma dens i calent de partícules altament energètiques.

Les interaccions gravitatòries tenen un paper essencial en els moviments pròxims a la superfície de la Terra i en el comportament a gran escala de l'Univers actual. Totes les altres forces fonamentals són apantallades: les interaccions febles –responsables de la inestabilitat de nuclis i partícules– i les interaccions fortes –responsables de l'estructura dels nuclis i dels hadrons– ho són a causa del seu curt abast, i les interaccions electromagnètiques ho són perquè la matèria agregada s'organitza en termes de components atómico-moleculars neutres. En l'altre extrem, la interacció gravitatòria és la més feble de totes les interaccions a escala microscòpica, i no té un paper rellevant en la fi-

sica de partícules elementals, però presenta la propietat de ser «coherent» amb la matèria agregada, perquè el seu acoblament efectiu el dóna la massa global proporcional al nombre de constituents.

Un dels grans èxits de la mecànica newtoniana, que inclou la llei de la gravitació universal, va ser el fet d'explicar el moviment dels planetes del Sistema Solar (les lleis de Kepler). L'evidència astrofísica –l'observació del moviment de les estrelles binàries al voltant del seu centre de masses, per exemple– demostra que les interaccions gravitatòries també operen en sistemes astronòmics més grans, com ara estrelles, galàxies i nebuloses. La mecànica newtoniana incorpora el principi d'equivalència de Galileu –que afirma que tots els cossos pròxims a la superfície terrestre cauen amb igual acceleració– a través de la igualtat entre la massa inercial (la inèrcia respecte a qualsevol canvi de moviment) i la massa gravitatòria (l'acoblament amb un camp gravitatori). Aquest principi d'equivalència és el fonament de la teoria de la relativitat general d'Einstein, segons la qual els fenòmens gravitatoris estan associats a una modificació de la geometria de l'espai-temps. La relativitat general inclou la teoria newtoniana en el límit en què aquesta modificació de la geometria és feble, i és la base de la descripció de l'Univers a gran escala.

L'Univers es defineix com la totalitat d'allò que existeix, inclosos l'espai, el temps, la matèria, l'energia, els planetes, les estrelles, les galàxies, l'espai intergalàctic, etc. Però no tot allò que existeix a l'Univers es pot observar, de manera que es pot parlar d'un univers observable i d'un univers total, una part del qual no és possible observar. El primer és constituït per les galàxies, que actualment es poden observar gràcies al fet que la llum i altres senyals que en procedeixen han tingut prou temps per a arribar a la Terra des de l'inici de l'expansió còsmica. Atès que, d'acord amb el principi cosmològic, l'Univers és isòtrop, els límits de l'Univers observable dibuixen un volum esfèric centrat en l'observador, independentment de quina siga la forma de l'univers total. Cada punt de l'Univers té, per tant, el seu propi Univers observable, que és pot superposar, en menor o major grau, amb l'Univers observable centrat en la Terra.

Com que l'Univers té una edat de 14.000 milions d'anys (Ma), es podria pensar que el radi de l'Univers equival a 14.000 milions d'anys-llum. Però en



realitat és molt més gran, ja que durant els 14.000 Ma d'història de l'Univers, l'espai existent entre els primers fotons emesos i els observadors terrestres s'ha anat expandint. A causa de l'expansió de l'espai en el temps, actualment es poden observar objectes que originalment eren molt més a prop entre ells. Per tant, el radi de l'Univers observable no és de 14.000 milions d'anys-llum, sinó d'uns 47.000 milions d'anys-llum. Aquesta és la distància que poden haver recorregut la llum primigènia i altres senyals (com els neutrinos i les ones gravitacionals, que es propaguen a la mateixa velocitat que la llum) des de l'objecte que les va emetre fins a un observador actual situat a la Terra. Però en la pràctica només és possible veure la llum de l'Univers primigeni i, en general, altres senyals de l'espectre electromagnètic, quan els fotons d'aquesta llum no van ser immediatament reabsorbits per altres partícules carregades, com ara el plasma que existia abans de la recombinació de les partícules elementals per a formar matèria agregada neutra. Com que la transició des del plasma primigeni a la matèria formada per àtoms va tenir lloc uns 380 mil anys (Ka) després del *Big Bang*, la llum més antiga que podem veure és d'aquesta època. Això vol dir que cal distingir entre l'Univers «observable» i l'Univers «visible». El segon té un radi d'uns 46.000 Ma, un 2% més petit que el primer. La superfície exterior esfèrica de l'Univers visible és formada pel conjunt de punts emissors de llum, o d'un altre tipus de radiació, situats a la distància justa perquè els fotons que van ser emesos en el moment de la recombinació de les partícules elementals en àtoms estiguen arribant a la Terra en aquest precís instant. Els fotons emesos des d'aquesta superfície són els que es detecten avui en forma de radiació còsmica de fons de microones o CMBR (de l'anglès Cosmic Microwave Background Radiation).

L'Univers visible conté entre 3 i 100 vegades  $10^{22}$  estrelles organitzades en més de 80.000 milions de galàxies, que, al seu torn, formen cúmuls i supercúmuls. Una estrella típica conté uns  $10^{57}$  àtoms. Una galàxia típica té 400.000 milions d'estrelles, i probablement a l'Univers visible hi ha 80.000 milions de galàxies, a més de gas intergalàctic. En conseqüència, el nombre d'àtoms de l'Univers visible s'aproxima als  $10^{80}$ . Actualment aquests àtoms constitueixen la matèria agregada dels elements atòmics i moleculars.

## L'UNIVERS EN EXPANSIÓ. HISTÒRIA DEL TEMPS

Fins al segle XX hom suposava que l'Univers era estàtic; les estrelles es podien moure les unes respecte de les altres, però mai no s'havia pensat que hi hagués una expansió o una contracció globals del conjunt de l'Univers. Aquesta idea la van introduir un seguit de descobriments realitzats durant la dècada de 1920, que van representar l'inici de la cosmologia observacional.

L'astrònom nord-americà Edwin Powell Hubble (1889-1953) es va adonar que els espectres de la llum de les galàxies molt distants mostraven, sistemàticament, un desplaçament cap a longituds d'ona més llargues, és a dir, un desplaçament cap al vermell. Això volia dir que estaven retrocedint respecte de la Terra, però que també s'allunyaven les unes de les altres. Els càlculs de Hubble van demostrar que la velocitat de retrocés ( $v$ ) d'una galàxia era proporcional a la distància ( $d$ ) a la qual la galàxia es trobava de la Terra, cosa que va expressar en la llei de Hubble:  $v = H d$ , on  $H$  és una constant de proporcionalitat que pren el valor de  $2,2 \cdot 10^{-18}/s$ .

La llei de Hubble és l'única llei que manté la mateixa distribució relativa de les galàxies en temps diferents. No hi ha cap punt privilegiat en la distribució lineal, i això és vàlid en totes les direccions de l'espai. Per tant, d'acord amb la llei de Hubble no hi ha cap raó per a pensar que la Via Làctia és al centre de l'Univers, ni tan sols si es pren com a referència per a les observacions. D'aquí es dedueix que l'espai s'expandeix en el temps, i que la història de l'Univers és la història del temps. Aquesta idea fonamental constitueix el principi cosmològic ja esmentat. Hi ha fluctuacions locals de densitat i temperatura, però globalment l'Univers és homogeni i isòtrop. Per tant, la constant de Hubble és constant en l'espai, i les lleis de la física són les mateixes en tots els seus punts.

Però la llei de Hubble també suggereix que, en algun temps del passat, tota la matèria de l'Univers es trobava molt més concentrada i calenta del que ho està ara. Aleshores la matèria i l'energia van ser impulsades per una explosió immensa, anomenada la Gran Explosió o Big Bang, que proporcionà

energia cinètica a l'Univers. D'acord amb la llei de Hubble, el temps necessari perquè un senyal viatge des del Big Bang fins a la Terra és del voltant de  $1/H = 1,4 \cdot 10^{10}$  anys. Aquesta és l'edat actual de l'Univers.

En la teoria de la relativitat general d'Einstein, l'increment de longitud d'ona dels espectres de les galàxies s'explica per l'expansió mateixa de l'espai. Per comprendre com és possible una expansió sense un centre, es pot imaginar la superfície d'una esfera, el radi (R) de la qual augmenta amb el temps cosmològic. Aleshores no hi ha cap centre en la superfície en expansió i tots els objectes puntuals de la superfície esfèrica retrocedeixen els uns respecte dels altres. En aquest símil, l'espai es mostra infinit, encara que és delimitat. La quantitat R és el radi de curvatura en cada punt, així com un factor d'escala que depèn del temps cosmològic, que canvia amb l'expansió. Qualsevol longitud en l'espai intergalàctic és proporcional a R. D'acord amb aquesta visió, l'increment de longitud d'ona amb el temps cosmològic és un desplaçament cosmològic cap al vermell, i no és pas causat per un moviment relatiu de les galàxies. Com més lluny es troba un objecte, més li costa a la llum arribar a l'observador, i més gran és el canvi en R i en la longitud d'ona. Si en la llei de Hubble la distància és suficientment gran, la velocitat d'expansió pot ser més gran que la velocitat de la llum. No hi ha cap problema amb aquest resultat: indica que la regió més distant de l'Univers queda més enllà de l'horitzó observable i cap senyal que s'hi emet no és capaç d'arribar a l'observador. D'això es conclou que l'espai s'expandeix amb el temps.

La llei de Hubble relaciona la velocitat d'expansió amb la distància espacial. Però l'expansió també depèn del temps cosmològic. Fins no fa gaire, la comunitat científica estava convençuda que hi havia una pressió negativa (cap a l'interior de l'Univers) deguda a l'atracció gravitatòria, que conduiria amb el temps a una desacceleració de l'expansió de l'Univers. Però el 1998 la cosmologia es va haver de replantejar aquestes suposicions quan es van publicar les troballes que el 2011 donarien el Premi Nobel de Física als nord-americans Saul Perlmutter (n. 1959), Brian P. Schmidt (n. 1967) i Adam Guy Riess (n. 1969). Aquests científics van demostrar que la llum que emeten les supernoves de tipus Ia, que corresponen a l'explosió d'una vella estrella compacta

tan pesant com el Sol i tan petita com la Terra, és més feble que l'esperada. Això indica que l'expansió de l'Univers s'accelera.

L'acceleració de l'Univers requereix la presència d'una energia capaç de proporcionar una pressió positiva cap a fora, contrària a l'exercida per la força de gravetat de la matèria. Per referir-se a aquesta energia que accelera l'Univers s'ha encunyat el nom d'*energia fosca*, però la seua naturalesa és un enigma. Juntament amb l'origen de la massa, l'energia fosca planteja un dels problemes més importants de la física actual.

És possible reconstruir una història de l'Univers a partir d'alguns fets cosmològics observacionals i d'acord amb la teoria que explica les interaccions fonamentals entre les partícules elementals, que ha estat comprovada en experiments de física d'altres energies fins a uns centenars de gigaelectronvolts. A energies més altes i distàncies més curtes s'ha de parlar de «terra ignota» i, per tant, les descripcions, de moment, són especulacions no comprovades en la teoria de la física de partícules.

Aquesta història, però, no és pot remuntar més enllà de l'anomenat temps de Planck, que és d'uns  $10^{-43}$  s, perquè per a temps anteriors no es disposa de cap teoria consistent de la gravetat quàntica. Entre l'instant zero i el temps de Planck no existien partícules elementals, i les quatre forces d'interacció que actuen avui a l'Univers (la interacció gravitatòria, la interacció nuclear forta, la interacció feble i la interacció electromagnètica) estaven unificades en una única força fonamental. A aquest primer període de temps de la història de l'Univers, se l'anomena *era* o època de *Planck*.

En l'era de Planck la temperatura de l'Univers era de  $10^{32}$  K, i l'energia mitjana per partícula era l'energia de Planck, d' $1,2 \cdot 10^{19}$  GeV. Seguint les especulacions actuals en física de partícules, en el període comprès entre els  $10^{-43}$  i els  $10^{-35}$  s la interacció nuclear forta, la feble i l'electromagnètica continuaven unificades, però la interacció gravitatòria ja se n'havia separat, perquè l'Univers s'expandia i es refredava. El que hi havia aleshores era un plasma de quarks i leptons. Als  $10^{-35}$  s, la temperatura havia disminuït a uns  $10^{27}$  K, i l'energia mitjana per partícula a  $10^{14}$  GeV. Per sota d'aquesta energia, la força d'interacció forta se separa de la interacció unificada electrofeble.

D'acord amb el model inflacionari de l'Univers, necessari per a comprendre algunes propietats de l'Univers actual, en aquests temps primitius es va produir un període d'expansió molt ràpida. Aleshores l'Univers era un plasma format per quarks, leptons i partícules responsables de les interaccions fonamentals: gluons per a la interacció nuclear forta, fotons per a la interacció electromagnètica, i bosons  $W^{\pm}$  i  $Z$  per a la interacció feble. Des del període inflacionari de l'expansió ràpida fins als  $10^{-12}$  s l'Univers es va continuar expandint, per bé que més lentament, i la temperatura va continuar disminuint fins que assolí els  $10^{15}$  K. Aleshores les energies típiques de les partícules eren d'uns 100 GeV. En alguna època, entre els  $10^{-35}$  s de l'escala de gran unificació de les interaccions forta i electrofeble i els  $10^{-12}$  s de l'escala electrofeble, esdevingué la bariogènesi. És un fet observat que l'Univers actual és constituït per matèria i no pas per antimatèria. *Bariogènesi* és el terme genèric per a descriure els processos físics que van produir aquesta asimetria entre la matèria i l'antimatèria en l'Univers primitiu. Encara que les condicions per a poder explicar la bariogènesi són conegudes i presents en la teoria estàndard de física de partícules, ens trobem molt lluny de poder donar una explicació quantitativa d'aquests fenòmens. Cal nova física. És altament probable que aquesta prehistòria de l'Univers, abans dels  $10^{-12}$  s, haja de ser revisada i reescrita en el futur, quan la ciència cosmològica disposarà de nous avenços sobre el coneixement de la física de partícules. De moment, i gràcies a les observacions cosmològiques dels darrers temps, se sap que a l'Univers hi ha més components d'energia-matèria que els que descriu el model estàndard actual de la física de partícules. Per tant, s'espera que els resultats dels experiments que es duen a terme amb l'accelerador de partícules LHC, en funcionament i de prestacions excel·lents, aporten nous descobriments, més enllà d'explicar l'origen de la massa amb el bosó de Higgs.

Als  $10^{-12}$  s s'entrà en el període que es pot anomenar històric, ja que hom ha pogut estudiar l'evolució de l'Univers d'aleshores ençà i descriure la física de partícules elementals gràcies a l'ús d'acceleradors. A més a més, es disposa d'alguns «fòssils cosmològics» d'aquesta època, radiacions romanents d'aquells

temps que es poden estudiar amb molt de detall. En passar a l'època històrica, les energies mitjanes de les partícules ja no eren prou altes per a mantenir en equilibri el quark més pesant de tots, el quark top, ni tampoc els bosons mediadors de la interacció feble  $W^*$  i  $Z$ , de manera que aquestes partícules es van desintegrar i van desaparèixer.

Un moment particularment significatiu en l'evolució de l'Univers va ser el de la transició dels quarks als hadrons, que va tenir lloc aproximadament cap als  $10^{-6}$  s, quan la temperatura era de  $10^{13}$  K, i l'energia mitjana per partícula al voltant d'1 GeV. Un altre fenomen importantíssim que va tenir lloc quant al temps  $t = 1$  s, va ser el desacoblament dels neutrins, unes partícules elementals que pertanyen a la família dels leptons. En l'Univers primordial els neutrins estaven en equilibri dinàmic a través de la seua creació i aniquilació en processos d'interacció feble a altes energies, perquè la freqüència d'aquesta interacció era més gran que la d'expansió de l'Univers. Però a energies per sota d'1 MeV, les interaccions dels neutrins són massa febles, i els neutrins es desacoblen del plasma. Des d'aleshores els neutrins estables han constituït una radiació de fons, ja que l'Univers s'ha continuat refredant i no ha afectat la seua distribució d'energies. La temperatura actual d'aquest fons de neutrins és d'1,96 K. Cal dir, però, que aquesta radiació de fons de neutrins encara no s'ha pogut observar, ja que interactua molt feblement amb la matèria.

En el moment en què es produïa el desacoblament dels neutrins, quan  $t = 1$  s, només els nucleons, entre tots els hadrons, eren estables, i cap als 100 s neutrons i protons existien en la proporció d'1 a 7. Aleshores les energies eren les típiques de l'enllaç nuclear, 1 MeV, i va començar la nucleosíntesi primordial. Els càlculs teòrics de l'abundància dels elements lleugers produïts en aquesta nucleosíntesi inicial estan totalment d'acord amb les abundàncies observades en l'Univers, cosa que representa un gran triomf de la teoria cosmològica del Big Bang.

En el període temporal comprès entre 1 s i 380.000 anys, la densitat d'energia de la radiació electromagnètica era més gran que la de matèria, raó per la qual es parla de l'era de la radiació. Aleshores a l'Univers ja hi havia

nuclis atòmics lleugers amb una càrrega elèctrica positiva, ja que s'havien originat en la nucleosíntesi primordial, i la seua càrrega era compensada per una quantitat igual de càrrega negativa en forma d'electrons lliures en equilibri amb la radiació electromagnètica. Com que la densitat d'energia de la radiació decreix més ràpidament amb la temperatura de l'Univers que la densitat d'energia de la matèria, perquè els fotons no tenen massa, a uns 380 Ka les dues densitats d'energia van quedar igualades. En aquell moment la temperatura, d'uns 3.000 K, ja no era prou alta per a mantenir els electrons i els nuclis lliures carregats separatament, de manera que es van combinar els uns amb els altres i van formar àtoms estables neutres. Aquest fenomen es coneix amb el nom de *recombinació*. Sense electrons lliures, la radiació electromagnètica ja no pot interaccionar de manera important amb la matèria, i l'Univers queda «transparent» perquè la radiació es desacobla de la matèria. La longitud d'ona d'aquesta radiació creix amb l'expansió de l'Univers i és una mesura del factor d'escala R: el que era una radiació de cos negre a la temperatura de 3.000 K en el moment en què es va desacoblar de la matèria, ha passat a ser, a causa de l'expansió de l'Univers, un fons actual de radiació de microones de 2,7 K, ja que a aquesta temperatura els fotons tenen la longitud d'ona corresponent a la radiació de microones de l'espectre electromagnètic. Aquesta radiació de fons de l'Univers va ser descoberta i mesurada el 1964 per l'astrofísic alemany Arno Allan Penzias (n. 1933) i el físic nord-americà Robert Woodrow Wilson (n. 1936), cosa que representa un altre triomf grandios del model cosmològic estàndard del Big Bang.

A partir de la recombinació que havia generat hidrogen atòmic i heli, quan l'Univers tenia una edat de 380.000 anys, s'entrà en l'era dominada per la matèria, durant la qual es formen les estrelles i les galàxies. Les galàxies s'agrupen en cúmuls i supercúmuls, de manera que en l'estructura a gran escala de l'Univers queden grans regions sense matèria visible. Comprendre el procés de formació d'aquesta estructura a gran escala és un dels problemes importants de la Cosmologia.

## LA SEGONA REVOLUCIÓ COPERNICANA. MATÈRIA I ENERGIA FOSCA

Al segle XVI, l'astrònom polonès Nicolau Copèrnic (1473-1543) va revolucionar l'astronomia en substituir un cosmos finit centrat en l'ésser humà per un Univers infinit i homogeni disposat al voltant del Sol. Posteriorment es va descobrir que ni tan sols el Sol és el centre de l'Univers, ja que el Sistema Solar és un més dels molts sistemes planetaris ordinaris que resideixen als suburbis de la Via Làctia. Finalment, el principi cosmològic, segons el qual l'Univers és homogeni i isotrop, ha obligat a abandonar definitivament la idea que l'home, o qualsevol altre centre, ocupa un lloc especial a l'Univers.

Si bé l'Univers és globalment homogeni, s'observa que té una estructura granular. Es creu que petites fluctuacions a l'atzar d'una densitat d'energia originàriament uniforme han generat petites agrupacions de densitat més elevada, en un procés molt semblant a la formació dels núvols. Les fluctuacions de la densitat inicial que van fer arrencar la granulació degueren començar en un temps no gaire tardà de l'evolució de l'Univers. Això vol dir que es disposa dels resultats de l'estructuració a gran escala de l'Univers, i que la radiació de fons a 3 K que s'observa avui, al cap de 14.000 Ma, ha de contenir memòria d'aquestes primeres fluctuacions de la densitat inicial. En efecte, el 1992 el satèl·lit COBE (de l'anglès Cosmic Background Explorer, «Explorador Còsmic de l'Espai Profund») de la NASA va descobrir petites no-uniformitats i anisotropies en la radiació de fons que eren consistents amb la granulositat observada en la distribució de matèria a l'Univers. Aquestes anisotropies han estat estudiades posteriorment amb més detall per un altre satèl·lit de la NASA, el WMAP (de l'anglès Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, «Sonda Wilkinson d'Anisotropia de Microones»), i això ha fet possible mesurar el contingut de matèria-energia de l'Univers actual. Els resultats finals són espectaculars: l'Univers conté un 28% de matèria. Com que la matèria visible directament és només d'un 5%, això vol dir que el 23% restant és matèria no convencional o fosca. De fet, la necessitat de l'existència d'una matèria fosca amb interacció gravitatòria ha estat present en la cosmologia durant unes quantes dècades (per



exemple, per a poder explicar les corbes de rotació de les galàxies i l'estructura a gran escala de l'Univers). Un altre descobriment important és el d'una nova pressió repulsiva, que correspon al 72% de densitat d'energia i que completa el balanç energètic. Aquesta contribució positiva al balanç d'energia, fins ara desconeguda, és compatible amb l'energia fosca introduïda per explicar l'acceleració actual de l'expansió de l'Univers a causa d'algun tipus de pressió repulsiva. Per tant, l'energia fosca és del 72%.

En un futur pròxim, el satèl·lit Planck de l'ESA examinarà la radiació còsmica de fons amb una sensibilitat, una resolució i un abast de freqüències no obtingudes mai abans, i afinarà encara més tots aquests resultats. Aleshores potser dades inesperades conduiran a noves idees i conceptes. De moment ja sabem que no tan sols no som a cap centre de l'Univers, sinó que la major part del contingut de l'Univers (el 95%) és formada per alguna cosa diferent del material de què estem fets els humans. Aquest descobriment es pot considerar una Segona Revolució Copernicana.

Els científics infereixen que la matèria fosca existeix gràcies als efectes gravitatoris que exerceix sobre la matèria visible i la radiació còsmica de fons, però no és detectable en forma de radiació electromagnètica emesa o dispersada. La seua existència és justificada per les discrepàncies existents entre les mesures de la massa de galàxies, cúmuls de galàxies i l'Univers sencer preses a través d'efectes dinàmics i de les mesures basades en la massa de la matèria «lluminosa» visible que contenen aquests objectes: estrelles, gas i pols del medi interestel·lar i intergalàctic. De fet, la matèria fosca va ser postulada per l'astrònom suís Fritz Zwicky (1898-1974) el 1934 per explicar la «massa que faltava» en les velocitats orbitals de les galàxies dels cúmuls. Més endavant, altres observacions –com ara les corbes de rotació galàctiques, la dispersió de velocitats de les galàxies, les lents gravitatòries, etc.– han donat també proves de la presència de matèria fosca en l'Univers.

Des de la dècada de 1970 es disposa de mesures d'alta precisió de les corbes de rotació dels objectes més exteriors de les galàxies espirals, i s'ha observat que aquestes corbes no coincideixen amb les corbes teòriques que s'obtenen aplicant les lleis de Kepler. La major part dels objectes hi orbiten a la matei-

xa velocitat, independentment de la seua distància del disc lluminós central, cosa que confereix una forma plana a la corba de rotació de la galàxia. Per a explicar aquesta forma plana caldria que les galàxies espirals tingueren una massa molt més gran que l'observada. I d'aquesta massa extra en pot donar compte la matèria fosca, que és continguda en el seu halo fosc. Les corbes de rotació, tant per baixa com per alta lluminositat superficial, indiquen un perfil de densitat universal, que es pot expressar com la suma d'un disc estel·lar estret i un halo de matèria fosca esfèric de densitat uniforme que arriba fins a grans distàncies.

També les galàxies el·líptiques tenen un contingut en matèria fosca relativament alt, tal com es dedueix de les mesures de dispersió de les seues velocitats (la dispersió de velocitats d'un grup d'objectes, per exemple un cúmul d'estrelles al voltant d'una galàxia, és l'abast de les velocitats d'aquests objectes respecte de la velocitat mitjana).

Una lent gravitatòria es forma quan la llum d'una font molt distant i brillant es doblega o es corba en passar a prop d'un objecte massiu, com ara un cúmul de galàxies. L'efecte de lent gravitatòria de la teoria de la relativitat general d'Einstein prediu les masses dels cúmuls que corben la llum, de tal manera que mesurant la geometria distorsionada de la trajectòria de la llum es pot obtenir la massa del cúmul responsable del fenomen.

En la major part de l'Univers, la matèria fosca i la matèria visible es troben juntes, tal com s'espera a causa de la seua atracció gravitatòria mútua. En el cúmul de la Bala, però, una col·lisió entre dos cúmuls de galàxies ha originat una separació de la matèria fosca i la matèria ordinària. Les observacions demostren que molta matèria ordinària, en forma de gas o plasma, es concentra al centre del cúmul. Les interaccions electromagnètiques, que no afecten la matèria fosca però sí l'ordinària, frenen les partícules del gas, que resten a prop del punt d'impacte i són detectades amb telescopis de raigs X. Per contra, les observacions del mateix cúmul a través de l'efecte de lent gravitatòria demostren que la major part de la massa es troba fora de la regió central de gas, cosa que indica que els components de matèria fosca dels dos cúmuls van passar l'un a través de l'altre, sense frenar-se de manera substancial.

## DETECCIÓ I PRODUCCIÓ DE MATÈRIA FOSCA FREDA

Encara que les observacions demostren que per a explicar l'estructura a gran escala de l'Univers cal una quantitat significativa de matèria no ordinària o fosca, la composició d'aquesta matèria no es coneix. S'han proposat diferents models per explicar de què podria estar feta. D'acord amb un primer model, hi hauria una matèria fosca calenta formada per partícules elementals lleugeres que es desplacen a velocitats relativistes, que podrien ser neutrins. Un altre model parla de matèria fosca constituïda per neutrins i protons, igual que la matèria ordinària però no visible, com ara planetes molt massius o forats negres no detectats fins ara. Tant l'una com l'altra, però, poden representar només una part molt petita del total de matèria fosca i amb elles no podem explicar la formació d'estructures. Per això és àmpliament acceptat un tercer model, el de la matèria fosca freda, no ordinària, composta per partícules elementals desconegudes, més enllà de la teoria estàndard de física de partícules, que es mouen a velocitats no relativistes.

Una propietat important de la matèria fosca és que es comporta com un fluid perfecte, és a dir, no té cap resistència interna o viscositat. Això significa que les partícules de matèria fosca no interactuen entre elles a través d'interaccions fortes o electromagnètiques. A més a més, per a explicar l'estructura a gran escala de l'Univers, s'ha d'invocar l'existència de matèria fosca freda. Calen, per tant, les anomenades partícules massives que interaccionen feblement o WIMP (de l'anglès *Weakly Interacting Massive Particles*). El model estàndard de física de partícules no preveu partícules d'aquestes característiques, però sí que poden existir en extensions del model estàndard, com per exemple en molts dels anomenats models supersimètrics. Aquests models proposen com a candidats a constituir la matèria fosca freda estables unes partícules supersimètriques que serien les més lleugeres de totes i que reben el nom de LSP (de l'anglès *Lightest Supersymmetric Particle*). Un neutralí és un exemple d'LSP hipotètica amb les propietats de les WIMP. Alternativament, segons extensions no supersimètriques del model estàndard, poden existir un tipus de neutrins, diferents dels descrits pel model estàndard, que sí que podrien ser candidats a

formar la matèria fosca freda. Aquests neutrins no interaccionen amb la matèria mitjançant interaccions febles com ho fan els neutrins ordinaris, raó per la qual reben el qualificatiu d'estèrils.

Si la matèria fosca de la Via Làctia és feta de WIMP, un gran nombre d'aquestes partícules ha de passar a través de la Terra cada segon. Diversos experiments que es duen a terme actualment, i d'altres que s'estan planificant, intenten detectar de manera directa o indirecta les WIMP que arriben a la Terra procedents del cosmos.

Per a detectar WIMP directament cal reconèixer els efectes o senyals que aquestes partícules produeixen en els nuclis atòmics de la matèria ordinària quan hi impacten i els fan retrocedir: ionització, escintil·lació o calor. Els experiments de detecció directa de WIMP és duen a terme en laboratoris subterranis profunds per tal de reduir el fons no desitjat de partícules que arriben del cosmos. Per exemple, el Laboratori Subterrani de Canfranc (LSC), a Osca, se situa sota un cim muntanyós dels Pirineus que li proporciona un escut contra els raigs còsmics equivalent al de 2.540 m d'aigua. Altres laboratoris europeus detectors de WIMP són el del Gran Sasso (Itàlia), el de Fréjus (França) i el de Boulby (Gran Bretanya). Alguns dels experiments que s'hi duen a terme poden detectar dos efectes diferents de l'impacte de les WIMP sobre els nuclis atòmics, i són capaços de distingir les partícules dispersades pels electrons de la matèria de les partícules WIMP de matèria fosca dispersades pels nuclis.

Dos experiments de detecció de WIMP, el DAMA/LIBRA, fet al laboratori nacional del Gran Sasso, i el CoGeNT, que és du a terme al Laboratori Subterrani de Soudan (Estats Units), han detectat una intrigant modulació anual dels senyals (per a la matèria fosca atrapada al sistema solar, i a causa del moviment de la Terra al voltant del Sol, s'espera una modulació anual de la freqüència d'esdeveniments). Si el senyal és atribuït veritablement a partícules WIMP, això estaria indicant que aquestes partícules tenen una massa baixa a la regió de 10 GeV. Aquest detector no disposa d'un mètode per a identificar el retrocés nuclear, tan sols la modulació anual del senyal. Però potser un altre experiment com l'ANAIS, basat en una tecnologia similar, que està en funcio-

nament al laboratori de Canfranc, podrà comprovar els resultats del DAMA. Cal tenir present que els experiments de detecció directa que identifiquen el retrocés nuclear són més sensibles a la regió de massa alta de les WIMP, de 100 GeV o més, i no han detectat cap senyal fins ara. És interessant que puguin estendre la seua sensibilitat a la regió de massa baixa de les WIMP per comparar les seves observacions amb els resultats del DAMA.

La matèria fosca existent a l'Univers també es pot detectar de manera indirecta cercant els productes de l'aniquilació de partícules WIMP. Si, tal com es creu, les WIMP són partícules neutres per a totes les càrregues, dues WIMP en col·lisió podrien aniquilar-se i produir raigs gamma, neutrins o parells partícula-antipartícula, com ara electró-positró. El senyal seria un excés significatiu de raigs gamma, positrons o antiprotons en l'halo galàctic. I efectivament, la missió espacial PAMELA, instal·lada en un satèl·lit rus el 2006 i capaç de mesurar amb una gran precisió i sensibilitat l'abundància i l'espectre d'energia de positrons i antiprotons, ha observat un excés de positrons. Si bé és cert que aquests positrons podrien ser produïts per l'aniquilació de matèria fosca, no es pot descartar que provenen de fonts convencionals, com ara púlsars. D'altra banda, no s'ha observat cap excés d'antiprotons. S'espera que el detector AMS (de l'anglès Alpha Magnetic Spectrometer, «Espectròmetre Magnètic Alpha»), recentment instal·lat a l'Estació Espacial Internacional (EEI), ajude a resoldre aquests dubtes.

També és fonamental produir les partícules de matèria fosca al laboratori i estudiar-ne les propietats. L'accelerador LHC estendrà la recerca de partícules supersimètriques fins a masses molt altes. A partir d'aquestes partícules de gran massa es provocarà una cadena de desintegracions fins arribar a les LSP, com ara el neutralí, que s'hauria de manifestar en forma d'energia faltant en tot el procés. Els dos detectors ATLAS i CMS de l'LHC estan actualment realitzant aquest estudi. *L'LHC també té la capacitat de produir matèria fosca directament, és a dir, de crear partícules WIMP, que l'ATLAS i el CMS poden detectar com a energia que falta, independentment que la supersimetria en siga l'explicació o no.* La limitació més important per a aquesta producció directa de partícules de

matèria fosca en l'LHC és que les WIMP, tal com diu el seu nom, són partícules d'interacció feble, de manera que serà necessari acumular una alta estadística per a obtenir resultats concloents. El que queda clar de tot això és que el problema de la matèria fosca està connectat amb la recerca de noves partícules no descrites pel model estàndard. D'aquesta manera es connectaran les dues fronteres de la física, la dels nivells o distàncies més grans amb la de les distàncies més petites. Que la mateixa instal·lació, com ara l'LHC del CERN, pugui donar informació tant sobre l'origen microscòpic de la massa, amb el descobriment del bosó de Higgs, com sobre un problema cosmològic, produint les partícules de matèria fosca, proporciona una demostració de la unitat de la ciència.

## LA PERSPECTIVA CIENTÍFICA

Una i altra vegada s'ha insistit, amb raó, que la ciència és internacional en el seu desenvolupament, a més de ser universal en la seua validesa, i el CERN, el Laboratori Europeu de Física de Partícules, serveix de model per a totes les àrees científiques. La ciència orienta el pensament de l'ésser humà cap a qüestions que molts pobles comprenen, i en la solució de les quals poden participar estudiosos de diferents llengües, races i religions. Werner Heisenberg, en una conferència que va pronunciar per a estudiants de Göttingen el juliol de 1946, assenyala la profunda impressió que li va produir l'anomenat «Festival de Bohr», la setmana de conferències que, l'estiu de 1921, va pronunciar Niels Bohr sobre la seua teoria atòmica. La impressió de Heisenberg fou causada perquè, en primer lloc, «em vaig adonar que, per a comprendre la constitució de l'àtom, era indiferent ser alemany o danès o anglès, i després vaig aprendre que en la ciència no es tracta de fe, ni d'opinió ni d'hipòtesis».

La validesa universal de la ciència pot conduir –i ha de fer-ho–, d'una banda, a la formació cultural de la societat, formació exempta d'opinions i de prejudicis. La ciència és cultura, i descobrir o aprendre els secrets del comportament de la natura és motiu d'una satisfacció intel·lectual que ha d'arribar a tothom. D'altra banda, aquesta mateixa validesa proporciona una base per a

albirar aplicacions noves del coneixement adquirit. Tal com deia un erudit: «és impensable produir ciència aplicada sense disposar de ciència susceptible de ser aplicada».

El camp de la física de partícules és d'investigació bàsica en ciència fonamental i no necessària respondre la típica qüestió que plantegen els polítics i altra gent: «per a què serveix?», però la respon. Com Faraday va respondre allà pels anys 30 del segle XIX als membres del Parlament britànic que li van fer aquesta mateixa pregunta quan ell els explicava l'interès de la investigació que combinava circuits elèctrics i imants. Segons consta en les actes del Parlament britànic, «no sé si les meues investigacions serviran algun dia, però si ho fan, vostès imputaran impostos als ciutadans pels beneficis que comportaran». Les paraules de Faraday van ser profètiques, perquè el fenomen d'inducció magnètica és un ingredient fonamental de l'electromagnetisme unificat, base de la tecnologia i de les comunicacions desenvolupades al llarg del segle XX.

Com que la física de partícules és una ciència fonamental, els coneixements adquirits en els seus objectius, com ara la propagació de partícules i radiacions a través de la matèria, o bé pels mitjans necessaris per a experimentar en física d'altres energies, com ara la criogènia per alts buits o la tecnologia d'imants superconductors, han generat aplicacions excel·lents que han retornat a la societat un valor afegit considerable que multiplica els beneficis econòmics i socials. A més a més, l'atmosfera de llibertat intel·lectual que proporciona un laboratori com el CERN és estimulante: no és casualitat que un avanç tan considerable per a la tecnologia de la informació com la invenció del web, gràcies al qual no cal transmetre la informació sinó accedir a la que hi haja dipositada en els portals, ha tingut lloc al CERN. I, seguint en aqueix camí, la física mèdica és darrerament un capítol d'enorme transcendència social amb les aplicacions d'acceleradors i detectors a la teràpia i la imatge mèdica. Atès que la física mèdica és una àrea de la física de partícules amb investigació orientada, als grans laboratoris han sorgit grups d'investigació que han desenvolupat conceptes i dispositius en col·laboració internacional per a l'aplicació en medicina. És el cas de l'IFIC, centre mixt de la Universitat de València i el Consell Superior d'Investigacions Científiques, on, a més de participar en ATLAS i en la cerca del bosó de Higgs, participa en projec-

tes europeus, també coordinats pel CERN, de física mèdica, com ara PARTNER, de teràpia, o ENVISION, d'imatge. I des de l'IFIC ha sorgit el projecte IFIMED de física mèdica, tan il·lusionant per a la societat valenciana i espanyola, dirigit a la investigació en imatge i acceleradors aplicada a la medicina.

En moments com els actuals, d'incertesa per al futur de la investigació científica a Espanya, vull proclamar uns quants fets. Ha costat més de 40 anys, en aquest país, arribar a situacions d'excel·lència científica com les obtingudes en els últims anys. Recordem que, en els anys 60 del segle XX, 40 anys després del naixement de la mecànica quàntica i en ple desenvolupament de tecnologies quàntiques en les societats avançades, aquesta disciplina ni fan sols s'ensenyava a la Universitat espanyola. Les coses s'han fet bastant bé en política científica, i ara la física espanyola ocupa el novè lloc mundial en tots els indicadors d'avaluació. I la Facultat de Física de la Universitat de València fa anys que ja va entrar, com a única representació espanyola, en el selecte grup dels 100 millors centres mundials d'estudis de física, en el rànquing internacional preparat per la Universitat de Xangai, un rànquing en què ocupa aproximadament la posició 70. En l'última dècada, l'obertura de noves línies d'investigació dirigides pels investigadors del Programa Ramón y Cajal ha suposat un impuls extraordinari a la qualitat dels centres espanyols, la seua internacionalització i una major visibilitat mundial. Si no es continua alimentant aqueixa política científica, consolidant els assoliments científics i les persones que ho fan possible, l'equilibri dinàmic necessari per a mantenir el nivell d'excel·lència científica dels centres s'ensorrarà en uns pocs anys. I com que és impossible de recuperar –de nou necessitaríem dècades– Espanya tornaria a perdre, com en tantes altres ocasions de la història, el tren de les societats científiques avançades, cap a les quals anem fent camí.

En *La perspectiva científica*, Bertrand Russell escriu:

He vist com la terra es torna vermella al capvespre, la rosada llambrejant de bon matí i la neu brillant sota un sol glacial; he ensumat la pluja després de la sequera, i he sentit el tempestuós Atlàntic batent les costes de granit de Cornualla. La ciència pot atorgar aquestes i altres alegries a més gent de la que altrament hauria pogut gaudir-ne. Si hom l'empra així, l'emprarà sàviament.



Aquest bellíssim cant de Russell, que descriu la influència de la ciència sobre la vida humana, conduint necessàriament al futur d'una societat científica avançada, de la qual he parlat abans, pot tancar les meues reflexions sobre el tema: Espanya no pot quedar-ne fora, i el poder de la ciència serà transmès i viscut per la societat.

Moltes gràcies per la seua atenció.

*València, setembre de 2012*