ZENBAIT EREDU KOSMOLOGIKO

Azken hamarkada honetan, kosmologiaren gorakadak Unibertsoaren zenbait eredu interesgarri gorpuztu ditu; haien gainbegiratu bat azaltzen da hemen.

1. SARRERA

Nahiz eta aintzinako mito eta erlijio guztiek teoria kosmologikoa inplizituki besarkatu (1), kosmologiaren planteamendu zientifikoak azken hamarkadetan bakarrik iritsi ditu lorpen onesgarriak (2). Izan ere, denboran nahiz espazioan barrena, orain Unibertsoa finitua ala infinitua ote denari buruzko oinarrizko galdera erantzun dezakegula dirudi experimentazioaren bidez.

Lan honetan, erabakitzeko posibilitate hauxe utzi duen 1920 hamarkadatik orain arte emandako prozesu teorikoari errepaso bat emango diogu.

2. GALAXIEN MUNDUA

1920an, Unibertso estatikoan pentsatzen zuten oraindik zientzigizonek (higidura lokalak arbuiatuz; adibidez, Herkules konstelazioaren puntu baterantz eramaten gaituen eguzkiarena); mundu honetako materia esne itxurazko lenteantzeko eraz, izarren moduan bilduta zegokeen (Galaxia edo Esne Bidea, grekoz $\gamma\alpha\lambda\alpha\xi$ = esne) (3).

Teleskopioz, hodeiak bezalako objektu barreiatu batzu antzematen ziren: nebulosak. 1932an, E. Hubble amerikarrak nebulosa batzutan izar indibidualak ikusi zituen tresna optiko hobetuagoz. Izar horiek tresna txarragoz ez ikusteak, azken batean bere neurrigabeko distantziari buruzko idea ematen zuen; honegatik, aipaturiko nebulosak ez ziren Galaxian egongo; beste galaxia batzu izango ziren baizik (2). Galaxiarteko distantziak neurrigabeak dira; argiak, $3 \cdot 10^8$ m/s abiaduraz, zenbait milioi urte erabiltzen du "leize" hauek gainditzeko.

Galaxien banaketa uniformea da zeruko gangan, eta ez dago begiratzen den norabidearen menpean ("isotropia"). Beste edozein galaxia batetik ere Unibertsoaren isotropia hau mantendu egiten dela suposa daiteke; hots, gure ikusmira kosmikoa ez dela pribilegiatua.

1) "Unibertsoak, espazioaren edozein puntutatik begiraturik, itxura berdina azaltzen du, baita edozein norabidetan ere. Ez dago puntu pribilegiaturik (espazioak ez dauka erdigune absoluturik, bere puntu guztiak erdiguneak izan daitezke batera), ez norabide pribilegiaturik: espazioa isotropoa da".

Postulatu hau "Printzipio Kosmologikoa" da (4). Haren bidez espazioa mugagabea dela atera daiteke ondorio bezala, mugarik eta bazterrik gabea (izan ere, bazterraren ondoko hedatzailea eta beste bazterretik urrunagoko bat ez lirateke egoera berdinetan egongo). Halaber, materiaren banaketak homogenoa izan behar du Unibertsoan, alde batzuk beste batzuk baino dentsitate handiagoa eduki gabe.

3. UNIBERTSO HEDAKORRA. ESPAZIO BEHATZAILEA

1923 eta 1929-ren artean, Hubble-k Unibertsoa ez zela estatikoa egiaztatu zuen, Newton-ek eta Einstein-ek berak uste izan zuten bezala, dinamikoa baizik.

Galaxien argiak uhin-luzera desberdinezko uhinak dauzka. Hasieran, uhin-luzera igorritakoa, galaxian dauden atomoen menpean dagoela uste izan zen, baina, uhin-luzera behatua teorikoa baino handiagoa zela, hau da $\lambda' > \lambda$, ikusten zen (uhin-luzeraren gorriranzko lerrakuntza). Gorriranzko lerrakuntza Doppler-Fizeau efektuak bezala interpreta daiteke. Kontsidera dezagun edozein galaxiak F (fokua) ematen duen argia (1. Irudia) eta beste galaxia batena O (be-

1. IRUDIA

hatzailea edo erreferentzi puntua), zein galaxia igorletik "v" abiaduraz urruntzen den. Galaxien arteko distantzia "r" da. F-ren argia $c = 3.10^8$ m/s abiaduraz "jarraitzen zaio" O galaxiari. O-raino ondoko denboran helduko da:

$$\Theta' = \frac{r}{c - v} \qquad (2)$$

O, F-ri dagokionez geldirik egongo balitz, hau da, v = o balitz, denbora zera izango litzateke:

$$\Theta = \frac{r}{c} \qquad (3)$$

kontutan izanik $(\lambda'/\lambda) = \Theta'/\Theta$, hauxe lortzen da:

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{c}{c - v} \qquad (4)$$

Honegatik, gorriranzko lerrakuntza batek zera inplikatzen du, argia ematen duen galaxia errezibitzen duenetik urruntzea. Galaxiak elkarrengandik urruntzen dira, haien arteko espazioa zabalduko bailitzan bezala. Unibertsoa hedatzen ari da.

O eta F galaxien arteko aukera nahierarakoa da; edozein galaxia bi izan daiteke. Magnitude inplikatuei (λ, λ', v eta r) zentzu enpirikoa emateko erosotasunez gure Galaxia gure ikusmira dela suposatzen da. Hau erosoagoa da, baina ez egiazkoagoa; ez da pentsatu behar Galaxia hedakundearen erdigunea denik. Printzipio Kosmologikoaren arabera, espazioak ez dauka erdigune absoluturik; edozein galaxia kontsidera liteke erdigune.

4. ekuazioaz "v" lor daiteke, urruntze-abiadura erlatiboa, λ' eta λ neurketaren bidez. Hubble-k eta bere laguntzaileek v (r) erlazioa lineala dela aurkitu zuten:

$$V = H \cdot r \qquad (5)$$

"v" hori edozein galaxiaren urruntze-abiadura da, beste edozein galaxiari erreferitua garai konkretu batean; "r" hori bi galaxien arteko distantziari proportzionala. "Hubble-ren legea" da. Eta "H", azkenik, proportzionaltasun-konstantea (Hubble-ren konstantea) ez dago "r"-ren menpean baina neurtzen den garaiaren menpekoa izan daiteke. H-ren alderantzizkoa, T = 1/H, Hubble-ren denbora da. Neurketa hoberenak $T = 1{,}9 \cdot 10^{10}$ urteko gaurko balioa ematen dute (5). Erlatibitate espezialaren teorian hauxe frogatzen da: ezin daitezkeela neur abiadurak argiarenak baino handiagoak, hots: $v \leqslant C$. 5. ekuazioa kontuan harturik zera lortzen da:

$$H \cdot r \leqslant C \qquad (6)$$

eta beraz:

$$r \leqslant \frac{C}{H} = \delta$$

Era berean ezin daitezke neur, edozer galaxiatatiko, distantzia $\delta = cT$ distantzia baino handiagoak. Hau "horizonte kosmikoa" da. Behatzaile bakoitzak espazio behatzaile mugatu eta finitua du, egiazko espazio osoaren arlo bat denez: 1 argi-urte/urte balioak erabiliz gaurko balioa $\delta = 1{,}9 \quad 10^{10}$ argi-urte lortzen da (2). Gure teleskopio hoberenak distantzia horren 2/3-etaraino heltzen dira bakarrik (3).

4. UNIBERTSOAREN JATORRIA

Galaxia bakoitzak garai guztietan abiadura berdina izan balu, higidura uniformearen legearen bidez zera lortuko genuke:

$$r = v \cdot t \quad \text{edo} \quad v = \frac{r}{t} \qquad (7)$$

5. ekuazioaz konparatzean, $t = \frac{1}{H} = T$ lortzean da une guztietan (6). Gainera, $t = 0$ baldin balitz $r = 0$; galaxia guztiak bilduak izango lirateke, super-izar bakar eta oso trinkoa osatuz, kosmologo batzuk "Atomo primitiboa" edo "Arrautze kosmikoa" deitutakoa (7). Barruko fenomeno erradiaktiboengatik Arrautze Kosmikoak leher egin zuela (Big-Bang edo Eztanda Handia) uste da, haren zatiak (projektil baten metraila moduan) norabide guztietan barrena sakabanatuz. Zati hauek, denbora iragatean, galaxiak izango ziren. Eztandaren hasieran, elementu kimikoen sorkuntza hasiko zen fisio nuklearren bidez.

Eztanda Handiaren nabaritasun experimentalik badago: bere "oihartzuna"-k irauten du erradiazio-ondoren eran (gaur eguneko irrati-mikrouhinak). Erradiazio-hondo hau isotropoa delarik, Penzias-ek eta Wilson-ek detektatu zuten 1965ean (8,2).

7. ekuazioan, $t = T$ denez gero, gaur egun $t = 1{,}9 \cdot 10^{10}$ urte izango litzateke; hau da, Eztanda Handia orain $1{,}9 \cdot 10^{10}$ urte gertatu bide zen; hauxe dateke, hortaz, Unibertsoaren adina (t_a).

Dena dela, ez da probablea hedakunde kosmikoak higidura uniformearen legea jarraitu izana, eta galaxien abiadura itxuraz gutxituz joan da denboran zehar, haien elkarrekiko erakarpen grabitatorioaren bidez (6). Big-Bang-etik gure garaira arte egon zitezkeen "balaztada grabitatorio"-aren efektu hauek ebaluatzera goaz orain.

5. UNIBERTSOAREN EREDUAK

Kontsidera dezagun erreferentzi puntu gisa galaxia hartzen dugula. "n" masak, r erradioko eta O erdiguneko esfera batean hertsia egonik eta homogenoki banatua, azelerazioa eragingo du O-tik "r" distantziara kokaturiko beste F galaxia batean (eta beraz, aipaturiko esferaren gainazalean). Azelerazio honek hauxe balio du:

$$g = \frac{d^2r}{dt^2} = v \cdot \frac{d \cdot v}{dt} = -\gamma \frac{m}{r^2} \qquad (8)$$

non

non $\gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ N · m^2 · kg^{-2} den. Erakarpenaren azelerazioa ez dago F-ren masaren menpean. Kanpoko masak ere ez du eragiten, homogenoki banaturik baitago eta esfera huts baten barruko eremua hutsa bait da (6). "Minus" zeinuak, azkenik, indarraren norantza bektorearen aurkakoa dela adierazten du.

Integra dezagun orain 8. ekuazioa, eta hauxe lortuko dugu (4):

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 = v^2 = 2\,\frac{m}{r} + 2E \qquad (9)$$

E hori integrazio konstantea da. Aurrerago zehaztuko dugu bere esangura. Hedakunde kosmikoak, espazioaren geometriak denboraren arian aldaezina irauten duenez, garai baten eta beste baten tamainuen arteko erlazioa "antzekotasunezkoa" da; beraz, antzekotasun honen eskala ondoko modu honetan definitzen da (4):

$$R = R\,(t) = \frac{r\,(t)}{r\,(t_o)} = \frac{r}{r_o} \qquad (10)$$

non

$$r_o = r\,(t_o) \neq 0$$

t = t bada, R eskalak 1 balio du. "t_o" unearen aukera nahierarakoa: $t_o = t_a$ izan liteke.

Orduan:

$$v = \frac{dr}{dt} = r_o \cdot \frac{dR}{dt} = r_o \cdot V$$

Beste alde batetik, aipaturiko esferaren dentsitatea zera da:

$$\rho = \frac{3m}{4\pi r^3} \text{ hau da,} \qquad \rho = \frac{3m}{4\pi r_o^3 R^3} = \frac{\rho_o}{R^3}$$

eta beraz, (11)

$$m = \frac{4\pi r_o^3 \rho_o}{3}$$

Defini dezagun honako hau ere:

$Q = \frac{8\pi\gamma}{3} \cdot \rho_o$. Hau ordezkatuz 9. ekuazioan zera lortuko da (4):

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = v^2 = \frac{Q}{R} + \frac{2E}{r_o^2} \qquad (12)$$

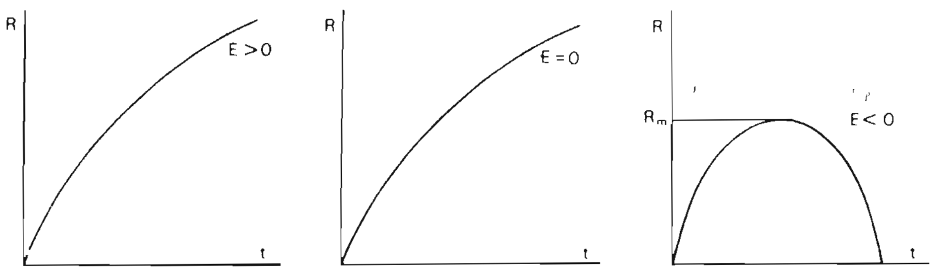
Hemendik R (t) funtzioa lor dezakegu: horrek Unibertso hedatzailearen portaera mugatzen du, ondoko integrazioaren bidez:

$$t = \int \frac{dR}{\left(\frac{Q}{R} + \frac{2E}{r_o^2}\right)^{1/2}} \quad ; \quad t = t_o \text{ bada, } R = 1 \qquad (13)$$

13. ekuazioaren integrazioa, E-ren zeinuaren terminotan egin da. Gure helburuetarako, haren "kualitatezko integrazioa" nahikoa izango da. Konsidera dezagun 1'2.ekuazioa. Argi dago $V^2 \geqslant 0$ izan behar duela. $R \rightarrow \infty$ bada, $\frac{Q}{R} \rightarrow 0$ eta $V^2 \rightarrow \frac{2E}{r_o^2}$; beraz, $E \geqslant 0$ izanaz bakarrik gerta liteke $R \rightarrow \infty$ (*). Bi kasu hauetan Unibertsoa betiereko hedakundean dugu: grabitatea txikiegia da Big-Bang-en inertzia gainditzeko, eta galaxiek elkarrengandik aldenduz jarraitzen dute betiereko (6).

Baina $E < 0$ bada, R ezin daiteke infinitua izan, $V^2 = \frac{2E}{r_o^2} < 0$ izango bailitzateke orduan. Eredu honetan R goitik mugatuta dago: $R \leqslant Rm = \frac{Q \cdot r_o^2}{-2E}$. Galaxiak ezin daitezke, betierekoz, separazio infinitutaraino urrun. Gehienezko separazio bat lortu ondoren, elkarretara hurbilduko dira berriz: Unibertsoa, R_m gehienezko eskalaraino hedatu ondoren, kizkurtu egingo da ostera. Honela aldizkako Unibertsoa izango dugu, hedakundearen eta kizkurtzapenen zikloz; $\tau = \frac{\pi \cdot Q \cdot r_o^2}{(-2E)^{1/2}}$ periodoa (6) da, eta bertan grabitateak Bin-Bang-en inertzia gainditzen du.

2. irudian hiru eredu hauek irudikatzen dira. Ikus dezakegunez, Unibertsoaren helburua E-ren zeinuaren menpean egongo da:



2. IRUDIA

E $<$ 0 balitz, betiereko hedakundea izango litzateke, eta E $\geqslant$ 0 balitz Unibertso ziklikoetan egongo ginateke. Ikus dezagun orain erlatibitatearen teoria orokorraren textuinguruan zein den E-ren esangura fisikoa eta haren garrantzia.

6. ESPAZIOAREN GEOMETRIA

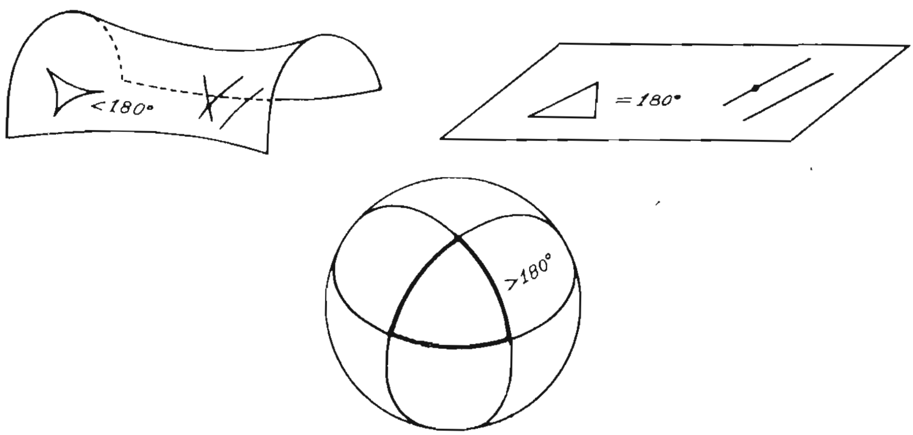
9. ekuazioa ondoko eran berrordenatzen badugu (8):

$$E = \frac{v^2}{2} - \frac{\gamma m}{r} \tag{14}$$

$E_k = \dfrac{v^2}{2}$ gaia F-ren energia zinetikoa izanik. $E_p = -\dfrac{\gamma m}{r}$ F-ren energia potentzial grabitatorioa eta, beraz $E = E_k + E_p$ batura F-ren energia orokorra; guzti hau O-ri dagokionez eta masa unitatez. Energiaren kontserbazioaren legeaz, kantitate honek konstante izan behar du denbora iragan ahala. Baina, erlatibitate orokorrak dioenez E espazioaren kurbaduraz (x) erlazionatua dago (9). Eta honela:

$E > 0 \Longrightarrow x < 0 \Longrightarrow$ Espazio hiperbolikoa (Lobatchewsky)		Espazio irekia
$E = 0 \Longrightarrow x = 0 \Longrightarrow$ Espazio launa (Euklides)		eta infinitua
$E < 0 \Longrightarrow x > 0 \Longrightarrow$ Espazio esferikoa (Riemann)		Espazio itxia eta finitua

3. irudian geometri mota bakoitzaren zenbait propietate erakusten da espazio bidimentsionaletarako (gainazalak) (6). Galaxien espazioa tridimentsionala da.



3. IRUDIA

Beraz, Unibertsoaren helburua eta haren geometria lotuak ageri zaizkigu. $E \geqslant 0$ balitz, Unibertsoa infinitua izango litzateke, nahiz espaziotan nahiz denboratan (betiereko hedakundea).

$E < 0$ balitz, aldiz, Unibertsoa finitua izango genuke, espaziotan eta denboratan (zikloak).

Saia gaitezen orain arazoa arlo experimentalera eramaten. Nola erabaki liteke experimentalki Unibertsoa irekia ($E \geqslant 0$) ala itxia ($E < 0$) jarraitzen zaion?

7. EREDUEN ARTEKO ERABAKIA

14. ekuazioan "v" bere balioaz ordezkatzen bada: $H \cdot r$, Hubble-ren legetik ateratakoa (5) eta 11. ekuazioari jarraikiz, $m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho$ ipintzen bada, zera lortuko da (8):

$$\frac{E}{r^2} = \frac{H^2}{2} - \frac{4\pi\gamma}{3} \cdot \rho$$

$$\frac{2E}{H^2 \cdot r^2} = 1 - \frac{8\pi\gamma\rho}{3H^2} \qquad (16)$$

Honela, dentsitatearen balio kritikoaren sarrera heltzen da:

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi\gamma}$$

"Dentsitate-parametroa" (6), $\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$, defini dezakegu orobat, eta orduan,

$$\frac{2E}{H^2 \cdot r^2} = 1 - \Omega \qquad (17)$$

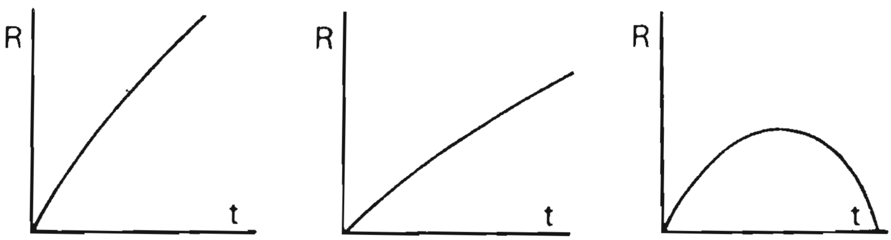
bada	$\Omega < 1,\ \rho < \rho_c,\ E > 0$	espazio hiperbolikoa	espazio infinitua Unibertsoaren betiereko hedakundea
	$\Omega = 1,\ \rho = \rho_c,\ E = 0$	espazio launa	
	$\Omega > 1,\ \rho > \rho_c,\ E < 0$		espazio finitua Unibertso ziklikoa

Unibertsoaren edozein esferaren ρ dentsitatea Unibertsoaren dentsitate moduan har daiteke, homogenoa denez gero. Orduan *arazo dena* Unibertsoaren dentsitatea dentsitate kritiko konkretu bat: $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi\gamma}$ baino handiagoa, berdina ala txikiagoa izan daitekeenaren menpekoa izango da. Honek Unibertsoaren finitutasunaren ala infinitutasunaren arazoa parametro experimental baten menpe uzten du (6,8).

$\Omega \leqslant 1$ bada, Unibertsoa infinitua da espaziotan eta denboratan.
$\Omega > 1$ bada, Unibertsoa finitua da espaziotan eta denboratan.

1. taulan, Unibertsoaren eredu desberdinei buruz azaldua laburtzen da.

E	X	Ω	Unibertsoaren helburua (denbora)	Unibertsoaren geometria (espazioa)	Unibertsoaren bilakaeraren grafikoa
> 0	< 0	< 1	betiereko hedakundea	hiperbolikoa	
$= 0$	$= 0$	$= 1$	betiereko hedakundea	launa (infinitua)	
< 0	> 0	> 1	hedakundeen eta kizkurtzapenen zikloak	esferikoa (finitua)	



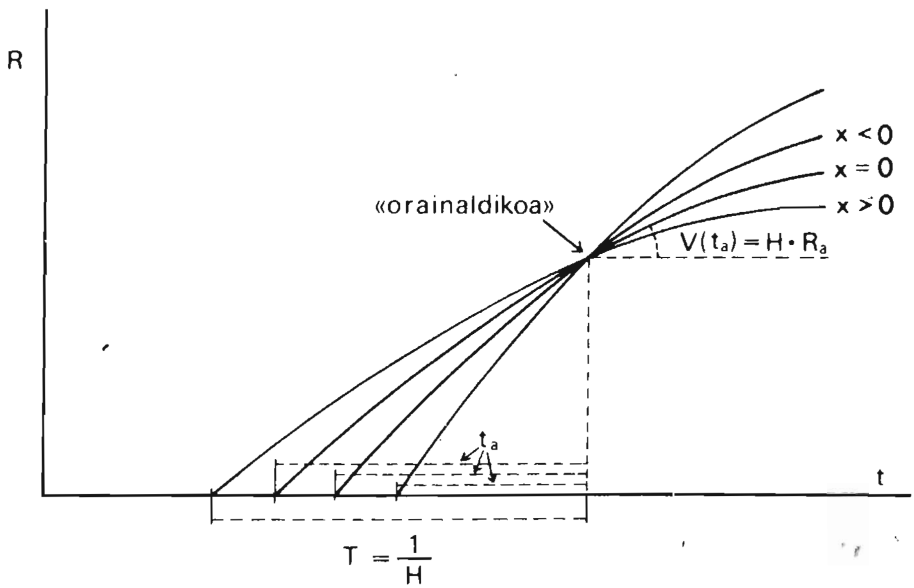
1. TAULA

$$T = \frac{1}{H} = 1{,}9 \cdot 10^{10}$$ urte bada, $\rho_c = 5 \cdot 10^{-27}$ kg $\cdot$ m^{-3} lortzen da. Balio txikia da, baina Unibertsoa oso hutsik dago (gogora ditzagun galaxiarteko neurrigabeko espazioak) eta bere dentsitatea are txikiagoa izan liteke.

Bakarrik, masa galaktikoak kontutan hartzen bada (Dirac eta Jordan) galaxien astro distiratsuagoen bidez kalkulaturikoak, $\Omega = 0{,}12$, lortzen da eta Unibertsoa betierekoz hedatuko litzateke, espazio hiperbolikotan barrena (10). Beste batzuk (Tolman) izar nanoen, zulo beltzen eta galaxiarteko eta izarrarteko gasen masek Ω gehi dezaketela uste dute, agian $\Omega = 2$-taraino, azken honi $\tau = 1{,}2 \cdot 10^{11}$ urteko periodozko eredu ziklikoa dagokiolarik.

Unibertsoaren dentsitatea ez da oso ezaguna eta, horregatik, eredu arteko erabakia ez da egin praktikan, nahiz eta teorikoki eginkorra izan.

Beste parametro erabilia, t_a, gaurko Unibertsoaren adina da. Kurba guztiak "orainaldiko" unean egokitu behar dira (6): $t = t_a$, $R = R(t_a)$, $V = H(t_a) \cdot R(t_a)$. Orduan, eredu gazteagoa esferikoa izango zen eredu launetik jarraitua ($T_a = 12{,}6 \cdot 10^9$ urte) eta hiperbolikotik. Baina Unibertsoaren adin orokorra ere ez da ezagutzen, haren gauza konkretuenak baizik (izarrak, izar-kumuluak, galaxiak, e.a.). Adin hauetariko asko balio kritikoa ($1{,}26 \cdot 10^{10}$ urte) baino txikiagoak dira, adibidez eguzkiaren $5 \cdot 10^9$ urteak (2). Beste adin batzuk balio kritiko hori gainezkatu egiten dute; adibidez, gure Galaxiarena $1{,}5 \cdot 10^{10}$ urte da gutxi gora-behera (2). Baita 4. irudian ere, eredu guztietan $t_a < T = 1{,}9 \cdot 10^{10}$ urteko adina eman dutela dirudi (2). Honekin denboraren eskala-problema bat sortzen da, beste eredu batzu (ez soilik grabitatorioak) (hemen deskribatutakoak bezala) kontuan hartzera behartuko luketenak) (4). Baina Unibertsoaren adina dentsitatea baino gutxiago parametro fidagarria eta konplexuagoa dirudi, nahiz eta honek ez erabaki, oraingoz, Unibertsoaren finitutasunaren ala infinitutasunaren arazoa.



4. IRUDIA

BIBLIOGRAFIA

1. Biblia Saindua...

I. Katime; J. A. Perez Ortiz eta X. Ibarra