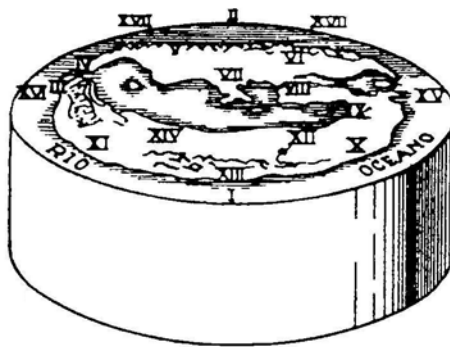


KOSMOLOGIAREN HISTORIA

Historian zehar teoria asko garatu dira unibertsoa azaltzeko. Kultura bakoitzak bere ereduak garatu du, unibertsoaren hasiera eta egitura azaltzeko. Teoria hauek zientziaren aurrerapenekin aldatu egin dira, datu berriekin bat etortzeko. Baina unibertsoaren ereduak gehienetan filosofia eta erlijioarekin lotuta egon dira.

Lehengo kulturetan unibertsoaren ideia Lurrarekin bat zetorren, zibilizazio horien bidaiatzeko ahalmena txikia zelako eta, horrexegatik, haien munduko mugak oso txikiak zirelako. Honela, Lurreko bizilekua gutxi gorabehera lautzat hartuta, unibertsoa lau zela uste izan zuten. Unibertso hori, batzuen ustez, infinitua zen eta beste batzuen iritziz mugatuta zegoen (itsasoarekin, mendi altuekin eta abarrekin,..). Eredu hauetan erlijioak garrantzi handia zeukan, eta erlijio bakoitzak bere unibertsoa zeukan, zegokion mitologiarekin.

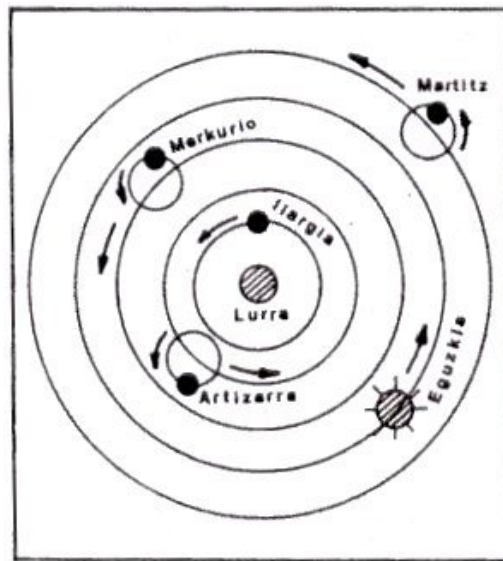


1. Irudia. Mileto-ko ANAXIMANDROren unibertso zilindrikoa.

Greziarren garaian teoria batzuk sortu ziren unibertso lauaren kontra. Mileto-ko ANAXIMANDRO (611-564 Kristoren aurretik) unibertso zilindriko baten alde azaldu zen. Gero ARISTOTELESEK (384-322 K.a.) unibertso esferiko bat defendatu zuen, fenomeno batzutan oinarrituta. Itsasontziak itsasotik urruntzean, desagertzen zen lehenengo gauza kaskoa zen. Hau norabide guztietan gertatzen zen, orduan kurbadura berbera egon behar zen norabide guztietan. Gainera ilargi-eklipseetan agertzen zen itzala azaltzeko, Lur esferikoa behar zen.

Unibertsoaren mugak handituz joan ziren, eta behin Lurraren esferikotasuna onartua izan zenean, teoria batzuk garatu ziren, Lurra unibertso erdian kokaturik. Hemen ere erlijioa eta filosofia agertzen dira, homozentrismo-ideiarekin. Homozentrismoan gizakia unibertsoaren erdian dago kokatuta, eta unibertsoaren gauzarik garrantzitsuena bihurtzen da.

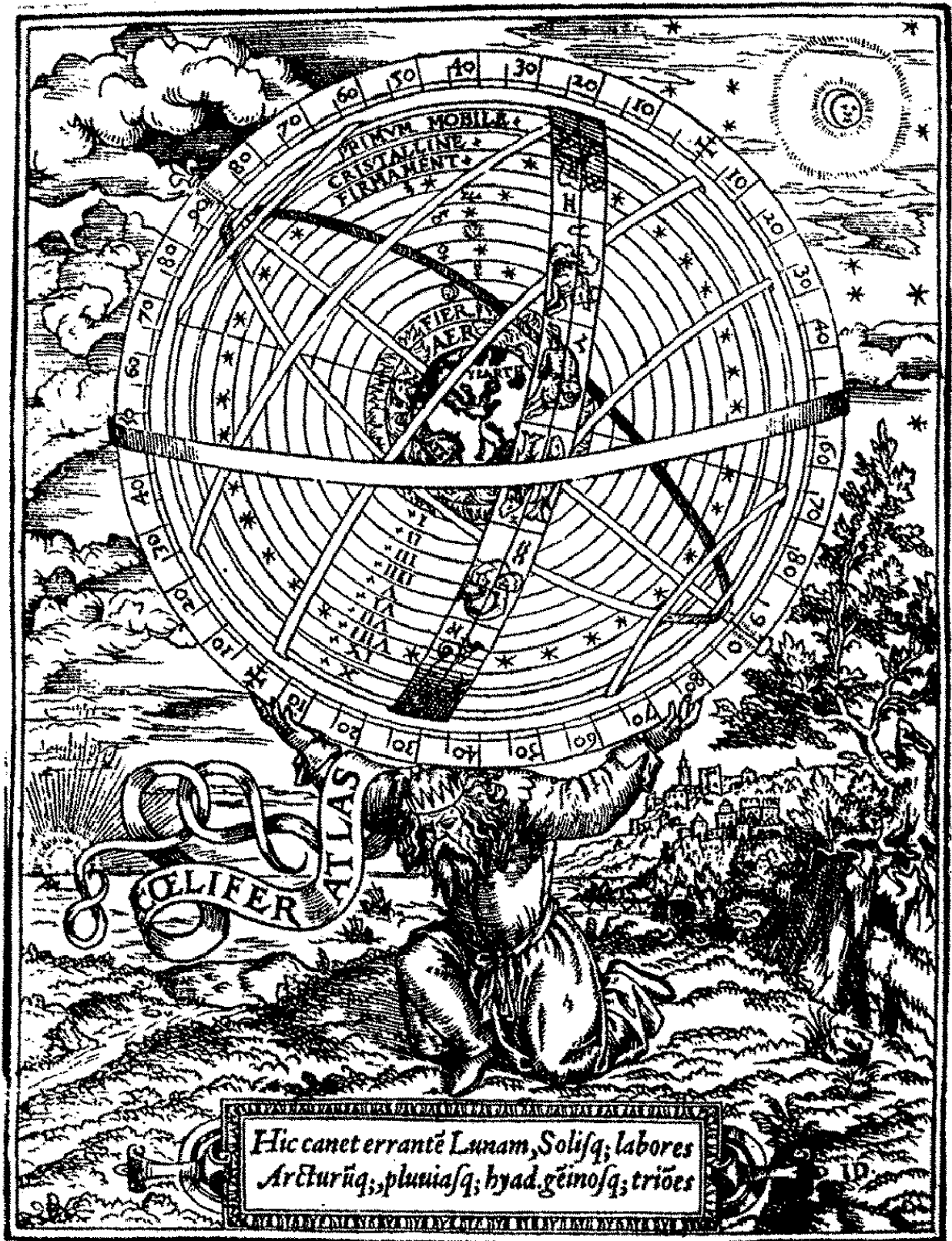
Teoria hauetako batek Lurra eta ilargia jartzen zituen esfera baten erdian, eta esferaren gainazalean izar finkoak zeuden. Eguzkia, ilargia bezala, biraka zebilen esferaren barruan orbita zirkularretan. Beste teoria bat PTOLOMEOrena (100-170 K.o.) izan zen. Teoria honek garrantzi handia eduki zuen, bosgarren mendetik hamabosgarrenera iraun baitzuen. Eredu honetan ere, Lurra unibertsoaren erdian zegoen, eta ilargia eta eguzkia biraka zebiltzan orbita zirkularretan. Baina planeten aurkikuntzak, horien agerpena ereduan zehaztera behartu zuen. Horrexegatik, zeruan zeukaten ibilbidea azaltzeko, eta Lurra unibertsoaren erdian aldi berean azaltzeko, orbita epizikloidalak erabili ziren.



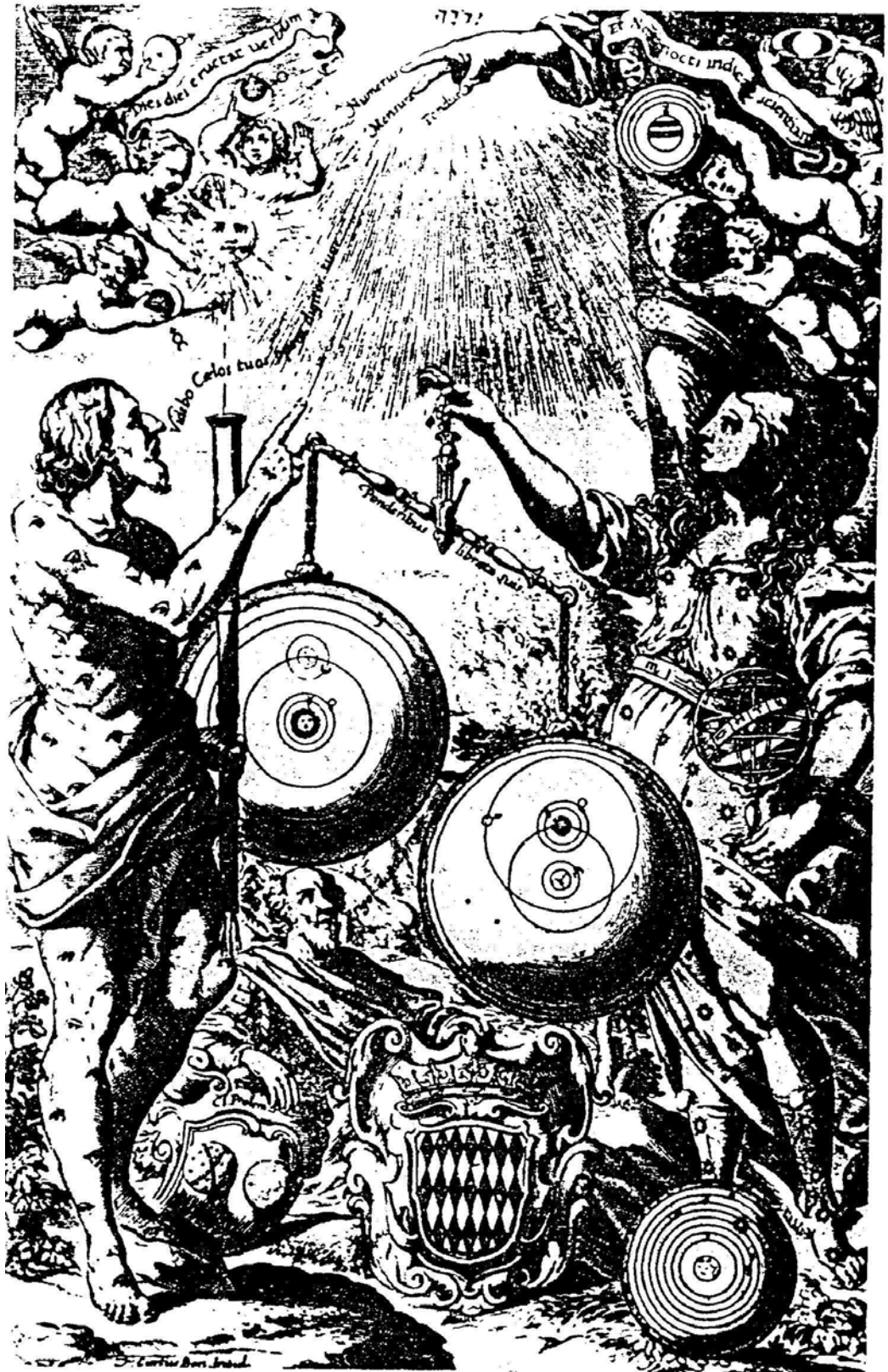
2. Irudia. PTOLOMEOren eredua.

Planeten ibilbideak ez zeuden oso ondo azalduta PTOLOMEOren ereduan, eta horrexegatik behar izan zen beste teoria bat. COPERNICO (1473-1543) izan zen teoria berri hori garatu zuena. Teoria horretan eguzkia unibertsoaren erdian kokatzen zen eta planetak biraka higitzen ziren orbita zirkularretan. Eredua garatzeko, printzipio batean oinarritu zen. Berarentzat Lurra ez dago unibertsoaren leku berezi batean. Honi *Copernico-ren printzipioa* deritzo. Ikus dezakegunez, eredu hau izugarritzko aurrerapena izan zen momentu haietan. Datu zientifikoak ondo interpretatzeko, homozentrismoa alde batean uzten zen, datu enpirikoak subjektibotasunaren gainean nagusituz.

Baina COPERNICOREN lanak ez ziren kontutan hartu, eta ahaztuta geratu ziren. Orduan TYCHO BRAHEK (1546-1601) beste eredu bat plazaratu zuen. Lurra unibertsoaren erdian jarri zuen, homozentrismoaren ideia berriro erabiliz. Ilargia eta eguzkia biraka zebiltzan orbita zirkularretan Lurraren inguruan. Eredu honen aldaketa nagusia planeten orbitetan zegoen. Planetak eguzkiaren inguruan zebiltzan orbita zirkularretan, ezagunak ziren planeten orbitekin egokitze.



3. Irudia. PTOLOMEOren eredua.

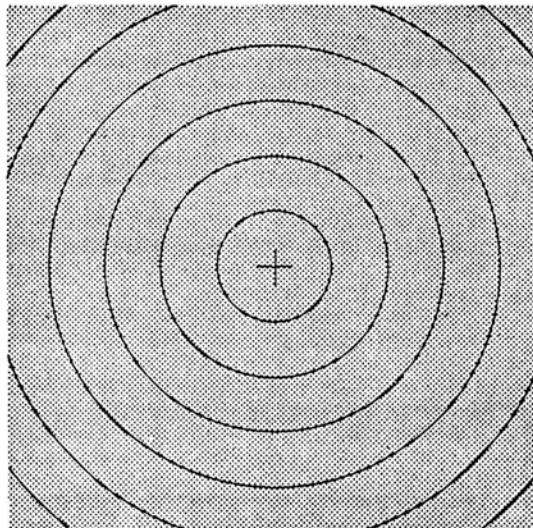


4. Irudia. COPERNICO, TYCHO BRAHE eta PTOLOMEOren ereduak.

Geroxeago COPERNICOn lanak ahaztuta zeudenez, GALILEO GALILEI (1564-1642) izan zen lan horiek berriro azaldu zituena. Teoria hau zabaltzeagatik arazoak eduki zituen inkisizioarekin, elizak pentsaera hori ez baitzuen onartzen. Beste aldetik, GALILEOk 1609. urtean teleskopioaren ideia garatu zuen. Gertaera hau oso inportantea izan zen, hortik aurrera teleskopioak gaeko zerua hobeto aztertzeke erabiltzen hasi zirelako.

Baina aurreko eredu guztiak ez ziren guztiz onak, planeten ibilbideak aurreanekin bat ez zetozen eta. TYCHO BRAHEk planeten posizioak neurtu zituen zehaztasun handiz. Gero JOHANNES KEPLERek (1571-1630), Tycho-ren dizipulua zenak, datu horiek eta berak lorturikoak erabili zituen *Kepler-en lege* famatuak ateratzeko. Lege horiek ondoko baieztapenak egiten zituzten: batetik, planetek orbita eliptikoak zeuzkatela, orbitaren foku bat eguzkian egonik, bestetik, planetaren eguzkiarekiko erradio bektoreak azalera berdinak estaltzen zituela denbora berdinetan, eta, azkenez, orbita egiteko behar zen periodoaren karratuak orbitako ardatzerdi handien hirugarren berreduraren proportzionalak zirela.

Geroxeago ISAAC NEWTONek (1642-1727) grabitazioaren teoria garatu zuen, eta bere mekanika aplikatuz, Kepler-en legeak frogatu zituen matematikoki. NEWTONen unibertsoa infinitua zen, infinitu izarrekin uniformeki banatuta. Materia, espazioa eta denbora guztiz independenteak ziren eredu horretan, eta bertan erabiltzen zen geometria euklidearra zen. Baina W. OLBERSek (1758-1840) bere paradoxa atera zuen espazio infinituaren eta izar-kopuru infinituaren kontra. Paradoxa hau aplikatzean, unibertsoa geruza esferikoetan zatitzen da.



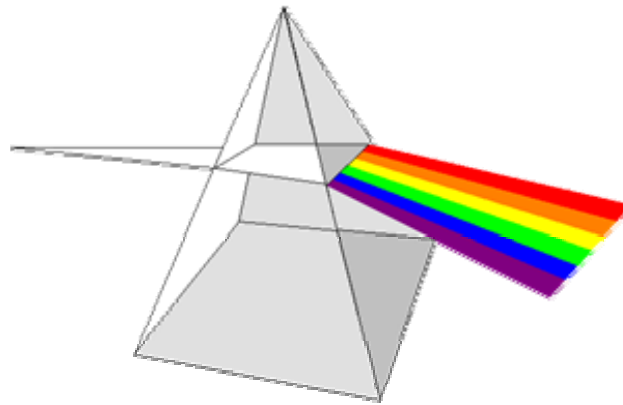
5. Irudia. OLBERSen paradoxa.

Geruza hauetan izar-kopurua r^2 -ren proportzioan hazten da distantzia handitzean. Baina izarren argiaren intentsitatea $1/r^2$ -ren proportzionala da distantzia handitzean. Orduan konturatzen gara geruza bakoitzetik hartzen dugun intentsitatea berbera dela eta, infinitu geruza daudenez, argiaren

intentsitatea infinitua izan behar dela. Hala izanik, Lurrean neurtuko genukeen intentsitatea, berbera izango litzateke egunez eta gauez, simetria esferikoa baitago. Hori ez zen gertatzen, eta horregatik eredu txarto zegoela ondorioztatu zuen.

Hurrengo aurrerapena 1842. urtean izan zen JOHANN CHRISTIAN DOPPLERek (1803-1853) bere izena duen efektua azaldu zuenean. Doppler efektua, uhinetan agertzen da uhinaren iturria eta behatzailea erlatiboki higitzen badira. Behatzailea eta iturria hurbiltzen direnean, uhin-luzera txikiagoa da, eta urruntzen direnean, handiagoa. Argiaren kasuan, garrantzitsuena guretzat, hurbiltzean more kolorerantz lerratzen da espektroa eta urruntzean gorriarantz. Efektu hau oso inportantea zen espektroen lerroak kontutan hartzen baziren.

Espektroen lerroak 1802. urtean WILLIAM HYDE WOLLASTONEk (1766-1828) aurkitu zituen. Baina JOSEPH FRAUNHOFER (1787-1826) izan zen 1814. urtean aztertu zituena.

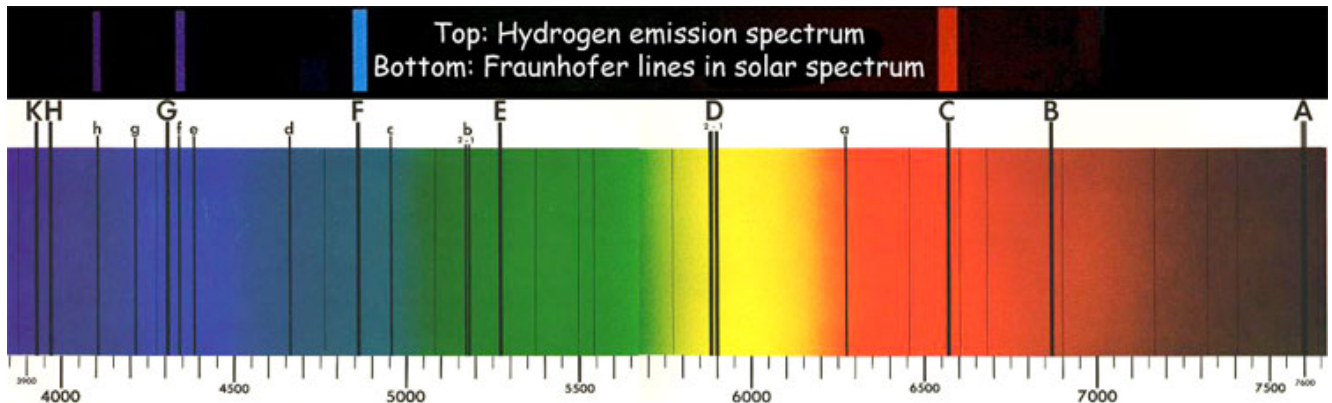


6. Irudia. Argi-izpi baten espektroa.

Izar baten argia prisma batetik pasatzean, difrakzioagatik banatzen da, uhin-luzeraren arabera. Horrela, espektro jarraian lerro beltz batzuk daude. Horiek dira espektroen lerroak eta izar guztien argian daude (eguzkikoei *Fraunhofer lerroak* deritze). Lerro hauen zergatikoa geroxeago aurkitu zen. Izar guztien koroan (izarren geruza bat) elementu kimikoak daude. Elementu hauek uhin-luzera konkretuko argia xurgatzen dute, prozesua kuantizatuta baitago. Gero norabide guztietan difunditu egiten dute xurgatutako energia, eta horrexegatik espektroa oso ahulduta agertzen da lerro hauetan. Lerro bakoitza elementu desberdin bateko absortzio-lerroa da.

Dena den, Doppler efektua 1868. urtean aplikatu zen espektro-lerroen ikerkuntzan. Izar batzuen lerroak oso mugituta agertzen ziren espektroan, eta hori azaltzeko Doppler efektua erabili zen. Lerroak gorriarantz lerratuta badaude, izarra urruntzen ari delako da, eta lerrakuntzaren bidez izarrek Lurrarekiko duen abiadura erradiala kalkula dezakegu. Berriz, lerroak morerantz lerratuta badaude, orduan izarra hurbiltzen ari delako da. Guzti hau oso erabilgarria izan zen, hurbileko

izarren abiadura kalkulatzeko, baina teleskopioak oso onak ez zirenez, urrunekoak ezin ziren kalkulatu. Aurrerago, neurketa-tresnen hobekuntzak gauzak aldatu egin zituen.



7. Irudia. Fraunhofer-en lerroak.

Beharbada, XX. mendean zientzien artean gehien aurreratu dena, Fisika izan da. Arlo guztietan, aurkikuntzek eta teoria berriek aldaketa ugari ekarri dute. Esate baterako, ALBERT EINSTEINen (1879-1955) Erlatibitate Teorik ordura arte finkatuta zegoen mekanikaren kontzepzioa hankaz gora jarri zuten, izugarrizko aldaketak ekarriz. Beste aldetik, teoria kuantikoak, ziurgabetasun-printzipioa tartean zela, mundua ulertzeko era aldatu zuen, neurketen mugak erakutsiz. Aipaturiko hauek bi adibide konkretu dira, baina aldaketa gehiago gertatu dira eta, horrexegatik, gaur ezagutzen dugun Fisika eta XIX mendean ezagutzen zena, nahiko desberdinak dira.

Aldaketa hauen ondorioz, Kosmologia ere asko aldatu da XX. mendean zehar. Hori oso erraz azal dezakegu, bere teoriak eta ereduak azaltzeko, Kosmologiak Fisikaren arlo guztietako teoriak behar baititu.

XIX. mendearen bukaeran zegoen unibertsoaren eredu, NEWTONen Mekanikan oinarrituta zegoen. Eredu honetan unibertsoa infinitua eta uniforme zen (distantzia handietan). Uniformetasunaz hitz egitean, Printzipio Kosmologikoa betetzen dela esan nahi dugu. Printzipio Kosmologikoa ondokoa dio: «*momentu konkretu batean unibertsoa berdina ikusten da bi puntu desberdinetatik*». Honek dakartzan ondorioak, isotropia eta homogenotasuna dira. Printzipio hau hipotesi bat da, baina beraren kontrako frogarik ez dagoenez, horrela onartzen da. Hipotesi hau COPERNICOn garaietatik ezaguna zen, Copernico-ren printzipioa honen baliokidea baita. Dena den, gaur eguneko izena EDWARD ARTHUR MILNEk (1896-1950) asmatu zuen.

Beste aldetik, ez zegoen batere garbi, unibertsoak hasierarik eduki behar zuen ala ez. Kosmologo batzuk unibertso eterno baten alde azaldu ziren: zergatik egon behar zen momentu berezi bat zeinean unibertsoa sortu zen? Beste batzuen ustez, hasiera beharrezkoa zen, beraien

sinesmenak edo ideologiak hori eskatzen baitzien. Baina hasieraren arazoa metafisikaren arlokoa zen, behatzen ziren fenomeno guztiak teoria biek in ados zeudelako. Eredu honen beste ezaugarria, geldikorra izatearena zen. Gauzen aldaezintasunaren pentsaera nagusi zen garai hartan. Horrexegatik beraiek pentsatzen zutena hauxe zen: unibertsoa beti izan da holakoa, edo, hasiera beharrezkoa bazen, unibertsoa ikusten den modukoa izan zen sortu zenean. Baina izatez, unibertso geldikorra oso ezegonkorra da, indar grabitatorioa soilik dagoelako eta hau erakarlea delako. Hau da, perturbazioak txikiak higidura sortuko luke. Honetaz asko hitz egin zen.

Hala eta guztiz ere, beste arazo bat zegoen, Olbers-en paradoxa. Batzuk materia-hodeiekin konpondu nahi izan zuten paradoxa. Izarren artean (garai hartan galaxiak ez ziren ezagunak) materia-hodeiak zeuden, gasez eta hautsez osotuta. Beraientzat hodei hauek erradiazioa gelditzen zuten, baina horrek ezin zuen konpondu arazoa. Materia erradiazioa hartzen egoten bada, helduko da momentu bat, zeinean tenperatura handia edukiko duen, eta orduan bera ere emititzen hasiko da. Azpimarratzekoa da, eredu honetan erabiltzen zen geometria Euklides-ena zela.

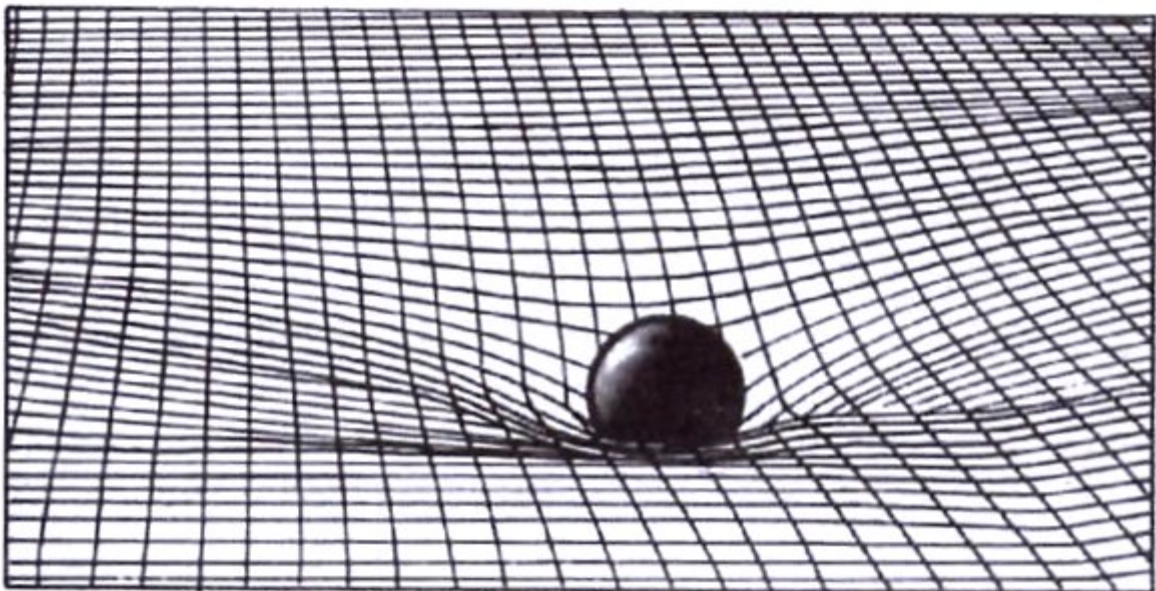
Momentu horretara arte, eredu kosmologiko guztiak azaltzeko Newton-en Mekanika erabili zen. Baina 1905. urtean EINSTEINEK bere Erlatibitate Bereziaren Teoria plazaratu zuenean, Mekanikaren oinarriak zeharo aldatu ziren. Dena den, abiadura txikietan gauzak berdin mantendu ziren, azken finean, abiadura txikien kasuan Newton-en Mekanika Erlatibitatearen Teoriaren hurbilketa baita. Einstein-en Erlatibitate Berezia bi postulatu oinarritzen da. Horietariko batek, erlatibitate-printzipioak, ondokoa dio: «*Sistema inertzial guztiak baliokideak dira lege fisikoak deskribatzeko*» edota «*lege fisiko guztiak modu berean adierazten dira sistema inertzial guztietan*». Erlatibitate-printzipio honek jadanik Mekanikan erabiltzen zen Galileo-ren printzipioa orokortzen du Fisikaren arlo guztietarako, erreferentzi sistema pribilegiatuak (eterearena kasu) desagerraraziz. Bigarren postulatuak hurrengoa dio: «*Argia espazio librean (hutsan) inerti sistema batekiko duen abiadurak beti balio berbera du, c , argi-iturria eta sistema inertziala edozeintzu direlarik*».

Ordura arteko Mekanikan bi gertaeren arteko denbora-tarteak balio berbera zuen behatzaile guztientzat, hau da, denbora magnitude absolutua zen. Luzera eta masa ere magnitude absolutuak ziren. Erlatibitatearen teorian denborak eta espazioko hiru dimentsioek lau dimentsiotako espazioa osotzen dute. Hala denbora eta espazioko dimentsioak maila berean geratzen dira. Teoria honetan, ez denbora, ez masa, ez luzera, ez dira magnitude absolutuak. Magnitude absolututzat onartzen dena, argiaren abiadura da, eta honek muga bat ezartzen dio seinaleen eta gorputzen abiadurari.

Beste aldetik, Erlatibitate Bereziaren Teoriaren ondorio garrantzitsua, masa eta energiaren arteko berdintasuna da. EINSTEINEK masa eta energia lotu zituen, hain ezaguna den $E = mc^2$ formularen bidez. Berdintasun hau oso garrantzizkoa da unibertsoaren lehenengo garaiak

azaltzeko, geroago ikusiko dugunez. Honekin masaren eta energiaren kontserbazioaren printzipioak apurtu egiten dira gauza banatu modura, unibertsoan benetan kontserbatzen dena *masa-energia* baita. Modu honetan kontserbazioaren bi printzipioak, masarena eta energiarena, bateratu egin zituen.

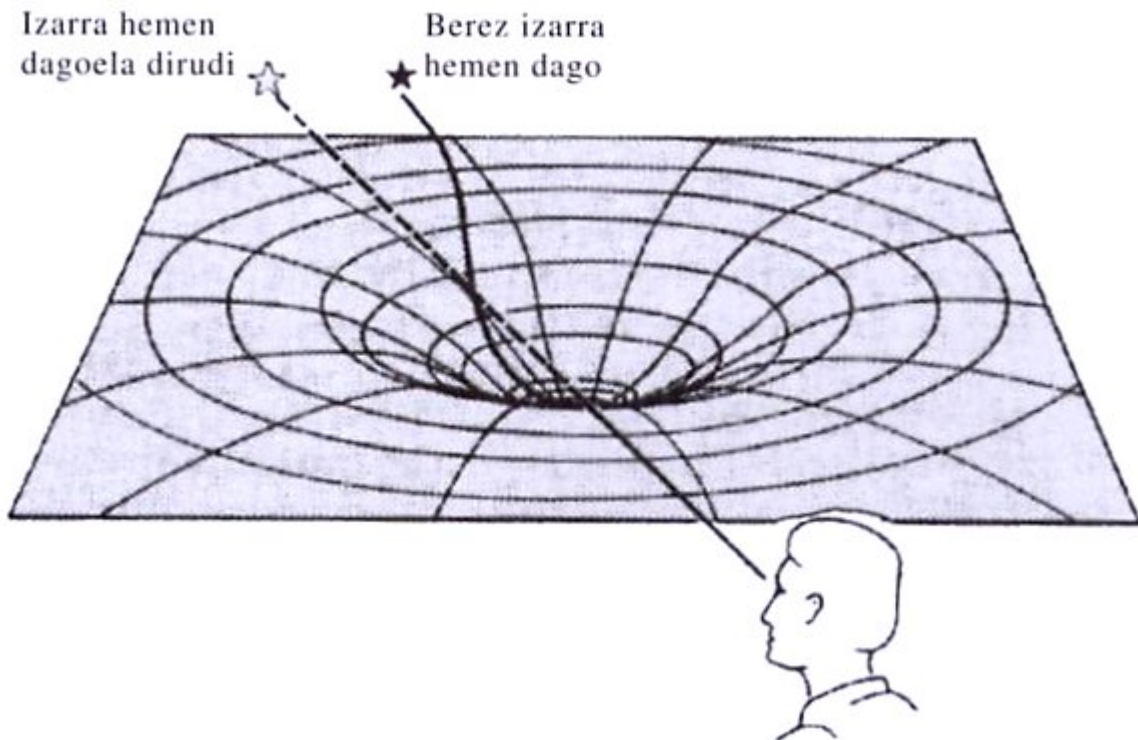
Erlatibitate Bereziaren Teorian erreferentzi sistema inertzialekin eta beraien arteko transformazioekin (Lorentz-en transformazioekin) egiten zen lan. Baina formulazio hori orokortu egin behar zen erreferentzi sistema guztietarako. Orokorpena 1915. urtean heldu zen, EINSTEINEk Erlatibitate Orokorraren Teoria azaldu zuenean. Erlatibitate Orokorrean koordinatuen transformazio orokorrak kontutan hartzen ziren, sistema azeleratuen (hots, sistema ez-inertzialen) ikerketarako. Hala, eta masa inertzialaren eta masa grabitatorioaren baliokidetzaren printzipioa onarturik, Newton-en grabitazioaren orokorpena lortu zen.



8. Irudia. Masaren eragina espazio-denboran.

EINSTEINEk bere Erlatibitate Orokorraren Teoria garatzeko, hiru axioma hartu zituen kontutan, hurrengoak alegia. Lehenengoa adierazpenen kobariantzian oinarritzen da, eta ondokoa dio: «*Lege fisikoen adierazpenek ez dute espazio-denboraren koordinatuen menpekotasunik*». Hau da, lege fisiko guztiak berdin adierazten dira edozein lekutan eta edozein momentutan egonik. Bigarren axioma baliokidetzaren printzipioa deitzen da eta hauxe esaten du: «*Inertzi indarrak grabitazioarenak bezalakoak dira*». Beste hitzetan esanda, masa inertziala eta masa grabitazionala berdinak dira. Azkenez, hirugarrenak ondokoa dio: «*Puntu baten inguruko espazio-denboraren propietate metrikoek alboko masa eta energiaren distribuzioaren menpekotasuna dute*». Hau da, espazio-denborak kurbadura du eta kurbadura honek alboan dagoen masaren menpekotasuna du.

Grabitazioa espazio-denboraren kurbaturagatik sortzen da. Honelatan, ba, grabitazioaren teoria geometrikoa lortu zen. Ereku grabitatorioaren eraginpean argi-izpiek duten desbiderapena da, teoria honek duen ondorio ezagunenetarikoa.



9. Irudia. Argi-izpi baten desbiderapena, eremu grabitatorio batetik pasatzean.

Teoria hauek oso garrantzitsuak izan dira mende honetako Kosmologiarako, eredu kosmologiko guztiak beraietan oinarritua baitaude. Beste aldetik, 1915.ean gure galaxia unibertso guztia zela onartzen zen, eta gainera, teleskopioez neurtzen ziren gorputzen abiadurak argiarena baino askoz txikiagoak eta aleatorioak ziren. Hala izanik, batezbesteko mugimendurik ez zegoenez, geldikortasunaren ideia nagusitu zen garai hartan. Izar batzuk jaiotzen ziren, beste batzuk hiltzen ziren, baina, orohar, galaxiaren itxura ez zen aldatzen.

Kosmologia modernoaren lehenengo eredu garrantzitsua EINSTEINEK berak garatu zuen. 1915. urtean EINSTEINEK, bere ekuazioak aplikatuz, unibertso osoaren geometria espazio-denborala azaldu nahi zuen. Horretarako, unibertsoan materia uniformeki banatuta zegoela suposatu zuen. Horrela, unibertsoaren dentsitatea konstantea zen. Berak aurkitu nahi zuen unibertsoa, homogeno, isotropo eta geldikorra zen. Jarrera honen zergatikoa urte horietan zegoen pentsaeratan datza. Hango ideia kosmologikoek unibertso geldikorra eskatzen zuten. Bere ekuazioen soluzioen artean ez zegoen horrelakorik eta horregatik bere ekuazioetan termino berri bat sartu zuen. Termino horri “konstante kosmologikoa” deritzo, eta EINSTEINen asmakizun bat bestenik ez zen. Ekuazioetan sartutako terminoak bosgarren indar baten agerpena zekarren.

Bosgarren indar honi “aldaratzaille kosmikoa” deitu zioten, eta soilik distantzia handietan agertzen zen, indar grabitatorioa konpentsatuz.

Einstein-en unibertsoa geldikorra, itxia eta finitua zen, baina mugagabea. Finitua izanik, Olbers-en paradoxa gainditzen zuen. Beste aldetik, eternoa zen, ez hasierarik ez bukaerarik ez zeukalako. Unibertso honetan aldaketa handirik ez zegoen, dentsitatea konstante mantentzen zelako. Dentsitate honek unibertsoaren dimentsioak mugatzen zituen, kurbaduraren bitartez. Espazio-denbora azaltzeko RIEMANNen geometria erabiltzen zen. Espazio honetan FERMATEN (1601-1665) printzipioa aplikatuz, bi puntuen arteko ibilbiderik laburrena argi-izpi batek egingo zuena zen. Ibilbide hauei *lerro geodesikoak* deritze. Dena den, espazioaren kurbadurak ez zeukan eraginik denboran, espazioa eta denbora desberdintzen zirelako.

Mendearen bigarren hamarkadaren bukaeran emisio eta absortzio-lerroen lerrakuntzaren ikerketa hobetu zen, teleskopio berriekin. Doppler efektua aplikatuz, nebulosen artean higadura zegoela ikusi zen. EINSTEINen ereduak ez zuen hori azaltzen, eta bertan behera geratu zen.

WILLEM DE SITTERek (1872-1934) EINSTEINen teoria modifikatuarekin beste soluzio bat atera zuen 1917. urtean. Bere eredia garatzeko, espazio-denbora hutsik zegoela suposatu zuen, hau da, unibertsoaren materiaren dentsitatea zero zela. Eredu hau isotropo, homogeno eta eternoa zen, gainera geldikorra zirudien, garai hartan zegoen pentsaerarekin bat etorritik. Teoria honek lerrakuntza azaltzen zuen. Baina lerrakuntzak unibertso aldakor baten beharra azaldu zuen. Hala, DE SITTERen eredia ez zen geldikorra esangura zehatzean, mugikorra baizik. Geldikorra zela ematen bazuen, koordenatuak hartutako eragatik zen. Horrexegatik hortik aurrera unibertsoaren eredu guztiak aldakorrak ziren, fenomeno hau azaltzeko. Baina teoria honek EINSTEINen ereduak bezala konstante kosmologikoa erabiltzen zuen. Konstantea EINSTEINen asmakizun bat zen, buruan zeukan eredia ekuazioetan agertzeko, eta ez emaitza zientifikoa. EINSTEINen esanetan, konstante kosmologikoaren erabilpena bere “huts zientifiko handiena” izan zen. Bestalde, normalean kontsideratzen da, EINSTEINen unibertsoan materia mugimendurik gabe zegoela, eta DE SITTERenean, berriz, mugimendua materiari gabe.

ALEXANDER FRIEDMANek (1888-1925) beste teoria bat garatu zuen matematikoki 1922. urtean. Teoria horretan EINSTEINen ekuazioen benetako soluzio homogeno eta isotropoak aurkitu zituen. EINSTEINek soluzio bat bakarra baino ez zuen espero, baina bera ekuazioen soluzio-multzo edo familia batekin lan egiten ibili zen. Multzo hori ateratzeko, unibertsoaren dentsitatea konstantea zela suposatu zuen. Soluzio bakoitzak unibertso desberdin bat definitzen zuen, eta horien artean EINSTEINena eta DE SITTERena zeuden.

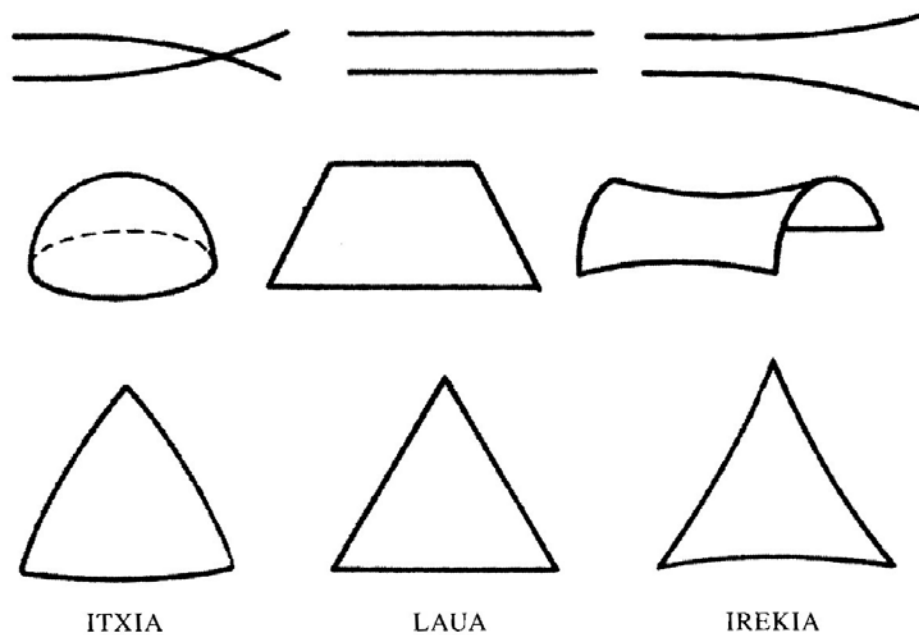
Ateratako unibertsoetatik, EINSTEINena soilik zen geldikorra, besteetan hedapena beti agertzen baitzen. Hedapena EINSTEINen ekuazioen barneko gauza bat da. Baina hedapenaz hitz

egiten ari denean, ez da esan nahi galaxiak mugitzen ari direla, espazioa zabaltzen ari dela baizik. Bestalde, FRIEDMANek EINSTEINen ekuazioetan konstante kosmologikoa mantendu zuen, baina balio guztiekin, zero balioa ere horien tartean egonik. Modu horretan, soluzio gehiago ere aurkitu ziren.

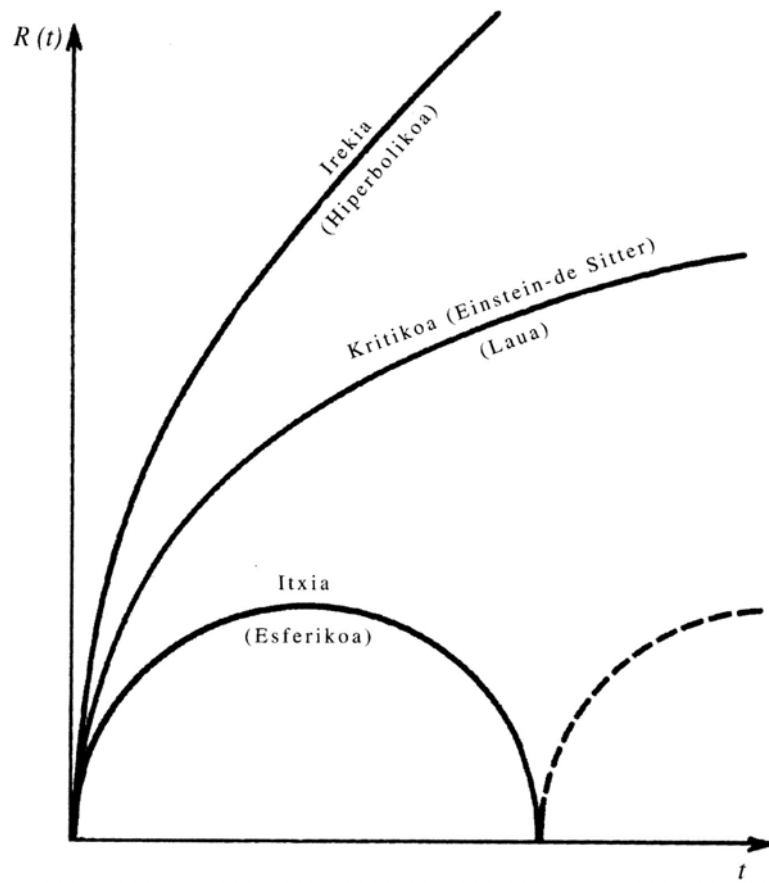
FRIEDMANen ereduaren artean hiru motatakoak dira garrantzitsuenak. Eredu-mota hauek espazioko kurbaduraren arabera sailkatzen dira. Kurbadura, momentu batean, unibertsoaren puntu guztietan berbera da, dentsitatea konstantea dela suposatu baita. Dena den, dentsitateak denboraren menpekotasuna eduki dezake. Ereduak ondoko multzoetan bana daitezke: kurbadura positibodunak, kurbadura negatibodunak eta zero kurbaduradunak. Eredu-mota bakoitzak bere berezitasunak ditu, jarraian azalduko denez.

Unibertsoak zero kurbadura badu, orduan espazioa laua izango da. Espazio horretan EUKLIDEn (305-285 K.a.) geometria erabiltzen da gauzak azaltzeko, eta lerro geodesikoak — argi-izpien ibilbideak— lerro zuzenak dira. Unibertso hau irekia da, hots, beti handitzen ari da. Baina beraren hedapen-abiadura zerorantz jotzen du infinitura hurbiltzean. Unibertso honetan masa eta bolumena infinituak dira.

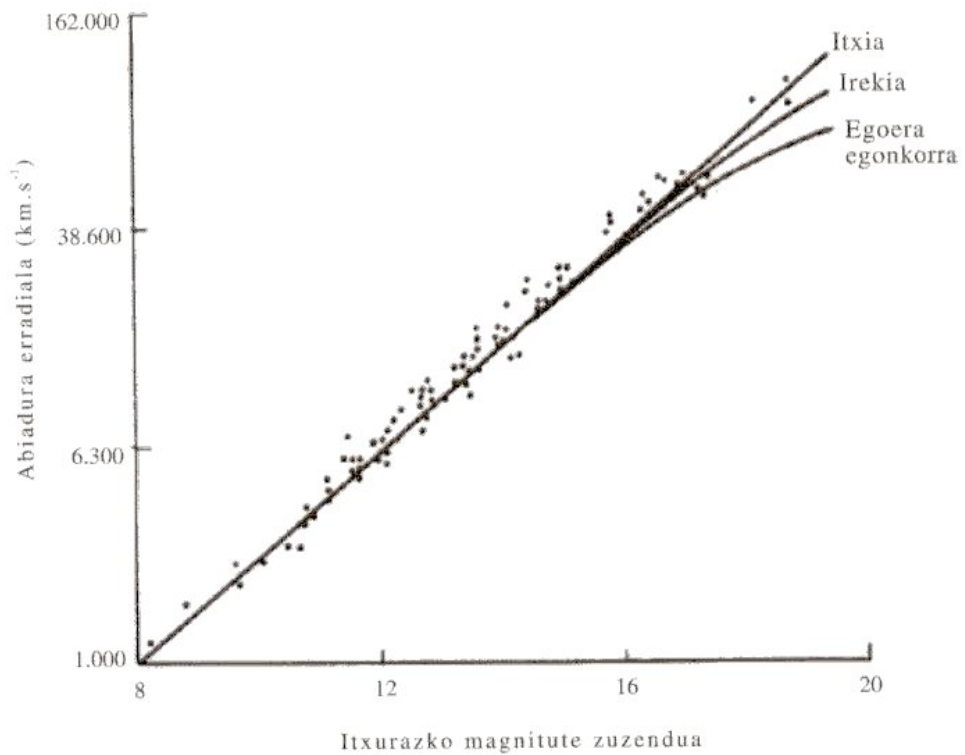
Unibertsoak kurbadura negatiboa badu, orduan espazioa hiperbolikoa da. Hemen LOBATCHEWSKYren (1793-1851) geometria erabiltzen da, eta lerro geodesikoak hiperbolak dira. Unibertso hau ere irekia da, beti handitzen ari delako, baina ere honetan abiadura handiagoz hedatzen da. Eta, halaber, infinitua da, masa eta bolumena infinituak direlako. Kasu honetan masak kurbaduran duen eragina, txikiagoa da, eta grabitatearen eremua ahulagoa da espazioa makurtzeko.



10. Irudia. Hiru geometria unibertsoarentzat.



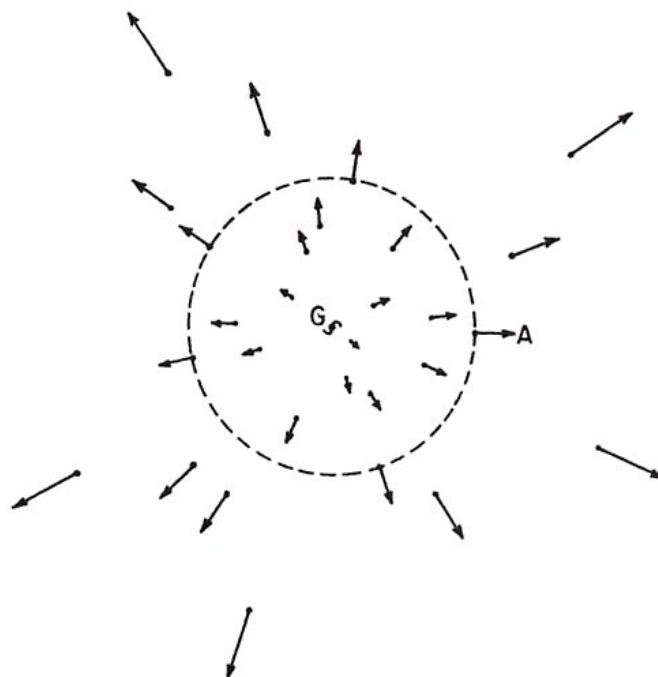
11. Irudia. Geometria bakoitzari dagokion unibertsoa.



12. Irudia. Hubble-ren legea beste eratan adierazita.

Unibertsoaren kurbadura positiboa bada, orduan espazioa esferikoa da. Espazio horretan RIEMANNen (1826-1866) geometria aplikatzen da eta lerro geodesikoak zirkunferentziak dira. Unibertso hau, berriz, ez da irekia, itxia baizik. Hasieran handitu egiten da, baina momentu batean gelditu eta uzkuratzen hasten da, hasierako egoerarantz itzuliz. Kasu honetan masa eta bolumena ez dira infinituak, eta horrexegatik esaten da, unibertsoa finitua dela. Beste aldetik, eredu honetan masaren eragina nahikoa da, grabitatearen eraginez espazioa ixteko. Argi-izpia, nahiko denbora balu, bere iturrira itzuliko litzateke.

Ikusi dugunez, ba, FRIEDMANen unibertsoak kurbaduraren arabera sailkatuta daude. Baina kurbadurak dentsitatearen menpekotasuna du. Hala, masaren dentsitatearekin sailkapen berbera egin dezakegu. Hedakuntza gelditzeko eta berriro uzkuartzeko behar den dentsitate txikienari, *dentsitate kritikoa* deritzo. Unibertso itxiaren dentsitatea dentsitate kritikoa baino handiagoa da, edo berdina. Kasu honetan masak unibertsoaren espazioa makurrarazten du. Grabitatearen eraginez, unibertsoaren hedapena gelditu egiten da une batez, eta hortik aurrera uzkuadura gertatzen da. Unibertso irekietan dentsitatea dentsitate kritikoa baino txikiagoa da, eta masak ezin du unibertsoa makurrarazi, ixteko. Modu horretan, ez dago grabitazio-indar nahikorik hedapena geldiarazteko.

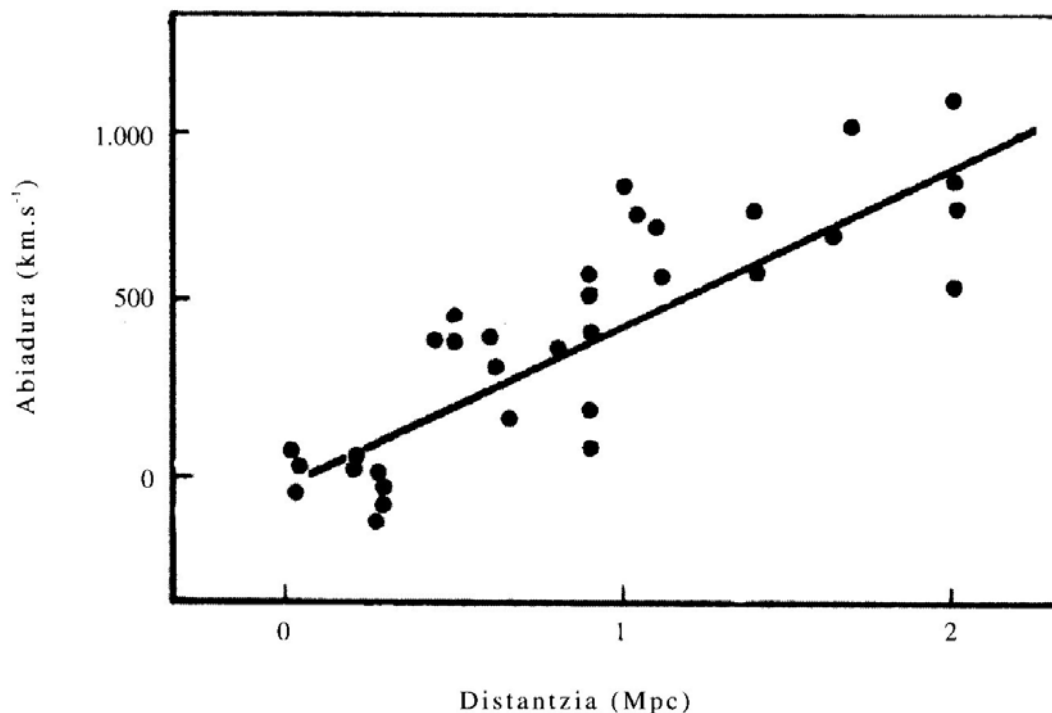


13. Irudia. Birkhoff-en teorema.

Gure unibertsoaren dentsitate kritikoa kalkulatzeko bide batzuk daude. Hauetariko bat 1923. urtean BIRKHOFFek garatutako teorema erabiltzean datza. Teorema honek balioa dauka bai NEWTONen eta bai EINSTEINen grabitazioan ere. BIRKHOFFen teorema aplikatzeko, simetria

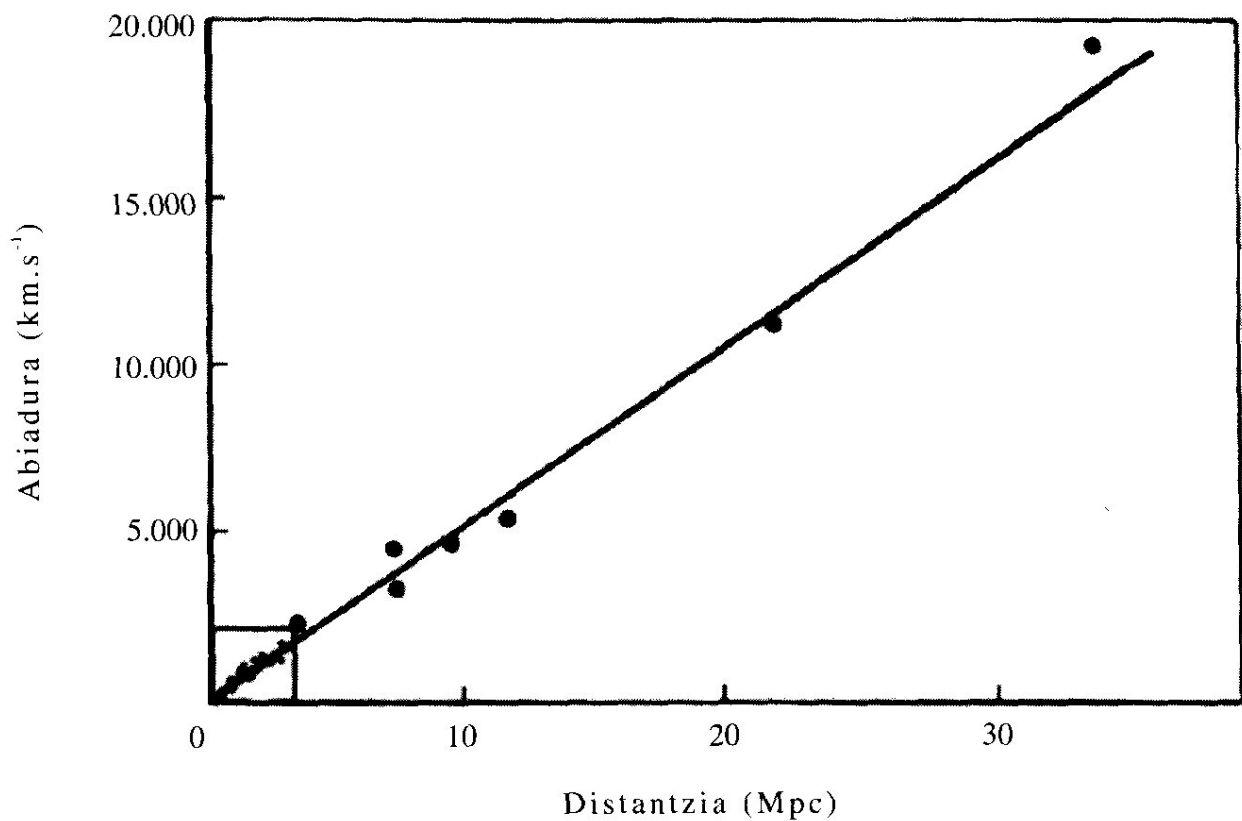
esferikoa egon behar da. Teorema honek ondokoa dio: «*A galaxiatik B galaxiaren higidura kalkulatzeko, bakarrik kontutan hartu behar dugu A galaxian zentratuta dagoen AB erradiodun esferaren barruan dagoen masa*». Hala, Doppler efektua eta aurrerago ikusiko dugun Hubble-ren legea aplikatuz, galaxiaren abiadura kalkula daiteke. Abiadura hau eta esferaren barruko masan dagokion ihes egiteko abiadura berdinduz, dentsitate kritikoa atera daiteke. Gaur egun ezagunak diren datuen arabera, dentsitate honen balioa $5 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ da. Hau da, batez beste hidrogenoren hiru atomo egon behar dira mila litrotako eskualde batean, hedakuntza geldiarazteko eta unibertsoa itxia eta finitua izateko.

GEORGES LEMAITREK (1894-1966) 1927. urtean FRIEDMANen bezalako lan bat plazaratu zuen. Esan beharra dago, LEMAITREK ez zituela ezagutzen FRIEDMANen lanak. Matematikoki ere atera zituen bere emaitzak EINSTEINen ekuazioetatik. Unibertsoaren hasierako momentuetan oso egoera dentsuan egon zela proposatu zuen lehenengo aldiz, eta hasierako egoera horri “*arrautza kosmikoa*” deitu zion. Berarentzat “*arrautza kosmikoa*” nukleo erradioaktiboak bezala lehertu zen. Horrela, atomoak goitik behera sortu ziren, hau da, desintegrazioaren bitartez, elementu astunak elementu arin bihurtuz joan ziren. Baina honek ez zuen ondo azaltzen, unibertsoan dagoen hidrogenoaren proportzio handia (% 75 inguru). Geroxeago, 1930. urtean, ARTHUR STANLEY EDDINGTONek (1882-1944) LEMAITREren lanak zabaldu zituen fisikarien artean.



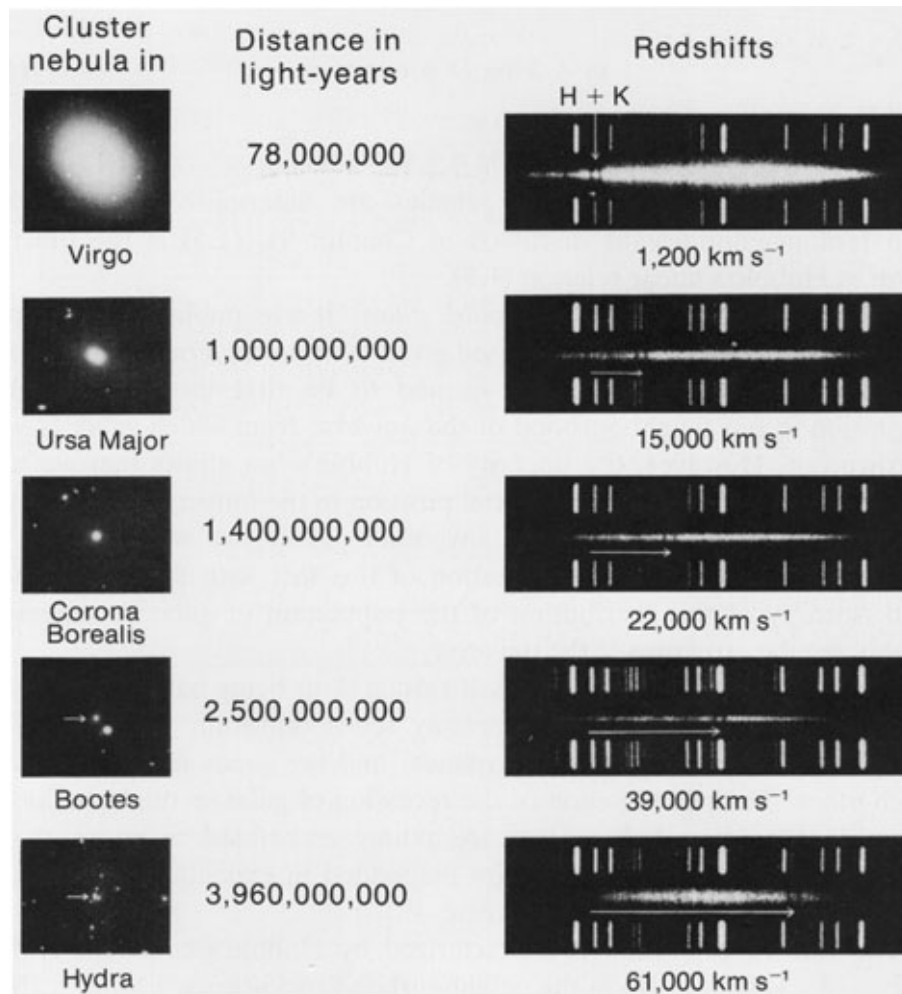
14. Irudia. Hubble-k eginiko grafikoa, bere legea ateratzeko.

Teleskopioak asmatu izan zirenetik, hobetuz joan ziren, eta honekin lotuta gauza berri asko aurkitu ziren. 1923. urtean EDWIN HUBBLEk (1889-1953) Mount Wilson-eko teleskopio berri batekin izarrak ikusi zituen Andromeda nebulosan. Hala gauza bat frogatu zen, gure galaxia ez zela unibertso galaxia bakarra eta beste batzuk ere ba zedula. Teleskopio berberarekin lan egiten jarraitu zuen galaxia askoren izarrak aztertuz. HUBBLEk Doppler efektua aplikatu zuen izar hauen azterketarako, momentu horretara arte, berriz, hurbileko izarren ikerketarako erabiltzen baitzen. Modu honetan, 1929. urtean HUBBLEk galaxien gorriranzko lerrakuntza eta beraien distantziaren arteko erlazioa azaldu zuen. Galaxiek zenbat eta urrunago hainbat eta lerrakuntza handiagoa zuten. Beraz, galaxia baten abiadura erlatiboa aldenduriko distantziaren proportzionala zen.



15. Irudia. 1931. urtean eginiko grafikoa, datu gehiagorekin.

Guzti hau ateratzeko, izar batzuk erabili zituen galaxien distantziak jakiteko, Cefeidak alegia. Cefeidak izar aldakorak (pulsanteak) dira, beraien argitasuna periodikoki aldatzen baita. Periodo honek izarren masaren menpekotasuna du. Behin masa jakinda, kalkulatu egin daiteke argitasun absolutua, hau da, izarrak norabide guztietara igortzen duen intentsitate guztia. Argitasun absolutuarekin eta itxurazko argitasunarekin, Lurrean neurtzen duguna, izarren distantzia kalkula dezakegu. Era honetan ezarri zen distantzia kosmikoen eskala.



16. Irudia. Distantzia desberdinen arabeko lerrakuntzak.

Hubble-ren legearekin unibertsoan galaxiak mugitzen zirela ikusi zen. Beraz, unibertsoan materiaren fluxu bat zegoela frogatu zen honela, eta hasierako leherketa baten beharra, atzerantz joango bagina galaxiak gero eta hurbilago egongo bailirateke. Kontutan hartu behar zen, leherketaren zentroa galaxia guztietan zegoela, Hubble-ren legea printzipio kosmologikoarekin lotuta baitzegoen. Printzipio kosmologikoa betetzen bazen, derrigorrez bete behar zen Hubble-ren legea. Hau da, galaxia batetik besteak mugitzen ikusten baziren, beste galaxia batetik mugimendu berbera ikusi behar zen. Adibide bat jarriko dugu: lerro batean A, B, eta C galaxiak ditugu distantzia berberaz tartekaturik. A-tik B galaxia v abiaduraz urruntzen dela ikusten da. Homogenotasunagatik B-tik C galaxia ere v abiaduraz urrundu behar da. Horrela, A-tik C galaxia $2v$ abiaduraz urruntzen dela ikusten da. Guzti hau edozein galaxiarekin egin daiteke. Hubble-ren legeak printzipio kosmologikoa konfirmatzen du. Baina, noski, printzipio honek ez du balio distantzia txikietan, soilik 100 milioi argi-urteko gora baino, hots, galaxia-kumuluen arteko distantzietatik gora.

Hubble-ren legeak adierazpen matematikoa du, ondokoa alegia,

$$V = HR,$$

non V eta R galaxien arteko abiadura erlatiboa eta distantzia diren, eta H delakoa Hubbleren konstantea. Konstante honek denboraren menpekotasuna du, baina momentu konkretu batean balio berbera du galaxia guztientzat. Leherketaren teoria onartzen bada, H gero eta txikiagoa izan behar da, indar grabitatorioak, galaxien artean dagoen indar bakarra, galaxiak geldiarazten baititu. Goiko formula ikusita, eta gorputzen dinamika kontutan hartuta, ondokoa atera dezakegu:

$$R = \frac{V}{H} = VT.$$

Hubble-ren konstantearen alderantzizkoari, T delakoari, *hedapenaren denbora karakteristikoa* deritzo, eta unibertsoaren adina mugatzen du. Atzerantz joaten bagara, leherketaren teoriak esaten duenez, galaxien abiadura gero eta handiagoa izan behar da. Orduan, unibertsoaren adina hedapenaren denbora karakteristikoa baino txikiagoa da.

Eredu kosmologikoen garapenerako H -ren balioa oso inportantea izan da historikoki. 30. eta 40. hamarkadetan H -ren balioa $(170 \text{ km s}^{-1})/(10^6 \text{ argi-urte})$ ingurukoa zela uste zen. Balio honekin hedapenaren denbora karakteristikoa 2000 milioi urte ateratzen zen gutxi gorabehera. Ondorioz, unibertsoaren adina denbora hori baino txikiagoa izan behar zen. Baina arazo bat zegoen, geologoen ustez Lurrak 4600 milioi urte baitzeuzkan. Horregatik, ereduan zerbait txarto zegoela hasi ziren pentsatzen.

Hubble-ren legea Einstein-en Erlatibitate Bereziarekin lotuz, beste ondorio bat atera dezakegu. Galaxia bat ezin da mugitu argiaren abiadura baino abiadura handiagoz, beraz, ikusten dugun unibertsoan muga bat dago. Muga hori oso erraz kalkula daiteke aurreko ekuazioetatik,

$$c = HR$$

eginik, eta horrela, mugaren balioa

$$R = \frac{c}{H}$$

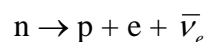
izango da. Muga hau baino urrunago dauden puntuetako argia ez zaigu heltzen. Muga honekin Olbers-en paradoxa gaindituta geratzen zen. Nahiz eta unibertsoa infinitua izan, ikusten dugun unibertsoa finitua da, unibertsoaren zati bat besterik ez baitugu ikusten.

Hubble-ren legeak hasierako leherketaren beharra erakusten zuen, baina unibertsoaren adinaren arazoak zalantzan jartzen zuen guztia. Hala eta guztiz ere, gauza bat argi zegoen, Hubble-ren legea onartuz gero eredu geldikorrek baztertua geratzen zirela.

HOWARD ROBERTSONek eta ARTHUR WALKERek 1935. urtean metrika berezia definitu zuten. Metrikak unibertsoaren adierazpenak azaltzeko erabiltzen dira. Metrika garatzeko kurbadura unibertso osoan uniformea zela suposatzen zen. Gainera, denbora kosmikoa berbera zen unibertsoaren hedapenarekin hedatzen ari diren behatzaileentzako. Hau da, espazioko hiru dimentsioak eta denbora independenteak dira. Hemen lerro geodesikoak argiaren ibilbideak dira. EINSTEINen ekuazioak ROBERTSON-WALKERen metrikaz askatzen badira, agertzen diren unibertsoak homogeno eta isotropoak dira.

1948. urtean GEORGE GAMOWek (1904-1968) hasierako leherketaren teoria hobetu zuen, eta ospetsua egin zuen benetan. Eredu horri “*Leherketa Handia*” deritzo, FRED HOYLEk asmatutako izena erabiliz (ingelesez, *Big Bang*). Eredu honetan GAMOWek elementu arinen ugaritasuna azaldu zuen, eta hondo-erradiazioaren fenomenoaren aurrean zuen.

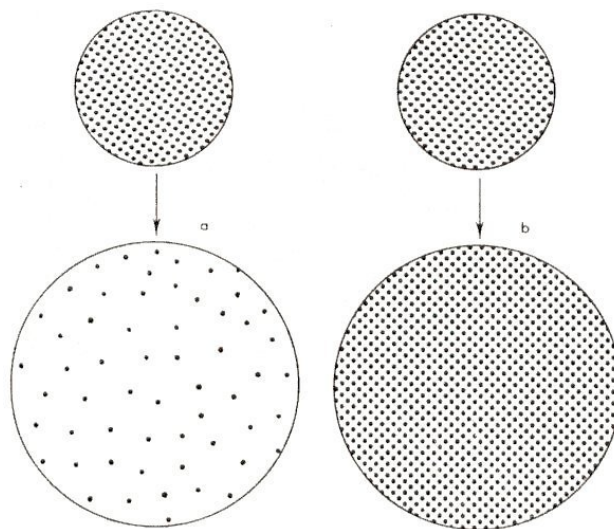
Elementuen ugaritasuna azaltzeko, hasierako unibertsoa salda bezalako gauza bat zela suposatu zuen. Salda hori neutroiz eta fotoiz osotuta zegoen eta oso tenperatura eta dentsitate handiak zeuzkan. Neutroiaren desintegrazioaren bitartez (neutroiaren batezbesteko bizitza 13 minututakoa da), protoiak eta elektroiak sortzen hasi ziren, honako erreakzioaren bidez:



Sortutako protoiak saldako neutroiekin lotzen ziren, elementuen nukleoak osotuz. Baina hola, hidrogeno eta helio nukleoak sortzen ziren soilik. Beste elementuak sortzeko, baldintza egokiak egon behar ziren, eta hasierako momentuan ez zeuden. Hidrogenoari eta helioari elementu arinak deitu ohi zaie; beste elementuei, aldiz, elementu astunak. Hedapenarekin tenperatura jaitsi egin zen, eta 3000 kelvin ingurukoa zenean, nukleoek elektroiak harrapatu zituzten. Horri *birkonbinaketaren garaia* deritzo. Teoria honekin elementu arinen sorrera nahiko ondo azaltzen zen, momentu horietan ezagutzen ziren unibertsoaren elementuen portzentajeekin nahiko ados baitzegoen. Garai hartan hidrogenoak eta helioak unibertsoaren % 99 osotzen zutela uste zen.

Arazo honen azalpena beranduago etorri zen FRED HOYLERen eskuetatik. Elementu astunak, erreakzio nuklearren bidez sortzen dira izar handien zentroetan. Leku horietan baldintza egokiak betetzen dira. Alde batetik, temperatura eta dentsitatea handiak dira, eta, bestetik, helio-4 (bi protoi eta bi neutroi) asko dago. Esan behar da, FRED HOYLE teoria honen kontra zegoela, nahiz eta beraren aldeko frogak hau azaldu. Bestalde, ikusi dugunez, teoria honetan leherketa gertatzean temperatura altua zegoen. Gero unibertsoa hedatzean hoztu egin behar izan zen. Gaur egun bero horretatik zerbait neurtu behar dugu, eta honi *mikrouhinen hondo-erradiazioa* deritzo. Baina hori beranduago ikusiko dugu.

1948. urte berean HERMANN BONDI, THOMAS GOLD eta FRED HOYLEk hasierako leherketarekin bat ez zetorren eredu bat gauzatu zuten. Beraientzat unibertsoaren propietateak eta berezitasunak ez dira aldatzen denborarekin, eta orduan leherketaren ideia ez da beharrezkoa. Eredu honi Eredu Geldikorra deritzo (ingelesez, *Steady State*). Teoria honek aurkikuntzak azaldu behar zituen, horrexegatik hedapena onartzen zen, Hubble-ren legea betetzeko eta lerrakuntza azaltzeko. Baina nahiz eta eredu honetan Hubble-ren legea bete izan, desberdintasun bat zegoen leherketaren teoriarekin, hauxe prezeski, Hubble-ren konstanteak ez baitzeukan denboraren menpekotasunik, edozein momentutan balio berbera baitzeukan. Beste aldetik, arazo bat zegoen, hedapenaren ideiak unibertsoaren dentsitatearen aldaketa zekarren. Unibertsoaren dentsitatea konstantea izan behar zen. Nola izan zitekeen hori? Arazo hau gainditzeko, hedapenean ezer ez dagoenetik materia etengabe sortzen zela proposatu zuten. Proposamen honi *Etengabeko Sorreraren Teoria* deritzo. Leherketaren ereduan, materia momentu batean sortu zen, hasieran; eredu geldikorrean, oster, materia aldiune guztietan sortzen ari zen. Esan behar da, materia asko ez zela sortu behar eredu egokitzeke: hidrogeno atomo bat sortu behar zen urtero mila milioi litroko eskualde batean.



17. Irudia. Eredu aldakorra (a) eta eredu geldikorra (b).

Materiaren sorrerak energiaren kontserbazio-legea apurtzen zuen. Baina, noski, lege hau hipotesi bat da. Guk inoiz ez dugu ikusi energia ezerezetik sortzen, baina gerta daiteke. Gainera, sortu behar zen materiaren kantitatea neurtezina da guretzat gaur egunean.

Eredu geldikorra printzipio kosmologiko perfektuan oinarrituta dago. Printzipio honek ondokoa dio: «*unibertsoa isotropo eta homogeneoa da edozein aldiunetan*». Hau da, behatzaile batek berdin ikusiko luke unibertsoa edozein momentutan eta edozein lekutan balego. Unibertsoaren ideia asko errazten da hipotesi honekin.

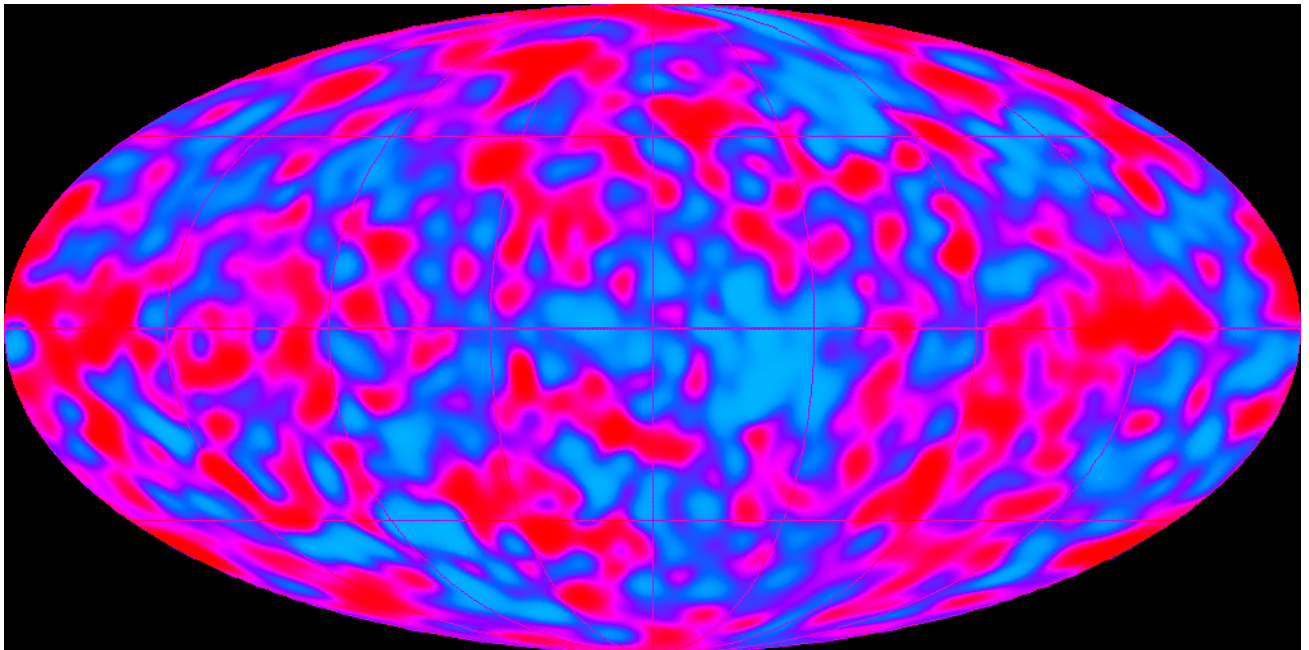
Garai hartan leherketaren teoriak ezin zuen azaldu oso ondo unibertsoaren adina. Lehen azaldu dugunez, leherketaren teorian unibertsoaren adina oso txikia zen. Horixe zen eredu geldikorraren aldeko argudiorik garrantzitsuenak. Baina 1952. urtean WALTER BAADEk (1893-1960) distantzia kosmikoen eskala aldatu egin zuen. Eskala honen bitartez, H -ren balioa birkalkulatu zen, eta ondorioz, H -ren balioaren estimazioa aldatu egin zen, hedapenaren denbora karakteristikoa aldatuz. Modu honetan leherketaren teoriak hobeto azaldu zuen unibertsoaren adina, eredu geldikorraren argudioak ahulduz. Gaur egun egokitzen hartzen den H -ren balioa erabiliz [$H = (15 \text{ km s}^{-1})/(10^6 \text{ argi-urte})$], hedapenaren denbora karakteristikoa 20.000 milioi urtekoa da. Beraz, unibertsoaren adina balio hori baino txikiagoa dela kontsideratzen da.

1964. urtean ARNO ALLAN PENZIAS eta ROBERT WOODROW WILSON, Bell Telephone laborategietako antena bat frogatzen ari zirenean, erradiazio berezia aurkitu zuten. Erabili zuten antenak gure galaxiak igortzen duen erradiazioa neurtzeko balio zuen. Baina aurkitutako erradiazioa guztiz isotropoa zen, hau da, momentu eta norabide guztietan berdina zen. Hori ikusita, erradiazio hori gure galaxiak ezin zela izan pentsatu zuten. Geroxeago konturatu ziren, aurkitutako erradiazioa GAMOWek auresandakoa zela. Honekin eredu geldikorra bertan behera geratu zen, aurkikuntza honen zergatikoa azaldu ezin zuelako. Mikrouhinen hondo-erradiazio kosmikoa leherketaren ereduaren aurrean barruan zegoen, eta teoria honen frogak garrantzitsuenetariko bat da.

Leherketaren ereduaren hasierako momentuan unibertsoak oso tenperatura altua zuen, hidrogeno-kantitate handia elementu astunetan ez bihurtzeko modukoa. Garai hartan, tenperatura altuetan egonik, materia eta erradiazioa oreka termikoan zeuden. Oreka termiko hau, nukleoek elektroiek harrapatu zituztenean apurtu zen, hau da, birkonbinaketaren garaian, 3.000 kelvin inguruan. Elektroiek askeak desagertu zirenetik, erradiazioa askeki hedatu da gaur egunera arte. Erradiazio honek tenperatura karakteristikoa du. Honelatan, ba, erradiazioa tenperatura honetan dagoen gorputz beltzak erradiaturikoa bezalakoa da. Hubble-ren legea aplikatzen badugu, erradiazioak lerrakuntza jasoko du, hau da, erradiazioa uhin-luzera txikietatik —energia handietatik— uhin-luzera handietara —energia txikietara— pasatu da. Leherketaren teoriak gaur

egungo erradiazio karakteristikoa 2,7 kelvinekoa izan behar dela aurreratu du. Emaitza hori ados dago gaur egun neurtzen denarekin.

Erradiazio hau erabat isotropoa ez izatea espero zen. Eta horixe da, orain dela oso gutxi C.O.B.E. sateliteak frogatu duena. Anisotropia txiki honen zergatikoa masaren pilamenduan dago. Beste aldetik, mikrouhinen hondo-erradiazio kosmikoa da gaur egun ikusten edo neurtzen dugun gauzarik zaharrena.



18. Irudia. C.O.B.E.ren irudia.

Denbora pasatzean, leherketaren teoria hobetuz joan da, teoriaren akats batzuk gaindituz. Teoria guzti honi “*eredu estandarra*” deritzo. Ikusi dugunez, eredu estandarrak hiru oinarri experimental ditu. Hauek ereduaren aurreraren barruan daude eta horren aldeko frogak dira. Frogak ondokoak dira: alde batetik, Hubble-ren legea; bestetik, mikrouhinen hondo-erradiazio kosmikoa; eta azkenez, elementu arinen ugartasuna.

1980. urtean ALAN H. GUTHek beste eredu bat garatu zuen, eredu estandarren akats batzuk gainditzeko. Eredu honi “*eredu inflazionarioa*” deritzo eta eredu estandarrekiko diferentzi gutxi dauka, unibertsoaren lehenengo garaietan izan ezik. Argiago esateko, momentu batetik aurrera — 10^{-30} s-tik aurrera— eredu biak berdinak dira. Desberdintasuna 10^{-30} s baino lehenago gertatutako itzelezko zabalkuntzan —*inflazioa* deritzon horretan— datza.

Edozertara, nahiz eta mende honetako kosmologian izugarrizko aurrerakada egon den, asko dago egiteko eta oraindik akats ugari daude ereduetan.

BIBLIOGRAFIA

- UEU-KO FISIKA SAILA, *Fisikaren Historia Laburra*, UEU, Iruñea, 1990.
- J. ARREGI, *Unibertsoa: Big Bang-etik gaur egunera*, UEUko Fisika Saila, Bilbo, 1988.
- S. WEINBERG, *Unibertsoren hasierako hiru minutuak*, Gaiak, Pentsamendu Garaikidea, Donostia, 1993.
- J. GRIBBIN, *Big Bang-aren bila*, Gaiak, Pentsamendu Garaikidea, Donostia, 1997.
- I. ASIMOV, *Unibertsoa*, Elhuyar.
- H. BONDI, *Cosmología*, Ed. Labor, Barcelona, 1970.
- I. A. KATIME, 3. A. PEREZ, *A la búsqueda del infinito*, Alhambra, Madril, 1980.
- J. MERLEAU-PONTY, *Cosmología del siglo XX*, Ed. Gredos, Madril, 1971.

Iruñean, 1993.eko uztailaren 29an
Udako Euskal Unibertsitatea, XXI. Udako Ikastaroak