

De l'origen al destí de l'Univers



Clara Kateb Castellnou
Tutor: Joan Anton Escuder
2n de batxillerat A
Curs: 2008-09
Escola Pia Sant Antoni
Barcelona, 8 de gener

Agraïments

Voldria agrair l'ajuda i el suport de la meva família. També voldria donar les gràcies a aquelles persones que m'han rebut tan amablement en entrevistar-les:

- Sr. Carlos Pobes, professor de la Universitat de Saragossa
- Sr. Daniel Roig, de la UAB i membre de l'Agrupació Astronòmica de Sabadell
- Sr. Alberto Manrique, professor del Departament d'Astronomia i Meteorologia (DAM) de la UB.

Finalment agrair al meu tutor Joan Anton Escuder la seva ajuda durant la realització del treball.

1. INTRODUCCIÓ	4
2. TEORIES COSMOLÒGIQUES AL LLARG DE LA HISTÒRIA	5
A) ARISTÒTIL (384-322 A.C.)	5
B) PTOLOMEU (885-165 A.C.).....	7
C) NICOLAU COPÈRNIC (1473-1543).....	9
D) GIORDANO BRUNO (1548-1600)	10
E) TYCHO BRAHE (1546-1601)	10
F) JOHANNES KEPLER (1571-1630).....	12
G) GALILEU GALILEI (1564-1642).....	13
H) ISAAC NEWTON (1643-1727).....	15
3. ALBERT EINSTEIN	17
ALBERT EINSTEIN (1879-1955)	17
LA TEORIA DE LA RELATIVITAT	20
1.1 La Relativitat Restringida	20
2.1. Teoria de la Relativitat General.....	24
4. ELS DESCOBRIMENTS QUE PORTAREN AL BIG BANG	31
A) HUBBLE - L'UNIVERS EN EXPANSIÓ.....	31
- Els espectres de les estrelles.....	33
- L'Efecte Doppler	34
B) PENZIAS Y WILSON: RADIACIÓ CÒSMICA DE FONTS	35
Les idees de George Gamow i Friedmann	35
5. LA TEORIA DEL BIG BANG	37
QUÈ ÉS LA TEORIA DEL BIG BANG?.....	37
ELS 3 PRIMERS MINUTS DE L'UNIVERS	38
El model estàndard d'interaccions	38
Etapas del Big Bang.....	39
DESPRÉS DELS 3 PRIMERS MINUTS.....	42
LES MESURES DELS SATÈL·LITS.....	44
COBE	44
WMAP	46
TEMES OBERTS.....	46
La matèria fosca.....	47
L'energia fosca.....	48
La investigació sobre la física de partícules	48
Matèria i Antimatèria	49
6. DESTÍ DE L'UNIVERS	50
7. ENTREVISTES	53
A) ENTREVISTA A L'ESOF	53
B) CONVERSA A L'AGRUPACIÓ ASTRONÒMICA DE SABADELL	56
C) ENTREVISTA ALBERTO MANRIQUE.....	62
8. DARRERES NOTÍCIES	66
9. CONCLUSIÓ	69

10. GLOSSARI	70
11. BIBLIOGRAFIA	71

1.INTRODUCCIÓ

Les qüestions sobre l'origen de la matèria i la constitució i ordenació dels astres sempre han ocupat un lloc important en el pensament humà en el decurs dels segles. Les primeres idees van aparèixer a Grècia, Aristòtil i Ptolomeu van considerar l'Univers geocèntric. Aquesta teoria va durar 14 segles, fins que Copèrnic primer, Kepler, i Galileu després, van demostrar que era heliocèntric. Els principis de l'obra magistral de Newton van fonamentar aquesta nova visió durant els tres segles posteriors.

Però fins que Einstein va crear la seva teoria de la relativitat, la cosmologia no va esdevenir una ciència. El descobriment de l'expansió de l'Univers per Hubble, les idees de Friedmann i Lemaître primer, i les de Gamow després, van posar les bases de la teoria del Big Bang; nom amb que Hoyle la va qualificar despectivament. L'any 1965 va rebre la consagració definitiva amb el descobriment de la radiació còsmica de fons per Penzias i Wilson.

L'Univers va tenir l'origen en un fet singular, en unes condicions de densitat i temperatura extremades, i va passar per una sèrie d'etapes durant el primers minuts que van condicionar la seva evolució posterior. El final de l'Univers segons les darreres investigacions serà fred i fosc. La cosmologia és una ciència a la que es dediquen molts grups d'investigació arreu del món i molts recursos a nivell internacional per a realitzar observacions. Des de l'any 1965 fins ara s'han anat recollint dades que confirmem aquesta teoria, i en el futur es realitzaran missions d'exploració espacial per arprofundir sobre la teoria.

Ara més que mai l'home sent la inquietud de trobar solucions als interrogants que planteja la cosmologia sobre l'origen i el destí que tindrà el nostre Univers. Els recents descobriments sobre l'acceleració de l'Univers, l'energia fosca o la posada en marxa del GHC, qualificada com la màquina del Big Bang, han tingut un gran ressò mediàtic, malgrat la seva complexitat i dificultat. L'any 2009, com sabem, és l'any internacional de l'Astronomia; la seva divulgació i desenvolupament rebrà un impuls que confiem que en un futur ajudi a aclarir els fascinants interrogants que planteja.

2. TEORIES COSMOLÒGIQUES AL LLARG DE LA HISTÒRIA

L'ésser humà sempre s'ha qüestionat sobre la seva posició a l'Univers. La varietat de les respostes que ha trobat fou – i encara és – immensa. La nostra és hereva de moltes de les anteriors. El nombre de persones que ha contribuït a gestar-la, i que es mereixerien un lloc en aquest Olimp, és igualment extraordinari. Limitem-nos, doncs, com Newton a recolzar-nos sobre “ les espatlles de gegants”.

Aquí a Occident, d'entre els primers intents el més destacable pot considerar-se el d'Hesíode, autor de la Teogonia, versió d'un relat cosmogònic grec.

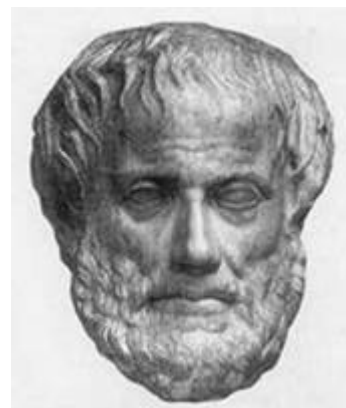
Després, els anomenats filòsofs presocràtics buscaren en la raó la manera d'allunyar-se d'uns mites que ja no els satisfieien. El camí que encetaren, que ha marcat la història, fou seguit, entre controvèrsies i escoles de pensament, per molts d'altres.

Així arribà Plató, hereu de totes les tradicions anteriors, i donà forma filosòfica a l'Univers dels “homes primitius”: un món superior, etern i immutable – de les idees – i una “còpia” imperfecte en la que vivim.

Amb un dels seus deixebles, Aristòtil, arribà una de les gestes més extraordinàries de tota la història del pensament: trencant amb el seu mestre confeccionà una explicació complexíssima i igualment coherent de tot el que ens envolta.

a) ARISTÒTIL (384-322 a.C.)

Aristòtil (384-322 aC) va desenvolupar un sistema del món en què la Terra era esfèrica i es trobava immòbil en el centre de l'Univers, mentre que el cel, amb tots els seus astres, girava al seu voltant. Més encara, va postular una diferència fonamental entre els cossos terrestres i els celestes. Segons Aristòtil, els cossos terrestres estaven formats pels quatre elements fonamentals presocràtics, els quals posseïen moviments naturals propis: la terra i l'aigua cap al centre de la Terra, l'aire i el foc en sentit contrari. Cada element tenia com a lloc natural una esfera (encara avui parlem de litosfera, hidrosfera i atmosfera).



Pel que fa als cossos celestes, Aristòtil fa una contribució original i introdueix una cinquena substància, l'èter, incorruptible i immutable, del qual estan formats els cossos celestes, que tracen un moviment natural de forma circular. Aristòtil considerava que el Sol, la Lluna i els planetes estaven fixats sobre les seves esferes corresponents. Les estrelles, al seu torn, es trobaven fixes sobre una esfera que girava al voltant de la Terra i corresponia a la frontera de l'Univers. Però, què hi havia més enllà de l'esfera estel·lar? Aquí, Aristòtil va haver de recórrer a diversos jocs de mans filosòfiques per explicar que, més enllà no hi havia res, però que aquest no-res no equivalia a un buit en extensió: tot plegat per dir que l'Univers s'acabava "realment" en l'esfera celeste.

Si hi ha un pensador que va contribuir a configurar la cultura occidental, aquest és Aristòtil. La seva influència s'ha deixat sentir durant més de dos mil·lennis, tant a través de la cultura judeocristiana com de la musulmana, i fins a la revolució científica pràcticament ningú no va gosar qüestionar les seves aportacions en tots els camps del pensament. Així no és estrany que el cosmos aristotèlic fos gairebé article de fe o model intocable i que marqués la història del pensament occidental.

Les característiques bàsiques del seu model han configurat el pensament cosmològic d'una manera sovint poc explícita però tremendament influent. Així, mentre que va adoptar els quatre elements bàsics dels presocràtics, no va fer el mateix amb la idea de Leucip i Demòcrit que tota la matèria estava formada per unes unitats bàsiques indivisibles anomenades àtoms. Això va provocar, d'una banda, que aquesta idea atomista fos pràcticament inexplorada durant dos mil anys i, de l'altra, que el microcosmos quedés relegat implícitament als models cosmològics, que van passar a ser un camp d'estudi més lligat a l'astronomia, i per tant al macrocosmos, que no pas a la física: de fet no ha estat fins al segle XX, amb el model del Big Bang, quan la física de partícules ha començat a interessar-se per la cosmologia.

A més, amb la introducció de l'èter, o quinta essència, Aristòtil també separava el microcosmos de la Terra (format pels quatre elements clàssics) del macrocosmos dels cels, permanents i incorruptibles. Aquesta separació va tenir una gran influència tant des del punt de vista religiós com científic. De fet no és fins al segle XIX, amb l'espectroscòpia, quan la ciència va poder demostrar que la composició dels objectes celestes era exactament la mateixa que la matèria terrestre. I no és fins a la teoria de la relativitat del segle XX quan l'èter passa a la història dels conceptes innecessaris o inexistents. Finalment, les esferes i els moviments

circulars, introduïts per Plató i Èudox, recollits per Aristòtil i consagrats en el model matemàtic de Ptolomeu, van conformar l'Univers hel·lenístic i medieval que, després de ser adoptat per les grans religions monoteistes, sobreviurà fins la revolució científica no només entre els estudiosos sinó també en l'imaginari popular.

b) PTOLOMEU (885-165 a.C)

Alguns segles després Ptolomeu perfeccionà matemàticament els detalls de l'astronomia aristotèlica, sense abandonar, però, l'esquema cosmològic elaborat pel seu predecessor.



La ciència astronòmica hel·lenística culmina amb Ptolomeu d'Alexandria (ca. 90 – ca. 168 dC). A banda d'escriure sobre geografia, astrologia i música, Ptolomeu va compilar en el seu històric tractat *l'Almagest* tot els coneixements astronòmics

acumulats fins al moment en un model coherent que estarà en la base de la cosmovisió occidental fins la revolució copernicana i de fet, com a model cosmològic. Ptolomeu recull l'Univers aristotèlic, però, sobre la base de la ciència hel·lenística, introdueix un model més sofisticat que les esferes de Plató i Èudox per explicar el moviment dels planetes.

Els models dels epicles (cercle que es mou en un altre cercle, anomenat deferent), introduït originalment per Apol·loni de Perge, serveix per explicar el moviment retrògrad observat en els planetes, com també la variació de la seva distància (i per tant, de la seva lluminositat). El centre del deferent no es troba a la Terra sinó que n'està lleugerament separat (un fenomen que s'anomena excentricitat). A més, Ptolomeu va introduir l'equant, o punt lleugerament allunyat del centre del deferent, al voltant del qual es produeix el moviment uniforme de l'epicicle (d'altre manera no es podia explicar la variació en el moviment retrògrad dels planetes).

l'Univers aristotèlic i ptolemaic en un sòlid edifici, defensat fermament pels poders eclesiàstics i polític, que no trontollarà fins a Galileu.

Des de sant Agustí, el cel del cosmos és el cel creat per Déu, la Ciutat de Déu, i així serà durant més de mil anys.

c) **NICOLAU COPÈRNIC (1473-1543)**

Nicolau Copèrnic (1473-1543), un erudit renaixentista polonès que entre les seves múltiples activitats va incloure l'astronomia, és l'autor d'un dels llibres més influents de la història: *De revolutionibus orbium coelestium*. Publicat poc després de la seva mort, va desfermar la revolució científica que culminaria amb els Principis de Newton. En el seu llibre, resultat de dècades de treball, Copèrnic exposa les seves tesis. La Terra no és el centre de l'Univers i està prop del Sol.



La distància de la Terra al Sol és molt petita comparada amb la distància que hi ha fins a les estrelles. La rotació diària de la Terra és el que causa el moviment aparent de les estrelles sobre la volta celeste. El moviment de la Terra al voltant del Sol és la causa del seu moviment aparent entre les estrelles i també la causa de les estacions. El moviment dels planetes entre les estrelles és causat per la combinació del seu moviment al voltant del Sol i de la mateixa Terra al voltant d'aquell.

Copèrnic va desenvolupar la seva teoria heliocèntrica unes dècades abans de la seva publicació, però era tant revolucionària que es va resistir a donar-la a conèixer. Fins i tot en el pròleg de la primera edició (escrit pel teòleg Andreas Osiander) s'especificava que el model que es descrivia en el llibre no volia ser una descripció de com era l'Univers real sinó simplement un estri per simplificar el càlcul del moviment dels planetes. I la veritat és que la controvèrsia que va desfermar el llibre va ser de caràcter més científic que filosòfic.

Val a dir que, a efectes pràctics, la teoria de Copèrnic, que pretenia una major simplicitat que la de Ptolomeu, no ho era tant com ell desitjava, atès que, per tal de mantenir les òrbites circulars perfectes també havia de recórrer als epicles ptolemaics. A més, no hi havia cap evidència observacional a favor del model de Copèrnic: aquest hauria d'esperar a les observacions telescòpiques de Galileu de les fases de Venus. Un dels arguments contundents

contra el sistema heliocèntric és que les estrelles no mostraven cap paral·laxi. Avui dia sabem que aquest efecte existeix, però que no podia ser mesurat amb les tècniques renaixentistes: la primera mesura d'una paral·laxi es va realitzar ben entrat el segle XIX. Copènic va argumentar (i encertar!) que això podia ser degut a les enormes distàncies estel·lars, però no va abandonar l'esfera celeste sobre la qual les estrelles es trobaven a una distància enorme però finita: l'Univers copernicà tenia la mateixa grandària que el ptolemaic.

d) GIORDANO BRUNO (1548-1600)

A Giordano Bruno correspon el mèrit d'haver eixamplat l'Univers copernicà: "Hi ha un nombre innombrable de sols, i un nombre infinit de terres que giren al voltant d'aquests sols", va gosar afirmar (la idea ja havia estat defensada per Lucreci el segle I a.C. i per Nicolau de Cusa el segle XV). No obstant això, Bruno va arribar a aquestes conclusions a partir d'especulacions metafísiques que poc tenien a veure amb un mètode científic. La seva visió del món és, en realitat, animista, i s'acosta més al panteisme que a la ciència moderna. I si va posar el Sol en el centre del sistema solar, no va ser per raons astronòmiques, sinó perquè li assignava a aquest astre propietats vitalistes, a l'estil de la filosofia hermètica de la seva època. De totes maneres, les idees de Bruno li van valer ser acusat d'heretge i morir en una foguera de la Inquisició romana, just quan s'iniciava el segle XVII, la qual cosa el va convertir en un màrtir del lliure pensament.

e) TYCHO BRAHE (1546-1601)

Tycho Brahe va ser l'últim dels grans astrònoms observadors de l'era anterior al telescopi, un aspecte a tenir molt en compte.

El 24 d'agost de 1563, mentre estudiava a Leipzig, es va escaure una conjunció de Júpiter i Saturn, un esdeveniment predit per les taules astronòmiques existents. Tanmateix, Tycho es va adonar que totes les prediccions sobre la data de la conjunció estaven equivocades en dies o fins i tot mesos. Aquest fet va



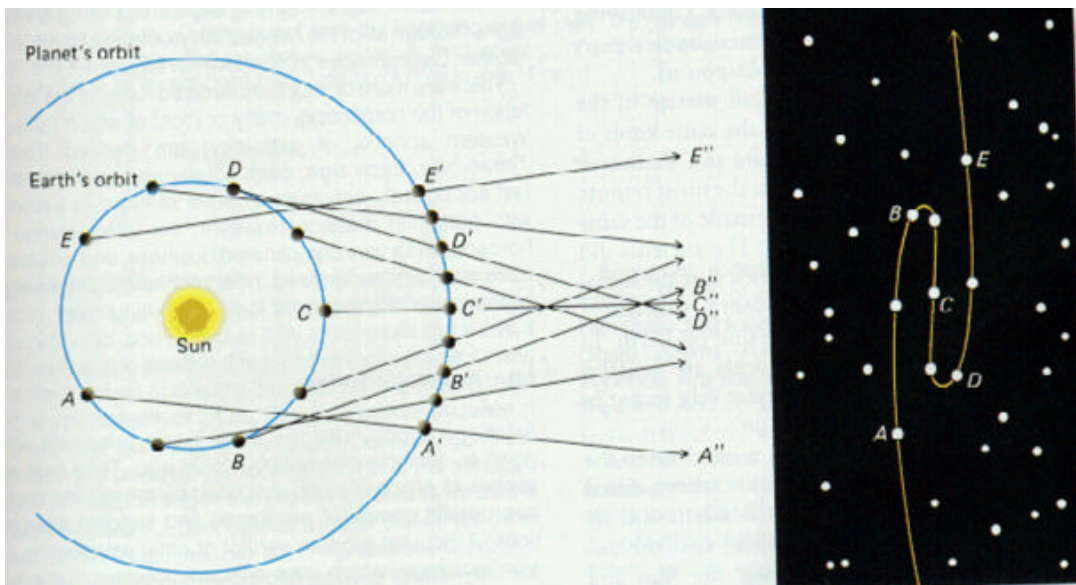
tenir una gran influència sobre ell. Brahe es va adonar de la necessitat de compilar noves i precises observacions planetàries que li permetessin realitzar taules més exactes. En les seves pròpies paraules:

He estudiat totes les cartes dels planetes i les estrelles i cap d'ells coincideix amb els altres. Hi ha tantes mesures i mètodes de mesurament com astrònoms i tots en desacord. El que es necessita és un projecte per cartografiar els cels des d'un únic lloc durant diversos anys. - Tycho Brahe, 1563 (als 17 anys).

En el decurs de la seva carrera científica Tycho Brahe va perseguir aquest objectiu. Així va desenvolupar nous instruments astronòmics. Amb ells va ser capaç de realitzar un precís catàleg estel·lar de més de 1000 estrelles les posicions del qual havien estat mesurades amb una precisió molt superior a l'aconseguida fins llavors. Les millors mesures de Tycho aconseguien precisions de mig minut d'arc. Aquestes mesures van permetre a Tycho mostrar que els cometes no eren fenòmens meteorològics sinó objectes de més enllà de la Terra. Els seus instruments científics van ser àmpliament copiats a Europa. Tycho va ser el primer astrònom a percebre la refracció de la llum i corregir les mesures astronòmiques d'aquest efecte. El conjunt complet d'observacions de la trajectòria dels planetes va ser heretat per Johannes Kepler, en aquell temps ajudant de Brahe. Gràcies a aquestes detallades observacions Kepler seria capaç uns anys més tard de trobar les lleis que governen el moviment planetari.

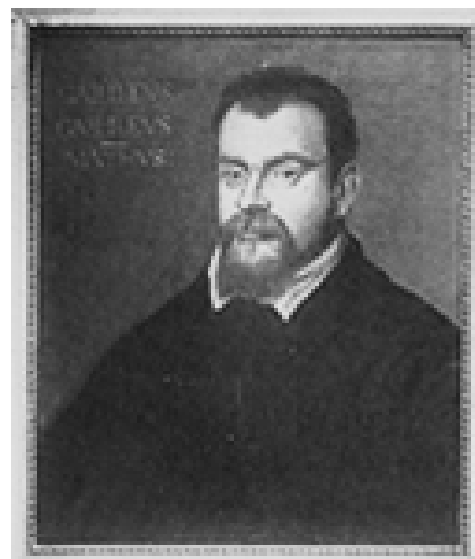
El sistema de l'Univers que Tycho representa una transició entre la teoria geocèntrica de Tolemeu i la teoria heliocèntrica de Copèrnic. En la teoria de Tycho el Sol i la Lluna giren al voltant de la Terra, immòbil mentre que Mart, Venus, Júpiter i Saturn girarien al voltant del Sol. Brahe estava convençut que la Terra estava estàtica perquè sinó haurien de poder-se apreciar els moviments aparents de les estrelles. Tal efecte existeix realment i es denomina paral·laxi però no podia ser detectat amb observacions visuals directes. Les estrelles estan molt més lluny del que es considerava raonable en l'època de Tycho Brahe.

l'atmosfera terrestre, que eixampla la seva imatge, però aquest fenomen era desconegut en temps de Kepler, per la qual cosa el seu argument semblava perfectament sòlid.



g) **GALILEU GALILEI (1564-1642)**

Però el gran impulsor de l'Univers copernicà i un dels primers científics moderns és Galileu Galilei (1564-1642). Potser Galileu no va ser el primer home que va mirar el cel a través d'un telescopi, però sí que va ser el primer a fer-ho sistemàticament, a interpretar les seves observacions i, sobretot, a divulgar els seus descobriments i fer-los accessibles a un cercle més ampli que el dels erudits versats en llatí. Galileu fou un apassionat defensor de Copèrnic, i les seves observacions astronòmiques van confirmar les seves conviccions. Però sota la pressió dels aristotèlics que dominaven la vida cultural d'aquella època, l'Església romana ja havia pres partit pel sistema geocèntric, per les seves suposades congruències amb la narració bíblica. Amb proves objectives, Galileu es va proposar convèncer els alts prelats de l'Església que Copèrnic tenia raó; però després d'insistir diversos anys, només va obtenir una prohibició oficial d'ensenyar el sistema heliocèntric.



Malgrat tot, el 1632, Galileu va publicar el *Diàleg* sobre els dos principals sistemes del món, llibre en el qual confrontava, d'una manera suposadament imparcial, les doctrines d'Aristòtil i de Copèrnic. Però ningú podia ensenyar-se amb les simpaties de l'autor: l'heroi del llibre era Salvitari, defensor de Copèrnic, qui refutava d'un en un els arguments del seu contrincant, el filòsof peripatètic Simplicí, maldestre defensor d'Aristòtil. El *Diàleg* va ser escrit originalment en Italià i pretenia ser un llibre de divulgació més que un text científic. Del sistema de Copèrnic, només apareixia la idea heliocèntrica, sense els detalls matemàtics de la teoria. No tots els arguments de Galileu eren clars, ni tan sols veritables: al final del llibre, per exemple, aparegués una teoria de les mareas, totalment errònia, amb la qual pretenia demostrar el moviment de la Terra. Més encara, no es diu ni mitja paraula sobre els descobriments de Kepler, que Galileu no va poder valorar correctament. Però malgrat les seves limitacions, el *Diàleg* va tenir l'efecte suficient per causar revolada en el mitjà científic i religiós. Tot just publicat, va ser vetat per l'Església, i Galileu va ser jutjat i condemnat a retractar-se de les seves conviccions.

Les observacions realitzades amb el seu telescopi li van permetre acumular arguments contra el model ptolemaic i a favor del model copernicà. Va observar muntanyes a la Lluna i taques variables al Sol, amb la qual cosa semblava clar que els cossos celestes no eren immutables i no estaven formats per una substància diferent a la de la Terra. Va descobrir quatre satèl·lits del planeta Júpiter (els més grans, que avui s'anomenen galileans), la qual cosa posava en entredit el model geocèntric; i també fases en el planeta Venus, impossibles d'explicar amb aquell i en canvi perfectament explicables amb el model heliocèntric. I a més va descobrir que la Via Làctia està formada per una infinitud de petites estrelles que no es poden distingir si no és amb un telescopi: Així s'aclariria el misteri d'aquesta banda lluminosa del cel que de tant havia despertat la imaginació dels filòsofs i els poetes.

Galileu també va descobrir que el telescopi reduïa la grandària aparent de les estrelles. Va sospitar que aquesta grandària era una il·lusió òptica i la va atribuir al mecanisme de la visió de l'ull. No obstant això, va continuar pensant que el diàmetre aparent no era totalment il·lusori i va calcular que una estrella molt dèbil devia trobar-se a 2.160 vegades la distància del Sol. Encara que aquest valor permetia considerar seriosament que les estrelles són semblants al nostre Sol, al contrari del que mantenia el seu contemporani Kepler. Quant a la grandària de l'Univers, Galileu es va mostrar excepcionalment caut. "És encara incert (i crec que ho serà sempre per a la ciència humana) si el món és finit o, al contrari, infinit", va arribar a afirmar i amb certa raó, atès que qualsevol altra posició basada en els coneixements de la seva època hagués estat una simple especulació.

En anys posteriors a Galileu, dos astrònoms, l'holandès Christian Huygens (1629-1695) i l'escocès James Gregory (1638-1675), van engrandir les estimacions de les distàncies a les estrelles, el primer en un factor 10 i el segon en un altre factor 4 (i encara es va quedar curt en un factor 5!). En qualsevol cas ens trobàvem davant d'un Univers d'unes dimensions fabuloses. Huygens va escriure admirat: "Una bala de canó tardaria centenars de milers d'anys a arribar a les estrelles". Es quedava curt.

h) ISAAC NEWTON (1643-1727)

Les lleis de Kepler, basades en les dades observacionals de Brahe i les observacions i els experiments físics de Galileu, van obrir la porta a l'obra científica del que molts consideren el científic més gran de la història: Isaac Newton (1643-1727). Abans de Newton no s'havia establert cap relació entre la caiguda dels cossos a la Terra i el moviment dels planetes al cel. Ningú no havia refutat la doctrina d'Aristòtil que els fenòmens terrestres i els celestes són de naturalesa totalment diferent, i que els successos més enllà de l'òrbita lunar no poden entendre's sobre la base de les nostres experiències mundanes.



La situació va canviar dràsticament quan Isaac Newton va descobrir que la gravitació és un fenomen Universal. Tots els cossos de l'Univers, ja siguin pomes, planetes o estrelles, s'atrauen entre si: i la força d'atracció (F) entre dos cossos és proporcional a les seves masses (M_1 i M_2) i inversament proporcional al quadrat de la distància (D) que els separa:

$$F = \frac{GM_1M_2}{D^2}$$

(on G és una constant)

Segons una popular llegenda, Newton va arribar a aquesta conclusió un dia que, mentre meditava sobre l'atracció que mantenia la Lluna unida a la Terra va veure caure una poma. La realitat és més prosaica: Newton va deduir la seva llei a partir de les lleis de Kepler. Aquestes li van donar la pista que el moviment dels planetes al voltant del Sol (i de la Lluna al voltant de la Terra) es podia explicar a través d'una única llei Universal que regia l'atracció dels

cossos. A aquests efectes Newton va utilitzar els mètodes matemàtics que havia inventat quan era més jove: ell va ser l'inventor, amb Leibnitz, del càlcul infinitesimal. Juntament amb els seus estudis sobre la mecànica dels cossos, basats en els de Galileu, va publicar tots els seus resultats l'any 1687 en la seva obra monumental *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.

L'existència de la gravitació Universal implica que les estrelles han d'estar molt allunyades per tal de no influir sobre el Sol i els seus planetes. El mateix Newton va refinar els càlculs de Gregory i va obtenir unes estimacions força aproximades de les distàncies a les estrelles més properes. Però, encara que molt petita, aquesta atracció no pot ser totalment nul·la: un conglomerat d'estrelles acabaria per col·lapsar sobre ell mateix a causa de l'atracció entre les seves parts, i aquesta seria la destinació d'un Univers finit. Newton va arribar a la conclusió que, perquè això no succeeixi, l'Univers ha de ser infinit i uniforme; només petites regions poden col·lapsar sobre elles mateixes per formar regions més denses, i és potser així com es formen les estrelles.

En qualsevol cas, amb l'aparició de la física newtoniana va quedar liquidada definitivament la física aristotèlica, amb les esferes cèlestes i les regions formades per diferents elements. No quedava dubte: el nostre sistema solar és tot just un punt en l'espai i les estrelles són els veritables components de l'Univers.

La magnitud de l'Obra de Newton i el seu prestigi van posar les bases per a les idees de la il·lustració i van influenciar les generacions posteriors de pensadors i científics, tant teòrics com experimentals, Locke i Voltaire van aplicar els conceptes de llei natural als sistemes polítics, Adam Smith va aplicar-le a l'economia. D'altra banda, el seu mateix prestigi també va recolzar una visió teista del cosmos. Efectivament, Newton va prevenir contra una utilització de les seves lleis per formular un cosmos com si fos un gran rellotge.

3. ALBERT EINSTEIN

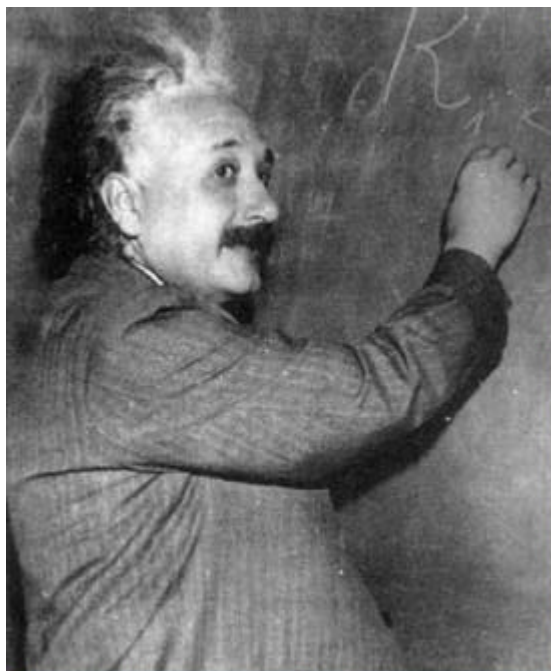
ALBERT EINSTEIN (1879-1955)

Podem datar l'acta de naixement de la cosmologia en un article d'Einstein publicat l'any 1907, després d'haver establert la teoria general de la relativitat. Vist en perspectiva, no és estrany que nasqués en les tres primeres dècades del segle XX, l'època en què el pare del Big Bang, George Gamow, va qualificar en un llibre com "thirty years that shook physics" (trenta anys que van capgirar la física).

Poques vegades les dates rodones marquen el final d'una era i el començament d'una altra, com l'any 1900 en el camp de la física. Aquell any William Thompson, Lord Kelvin (1824-1907), mestre de Maxwell i un dels grans físics del segle XIX, va fer una conferència en la qual plantejava un futur lluminós a la física només enfosquit per dos "núvols": la radiació del cos negre i l'experiment de Michelson-Morley.

Avui sabem que l'explicació a aquests dos "núvols" donaria origen a la teoria quàntica i a la teoria de la relativitat que van revolucionar la visió del món. I de fet el desembre d'aquell mateix any el físic alemany Max Planck (1858-1947) presentava en una altra conferència la seva hipòtesi quàntica que desfermaria la revolució.

Les tres primeres dècades del segle XX van representar una veritable i contínua revolució en les ciències físiques i, de fet, és el moment en què es pot parlar del naixement de la cosmologia científica. D'una banda, la teoria quàntica va permetre el coneixement de



l'estructura interna de la matèria, una visió del microcosmos que mai abans s'havia assolit. D'altra banda, la teoria de la relativitat va abordar l'estudi del temps i de l'espai, de la massa i l'energia, i de les seves relacions, i va ser capaç de formular per primera vegada un model matemàtic de l'Univers que anava més enllà del coneixement limitat per les observacions. Va ser durant aquestes dècades quan es va establir la nova visió del cosmos que ha sobreviscut en gran mesura fins a l'actualitat.

I en aquesta visió, sens dubte hi ha un nom propi que destaca sobre els altres: Albert Einstein (1879-1955). Aquest científic alemany, va contribuir a les dues revolucions de la física del segle XX, però va ser l'autor i impulsor en solitari d'una de les dues, *la teoria de la relativitat*, que va marcar un abans i un després en la cosmologia.

L'any 1905 Einstein va publicar els resultats sobre els seus estudis al voltant de la propagació de la llum. Tenint en compte els resultats de l'experiment de Michelson i Morley que implicaven la constància de la velocitat de la llum independentment de l'observador, i aplicant el principi galileà que dos observadors en moviment relatiu constant, l'un respecte a l'altre, han d'obtenir els mateixos resultats en els experiments, va arribar a la conclusió que el temps i l'espai depenien de cada observador i que eren dues facetes d'una mateixa realitat, anomenada espai-temps. En un altre dels seus articles, encara aprofundia més en aquest plantejament revolucionari i arribava a la conclusió de l'equivalència entre massa i energia, formulada en l'equació més famosa de la història:

$$E = mc^2$$

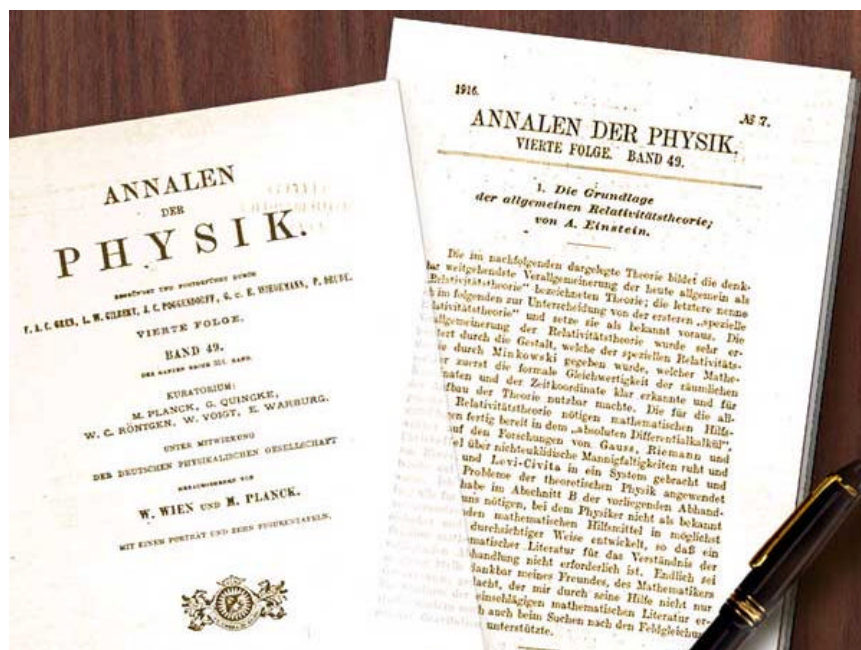
C és la velocitat de la llum, que és una constant Universal. Així doncs podem parlar de massa-energia com una mateixa realitat que es manifesta de dues formes diferents. Val a dir que tots els aspectes de la teoria de la relativitat especial o restringida concorden amb tots els experiments realitzats fins ara i constitueix una de les bases més sòlides de la física moderna.

La teoria especial de la relativitat només s'aplicava als cossos en moviment relatiu a velocitat constant. Per estendre-la als cossos amb moviment accelerat, Einstein va fer un monumental tour-de-force matemàtic que va culminar amb la publicació l'any 1915 de la teoria general de la relativitat. En ella Einstein geometritza la força de la gravetat: la geometria de l'espai-temps està determinada per la massa-energia. En una famosa i afortunada frase d'un dels grans físics del segle XX i deixeble d'Einstein, John A. Wheeler (nascut el 1911) diu: "La matèria li diu a l'espai-temps com s'ha de corbar: l'espai-temps li diu a la matèria com s'ha de moure." En la seva teoria general, Einstein lligava els dos nous conceptes que havia introduït amb la teoria especial, i li atorgava a la gravetat, força que domina tot l'Univers, el caràcter determinant de la seva geometria.

No és estrany que Einstein es plantegés ben aviat (el 1907) la tasca d'aplicar les equacions de la teoria general de la relativitat a l'Univers en el seu conjunt: s'enfrontava a una tasca monumental que donaria origen a la cosmologia com a ciència. El problema

conceptual que Einstein afrontava era el de compatibilitzar les seves equacions amb la imatge preconcebuda d'un Univers estàtic. Aquesta imatge estava tan arrelada que Einstein no va gosar posar-la en dubte i no es va veure en cor d'acceptar allò que resultava una conseqüència evident de les seves equacions: l'Univers havia de ser dinàmic, o bé en expansió o bé en contracció.

Per evitar aquest comportament, Einstein va afegir en les seves equacions un nou terme, anomenat constant cosmològica: la seva missió, era contrarestar l'atracció gravitatòria. En termes newtonians, podríem dir que seria una força repulsiva, introduïda. Així doncs, el primer model cosmològic matemàtic era un model estàtic en el qual s'introduïa la constant cosmològica per contrarestar l'atracció de tota la matèria de l'Univers.



El mateix any, l'astrònom holandès Willem de Sitter (1872-1934) va publicar un altre model cosmològic basat en les solucions de les equacions d'Einstein en el qual, en cas de no tenir en compte els efectes de la matèria, obtenia un model en expansió. Cap dels dos sabia que un matemàtic i meteoròleg rus, Alexander Friedmann (1888-1925), comprovava que, sense introduir la constant cosmològica, les equacions d'Einstein tenien una solució que generava un Univers en expansió.

La teoria de la Relativitat

La importància de les idees de la teoria de la Relativitat per la física, la ciència i pel coneixement humà en general ha estat àmpliament reconeguda. La primera teoria va ser publicada per Albert Einstein el 1905 i descriu la física del moviment en absència de camps gravitatoris, fins aleshores basada en la mecànica clàssica d' Isaac Newton i l'anomenada relativitat de Galileu, malgrat que ja s'havien apuntat certes incoherències per part d'alguns físics. La teoria rep el nom de relativitat perquè introdueix la noció de transformació de les lleis de la física respecte als observadors; i s'ajusta amb el qualificatiu d'especial o restringida per cenyir-se a casos de sistemes en els quals no es tenen en compte els camps gravitatoris. Una extensió d'aquesta teoria, que inclou els camps gravitatoris, és la *Teoria General de la Relativitat*, publicada per Einstein en 1916.

1.1 La Relativitat Restringida

A la fi del segle XIX, tots els fenòmens de l'Univers físic podien explicar-se a partir de les tres senzilles lleis de la mecànica de Newton, junt amb les de l'electromagnetisme descobertes per James C. Maxwell. Amb les tres lleis de Newton, els físics del segle XIX havien pogut explicar el funcionament de les òrbites dels planetes al voltant del Sol, i dels satèl·lits al voltant dels planetes, el flux i reflux de les mareas oceàniques, la caiguda dels cossos, i fins i tot calcular el pes del Sol i la Terra, entre altres assoliments. De la mateixa forma amb un conjunt senzill de lleis elèctriques i magnètiques, incloent les descobertes per Maxwell es podien explicar la majoria dels fenòmens electromagnètics, el comportament dels imants, les descàrregues elèctriques, els circuits elèctrics, les ones de ràdio o la llum i la propagació, difracció i la reflexió de la llum. Aquest conjunt de lleis constituïen la anomenada física clàssica; el seu èxit en explicar els fenòmens observats, al costat de les aplicacions tecnològiques a que havien conduït, i segons diu S. Hawking "van fer creure als científics que es trobaven molt propers a una descripció complerta de la Natura"

Per altra banda el concepte d' "espai absolut" de Newton era l'espai de l'experiència quotidiana, i per tant l'espai únic on se situava tot, la humanitat, el Sol, els planetes i les

estrelles. Aquest espai ens proporciona la nostra sensació de longitud, amplitud i altura; i d'acord amb les lleis de Newton, tots nosaltres, independentment del nostre moviment, estarem d'acord en la longitud, amplitud i altura d'un objecte, amb la condició de que fem mesures suficientment precises. Amb el concepte de "temps absolut" de Newton passava el mateix; era el temps de l'experiència quotidiana, el temps que flueix inexorablement cap a endavant, el temps mesurat pels rellotges i per la rotació de la Terra i el moviment dels planetes. És un temps el flux del qual és experimentat en comú per tots els éssers i objectes coneguts. Però si algun d'aquests conceptes d'espai i temps absoluts de Newton es qüestionessin, tota la física clàssica s'ensorraria. Això va succeir el 1881, quan Albert Michelson va mesurar la propagació de la llum. Fins aleshores se suposava que existia un èter en el qual objectes i observadors viatjarien. Però els resultats negatius del moviment relatiu de la llum respecte a l'èter proporcionats pel cèlebre experiment de Michelson-Morley conduïrien a una contradicció.

1.1.1. L'experiment de Michelson Morley

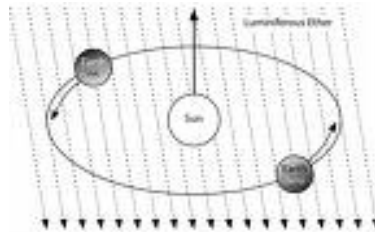
Semblava lògic, a partir de les lleis newtonianes, que si es medeix la velocitat de la llum, com la de qualsevol objecte, el resultat ha de dependre del moviment de qui la mesura.

Si qui la mesura està en repòs en l'espai absolut, llavors hauria de veure la mateixa velocitat de la llum en totes les direccions. En canvi, si qui la mesura s'està movent a través de l'espai absolut, posem per cas cap a l'est, llavors hauria de veure més lenta la llum que es propaga cap a l'est i més ràpida la llum que es propaga cap a l'oest; de la mateixa forma que una persona situada en un tren que viatja cap a l'est veu més lents els cotxes que es mouen cap a l'est i més ràpids els que es mouen cap a l'oest.

Anàlogament, per a la llum existia una substància, anomenada "èter", que determinava la velocitat de propagació d'acord amb les lleis de la física newtoniana; i aquesta propagació en l'èter de la llum, havia de fer-se sempre amb la mateixa velocitat, independentment de la seva direcció de propagació.

Ara bé, la Terra es mou a través de l'espai absolut, encara que només sigui pel seu moviment al voltant del Sol: al gener es mou en una direcció; al juny, sis mesos després, es mou en l'oposada. Resultava obvi que un observador en la Terra mesuraria una velocitat de la llum diferent en direccions diferents, i les diferències canviarien amb les

estacions encara que només de forma molt lleugera (al voltant de 1 part en 10.000), perquè la Terra es mou molt lentament comparada amb la llum.



Albert Michelson, un nord-americà de 28 anys, el 1881, utilitzant una tècnica experimental molt precisa, no va poder trobar cap evidència de la més mínima variació de la velocitat de la llum amb la direcció. La velocitat resultava ser la mateixa en totes les direccions i en totes les estacions de l'any en els seus experiments inicials de 1881, i també va resultar ser la mateixa en els experiments posteriors, i molt més precisos, que va realitzar el 1887 a Cleveland, Ohio, en col·laboració amb un químic, Edward Morley.

Els primers intents d'explicar els resultats de l'experiment de Michelson-Morley van provenir del físic irlandès George F. Fitzgerald, Hendrik Lorentz a Àmsterdam, Henri Poincaré a París, i Joseph Larmor a Cambridge, que reexaminaren les lleis de l'electromagnetisme i van advertir que el moviment «dilata» el temps, contràriament al que afirmava la física newtoniana. Per desgràcia els rellotges de l'última dècada del segle XIX eren molt poc precisos per a revelar la veritat, i a la vista dels triomfs científics i tecnològics de la física newtoniana, triomfs basats fermament sobre la idea del temps absolut, ningú estava disposat a afirmar amb convicció que el temps realment es dilata. No va ser fins que en 1905 Einstein va plantejar aquesta qüestió.

1.1.2 La solució d'Einstein

Einstein va postular que la velocitat de la llum en el buit és la mateixa per a tots els observadors, i va rebutjar l'espai i temps absoluts. En rebutjar l'espai absolut, Einstein va buidar de qualsevol significat la noció de «estar en repòs en l'espai absolut». No hi ha manera, va afirmar, de mesurar el moviment de la Terra a través de l'espai absolut, i per això és pel que l'experiment de Michelson-Morley va donar el resultat que va donar. Només es pot mesurar la velocitat de la Terra relativa a altres objectes físics tals com el

Sol o la Lluna, de la mateixa forma que només es pot mesurar la velocitat d'un tren relativa a altres objectes físics tals com el sòl o l'aire. Però ni per a la Terra ni per al tren ni per a cap altra cosa existeix cap patró de moviment absolut; el moviment és purament «relatiu». En rebutjar el temps absolut, Einstein rebutjava la noció que tots, independentment del nostre moviment, hem de sentir el flux del temps de la mateixa manera. El temps és relatiu, afirmava Einstein. Cada persona que segueix la seva pròpia trajectòria ha d'experimentar un flux del temps diferent d'uns altres que segueixen trajectòries diferents.

La nova base de Einstein consistia en dos nous principis fonamentals:

- El principi del caràcter constant de la velocitat de la llum: la velocitat de la llum és absolutament la mateixa en totes direccions, i absolutament independent del moviment de la persona que la mesura.

Aquest principi és una rotunda afirmació que l'experiment de Michelson- Morley era correcte i que, qualsevol que sigui la precisió que puguin arribar a en el futur els instruments per a mesurar la llum, sempre continuaran donant el mateix resultat: una velocitat de la llum Universal.

- El principi de relativitat: les lleis de la física han de tractar tots els estats de moviment en peus d'igualtat. Aquest principi suposa un rotund rebuig de l'espai absolut: si les lleis de la física no tractessin a tots els estats de moviment (per exemple, el del Sol i el de la Terra) en peus d'igualtat, llavors, utilitzant les lleis de la física, els físics serien capaços d'escollir algun estat de moviment «privilegiat» (per exemple, el del Sol) i definir-lo com l'estat de «repòs absolut».

Una conseqüència molt important és que el temps i l'espai passen a ser dependents de les velocitats relatives dels sistemes dels observadors. Així dos esdeveniments que ocorren simultàniament en diferents llocs per a un sistema de referència, poden ocórrer en temps diferents en un altre sistema de referència, és a dir la noció de simultaneïtat és relativa; i d'igual manera, si ocorren en un mateix lloc en un sistema, poden ocórrer en llocs diferents en un altre.

2.1. Teoria de la Relativitat General

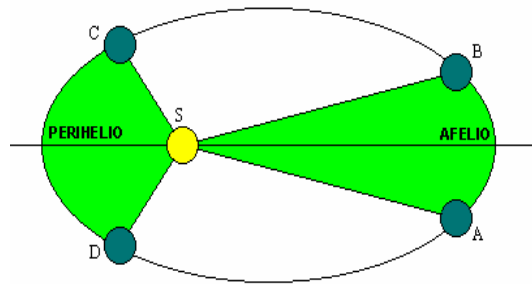
¿Per què calia establir una teoria més àmplia, un cop formulada la teoria especial de la relativitat?

Com va demostrar Einstein en formular la Relativitat Especial cap informació pot viatjar a més velocitat que la de la llum i per tant la causalitat entre dos esdeveniments units per un interval espacial queda limitada. Però un dels pilars fonamentals de la gravetat newtoniana, el principi d'acció a distància, suposava que les alteracions produïdes en el camp gravitatori es transmeten instantàniament a través de l'espai. La contradicció entre ambdues teories era molt evident, ja que assumir les tesis de Newton portaria implícita la possibilitat que un observador fos afectat per les perturbacions gravitatòries de manera instantània, és a dir, a una velocitat més gran que la de la llum.

Per a Newton la gravetat era una força que actua entre qualsevol parell d'objectes en l'Univers, una força amb la qual els objectes s'atreuen mútuament. Quant majors són les masses dels objectes i més pròxims estan, més intensa és la força. Dit de forma més precisa, la força és proporcional al producte de les masses dels objectes i inversament proporcional al quadrat de la distància entre ells. El descobriment del planeta Neptú el 1846 va constituir la gran prova experimental que va confirmar les lleis de Newton. Urà havia estat descobert el 1781, però presentava una òrbita amb certes irregularitats; els càlculs basats en les lleis de Newton fets per Le Verrier predeïen que havia d'haver un nou planeta que perturbava l'òrbita d'Urà. El 1846, Galle va dirigir el seu telescopi a la regió calculada i va trobar el planeta predit, molt tènue per a ser vist a ull nu però suficientment brillant per a veure'l en el seu telescopi. Aquest nou planeta, que indica la llei gravitatòria de Newton, va rebre el nom de «Neptú».

2.1.1 El problema del periheli de Mercuri

Malgrat tot al començament del segle XX, persistia una discrepància enigmàtica amb la llei gravitatòria de Newton. Era una peculiaritat en l'òrbita del planeta Mercuri que finalment resultaria ser un anunci d'un fracàs de la llei de Newton i un triomf de la relativitat. Mercuri, com els altres planetes es mou al voltant del Sol, en una el·lipse, en la qual el Sol està en un dels seus focus, com va assenyalar Kepler. El punt més proper a l'astre Rei es diu periheli i el més llunyà afeli.



El moviment segueix les lleis de Kepler de manera que el Sol està en un dels focus, i l'àrea tancada per CSD i la tancada que BSA es recorre en temps iguals, i d'aquí es desprèn que com més prop del Sol està més ràpid anirà. Doncs bé, aquesta el·lipse no està sempre orientada de la mateixa manera, sinó que va girant amb el temps; l'el·lipse dona voltes o, dit d'altra manera, el periheli es desplaça i a això se li diu la precessió del periheli.



Tots els planetes presenten una precessió del seu periheli que s'explica per les lleis de Newton. Però en el cas de Mercuri la diferència entre el teòric i el real era massa gran; segons les lleis de Newton aquesta el·lipse havia de girar a raó de 575 segons d'arc cada segle, o el que és el mateix, l'el·lipse donaria una volta completa cada 225.000 anys; no obstant això s'havia comprovat que, en realitat, girava a raó de 531 segons d'arc per segle, el que equivaldria a dir que la volta completa la donava en 244.000 anys. Per a intentar explicar aquesta desviació, el matemàtic francès Le Verrier, el mateix que va predir l'existència de Neptú, va postular també l'existència d'altre planeta situat entre Mercuri i el Sol que va dir Vulcà. Però els intents de trobar-lo van anar en va. Per què era incapaç la mecànica clàssica d'explicar aquesta anòmala precessió del periheli de Mercuri?. Recordem que segons Newton, la força gravitatòria depèn de la distància entre els dos

objectes, per exemple, el Sol i Mercuri; en canvi per a la teoria de la relativitat restringida aquesta idea era diferent, la distància depèn des de quin sistema s'observi. Per exemple, les lleis de la teoria de la relativitat restringida prediuen que la distància entre el Sol i Mercuri diferirà aproximadament en una part en mil milions, depenent de si un està situat en la superfície de Mercuri quan mesura o si està situat en la superfície del Sol. Si ambdós sistemes de referència, el de Mercuri i el del Sol, són igualment bons als ulls de les lleis de la física, llavors quin sistema hauria d'utilitzar-se per a mesurar la distància que apareix en la llei gravitatòria de Newton?. Qualsevol elecció, la del sistema de Mercuri o la del Sol, violaria el principi de relativitat.

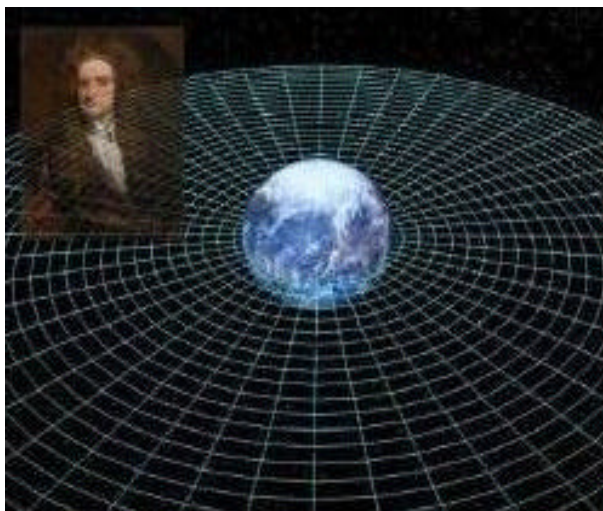
Aquest dilema va orientar a Einstein de quin era el punt feble de la teoria gravitatòria de Newton, que no permetia donar amb la clau de l'anomalia del periheli de Mercuri. Els esforços d'Einstein van culminar un dia de novembre de 1907, que segons les seves paraules: *«Estava assegut en una cadira en l'oficina de patents a Berna, quan de cop i volta se'm va ocórrer una idea: "si una persona cau en caiguda lliure, no sentirà el seu propi pes"»*. I aquesta idea va ser la clau; apuntava cap a una nova visió revolucionària de la gravetat; és el germen de la teoria de la relativitat general, i posteriorment la va qualificar com *«la idea més feliç de la meua vida»*.

Per donar una imatge molt senzilla, Einstein va imaginar un observador tancat dins d'un ascensor amb les parets opaques, i portant una caixa pesada. Si de cop i volta es trenca la corda de l'ascensor, i aquest cau en caiguda lliure, l'observador comprovaria que no cal fer cap força per aguantar la caixa, és a dir com si la caixa no tingués pes, i el que és igual com si no estigués sotmesa al camp gravitatori de la terra; a més a més si hi hagués una altra persona dins de l'ascensor, la veuria flotar dins de la cabina, i en aquest supòsit, si l'observador està sotmès a una pujada a acceleració constant per la persona seria impossible de saber si hi ha una acceleració constant o una atracció gravitacional. La conclusió és l'equivalència local entre el moviment accelerat i la gravitació.

Aquesta és la idea genial de Einstein, que més correctament diu: *«En qualsevol petit sistema de referència en caiguda lliure, arreu del nostre Univers real dotat de gravetat, les lleis de la física han de ser les mateixes que en un sistema de referència en un Univers idealitzat lliure de gravetat.»*

2.1.2 La solució : La curvatura de l'espai

Per a poder desenvolupar aquesta idea no obstant això, Einstein es va adonar que necessitava un marc matemàtic més ampli i complex del que coneixia. L'ajuda li va venir de dues maneres, la primera per part de Hermann Minkowski qui havia proporcionat una idea molt poderosa, a la qual Einstein primer no va parar compte. Després va escriure. *«en endavant, l'espai per si mateix i el temps per si mateix estan condemnats a esvair-se en meres ombres, i només un tipus d'unió d'ambdós conservarà una realitat independent»*. Aquesta idea era la que l'Univers és un espai-temps tetradimensional, és a dir de quatre dimensions, sent el temps la quarta dimensió, i que la gravetat provocava una curvatura (primer es va usar el terme distorsió) de l'espai-temps de Minkowski. Què significa que l'espai-temps estigui corbat (o distorsionat)? L'antic matemàtic grec Euclides, qui va crear la disciplina ara coneguda com «geometria euclidiana», va utilitzar com un dels seus postulats geomètrics l'exigència que dues línies semblants inicialment paral·leles mai es tallen. Aquesta absència de tall és una prova inequívoca per a la planitud de la superfície en la qual estan dibuixades les línies. Si l'espai és pla, llavors les línies rectes inicialment paral·leles mai es tallaran. En una superfície corbada, en canvi, com la superfície d'un globus terraqüi, les línies "rectes" són els cercles màxims, i els cercles màxims del globus terraqüi són els camins més curts entre dos punts (són els tipus de rutes que els agrada seguir a les línies aèries). És la curvatura de la superfície del globus la qual obliga que les dues línies rectes, inicialment paral·leles, es tallin en el Pol Nord.



Newton's fixed space

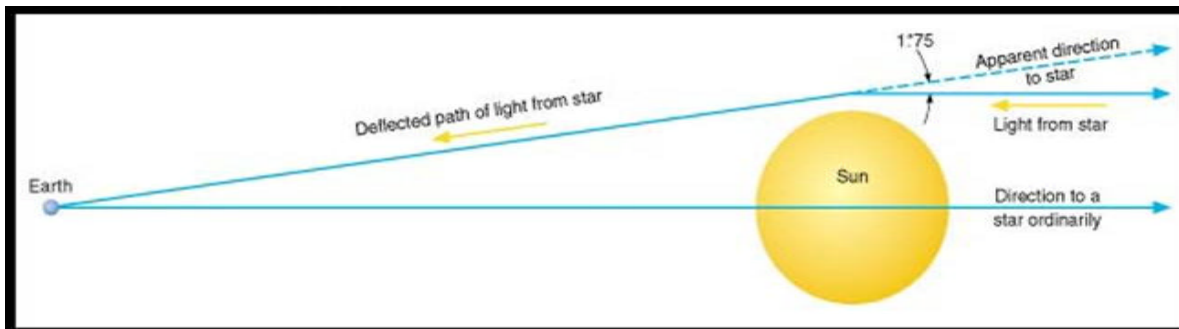


Einstein's flexible space-time

Quan Einstein va advertir això, se li va fer obvi que la gravetat és una manifestació de la curvatura de l'espai-temps. Des del punt de vista d'Einstein, la curvatura de l'espai-temps

és la causa de l'atracció de les masses. D'aquesta manera, Einstein i Newton, amb els seus punts de vista molt diferents sobre la naturalesa de l'espai i el temps, donen noms molt diferents a l'agent que ho causa. Einstein ho anomena curvatura de l'espai-temps; Newton ho anomena gravetat. Però només hi ha un agent en acció, i per tant, la curvatura del espai-temps i la gravetat han de ser exactament el mateix, expressat en llenguatges diferents.

Einstein era professor a Praga en l'estiu de 1912, quan es va preguntar, de quina manera la matèria distorsiona l'espai-temps i quins són els detalls de la distorsió? La recerca de la llei de distorsió es va convertir en l'interès principal d'Einstein. Quan es va traslladar de nou a Zurich, per ocupar una càtedra va demanar consell a un antic condeixeble, Marcel Grossmann, que era professor de matemàtiques, li va preguntar si algun matemàtic havia desenvolupat un conjunt d'equacions matemàtiques que li pogués ajudar a imaginar la llei de distorsió, és a dir, la llei que descriu de quina forma la matèria obliga a l'espai-temps a corbar-se. Grossmann li va indicar que el matemàtic alemany Bernhard Riemann a la dècada de 1860, l'italià Gregorio Ricci a la de 1880, i l'estudiant de Ricci, Tullio Levi-Civita a les de 1890 i 1900 les havien descobert; es denominaven «càlcul diferencial absolut», o, en el llenguatge dels físics de 1915-1960, «anàlisi tensorial», o en el llenguatge des de 1960 fins a avui, «geometria diferencial». I així, amb gran ajuda de Grossmann, Einstein va començar a dominar les dificultats de la geometria diferencial. A pesar de l'esclat al juny de 1914 de la primera guerra mundial, Einstein va continuar a Berlín la seva recerca d'una descripció acceptable de la forma que la matèria corba l'espai-temps. Va trobar que la llei predeïa que la llum d'una estrella que passés fregant la vora del Sol hauria de ser desviada gravitatòriament en un angle de 1.7 segons d'arc; i el més important per a Einstein, la nova llei donava el desplaçament correcte del periheli de Mercuri! La concepció d'Einstein de 1914 quedava completament indicada!. I el nou formalisme seguia donant les mateixes prediccions per al desplaçament del periheli de Mercuri i per a la desviació gravitatòria de la llum, i incorporava la seva predicció de 1907 sobre la dilatació gravitatòria del temps.



El 29 de maig del 1919 Sir Arthur Eddington va organitzar una expedició científica aprofitant un eclipsi solar i va verificar la predicció; va ser la primera confirmació de la teoria que després va ser verificada a l'eclipsi de 1922. Per fer-ho s'observen les posicions aparents dels estels en l'eclipsi amb les posicions aparents mesos més tard, lluny del Sol. Einstein va predir un desplaçament de la posició aparent que va coincidir amb les mesures fetes amb els estels situats vora al Sol.

A partir d'aquest moment, la Teoria de la Relativitat General va quedar com a la base de la Cosmologia. Matemàticament les equacions d'Einstein són molt complexes, i per això va costar un cert temps trobar algunes solucions.

2.1.3 Friedmann i Lemaitre

La primera solució de les equacions que portava a considerar un Univers dinàmic va ser feta per el físic rus Alexander Friedmann entre 1922–1924, que també va proposar que l'Univers és isotròpic, és a dir, que té les mateixes propietats en tots els punts. Malgrat que el seu treball va ser publicat a una important revista, va passar desapercebut pel seus contemporanis. Friedmann inclús va comunicar els seus resultats directament a Einstein, que va verificar la correcció matemàtica del model però que no coincidia amb la seva idea d'Univers estàtic. Friedmann morí al 1925.

Al 1927, Georges Lemaitre, un professor d'astronomia belga, va arribar a resultats similars independentement de Friedmann i els va publicar a Bèlgica; malgrat que Einstein el va sentir en una conferència i va qualificar la idea de brillant, tampoc li va donar importància. Les proves observacionals de la expansió de l'Univers obtingudes per Edwin Hubble van

fer que la idees de Lemaître fossin reconegudes i el seu article fos traduït i publicat a la revista Nature, quatre anys més tard al 1931.

Robertson i Walker, americà i anglès respectivament, van explorar el problema i al 1935 van provar que aquesta solució era l'única homogènia i isotròpia. Per això aquesta solució s'anomena de vegades la mètrica "Robertson-Walker", o mètrica FLRW en honor de "Friedmann-Lemaître- Robertson-Walker".

4. ELS DESCOBRIMENTS QUE PORTAREN AL BIG BANG

a) HUBBLE - L'UNIVERS EN EXPANSIÓ

La imatge moderna de l'Univers es remunta tan sols a 1924, quan l'astrònom nordamericà Edwin Hubble va demostrar que la nostra galàxia no era l'única. N'hi havia, de fet, moltes altres amb àmplies regions d'espai buit entre elles. Per poder provar això, necessitava determinar les distàncies que hi havia fins a aquestes galàxies. Hubble es va veure forçat a utilitzar mètodes indirectes per mesurar aquestes distàncies. Resulta que la brillantor aparent d'una estrella depèn de dos factors: la quantitat de llum que irradia (la seva lluminositat) i la llunyania a què està de nosaltres. Per a les estrelles properes, podem mesurar les seves brillantors aparents i les seves distàncies, de tal manera que podem calcular les seves distàncies mesurant les seves brillantors aparents. Hubble va advertir que cert tipus d'estrelles, quan estant suficientment aprop de nosaltres com perquè es pugui mesurar la seva lluminositat, tenen sempre la mateixa lluminositat. Per tant, ell va argumentar que si trobéssim aquests tipus d'estrelles en una altra galàxia, podríem suposar que tindrien la mateixa lluminositat i calcular, d'aquesta manera, la distància a aquesta galàxia. Si poguéssim fer-ho per diverses estrelles en la mateixa galàxia, i els nostres càlculs produïssin sempre el mateix resultat, podríem estar segurs de la nostra estimació.

Edwin Hubble va calcular les distàncies a nou galàxies diferents per mitjà del mètode anterior. En l'actualitat sabem que la nostra galàxia és només una d'entre centenars de milers de milions de galàxies que es poden veure amb els moderns telescopis, i que cadascuna d'elles conté centenars de milers de milions d'estrelles.



Aquesta imatge mostra una galàxia espiral. Creiem que aquesta imatge és similar a la de la nostra galàxia si fos vista per algú que visqués en una altra galàxia.

Vivim en una galàxia que té un diàmetre aproximat de cent mil anys llum, i que està girant lentament. Les estrelles que estan als braços de l'espiral giren al voltant del centre

amb un període de diversos anys. El nostre Sol no és més que una estrella groga ordinària, de mida mitjana, situada prop del centre d'un dels braços de l'espiral. Certament hem recorregut un llarg camí des dels temps d'Aristòtil i Ptolomeu, quan pensàvem que la Terra era el centre de l'Univers.

En els anys que van seguir al descobriment de l'existència d'altres galàxies, Hubble va dedicar el seu temps a catalogar les distàncies i a observar els espectres de les galàxies. En aquella època, la major part de la gent pensava que les galàxies es mourien de forma bastant aleatòria, pel que esperava trobar tants espectres amb esllavissament cap al blau com cap al vermell. Va ser una sorpresa absoluta, per tant, trobar que la majoria de les galàxies presentaven un esllavissament cap al vermell: gairebé totes s'estaven allunyant de nosaltres! Fins i tot més sorprenent encara va ser la troballa que Hubble va publicar al 1929: ni tan sols l'esllavissament de les galàxies cap al vermell és aleatori, sinó que és directament proporcional a la distància que ens separa d'elles. O, dit amb altres paraules, quant més lluny està una galàxia, a més velocitat s'allunya de nosaltres! Això significa que l'Univers no pot ser estàtic, com tothom havia cregut abans, sinó que de fet s'està expandint. La distància entre les diferents galàxies està augmentant continuament.

El descobriment de que l'Univers s'està expandint ha estat una de les grans revolucions intel·lectuals del segle XX. Vist *a posteriori*, és natural que sorprengui que a ningú se li hagués passat això abans. Newton, i algun altre científic, s'haurien d'haver adonat que un Univers estàtic començaria de seguida a contreure's sota la influència de la gravetat. Però suposem que, per contra, l'Univers s'expandeix. Si s'estigués expandint molt lentament, la força de la gravetat frenaria finalment la expansió i aquest començaria llavors a contraure's. Tanmateix, si s'estigués expandint més de pressa que un cert valor crític, la gravetat no seria mai prou intensa com per aturar l'expansió, i l'Univers continuaria expandint-se per sempre. La situació seria semblant al que succeeix quan es llança un coet cap a l'espai des de la superfície de la Terra. Si aquest té una velocitat relativament baixa, la gravetat acabarà aturant el coet, que aleshores caurà de nou a la Terra. En canvi si el coet té una velocitat més gran que una certa velocitat crítica (d'uns onze quilòmetres per segon) la gravetat no serà prou intensa com per fer-lo tornar, de tal manera que s'allunyarà de la Terra definitivament. Aquest comportament de l'Univers podria haver estat predit a partir de la teoria de la gravetat de Newton, al segle XIX, en el XVIII, o fins i tot a finals del XVII. La creença en un Univers estàtic era tan forta que va persistir fins a principis del segle XX. Fins i tot Einstein, quan al 1915 va formular la teoria de la relativitat

general, n'estava tan segur que va introduir una nova força "antigravitatoria", que, al contrari que les altres forces, no provenia de cap font en particular, sinó que estava inserida en l'estructura mateixa de l'espai-temps. Ell sostenia que l'espai-temps tenia una tendència intrínseca a expandir-se, i que aquesta tindria un valor que equilibraria exactament l'atracció de tota la matèria en l'Univers, de manera que seria possible la existència d'un Univers estàtic.

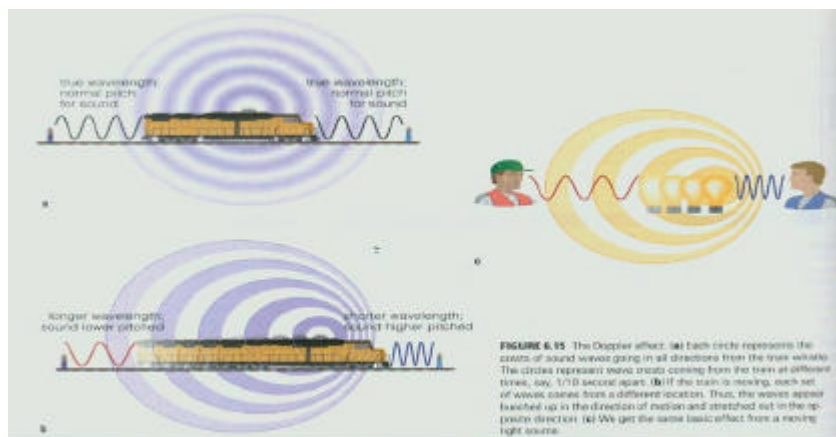
- Els espectres de les estrelles

La estrelles estan tan lluny de la Terra que ens semblen simples punts lluminosos. No podem apreciar ni la seva mida ni la seva forma. Com podem llavors classificar les estrelles en diferents tipus? De la immensa majoria de les estrelles, només podem mesurar una propietat característica: el color de la seva llum. Newton va descobrir que quan la llum travessa un tros de vidre triangular, el que es coneix com un prisma, la llum es divideix en els diversos colors que la componen (el seu espectre), el mateix que passa amb l'arc de Sant Martí. En enfocar amb un telescopi una estrella o galàxia particular, podem observar de manera similar l'espectre de la llum provinent d'aquesta estrella o galàxia. Estrelles diferents tenen espectres diferents, però la brillantor relativa dels diferents colors es sempre exactament igual a la que s'esperaria trobar a la llum emesa per un objecte en vermella incandescència. (De fet, la llum emesa per un objecte en vermella incandescent té un aspecte característic que només depèn de la seva temperatura, la que es coneix com espectre tèrmic. Això significa que podem esbrinar la temperatura d'una estrella a partir del seu espectre lluminós.) A més a més, s'observa que certs colors molt específics són absents dels espectres de les estrelles, i que aquests colors absents poden variar d'una estrella a una altra. Atès que sabem que cada element químic absorbeix un conjunt característic de colors molt específics, es pot determinar exactament quins elements hi ha a l'atmosfera d'una estrella comparant els conjunts de colors absents de cada element amb l'espectre de l'estrella.

Quan els astrònoms van començar a estudiar, als anys vint, els espectres de les estrelles d'altres galàxies, van trobar un fet molt peculiar: aquestes estrelles posseïen els mateixos conjunts característics de colors absents que les estrelles de la nostra pròpia galàxia, però desplaçats tots ells en la mateixa quantitat relativa cap a l'extrem de l'espectre corresponent al color vermell. Per comprendre les implicacions d'aquest descobriment, hem de conèixer primer l'efecte Doppler.

- L'Efecte Doppler

Com hem vist, la llum visible consisteix en fluctuacions, o ones, del camp electromagnètic. La freqüència (o nombre d'ones per segon) de la llum és extremadament alta, des de quatre fins a set milions d'ones per segon. Les diferents freqüències de la llum són el que l'ull humà veu com diferents colors, corresponent les freqüències més baixes a l'extrem vermell de l'espectre, i les més altes, a l'extrem blau. Imaginem llavors una font lluminosa, tal com un estel a una distància fixa de nosaltres, que emet ones de llum amb una freqüència constant. Òbviament la freqüència amb què són emeses (el camp gravitatori de la galàxia) no serà prou gran per tenir un efecte significatiu. Suposem ara que la font comença a moure's cap a nosaltres. Cada vegada que la font emeti la següent cresta d'ona, estarà més a prop de nosaltres, per la qual cosa el temps que cada nova cresta tarda a arribar-nos serà menor que quan l'estrella estava estacionària. Això significa que el temps entre cada dues crestes que arriben a nosaltres és més curt que abans i, per tant, que el nombre d'ones que rebem per segon (és a dir, la freqüència) és més gran que quan l'estrella estava estacionària. Igualment, si la font s'allunya de nosaltres, la freqüència de les ones que rebem serà menor que en el cas estacionari. Així doncs, en el cas de la llum, això significa que les estrelles que s'estiguin allunyant de nosaltres tindran els seus espectres desplaçats cap a l'extrem vermell de l'espectre (esllavissament cap al vermell) i els estels que estiguin apropant tindran esllavissament cap al blau. Aquesta relació entre freqüència i velocitat, que es coneix com a efecte Doppler, és una experiència diària. Si escoltem un cotxe al passar per la carretera notem que, quan s'ens aproxima, el motor sona amb un to més agut del normal (el que correspon a una freqüència més alta de les ones sonores), mentre que quan s'allunya produeix un so més greu. El comportament de la llum o de les ones de ràdio és similar. De fet, la policia fa ús de l'efecte Doppler per mesurar la velocitat dels cotxes a partir de la freqüència dels polsos de les ones de ràdio reflectits pels vehicles.



b) PENZIAS Y WILSON: Radiació còsmica de fons

Al 1965, dos físics nordamericans dels laboratoris Bell Telephone a Nova Jersey, Arno Penzias i Robert Wilson, estaven provant un detector de microones extremadament sensible. (Les microones són iguals que les ones lluminoses, però amb una freqüència de l'ordre de només deu mil milions d'ones per segon.) Penzias i Wilson es van sorprendre al trobar que el seu detector captava més soroll del que esperaven.

El soroll no semblava provenir de cap direcció en particular. Al principi van descobrir excrements d'ocell en el seu detector, per la qual cosa van comprovar tots els possibles defectes de funcionament, però aviat els rebutjaren. Ells sabien que qualsevol soroll provinent de dins de l'atmosfera seria menys intens quan el detector estigués dirigit cap amunt que quan no ho estigués, ja que els raigs lluminosos atravessarien molta més atmosfera quan es rebessin des de prop de l'horitzó que quan es rebessin directament des de més amunt. El soroll extra era el mateix per a qualsevol direcció des de la qual s'observés, de manera que havia de provenir de fora de l'atmosfera. El soroll era també el mateix durant el dia, i durant la nit, i al llarg de tot l'any, malgrat que la Terra girés sobre el seu eix i al voltant del Sol. Això va demostrar que la radiació havia de provenir de més enllà del sistema solar, i fins i tot des de més enllà de la nostra galàxia, perquè en cas contrari variaria quan el moviment de la Terra fes que el detector apuntés a diferents direccions. De fet, sabem que la radiació ha d'haver viatjat fins a nosaltres a través de la major part de l'Univers observable, i donat que sembla ser la mateixa en totes les direccions, l'Univers ha de ser també el mateix en totes les direccions, almenys a gran escala. En l'actualitat, sabem que a qualsevol direcció on mirem, el soroll mai varia més d'una part en deu mil. Així, Penzias i Wilson van ensopegar inconscientment amb una confirmació extraordinària precisa de la primera idea Friedmann.

Les idees de George Gamow i Friedmann

Aproximadament al mateix temps, dos físics nord-americans de la propera Universitat de Princeton, Bob Dicke i Jim Peebles, també estaven interessats en les microones. Estudiaven un suggeriment fet per George Gamow (que havia estat alumne d'Alexander Friedmann) relatiu a que l'Univers en els seus primers instants hauria d'haver estat molt calent i dens, per acabar blanc incandescent. Va ser la primera idea d'un Big Bang.

Dicke i Peebles van argumentar que encara hauríem de ser capaços de veure la resplendor dels inicis de l'Univers, perquè la llum provinent de llocs molt distants estaria arribant ara. Tanmateix, l'expansió de l'Univers implicaria que aquesta llum hauria d'estar tan tremendament desplaçada cap al vermell que ens arribaria avui en dia com radiació de microones. Quan Dicke i Peebles estaven estudiant com trobar aquesta radiació, Penzias i Wilson va assabentar-se de l'objectiu d'aquest treball i van comprendre que ells ja havien trobat aquesta radiació. Gràcies a aquest treball, Penzias i Wilson van ser guardonats amb el premi Nobel l'any 1978 (el que sembla ser força injust amb Dicke i Peebles, per no esmentar Gamow) pel descobriment de la *radiació còsmica de fons*. A partir d'aquest moment la teoria del Big Bang va començar a ser considerada la que millor explicava l'origen de l'Univers.

A primera vista, podria semblar que tota aquesta evidència que l'Univers sembla el mateix en qualsevol direcció des de la que mirem suggeriria que hi ha alguna cosa especial quant a la nostra posició en l'Univers. En particular, es podria pensar que, si observem a totes les altres galàxies allunyar-se de nosaltres, és perquè estem en el centre del l'Univers. Hi ha, però, una explicació alternativa: l'Univers podria ser també igual en totes les direccions si l'observéssim des de qualsevol altra galàxia. Això va ser la segona suposició de Friedmann. No es té evidència científica a favor o en contra d'aquesta suposició. Creiem en ella només per raons de modèstia: seria extraordinàriament curiós que l'Univers semblés idèntic en totes les direccions al nostre voltant, i que no fos així per a altres punts de l'Univers! En el model de Friedmann, totes les galàxies s'estan allunyant entre si unes de les altres. La situació és similar a un globus amb cert nombre de punts dibuixats en ell, i que es va inflant uniformement. A mesura que el globus s'infla, la distància entre cada dos punts augmenta, malgrat la qual cosa no es pot dir que existeixi un punt que sigui el centre de la expansió. A més a més, com més lluny estiguin els punts, es van separar amb major velocitat. Similarment, en el model de Friedmann la velocitat amb la qual dues galàxies qualsevols se separen és proporcional a la distància entre elles. D'aquesta manera, predeia que l'esllavissament proporcional a la seva distància de nosaltres, exactament el que Hubble va trobar.

5. LA TEORIA DEL BIG BANG

Què és la Teoria del Big Bang?

Després del descobriment al 1965 de la radiació de fons, es va consolidar entre els científics la idea proposada per Gamow l'any 1940 de què l'Univers es va originar en el passat en un fet "singular". F. Hoyle, que en aquella època defensava una altra teoria, la del estat estacionari, la va qualificar despectivament en un programa de la BBC anomenant-la Gran Explosió, és a dir Big Bang, que és com es coneix ara. Malgrat el menyspreu original, aquesta expressió ha perdut la seva connotació pejorativa i irònica i ha esdevingut un nom científic i vulgaritzat de l'època en que va aparèixer l'Univers que coneixem; l'any 1990 es va fer un concurs que renombrar-la sense èxit.

La Teoria del Big Bang diu en síntesi, que tota l'energia existent a l'Univers estava concentrada en un punt més petit que un àtom. La temperatura era molt alta i per aquesta raó no existia la matèria com la coneixem avui. Després de la gran explosió, l'espai s'expandeix i es refreda permetent la formació d'àtoms, estrelles, galàxies, i planetes a partir de partícules elementals.

Aquest fet va ocórrer, segons les darreres investigacions, fa 13.700 (± 200) milions d'anys

- La teoria del Big Bang explica l'expansió de l'Univers, l'existència d'un passat dens i calent, l'origen dels elements químics primordials i la formació dels objectes astronòmics que s'observen en l'esfera celeste (estrelles, galàxies, cúmuls de galàxies, etc).
- Aquesta teoria es basa en la Relativitat General d'Einstein i en la combinació amb les prediccions de la física nuclear i la física de partícules i d'interaccions, i constitueix el model estàndard de la cosmologia moderna.
- La cosmologia del Big Bang és coherent amb les observacions que s'han realitzat.

Tal com hem dit abans, les proves experimentals de la teoria són:

1. L'expansió de l'Univers descoberta per Hubble.
2. L'existència del Fons Còsmic de Microones, descoberta per Penzias i Wilson.

Però també hi ha una altra que és:

3. La composició i la distribució de la matèria dels astres més antics descoberta per Gamow.

L'estudi del gas de galàxies primitives, situades a una gran distància de nosaltres, i d'estrelles antigues de la Via Làctia ha revelat que la seva matèria està formada principalment per hidrogen (inclòs l'isòtop deuteri) i heli. Aquestes proporcions coincideixen amb el que, segons el model del Big Bang, va esdevenir en l'etapa de la "nucleosíntesi".

Els 3 primers minuts de l'Univers

Per poder explicar què va passar en els primers minuts de l'Univers cal estudiar l'interior de la matèria en profunditat, i observem que està feta de partícules elementals, els maons fonamentals de l'Univers, i que constitueixen la base dels àtoms, i per tant dels estels i galàxies. La teoria que explica el comportament de les partícules, s'anomena model estàndard de la física de partícules, i es va desenvolupar a finals dels anys 70 i principis del 80 per S. Weinberg i A. Salam principalment.

El model estàndard d'interaccions

Aquest model diu que la matèria està formada per:

- Dos tipus de partícules: Els Leptons i els Quarks.
- Quatre tipus d'interaccions o forces bàsiques : Forta, Electromagnètica, Feble i Gravitatòria.
- Uns missatgers o elements que s'intercanvien en la dinàmica de partícules i que estan associats a cada tipus d'interaccions.

Interacció Forta

La interacció forta, manté units els Quarks per formar unes partícules anomenades Hadrons, entre les quals trobem els protons i neutrons. El missatger que actua a aquestes distàncies petites, s'anomenen "Gluons". L'intercanvi de gluons entre els quarks provoquen canvis en les seves propietats que s'anomenen "colors". Un dels objectius del GCH (LHC en anglès) posat en marxa en el 2008, es esbrinar el comportament del Quarks i els Gluons.

Interacció Electromagnètica

La interacció electromagnètica actua sobre les partícules amb càrrega elèctrica. Manté units els electrons amb els nuclis per formar els àtoms. El missatger s'anomena "*Fotó*".

Interacció Feble

La interacció feble afecta als leptons i als quarks. És la responsable de certs processos. Els missatgers s'anomenen "*W*" i "*Z*", i van ser descoberts l'any 1984.

Interacció Gravitatòria

Afecta a la massa dels objectes. A l'escala de les partícules elementals la seva intensitat és la més minça de les quatre; però a escala còsmica predomina sobre les altres i afecta a la dinàmica de les grans masses. El seu missatger s'anomena "*Gravito*" però no ha estat descobert.

Etapas del Big Bang

Durant els tres primers minuts aproximadament, l'Univers va passar per un seguit d'etapes:

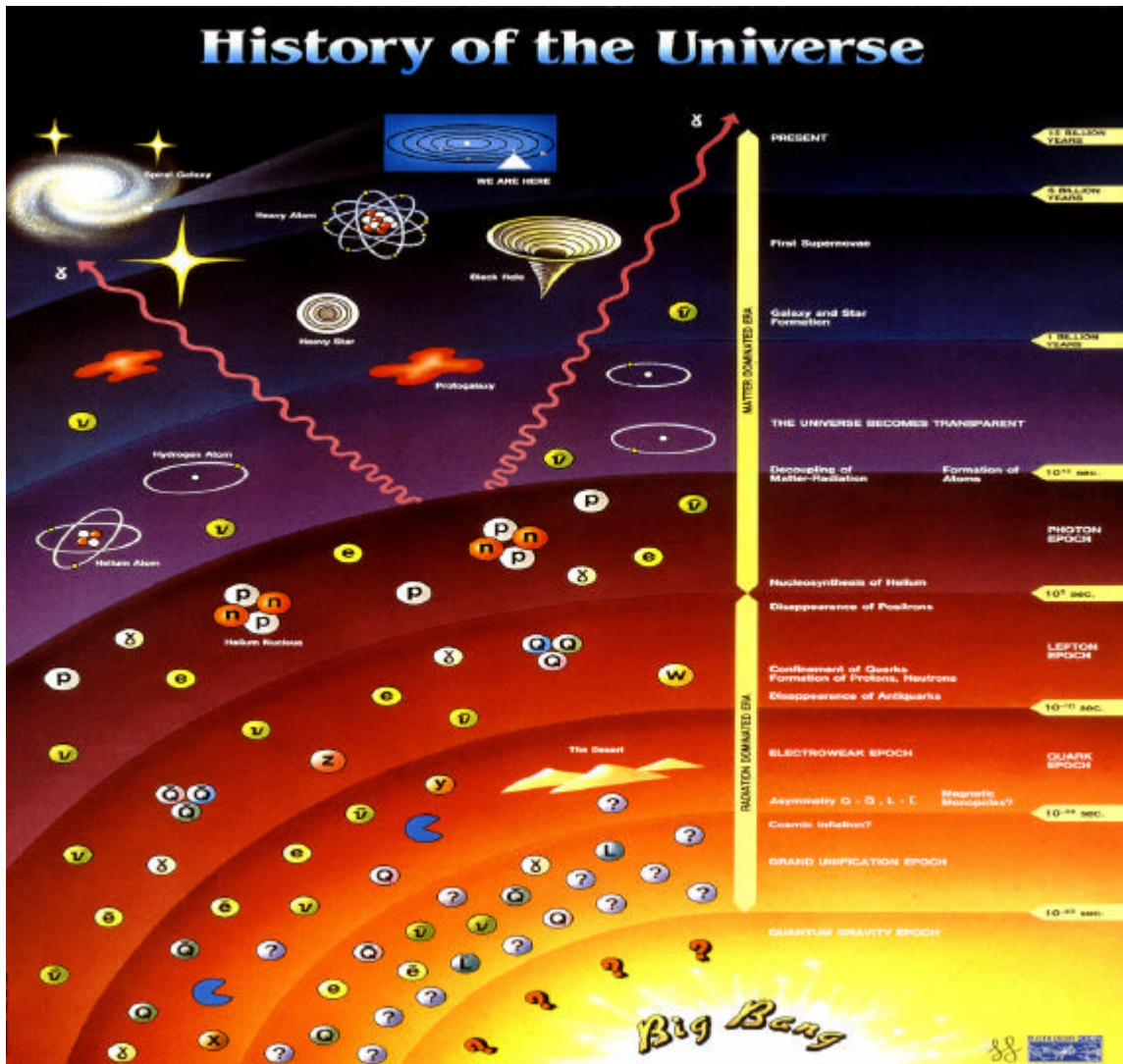
1. Etapa de Planck
2. Inflació
3. Confinament dels quarks
4. Etapa de les Partícules
5. Etapa de Nucleosíntesis

Etapa de Planck ($t < 10^{-43}$ s)

És l'etapa de la qual no es pot deduir res fent ús de la relativitat, i només es pot aplicar la teoria quàntica. En aquesta etapa és quan es pot parlar de "Big Bang", i és considerat el "naixement" del nostre Univers. Sobre la base dels mesuraments recens de l'expansió de l'Univers, es calcula que aquest fet va ocórrer fa uns 13,73 mil milions d'anys.

Si mirem cap enrere segons aquesta escala, el primer instant de l'Univers, és a dir, el començament del Big Bang té lloc als 10^{-43} s. Abans d'aquest instant les teories físiques,

com hem dit, només poden fer hipòtesis. Es pensa que les interaccions fonamentals o forces bàsiques estaven unificades i que l'Univers bàsicament és energia .



Etapa d'inflació ($10^{-43} < t < 10^{-38}$ s)

Les primeres etapes del Big Bang estan subjectes a moltes especulacions. En la majoria dels models anomenats estàndards, l'Univers al principi estava ple d'una alta densitat d'energia, a enormes temperatures i pressions, i va ser molt ràpida l'expansió i el refredament. Aproximadament 10^{-35} segons després del Big Bang i en plena expansió, una fase de transició va provocar una anomenada "inflació" còsmica, durant la qual l'Univers va créixer exponencialment. Existeixen diverses hipòtesis sobre aquest esdeveniment, entre les quals la idea d'inflació és d'interès ja que resol algunes dificultats teòriques inherents a la teoria

del Big Bang. Mentre que el Big Bang gaudeix d'un sòlid suport d'observacions, el model d'inflació requereix major evidència observacional per ser acceptat definitivament.

En aquesta etapa es considera que a l'Univers existien dues interaccions la Gravitatòria i una altra anomenada Teoria de la Gran Unificació, que suposa que estaven unificades les interaccions forta, feble i electromagnètica. En anglès es diu Grand Unified Theory (GUT).

Aquesta etapa dura fins al temps de 10^{-38} s i la temperatura de l'Univers s'havia refredat fins als 10^{29} K

Etapa de confinament dels Quarks ($10^{-38} < t < 10^{-10}$ s)

Després que la inflació s'aturés, l'Univers consistia bàsicament en un plasma de partícules elementals, principalment de les parelles quark-gluon. Les temperatures eren tan altes que els moviments aleatoris de les partícules assolien velocitats properes a la de la llum, i es pensa que els parells de partícules-antipartícules de tot tipus es creaven i es destruïen en col·lisions contínues.

L'Univers va seguir creixent a mida que disminuïa la temperatura, i es pensa que les forces fonamentals eren tres : Gravitatòria, Forta i ElectroFeble, aquesta última formada per l'unió de la electromagnètica i la feble. El descobriment, l'any 1984 de les partícules W i Z, va confirmar aquesta teoria.

Aquesta etapa dura fins al temps de 10^{-10} s i la temperatura era ja de 10^{15} K, i en aquest instant les dues forces esmentades es van separar, i es pensa que van assolir el model actual.

Etapa de les Partícules ($10^{-10} < t < 10^{-3}$ s)

En algun moment una reacció desconeguda anomenada bariogènesi provoca un petit excés de quarks i leptons més les seves antipartícules i això es va traduir en el predomini de la matèria sobre l'antimatèria en l'Univers. Hem de tenir en compte que després d'uns 10^{-11} segons, la imatge es torna menys especulativa, ja que les partícules poden assolir uns valors reproduïbles en els experiments dels acceleradors de la física de partícules actual.

Es suposa que en el temps de 10^{-4} segons es produeix una aniquilació de la massa deixant només una proporció de protons i neutrons semblant a l'actual i sense cap de les seves antipartícules, que és el que observem avui en dia. Un procés semblant va ocórrer aproximadament amb els electrons i positrons.

Després d'aquestes aniquilacions, els protons, neutrons i electrons van perdre velocitat i la densitat d'energia de l'Univers va estar dominada pels fotons.

Quan l'Univers té 10^{-3} s la temperatura és de 10^{12} K.

Era de la Nucleosíntesi (10^{-3} s < t < 3 min)

Pocs minuts després del Big Bang, quan la temperatura era d'aproximadament d'uns mil milions de graus Kelvin es comencen a combinar els neutrons amb els protons per formar deuteri i nuclis d'heli en un procés anomenat nucleosíntesi. Però la majoria de protons continuen sense combinar-se en forma de nuclis d'hidrogen.

Quan l'Univers té 3 minuts la temperatura és ja de 10^9 K, i la fusió nuclear s'atura.

En aquest instant la composició de la matèria és:

- 75% de nuclis d'Hidrogen, és a dir protons
- 25% de nuclis d'Heli

Després dels 3 primers minuts

Etapa de recombinació o dels nuclis (3 min < t < 380.000 anys)

L'Univers després dels 3 primers minuts és un plasma calent format per nuclis d'hidrogen, d'heli i electrons; els fotons es limiten a saltar d'un electró a altre i per tant l'Univers és opac, ja que els fotons no viatgen. A mesura que l'Univers es refreda, la densitat d'energia de la matèria és dominada per la radiació dels fotons. Després d'uns 379.000 anys del Big Bang, els nuclis i els electrons es combinen en àtoms, principalment hidrogen. En aquest moment la radiació es dissocia de la matèria i va seguint així a través de l'espai lliure. Aquesta relíquia de la radiació es la que es coneix amb el nom de radiació còsmic de fons.

Al final de l'etapa de recombinació del Big Bang, la formació dels àtoms fa que la radiació viatgi lliurement. És a dir, l'Univers es fa detectable. I nosaltres hem desenvolupat instruments per poder veure la primera radiació lliure: la radiació del Fons Còsmic de Microones. En observar el Fons Còsmic de Microones detectem irregularitats que indiquen que la matèria no estava distribuïda uniformement. Hi havia grumolls amb major densitat de matèria. Per efecte de la gravetat, la matèria comença a acumular-se on hi ha una mica més de matèria. Les regions amb major densitat atreuen a la matèria del seu voltant.

Quan l'Univers té 380.000 anys la temperatura és de 3.000 K.

Era dels Àtoms ($380.000 < t < 1.000.000.000$ anys)

L'Univers està ple de gas atòmic, aquesta època es diu Edat Còsmica Fosca (Cosmic Dark Age), ja que es formen els nuvols protogalàctics degut a la concentració de la matèria provocada per l'atracció gravitatòria de la matèria fosca. Això provocarà la formació dels primers estels. Les mesures del telescopi espacial Hubble ens mostra una distribució de les galàxies d'una etapa antiga (l'Univers quan era més jove), d'una forma més densa i més calenta, d'acord amb la teoria del Big Bang. El procés d'atracció gravitatòria forma núvols de gas, estrelles, i galàxies, que són les estructures astronòmiques observables avui en dia.

Els detalls d'aquest procés depenen de la quantitat i el tipus de matèria a l'Univers. Els tres tipus possibles de matèria es coneixen com a matèria fosca freda, matèria fosca calenta i matèria bariònica. Les millors mesures disponibles mostren que la forma dominant de matèria en l'Univers és la matèria fosca freda. Els altres dos tipus de la matèria constitueixen menys del 18% de la matèria en l'Univers.

Era Actual ($t > 1.000.000.000$ anys)

Amb el pas de centenars de milions d'anys es van formant estructures de matèria i espais buits. La gravetat va donant forma a aquestes estructures; són els gèrmens de galàxies primitives detectables avui en dia.

- **Les primeres estrelles**

Durant molt temps, la força de la gravetat va fer que núvols massius d'hidrogen i heli col·lapsessin sobre si mateixos. A mesura que el gas s'anava concentrant, la pressió en el centre augmentava, i amb la pressió augmentava també la temperatura. Quan la pressió i la temperatura van ser prou altes van començar les reaccions de fusió. En aquell moment, fa uns 13.000 milions d'anys, gairebé 1.000 milions d'anys després del Big Bang, van néixer les primeres ESTRELLES, estrelles amb majúscules doncs es pensa que eren GEGANTS.

Es creu que les primeres estrelles van ser molt massives, d'almenys unes cent vegades la massa del nostre Sol. Des de llavors, el naixement i la mort de les estrelles no han deixat de succeir.

- **El Sistema Solar**

El nostre sistema solar es va formar fa uns 4.600 milions d'anys, a partir d'un mateix núvol de gas i la pols enriquida amb els elements produïts en altres estrelles i supernoves que van ser expulsats a l'espai. Degut a la gravetat, aquest núvol va començar a col·lapsar i a rotar cada cop més de pressa, igual que una ballarina quan baixa els seus braços. La nebulosa es aplanar en forma de disc, on en el centre, la zona més densa i calenta, es va formar el Sol; mentre a les parts externes, es van crear petits grumolls de gas i pols que poc a poc van acumular matèria suficient fins a convertir-se en planetes.

Les mesures dels satèl·lits

COBE

El Fons Còsmic de Microones, com hem dit és una de les proves fonamentals de l'existència del Big Bang, i ha estat confirmada per observacions recents. En la dècada dels 90, l'Explorador Còsmic de Microones COBE, un satèl·lit de la NASA, confirma els resultats de Penzias i Wilson.

El COBE portava un espectròmetre, que és un aparell capaç de mesurar la radiació electromagnètica, capaç de descompondre la radiació còsmica de microones en diferents longituds d'ona i mesurar la seva intensitat en cadascuna d'elles amb una precisió extraordinària.

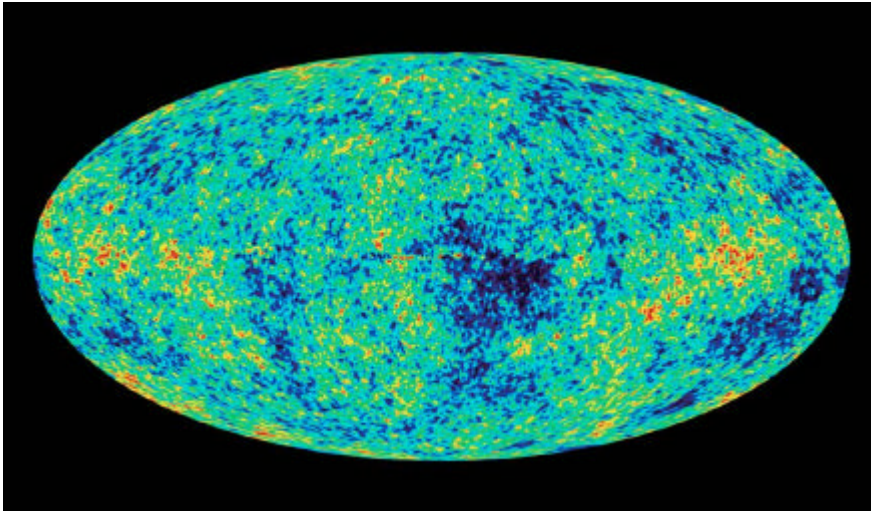
D'aquestes observacions es va obtenir que la radiació que encara ens arriba com a resultat d'aquella explosió correspon a la d'un cos negre (hi ha una relació directa entre el pic d'emissió d'un cos negre i la seva temperatura) molt fred, tal com predeu la teoria, que s'hauria de detectar una corba amb el pic d'emissió en les microones .

Una altra de les prediccions del model del Big Bang és que la intensitat de la radiació del Fons Còsmic de Microones no pot ser absolutament uniforme. El satèl·lit COBE va obtenir per primera vegada el 1992 una determinació del grau de inhomogeneïtat de la radiació.



En la imatge es mostra un mapa en fals color de tota la volta celeste amb les regions de radiació més intensa en vermell i les menys intenses en blau. El contrast d'unes regions a altres és d'unes poques centmil·lèsimes. L'observació d'un Fons Còsmic de Microones no uniforme és una altra prova del model del Big Bang. Aquests resultats van ser verificats per diversos experiments en la dècada dels 90. Un dels primers, l'experiment de Tenerife sobre el Fons Còsmic de Microones va ser portat a terme en l'Observatori del Teide a Canaries.

WMAP



Més recentment, un altre satèl·lit de la NASA, conegut amb el nom de WMAP ha obtingut mesures encara més precises i nítides del Fons Còsmic de Microones. El mapa mostra les zones més calentes en vermell i les zones més fredes en blau. La interpretació d'aquestes últimes observacions en el marc del model del Big Bang ha permès extreure informació de molts dels seus paràmetres fonamentals, reduint notablement les incerteses que havia sobre ells.

Temes oberts

D'acord a les darreres observacions, el nostre "Univers pla" s'està accelerant cada vegada més. Tot sembla indicar que hi ha a l'Univers una forma d'energia que causa que l'expansió sigui cada vegada més ràpida (l'energia fosca).

A més es desconeixen les característiques de la matèria que no detectem (la matèria fosca). Establir les propietats de l'energia fosca i de la matèria fosca són dos dels problemes oberts de la Cosmologia; però hi ha d'altres.

La matèria fosca

Al 1923 Fritz Zwicky va observar que el moviment de les galàxies en el Cúmulo de Coma requeria, per a ser explicat, d'una gran quantitat de massa que no emetia llum, i per tant "fosca". Quaranta anys més tard alguns astrònoms van descobrir que la velocitat de rotació de les estrelles al voltant del centre de les galàxies era massa ràpid, impossible de sostenir sense la presència d'una gran quantitat de matèria fosca al voltant de les galàxies.

Recordem que al 1919 Sir Artur Eddington va aconseguir mesurar la deflexió de la llum emesa per una estrella distant al seu pas a prop del Sol. Aquest resultat va confirmar la hipòtesis d'Einstein que la força de gravetat actua no només sobre cossos amb massa sinó també sobre radiacions com la llum. Això està unit al fet que la radiació transporta energia i que l'energia i la massa estan relacionades per l'equació esmentada abans.

Combinant imatges de galàxies llunyanes de la Terra i mètodes de mesura basats en el principi d'Einstein, de què la llum és desviada al voltant d'una gran massa, es va poder mesurar la quantitat de massa que contenen els cúmuls de galàxies. Això va demostrar que el 26% del total de la matèria de l'Univers és matèria fosca. La matèria que coneixem és només el 4% del total.

Una possibilitat és que la matèria fosca estigui feta de partícules que no emetin radiació electromagnètica i que són estables, o almenys amb un temps de vida major que l'edat actual de l'Univers, és a dir, 13.5 milers de milions d'anys. A aquestes partícules se les anomena WIMP (Weakly Interactive Massive Particle, Partícules d'Interacció Massiva Feble).

Dins dels experiments previstos al GCH, n'hi haurà que estaran dedicats a detectar les partícules WIMP; per produir-les es requereix d'una energia molt elevada mai assolida fins ara en els acceleradors de partícules.

L'energia fosca

Les darreres comprovacions en els estels anomenades supernoves impliquen que avui l'Univers està dominat per una misteriosa forma d'energia coneguda com a energia fosca, i que aparentment impregna la totalitat d'espai. Les observacions suggereixen que el 72% del total de la densitat d'energia de l'Univers és d'aquest tipus. La seva composició i mecanisme són desconeguts i, en els pròxims anys es duran a terme investigacions basades en el model estàndard de física de partícules per intentar trobar la seva explicació.

La investigació sobre la física de partícules

La física d'astropartícules és un nou camp de la física que neix de la convergència de la astrofísica i la física de partícules. Està molt relacionada amb la física dels acceleradors de partícules, aquests són màquines, normalment en forma d'anella on es fabriquen feixos de partícules d'alta energia per sondejar la estructura de la matèria.

Els col·lisionadors, com l'LHC, o GCH en català, són acceleradors que envien els feixos de partícules en direccions oposades dins del mateix anell de l'accelerador per observar els resultats de les col·lisions. S'utilitzen detectors de partícules fets de materials especials (àtoms o nuclis) que són capaços de convertir les ones del resultat de les col·lisions en senyals elèctriques; aquestes senyals són processades i reconstruïdes per potents ordinadors.

GHC

El GCH (en anglès LHC) és un accelerador de 27 quilòmetres situat a la frontera entre Suïssa i França, entre 50 i 150 metres sota terra. (Per fer-nos una idea envoltaria tota l'àrea de Barcelona). Més de 10.000 científics i enginyers de casi 500 institucions acadèmiques i companyies de tot el món van al laboratori del CERN (Organització Europea per a l'investigació Nuclear) a Ginebra per a contribuir al projecte GCH.

El CERN, fundat al 1954, s'ha convertit en un exemple de la col·laboració internacional; està format per 20 estats membres i és el major laboratori de física de partícules del món. El

GCH s'anomena la màquina del Big Bang ja que bona part dels experiments que es duran a terme, tenen a veure amb les primeres etapes de l'Univers.

Un altre dels experiments que es duran a terme al GCH és diu ALICE (A Large Ion Collider Experiment), Un Ampli Experiment de Collisió de Ions. En aquest cas s'utilitzaran feixos de nuclis de plom, que contenen un gran nombre de protons i neutrons, accelerats a velocitats properes a la de la llum.

Matèria i Antimatèria

Al 1928 el físic Paul Dirac va desenvolupar una teoria que combinava la teoria de la relativitat i la física quàntica, per explicar les propietats que s'havien descobert de l'electró. La seva teoria va trobar dues solucions simètriques: una per a l'electró i una altra per una partícula igual però amb càrrega positiva. Aquesta partícula es va anomenar positró. Va ser descoberta per Carl Anderson al 1933 analitzant els raigs còsmics amb un detector.

Quan una partícula es troba amb la seva antipartícula es destrueixen per formar energia. Les partícules d'antimatèria es produeixen fa temps als acceleradors de partícules, i s'ha trobat una antipartícula per a cada partícula coneguda. El 1996 al CERN, es va produir el primer àtom d'antimatèria unint un antiprotó amb un antielectró; experiment que es van repetir massivament al 2002.

En les primeres etapes del Big Bang es pensa que tota la antimatèria va desaparèixer per donar pas a la matèria que coneixem. Un experiment previst al GCH anomenat "beauty" espera trobar la explicació a aquesta ruptura de la simetria.

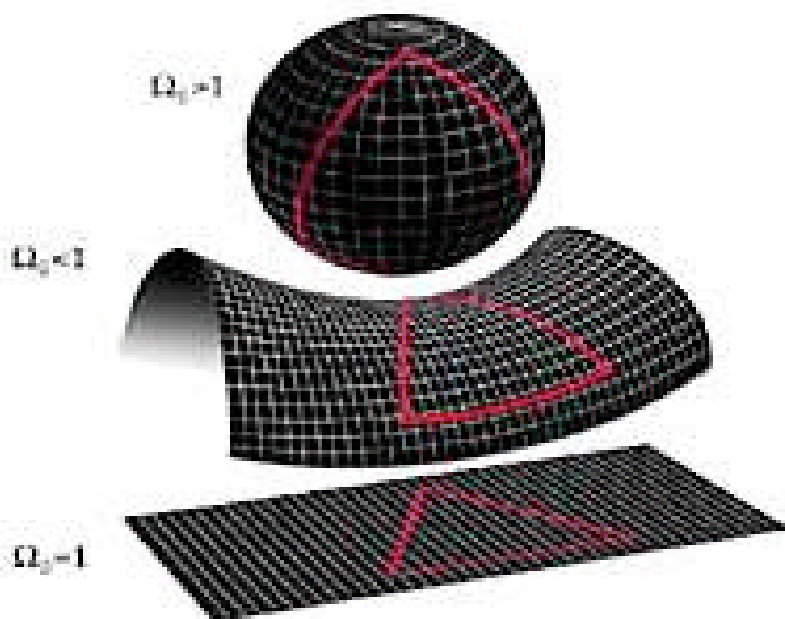
6. DESTÍ DE L'UNIVERS

Segons la teoria de la relativitat l'espai (és a dir l'espai-temps) es pot corbar i deformar en presència de matèria. A prop d'un objecte com el Sol o la Terra aquesta deformació de l'espai produeix la gravetat. A nivell còsmic l'efecte combinat de tota la matèria de l'Univers pot produir també una curvatura o contracció de l'espai.

Si la densitat de l'Univers és més gran que una determinada quantitat, (anomenada densitat crítica) llavors l'espai tridimensional es corbarà al seu voltant de la mateixa manera en la qual està corbada la superfície bidimensional d'una esfera, per crear una superfície tancada. No importa quanta quantitat hi hagi en excés, sinó només que hi estigui. L'espai seria finit i tindria un volum finit; de la mateixa forma que la superfície de la Terra té una àrea i volum finits i si ens desplaçem per ella, no trobariem cap frontera i acabariem tornant al punt de sortida; passaria el mateix amb aquest tipus d'Univers al desplaçar-nos per ell.

Si la densitat és menor que la densitat crítica, l'Univers seria obert, amb l'espai corbat cap a fora, de la mateixa forma que una sella de muntar a cavall. En aquest cas l'Univers seria infinit i sempre s'expandiria; si ens desplaçem per ell, no tornariem mai al punt de sortida.

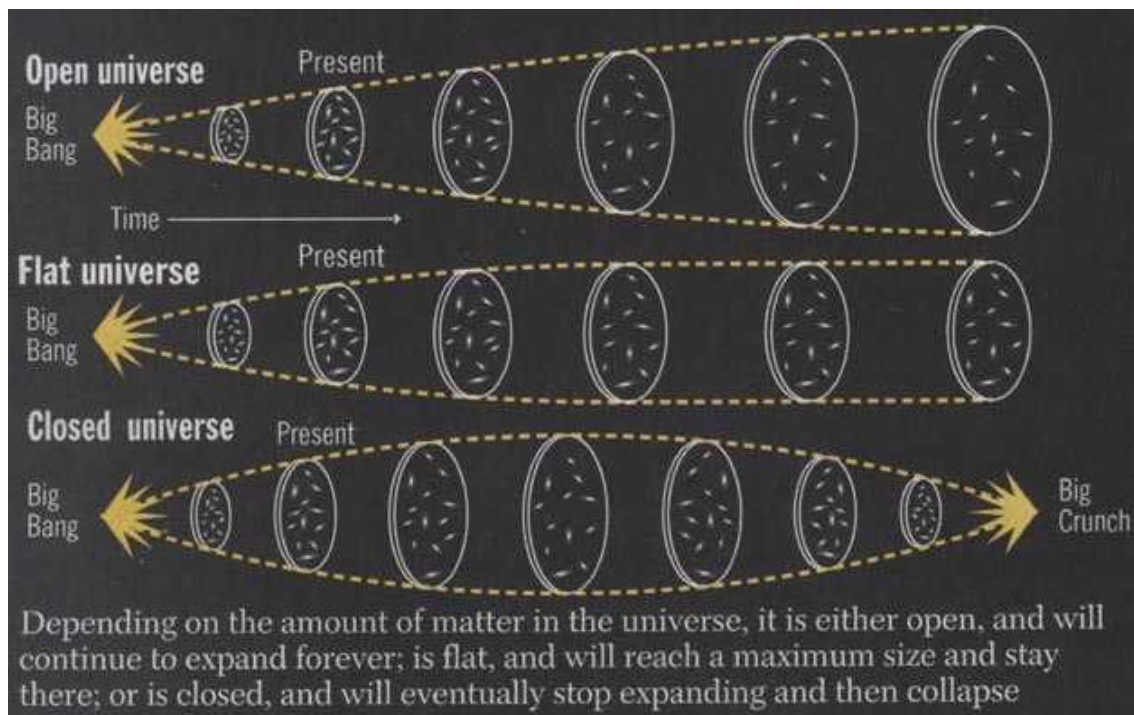
Si la densitat és igual a la crítica, llavors l'Univers seria pla, com si fos una llarga làmina.



Segons les darreres investigacions el valor és $O_0 = 1.02 \pm 0.02$, per tant l'Univers seria pla.

Les tres possibilitats corresponen a tres destins diferents:

- En un Univers tancat, la força gravitatòria de la matèria frenaria l'expansió i el faria col·lapsar en una bola de foc anomenada *Big Crunch* o *Gran Implosió* o *Colapso*.
- En un Univers obert, la expansió mai s'aturaria
- En un Univers pla (densitat crítica) l'expansió s'acabaria fent més lenta fins que arribaria a un estat d'equilibri gravitacional



Al 1998 dos equips d'investigació internacionals dirigits per S. Perlmutter i A. Riess respectivament, van descobrir que la expansió de l'Univers s'està accelerant. L'estudi es va dur a terme en objectes celestes anomenats supernoves de tipus Ia, molt lluynants, estudiant el desplaçament al vermell, i comprovant que las distàncies augmentaven a gran velocitat.

Les supernoves són grans explosions que tenen lloc en el període final de la mort dels estels; les de tipus Ia tenen la propietat especial de brillar amb una lluminositat igual per a totes, el que les fa molt interessants per aquests estudis. La verificació posterior d'aquests estudis fa que molt pocs científics dubtin d'aquest descobriment.

Per intentar explicar aquest fet la majoria dels cosmòlegs creuen que s'ha d'introduir un fluid còsmic repulsiu que es contraposi a la acció atractiva de la gravetat d'Einstein, suposant per tant que l'espai buit té una energia, que s'anomena energia fosca.

La primera vegada que es va fer servir aquest concepte va ser al 1917 per Einstein i el va anomenar constant cosmològica. Això va succeir perquè quan Einstein va formular la teoria de la relativitat es considerava que l'Univers era estàtic i etern. Quan Hubble va provar la expansió de l'Univers, Einstein va retirar la constant cosmològica, que va qualificar com "el major error de la seva vida". Ara es considera també aquesta possibilitat, però el valor que caldria que assumís és molt més gran del que justificaria l'acceleració de l'Univers. Per aquest motiu s'investiguen altres hipòtesis, entre les quals destaca el concepte de quinta essència.

El nom de quinta essència prové del cinquè element que els grecs afegien als quatre, aigua, aire, foc i terra, per explicar el món supralunar. Aquest concepte permetria, junt amb la matèria visible i la matèria fosca, una descripció completa del contingut energètic de l'Univers. Matemàticament es tradueix en una equació amb un paràmetre anomenat Λ . En els darrers anys s'han fet observacions per tal de determinar o acotar el seu valor. Segons sembla els valors podrien portar a una expansió superaccelerada de l'Univers; en aquest context a la energia fosca se l'anomena energia fantasma ja que produiria un efecte catastròfic en l'espai que es diu "*Big Rip*" o *Gran Trencament*, per diferenciar-la del "*Big Crunch*".

7. ENTREVISTES

a) Entrevista a L'ESOF

L'ESOF (EuroScience Open Forum) és una reunió de científics que es fa cada dos anys a una ciutat d'Europa i que Barcelona va guanyar com a seu per l'any 2008. També es fan diverses activitats pel públic en estands, on es pot parlar amb científics directament.

A l'estand de l'ASPERA (Astroparticle ERANet) trobem al professor Carlos Pobes de la Universitat de Saragossa, que està treballant en un projecte d'investigació a Canfranc, al Pirineu aragonès.

A l'estand hi ha un aparell, d'una mida considerable, en el que continuament es produeixen uns centelleigs lluminosos que el van recorrent de dalt a baix. També hi ha fotografies i mapes...

Atentament contesta les meves preguntes:

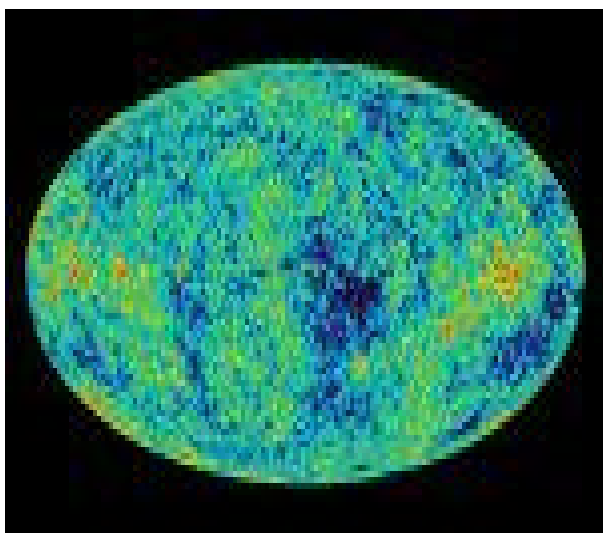
- Què és aquest aparell?

Es tracta d'un detector real de partícules carregades anomenades *muons*, visibles per la traça lluminosa que deixen en passar, procedents directament de l'espai. La matèria que coneixem representa només el 4% de la matèria total de l'Univers i la física d'astropartícules, un nou camp emergent en la intersecció de la física de partícules, l'astronomia i la cosmologia, pretén donar resposta a preguntes fonamentals com ara, de què està fet l'Univers?.



- Què és la matèria fosca?

Es diu així a la matèria que no emet llum i que és la major part de l'Univers. Es pensa que poden ser un tipus de partícules encara no descobertes, anomenades partícules massives dèbilment interaccionants (WIMP en anglès, Weakly Interacting Massive Particles). Al Pirineu existeix el Laboratori Subterrani de Canfranc (LSC), un laboratori subterrani concebut per a dur a terme experiments de física de partícules i per detectar-les. És l'únic laboratori subterrani a l'Estat espanyol i és el producte d'un consorci entre el Ministeri de Ciència i Innovació, el Govern d'Aragó i la Universitat de Saragossa. L'entrada principal del laboratori es localitza a 3.3 km des del costat espanyol del túnel de carretera de Somport, a Canfranc (Aragó). Està situat sota un cim dels Pirineus anomenat El Tobazo, el qual proporciona un escut contra els raigs còsmics equivalent a aquell que proporcionarien 2.450 metres d'aigua.



- Què és aquesta imatge?

És la millor prova del Big Bang. La llum procedent d'aquesta explosió, en el transcurs del seu viatge, canvia de freqüència fins arribar a les microones. Aquest descobriment es va fer l'any 1965, i és el que es coneix com a fons còsmic de microones. Al 1992 es va llançar a l'espai el satèl·lit COBE, i després el WMAP amb la intenció de detectar les petites fluctuacions de les radiacions de temperatura. Aquestes fluctuacions apareixen com a variacions del color en la imatge, i són molt importants per saber com era l'Univers primitiu.

- Em pot comentar algun descobriment recent sobre el Big Bang?

Les darreres dades obtingudes per diferents equips de científics indiquen que l'expansió de l'Univers s'accelera en comptes de anar-se desaccelerant. Això vol dir que existeix més energia de la que detectem. Per què et facis una idea, si hem dit que la matèria coneguda de l'Univers és un 4%, i la fosca el 27%, aquesta energia fosca es la resta, un 73%; encara no sabem quin és el seu origen, ni explicació.

Per últim el professor Pobes ens convida a veure un altre estand, "Feel like a quark", que té també relació amb el Big Bang.

En aquest estand trobem el professor Marco Costa de la Universitat de Turí, que parla una mica castellà. No ens pot atendre gaire ja que l'esperen las cameres de la televisió que venen a filmar un espectacle de dansa que es fa en relació als quarks. Ens ensenya un muntatge del Laboratori que està a Suïssa superposat a la ciutat de Barcelona, per que ens fem una idea de las seves dimensions.

I em comenta que els quarks son els components bàsics de la matèria, i que els experiments que es fan en el LHC (Large Hadron Collider) pretenen descobrir, entre altres coses, què va poder passar en els primers instants del Big Bang, i en especial quin és l'origen de la matèria fosca, i per què s'observa que prepondera la matèria sobre l'antimatèria.

Pàgina web de l'ASPERA

<http://www.aspera-eu.org/>

Pàgina web del laboratori Subterrani

<http://ezpc00.unizar.es/lsc/index2.html>

b) Conversa a l'Agrupació Astronòmica de Sabadell

He anat a fer una entrevista al senyor Daniel Roig, físic que treballa a la UAB, i que és membre de l'Agrupació Astronòmica de Sabadell, (<http://www.astrosabadell.org/>) entitat sense ànim de lucre fundada l'any 1960, les finalitats de la qual són la incentivació i suport a l'astronomia amateur, i la divulgació i didàctica de l'astronomia. També és societat col·laboradora associada de la SEA (societat espanyola d'astronomia).

He parlat amb ell, a la seu de l'Agrupació, sobre diversos aspectes, els quals m'ha anat aclarint amb la seva experiència.

Com es va originar la teoria del Big Bang?

Què va verificar Hubble?

Què és la constant cosmològica?

Què és la matèria fosca

Quina serà la fi de l'Univers?

El senyor Roig ha explicat el següent:

La primera indicació clara de l'existència del Big Bang va provenir de la comprovació que tot s'allunyava de nosaltres, o més ben dit que tot s'allunyava de tot; això ja feia sospitar que si "rebobinàvem" cap enrere, tot havia de sortir d'un punt. Així va començar la cosmologia moderna i la idea del Big Bang. Expressat en termes més correctes l'Univers va començar a tot arreu i en cada punt, i es va anar expandint.

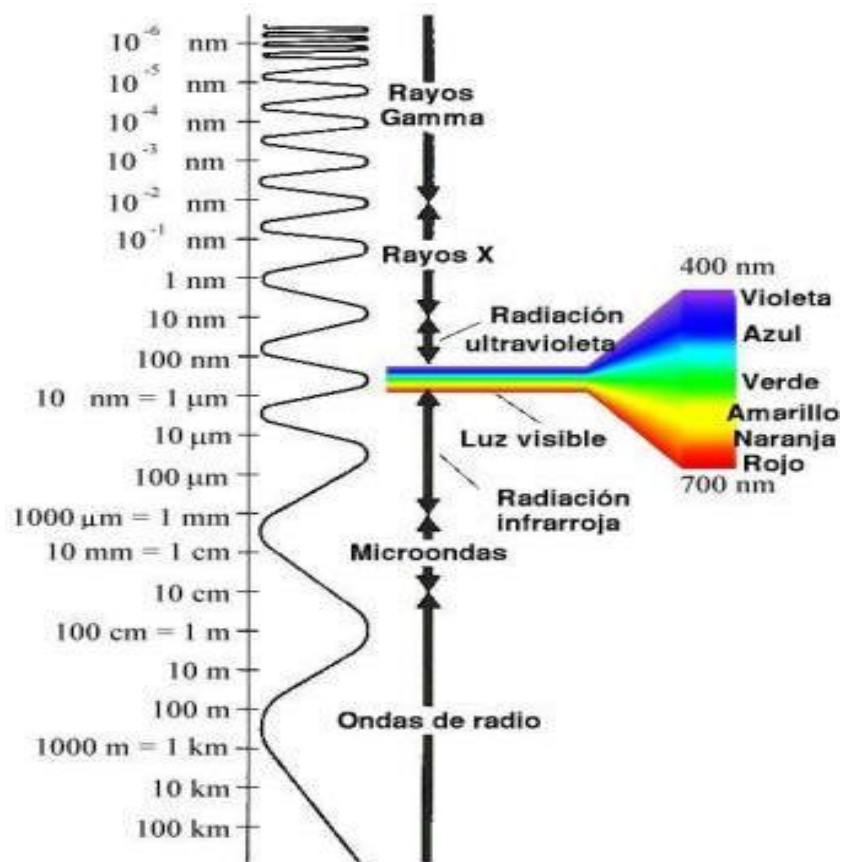
En el moment en que Hubble va verificar aquest allunyament i va publicar el seu descobriment, cap als anys 20, es pensava en un Univers infinit, la qual cosa era incompatible amb que tot va sorgir d'un punt, és a dir amb una expansió.

Uns anys abans, Einstein ja havia creat la teoria de la relativitat, suposant que l'Univers era infinit i etern, com la majoria dels físics d'aquella època. Amb la teoria de la relativitat havia aconseguit fer un model matemàtic d'Univers i ell volia arribar a la conclusió que l'Univers era estàtic o quiet i etern; però, perquè fos estàtic, aquest Univers necessitava alguna cosa que el tirés cap enfora, ja que segons les equacions d'Einstein, la relativitat general ens diu que la matèria deforma l'espai; si l'Univers fos estàtic tendria a fer-se petit; es contrauria

per efecte de la massa, ja que la massa s'atreu entre ella; llavors va pensar en una força que compensés la força d'atracció: a aquesta força li va dir **constant cosmològica**. És com l'exemple de la piscina plena de pilotes, on aquestes pilotes representen les galàxies; l'atracció entre elles provocaria un col.lapse; per evitar aquest col.lapse, calia compensar aquesta deformació; aquesta és la raó de la introducció de la constant cosmològica en la seva equació.

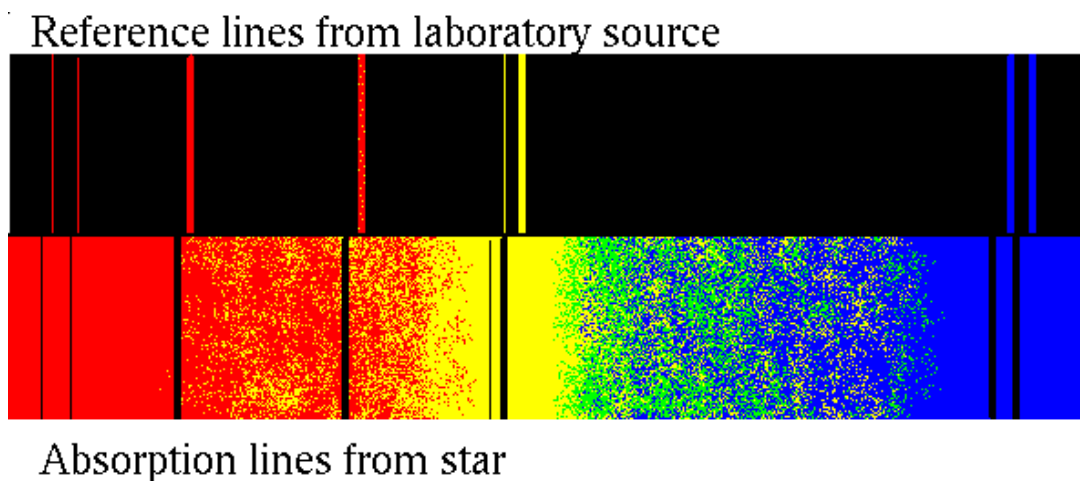
$$G_{\mu\nu} = -8\pi T_{\mu\nu}$$

Hubble va veure que les galàxies com més lluny estaven més "vermelles" es veien; això és l'efecte Doppler. Sabem que quan una font sonora s'allunya de nosaltres, les ones són més llargues; el mateix passa amb la llum visible, que està formada per ones electromagnètiques, com les de radio, l'ultraviolada, els raigs X, etc. De tot l'espectre només podem veure unes longituds concretes.



En un extrem està el blau, corresponent a les ones més curtes i en l'altre el vermell, corresponent a les més llargues; per això si s'està allunyant la font lluminosa, com les longituds d'ona són més llargues, es diu que l'espectre està desplaçat cap al vermell.

Hubble treballava amb aparells que li donaven l'espectre de la llum que arriba dels estels; la llum arriba amb una certa longitud d'ona. Cada element químic té un espectre que el distingeix; per exemple les bombetes que veiem que són grogues perquè emeten la llum en aquest color; si mirem l'espectre d'un estel veurem unes línies, que identifiquen els seus elements, per exemple hidrògen.... El que va veure Hubble és que estaven envermellint, desplaçant cap al vermell, és a dir alluyant-se. I a més a més també va deduir que la velocitat amb què s'allunyaven era proporcional a la distància a la que es trobaven. Ara s'anomena la Llei de Hubble. Aquesta demostració de la expansió va fer que Einstein eliminés la constant cosmològica de les equacions i va dir que havia estat el major error de la seva vida.



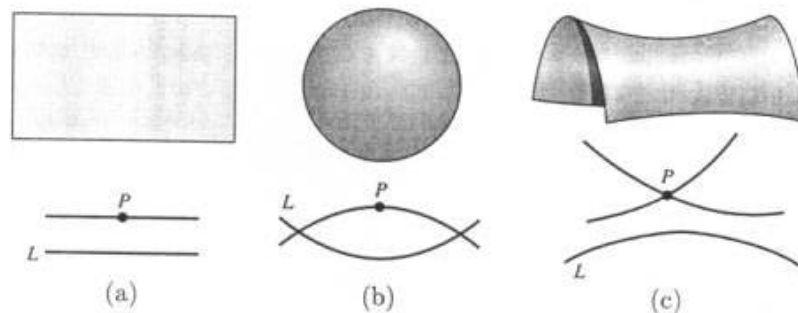
La llei de Hubble ens diu que les coses més llunyanes s'allunyen més ràpidament: d'una banda l'Univers s'està expandint, però de l'altra la massa total està evitant que s'expandeixi, és a dir, està frenant l'expansió. Hi ha dos opcions possibilitats: o que se segueixi expandint o que es pari; depèn de la massa. Si hi ha molt poca massa no és parerà mai l'expansió, i si hi ha molta massa, llavors es parerà en algun moment i es contreurà; passarà el que es diu **Big Crunch**.

En realitat no es pot parlar de molta o poca massa, perquè l'Univers pot ser infinit, sinó que es parla de densitat, "O", és a dir de quanta massa hi ha en un cert volum d'espai.

- si ρ és més gran que ρ_c , té molta massa. Passarà el **Big Crunch**,
- si ρ és més petit que ρ_c té poca massa, i s'anirà expandint per sempre i les galàxies cada cop estaran més allunyades.
- en el cas que fos igual a ρ_c , s'expandiria cada vegada més a poc a poc i al final es pararia.

No tothom està d'acord, ja que potser no s'acabaria de parar mai, si tingues una mica més de massa o una mica menys, es podria parar i tornar enrere o no parar mai; dependria de la massa crítica.

Segons la relativitat en cada cas tindrem un Univers amb una geometria diferent. En el tercer cas l'Univers serà pla; això, per exemple vol dir que si fas un triangle enorme a l'espai, la suma dels angles dóna 180° . En el segon cas et sortiria un Univers obert, que vol dir que la suma dels angles del triangle et donaria més gran que 180° ; i en el primer cas, és tancat com en una esfera, si dibuixes un triangle i sumes els angles et donaria més petit que 180° .



En aquest moment totes les observacions diuen que l'Univers és pla. Ara bé, si sumem tota la matèria que veiem, el resultat és més petit que 1; però observant les galàxies que giren, s'ha vist que giren molt més ràpid del que es pensava. La conclusió és que ha d'existir un altre tipus de matèria que no veiem, ja que no interacciona amb la llum, i que es diu matèria fosca. Aleshores si sumem les dues quantitats de matèria es pot arribar a dir que la densitat del Cosmos és igual a 1.

A finals del segle passat es van fer mesures per determinar amb exactitud els paràmetres cosmològics per intentar saber quina era la velocitat i acceleració de la expansió, i en quina

mesura s'estava frenant; això es va fer per saber en quin cas estem, ja que segons si es frenés molt o poc, voldria dir que tindria molta o poca massa. Fa uns 10 anys es va aconseguir mesurar amb precisió, i el resultat va ser que no estava frenant, ni poc ni massa si no que s'estava accelerant; es va trobar per tant que hi ha alguna cosa que feia que les coses s'allunyessin molt ràpid. La manera més senzilla de dir com pot passar això es afegir de nou la constant cosmològica, que Einstein havia rebutjat i que provocaria aquesta acceleració. Avui es pensa que l'Univers és pla, i que només un 4% de tot l'Univers és la matèria que veiem: estrelles, galàxies, gasos, àtoms..., un 24% es matèria fosca (*dark mater*), i la resta seria aquest energia fosca (*dark energie*). Aquestes proporcions varien al llarg del temps; ara tens una energia fosca o del buit com es diu en alguns llocs i de la que no encara no tenim una idea clara del que representa, i que guanya a la matèria, per això s'accelera.

Al començament de l'Univers, les proporcions de matèria i llum o radiació, eren diferents a les ara; al principi la radiació era més densa que ara. Pensa que la radiació són fotons, és a dir ones, i les ones tenen una longitud; en cada etapa la foto de la omega o sigui de la densitat és diferent. Al principi les ones són més curtes i ara degut a la expansió, són més llargues; la longitud va passant per les diverses zones, per l'infraroig fins que arriba a la zona de les microones, i d'aquí ve el nom del fons de microones; es la energia que ve del començament de l'Univers que s'ha anat envermellint debut a l'expansió; cada vegada tens menys fotons per metre cúbic, ia menys energia ja que els fotons vermells tenen menys energia que els blaus; per exemple, en una flama, la part blava que es la mes calenta és la del centre i la part vermella és la de fora. El que vull dir és que al començament domina la radiació sobre la matèria, després ha un moment on s'igualen, i va passant el temps i tens que ara la densitat de la matèria és la que domina.

L'Univers té 14.000 mil d'anys, l'inici és el Big Bang; d'abans no en sabem res. Imaginem que agafem dos punts molt propers; hi ha un moment, ho pots veure en els diagrames que representen les etapes del Big Bang, que de sobte s'expandeixen; a aquest fenomen li diuen *inflació*. És una teoria que diu que un instant del començament del Big Bang, l'Univers es va expandir molt ràpid; no se sap la causa, però serveix per explicar moltes coses; per exemple per explicar per què ara pensem que l'Univers és pla.

Tornem al instant en que la densitat de la matèria, entenen tota la matèria visible i fosca, és igual a la densitat de radiació, temps que en cosmologia es diu temps d'igualtat; en aquest

instant l'Univers s'expandeix més lentament, degut a aquest fet; llavors les petites perturbacions que hi hagi, poden créixer. És quan es formen els primers cúmuls de matèria, que es van ajuntant. L'Univers s'està expandint i a l'hora s'està refredant; els fotons tenen menys energia, i arriba un moment que ja no poden xocar amb la matèria; pensa que fins ara tot estava junt, radiació i matèria, les dues coses poden xocar, tenen càrrega per exemple, però arriba un moment en que la temperatura baixa prou perquè ja no puguin xocar. Què passava fins ara?, doncs que els electrons i el protons es volien ajuntar però el fotons no els deixaven, es posaven pel mig; però a partir d'aquest moment el fotó ja té força, i el protó i electró queden lligats; com que la suma de càrrega $+1 -1$ de cadascun, dóna 0; els fotons no els veuen, ja que només poden xocar amb coses que tenen càrrega elèctrica.

Això va succeir quan la temperatura va baixa per sota dels 3000K. En aquest moment es diu que el redshift és 0; perquè tinguis una idea, ara el seu valor és 1, quan les galaxies estaven a la meitat de distància que ara, el valor era $\frac{1}{4}$. Es tracta d'un factor d'escala, com en un mapa per mesurar la evolució de l'Univers. Sempre ha estat menor que 1, i a partir d'ara serà més gran que 1; una forma de escriure-ho és A/A° . Pots utilitzar el temps o pots parlar del factor escala. Tornem al tema dels fotons. Com que cada vegada tenen menys energia, els electrons es queden enganxats amb els protons perquè els fotons ja no els poden separar, i aquest moment es diu el temps o la etapa de recombinació, que vol dir en realitat que es combinen, ja que fins en aquest moment no s'havien combinat; els fotons que fins ara anaven xocant contra tots, a partir d'aquest moment ja no xoquen contra res. És similar per exemple, el cas de la boira, la llum no passa, perquè els fotons xoquen amb les partícules d'aigua que hi ha a l'aire, contra les primeres i per tant no passen i no veiem que hi ha mes enllà.

Com que a partir d'aquest moment els fotons ja no xoquen, van rectes, queda un núvol de fotons que és el que es coneix com a fons còsmic de radiació, en la seva forma actual; pensem que amb el temps han esdevingut menys energètics, i han arribat molt diluïts, molt dispersos, i tenen una longitud d'ona en la franja de les de micrones. Aquests fotons son molt importants en la cosmologia perquè ens arriben directament d'aquest període inicial del Big Bang, quan els protons i electrons començaven a combinar-se; i per tant l'Univers era més homogeni que ara, era tot igual, no hi havia estrelles ni galàxies; així podem estudiar com era l'Univers en aquella etapa, és a dir, és la situació més antiga que podem observar directament.

La matèria s'anava agrupant fins que va arribar un moment que estava tant agrupada que es van formar les primeres estrelles. Quan l'Univers era una dissetena part de com és ara, és a dir quan era disset vegades més petit, es van formar les primeres estrelles, les primeres galàxies, i les primeres fonts de llum; ja que fins a aquest moment la llum era la de tot l'Univers, la de la capa de fons. Més endavant és quan es pensa que la energia fosca és la que domina; la densitat total sempre és la mateixa, però ara estem dominats per aquesta energia, que és el que fa l'Univers s'acceleri. I es creu que cada vegada s'accelerirà més ràpid, fins que arribi un moment que s'acabaran de formar les estrelles i les galàxies; es refredarà, i les estrelles s'aniran morint, l'Univers aleshores serà un lloc molt fosc, molt fred i així s'acabarà .. fins que hi hagi un altre big bang, si és que n'hi ha una altre!

c) Entrevista Alberto Manrique

Alberto Manrique és doctor en astrofísica i professor del Departament d'Astronomia i Meteorologia de la Universitat de Barcelona. Actualment, la seva línia d'investigació se centra en la cosmologia, en particular en les estructures còsmiques; tasca que compagina amb l'ensenyament.

He parlat amb ell a la facultat de Física i ha contestat atentament a les meves preguntes sobre la inflació, l'energia fosca, línies d'investigació actuals i futures sobre l'Univers i el seu destí, etc. Això és el que ell ha explicat:

“La inflación es una teoría que nos ayuda a comprender algunos de los problemas que se plantea la cosmología actual. En el momento actual todavía no ha sido comprobada. Pero basándose en ella, se han realizado algunas predicciones, teóricamente bastante complejas, que podrían ser verificadas por la misión de exploración WMAP, en los próximos años; el handicap es que la precisión necesaria que puede alcanzarse con la misma ronda el límite observacional preciso para alcanzar el éxito.

La misión WMAP está analizando lo que se llaman las “anisotropías” que presenta la radiación de fondo. El origen de las mismas, se cree que puede provenir de dos posibles fuentes: una sería lo que se llaman efectos gravitatorios normales o escalares, y otra que

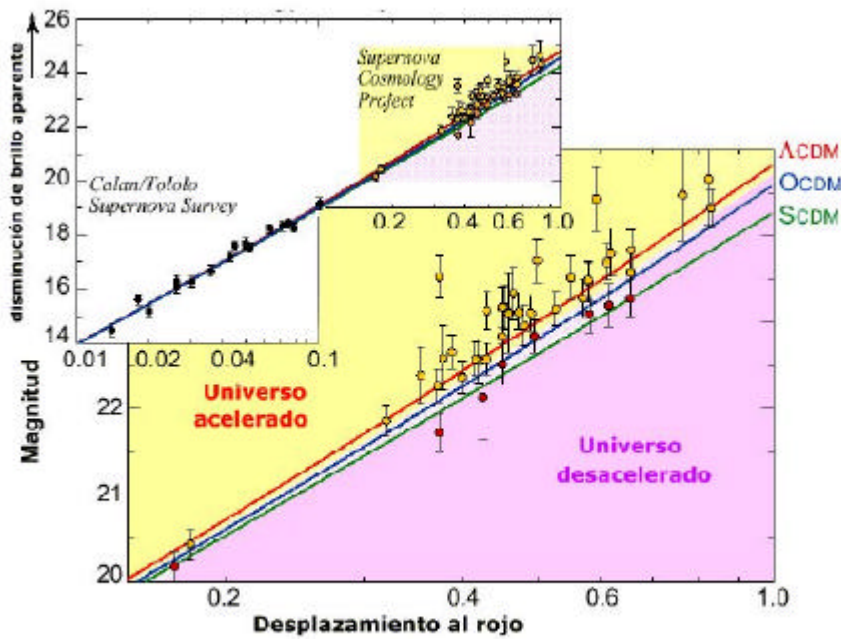
las llamadas ondas gravitatorias; en ambos casos la teoría inflacionaria hace unas predicciones que con el tiempo se podrían comprobar. Hay que decir que en el futuro está prevista una misión más específica, se llama Planck y es de la ESA; su objetivo primordial es analizar con mayor detalle éstas anisotropías de la radiación de fondo de microondas. Si finalmente se lograra comprobar alguna de esas predicciones, sería la prueba definitiva a favor de la idea de la inflación, y sería considerada una teoría física real, no solo una hipótesis teórica.

Recalco este punto, porque seguro que habrás oído hablar mucho de ella, fuera del contexto de la física; ha tenido cierta trascendencia en los medios, revistas, programas de TV, etc. Ten en cuenta que en la Física las teorías han de ser debidamente comprobadas, y para ello se han de realizar experimentos, es decir verificarlas en detalle; si no se obtienen datos que las comprueben, a través de medidas directas o indirectas, observaciones o pruebas de laboratorio, los científicos la descartan. Eso sucedió con la teoría de la relatividad, que como ya sabes o habrás leído, no se impuso en la física moderna hasta que se confirmó una de sus predicciones, en la observación de un eclipse de sol. La inflación es en este sentido una teoría popular, que puede explicar muchas cosas y que, dicho sea de paso plantea temas muy interesantes, pero no hay evidencias de ella hasta el momento. Y por último, en mi opinión, en el caso que al final se verificara, los físicos teóricos que la pensaron, a buen seguro que conseguirán el premio Nobel de Física.

Otra línea de investigación actual sobre el Universo inicial en cosmología es la energía oscura; también está de moda en los medios; y sobre la que se están invirtiendo bastantes recursos y esfuerzos para determinar su causa. Curiosamente se ha retomado una idea antigua de Einstein, la constante cosmológica. Primero éste, supuso que el Universo era estático ya que no pensaba que estuviera en expansión; pero para que tal fenómeno no se dedujera de sus ecuaciones, tuvo que introducir un término que llamó constante cosmológica; supongo que ya has oído hablar de la misma. Pero ahora, en el nuevo escenario que se nos presenta, no está definido qué tipo de energía significa o que quiere representar éste término. En pocas palabras, este término está en una ecuación, llamada ecuación de estado, y es una relación entre la densidad y la presión; el resultado final nos da unos valores diferentes en forma de un parámetro cuyo valor habrá que determinar.

Para ello se están realizando observaciones de un determinado tipo de supernovas. Las supernovas se llaman así porque son remanentes de una gran explosión ocurrida en el pasado. El tipo específico de supernovas objeto de la investigación resulta que presentan un máximo intrínseco de luminosidad que siempre tiene el mismo valor; de esa manera se puede determinar su distancia por el brillo aparente que presentan. Estudiando los valores que se obtienen se puede hacer una gráfica, lo que da una idea del ritmo de expansión del Universo; los resultados indican que el ritmo obtenido no es compatible con una expansión lenta.

1



La investigación actual se traslada también al campo de la física de partículas y a los aceleradores, en especial al Gran Colisionador de Hadrones, LHC, puesto en marcha en Ginebra, y del que se hizo eco la prensa. Aunque se diga que, con el LHC se quiere simular el Big Bang no es así. Lo que se pretende hacer es simular unas condiciones parecidas a las que se dieron en el Big Bang, es decir energías i temperaturas muy altas; y a partir de ahí poder estudiar fenómenos relacionados con la aparición de las primeras partículas en el Universo.

La física de partículas es otra forma diferente de investigación en la cosmología actual, complementaria al estudio por los satélites de la radiación cósmica de fondo; también incluso de verificar la teoría de la inflación, aunque la base mas cierta, como te he indicado, sean las misiones espaciales.

El trabajo sobre el Universo primitivo lo llevan a cabo grandes grupos de investigación a nivel mundial. Solo conozco un grupo español, en la Universidad de Santander, que está colaborando con el equipo de la futura misión Planck. En España hay muy poca gente trabajando con el Universo primitivo; la mayoría de los grupos son americanos, porque los satélites COBE y WMAP son de la NASA; aquí en la U.B. y en la facultad nuestra, se realizan investigaciones pero a nivel de física de partículas.

En cuanto al destino final del Universo, ¿qué se decía antes del descubrimiento de la energía oscura?, pues que se expandiría indefinidamente, pero cada vez más despacio. Esto en función de los valores de los datos cosmológicos en este momento. Había una duda entre si el Universo era abierto o plano, que dependerá del valor de la densidad del Universo. Los valores, primero indicaban que era abierto, porque la densidad era menor que la densidad llamada crítica, y por tanto se seguiría expandiendo indefinidamente. Luego nuevos datos determinaron que el Universo es plano; y en éste caso el proceso actual de aparición de galaxias y estrellas seguiría, pero a medida que se fuera haciendo menos denso, y el combustible de las estrellas se fuera acabando provocaría un Universo realmente oscuro, estrellas muertas y nada más; es decir el Universo seguiría en expansión indefinida y a la vez se iría enfriando. Con el descubrimiento de la energía oscura, el escenario varía, en el sentido de que la expansión se acelera, y se piensa que el final será muy parecido al que ocurriría con un Universo abierto.

Voy a mencionarte otra hipótesis que hace referencia a la estabilidad del protón; éste, a diferencia del neutrón que en forma aislada es inestable, sí que es estable. Pero hay quien piensa que no es estable del todo, y que al ir pasando el tiempo, (hablando en términos de una escala de tiempo del Universo actual), se irá desintegrando. Es el caso, por ejemplo, que sucede en un tipo de estrellas llamadas enanas blancas, en las que llega un momento que están tan frías que no se ven; y solo existe una especie de bola sólida. En función de si los protones son o no estables tendríamos dos posibilidades de destino del Universo; si fueran estables, el Universo en el futuro estaría lleno de pedruscos fríos; y si los protones realmente no fueran estables, la materia se desintegraría y al final quedaría un Universo frío y vacío; pensemos que ahora la temperatura de la radiación cósmica de fondo es de 3°K, y al final llegaría a los 0°K, el cero absoluto, y habría una especie de sopa de partículas que cuesta de imaginar

Esto es lo que se piensa ahora, suponiendo que las teorías que tenemos son correctas. Quizás dentro de 20 o 30 años las teorías sean otras y se piense otra cosa; hay otras muchas ideas; por ejemplo unaa que dice que la energía oscura puede evolucionar hacia otro tipo de energía, y al final el Universo no se expandiría aceleradamente i que incluso dejase de expandirse en algún momento, pero creo que con esto ya tienes bastante materia para estudiar.

Quiero indicarte, por último, que la física es una ciencia que avanza y progresa constantemente, y en eso radica su belleza; y nunca se puede hablar de que las teorías actuales sean las verdaderas y últimas."

8. Darrerres noticias

Font : <http://www.uv.es/obsast/>

Los superordenadores indican dónde mirar para ver la materia oscura (7/11/2008, de Plataforma SINC)

Un equipo internacional de astrofísicos, dirigido por Volker Springel, del Instituto Max Planck de Astrofísica, ha utilizado varios de los superordenadores más grandes de Europa para indicar al más reciente observatorio espacial de la NASA, el telescopio Fermi, hacia donde apuntar para ver la misteriosa materia oscura que compone el Universo. Los resultados del estudio se publican hoy en la revista Nature.

Fermi lleva ya varios meses explorando el cielo, en la longitud de onda de rayos gamma, una forma de radiación que posee más energía que los rayos X. En un par de años, podría detectar el "brillo" de la materia oscura, cuyos efectos gravitatorios fueron descubiertos por los astrónomos hace más de tres cuartos de siglo, pero que hasta la fecha se ha mantenido obstinadamente invisible a todos nuestros telescopios, a pesar de que, aparentemente, constituye el 85% de la materia del cosmos.

La mayor parte de los cosmólogos cree que esta materia oscura es un nuevo tipo de partícula que todavía no se ha detectado en la Tierra (si bien el Gran Colisionador de Hadrones podría proporcionar pruebas de ello cuando se reparen sus imanes). En las condiciones adecuadas, estas partículas podrían producir rayos gamma que permitirían su detección por el telescopio Fermi.

Pero ¿dónde debe buscar el telescopio Fermi para ver esta firma de rayos gamma de la materia oscura? Un equipo de astrofísicos de Alemania, Reino Unido, Canadá y Países Bajos (el "Consortio Virgo") ha utilizado uno de los superordenadores más grandes de Europa para simular la formación de la estructura de materia oscura que rodea a una galaxia, como nuestra Vía Láctea. Esos "halos de materia oscura" son más de 1.000 millones de veces más masivos que nuestro Sol, y son las unidades básicas de la estructura del cosmos.

Un nuevo detector ayudará en la búsqueda de la materia oscura (12/12/2008, de MIT)

Están en marcha varios proyectos de investigación que intentan detectar partículas que podrían constituir la misteriosa "materia oscura" que se cree que domina la masa del Universo. Pero los detectores que existen actualmente tienen un problema: también recogen partículas de materia ordinaria - neutrones rápidos como el rayo que enmascaran las evasivas partículas de materia oscura que los instrumentos están diseñados para encontrar.

La físico Jocelyn Monroe del MIT tiene una solución. Un nuevo detector construido por ella y sus estudiantes acaba de finalizar sus pruebas iniciales en el Laboratorio Nacional de Los Alamos. Cuando sea instalado durante los próximos meses junto con los detectores de materia oscura que ya existen, el nuevo aparato debería de identificar todos los neutrones ordinarios que lleguen, considerando todo lo demás que el otro detector detecte como un fuerte candidato a constituir la materia oscura.

Descubren a la energía oscura suprimiendo el crecimiento en el Universo (17/12/2008, de NASA)

El observatorio de rayos X Chandra ha tomado una imagen del cúmulo de galaxias Abell 85 en el que el gas a una temperatura de varios millones de grados resplandece con un color púrpura. Esta imagen ha sido combinada con una imagen óptica del Sloan Digital Sky Survey. Este cúmulo de galaxias es uno de los 86 observados por Chandra para

estudiar cómo la energía oscura ha impedido el crecimiento de estas estructuras masivas durante los últimos 7 mil millones de años. Los cúmulos de galaxias son los objetos más grandes ligados por la gravedad del Universo y son ideales para el estudio de las propiedades de la energía oscura, la misteriosa forma de gravedad repulsiva que está alimentando la expansión acelerada del Universo.

Comprender la naturaleza de la energía oscura es uno de los mayores problemas en ciencia. Las posibilidades incluyen la constante cosmológica, el equivalente a la energía del espacio vacío, una modificación de la relatividad general a grandes escalas o un campo físico más general. Para ayudar a discernir entre estas opciones, se utilizó Chandra para observar el incremento en la masa de cúmulos de galaxias durante los últimos 7 mil millones de años. Los resultados son consistentes en gran medida con los de resultados previos que miden la expansión del Universo utilizando medidas de distancias, revelando que la relatividad general funciona como se esperaba en escalas grandes. El trabajo en cúmulos, junto con otros estudios, proporciona también los indicios más sólidos hasta la fecha de que la energía oscura es la constante cosmológica, o "que nada pesa algo".

9. CONCLUSIÓ

L'objectiu principal per mi en començar a fer aquesta recerca era tractar d'esbrinar quin es creu que serà el destí final de l'Univers, amb els coneixements científics de què es disposa actualment. També m'interessava molt conèixer com es va originar l'Univers, com i quan va tenir lloc el Big Bang, en quin punt de la seva evolució es troba ara i com s'ha arribat, pas a pas, a elaborar aquestes teories.

Després de realitzar aquest treball me n'adono que he après moltes coses al voltant de l'Univers i del seu origen, i he constatat per què la teoria del Big Bang és la reconeguda actualment pels científics com a explicació de l'origen de l'Univers. M'ha sobtat el que sembla que serà el final del nostre Univers, la foscor i la fredor total, segons diuen els científics, encara que això pot canviar en un futur, amb les noves línies d'investigació que s'estan seguint actualment i els nous descobriments que es duen a terme contínuament.

He conegut, amb la realització del treball, moltes nomenclatures i termes científics que m'eren desconeguts fins a aquest moment i que m'han servit per l'estudi d'aquest tema; com ara la inflació, la retrogradació dels planetes, la curvatura de l'espai, l'energia fosca, la radiació còsmica de fons, l'acceleració de l'Univers..., etc. I també que les teories de la ciència no són vàlides fins que no es comproven experimentalment.

He trobat molt interessants i m'han ajudat molt per entendre millor tots aquests conceptes, les explicacions de les persones que he entrevistat, les quals treballen en aquests temes i dels quals tenen molts coneixements; m'ha agradat conèixer les seves opinions.

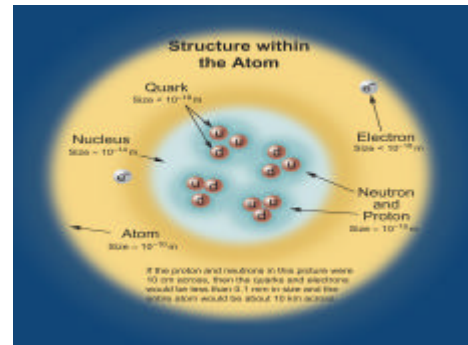
A més a més, elaborar aquest treball m'ha servit, a nivell personal, per saber-me organitzar millor, recopilar informació, resumir i sintetitzar,...

10. GLOSSARI

Quarks: són els constituents fonamentals de la matèria i les partícules més petites que l'home ha aconseguit identificar.

Els quarks es combinen de manera específica per a formar partícules com ara protons i neutrons.

Leptó: un lepton és una partícula amb espín $-1/2$ (un fermions) que no experimenta interacció forta (és a dir, la força nuclear forta). Els leptons formen part d'una família de partícules elementals coneguda com la família dels fermions, igual que els quarks.



Gluó: El gluons (de la veu anglesa GLUE 'pegament', derivada al seu torn del llatí gluten a través del francès gluer 'enganxar') no té massa ni càrrega elèctrica, però sí càrrega de color, pel que a més de transmetre la interacció forta també la pateix. La teoria que postula l'existència dels gluons i descriu la seva dinàmica s'anomena Cromodinàmica quàntica. El nom fa referència a "cola" (GLUE), es deu a aquestes partícules són les que "uneixen" els quarks dins dels nucleon.

Positró: electrons però amb càrrega negativa.

Hadró: és una partícula sensible a la força nuclear forta. Els hadrons es componen de quarks i per tant no són partícules elementals, sinó compostes.

Segons el nombre de quarks que formen els hadrons, poden ser de dues menes:

- **Barions:** formats per 3 quarks.
- **Mesons:** formats per 2 quarks.

11. BIBLIOGRAFIA

Llibres

Big Bang

Manel Sanromà
Editorial UOC, 2008

¡BANG!. La Historia completa del Universo

Brian May, Patrick Moore, Chris Lintutt
Editorial Crítica, 2007

Biografía del Universo

John Gribbin
Editorial Drakontos, 2007

Los tres primeros minutos del Universo

Steven Weinberg
Editorial Alianza, 1980

La evolución de nuestro Universo

Malcom S. Longair
Editorial Cambridge

Orígens

Museu de Ciències Naturals. Ajuntament de Barcelona

Revistes

Revista de Física/ Vol 4(2) (2007)

Investigación y Ciencia, nº 380

Investigación y Ciencia, nº 387

Webs

<http://home.earthlink.net/~astronomia/entrada.html>

www.geocities.com/angelto.geo/cosmo/cosmo.htm

<http://www.das.uchile.cl/~mhamuy/courses/AS42A/capitulo2.html>

http://astronomia.net/cosmologia/#Curso_b%E1sico_de_cosmolog%EDa

es.wikipedia.org/wiki/Big_Bang