

Kosmologiaren mugak eta Printzipio Antropikoa

*Mikel Susperregi*¹

Fisika Teorikoa Saila
Euskal Herriko Unibertsitatea / Zientzi Fakultatea
644 P.K., 48080 BILBO

Laburpena: Egun, kosmologiak aurreikusten duen unibertsoaren egitura globala aztertzean, astronomian behaketak egiteko dugun ahalmenaren mugak ezagutu nahi ditugu. Dakigunez, behaketen bidez iker dezakegun unibertsoa auzunean diren baldintza astrofisikoak, eta Naturako *konstanteen* balioak gizakiak sortzeko hainbatekoak dira eta nolabaiteko konplexitate biologikoa hazteko ere egokiak dira. Baldintza hauek betetzea fisika mugatzea da, eta horixe da *Printzipio Antropikoa*, labur esateko. Printzipio horren bidez, gure unibertso auzuneko hainbat baldintza mugatuak badira ere, galdera nagusia hau da: ba al dago jakiterik zer nolako estrapolazio egin daitekeen unibertsoaren egitura globala ezagutzeko?, gure inguruko unibertsoa ezagutuz gero, eta kontestu zabal horretan, gure behaketekin bat datozen teoriak asko izan badaitezke, ba al dago jakiterik teoria hauen artean aukerak nola egin ditzakegun? Beraz, ondorioz, unibertsoaren egitura globala aztertzeke badaude baldintzak zenbait aukera egiteko, kosmologian, muga epistemologiko gaindiezinak baititugu.

1. SARRERA

Seguru asko, *muga* hitza daraman izenburua ez da aukera daitekeen izenbururik baikorrena. Kosmologiaren iritziz, eta hau da joera nagusia, astronomiaren ezagutza unibertso osora heda daiteke, muga guztiak zeharkatuz. Dena dela, behaketa astronomikoen mugak nabariak dira, eta ez dira teknikoak soilik, jakina (edozein galaxiaren izar-espektroek limitazio teknikoak dituzte, bereizmena dela-eta, esaterako). Unibertsoaren osotasunaren atal muga baina ez diezagukete erakuts behaketek; hots, *kausalitate-horizontearen*

¹ EMAIL: wtpsuxxm@ehu.es

barruan dagoen bolumena. Horren oinarrizko arrazoiak bi dira: argi-izpien abiadura, batetik, eta unibertsoaren hedapen-abiadura, bestetik, finituak izatea. Beraz, esan denez, behaketen bidez uztartzen den informazio astrofisikoaren hedapena mugatua da. Argiaren abiadura finitua izateak badu beste ondorio zuzena. Fenomeno astrofisikoak bereizten ditu: elkarrekiko harreman kausala izan dezaketenak eta izan ez dezaketenak. *Kausalitate-horizontearen* barruan diren gertaera astrofisikoak beha ditzakegu, eta aipatu bolumena da gure eremu esperimentalak. Mugatze hori oinarrizkoa da, eta ahalegin guztiak eginda ere ez dago hori gainditzetik; gure ezagutzaren garapenaren bidez, esaterako, edo aurrerapen teknologikoen bidez.

Unibertsoaren hastapenetik gaur egun arte datozkigun aztarna baliagarrienak, *mikrouhin* eta *X-izpiko erradiazio kosmikoak*, kausalitate-horizontearen barruan kokaturik daude, eta hortik kanpoko mikrouhin edo X-izpiko erradiaziorik ezin dugu jaso. Muga horiek aztertzea garrantzitsua da, astronomiaren ikuspuntutik, eta modu berean ere, inportantea da erabakitzea zein printzipiotan oinarriturik eraiki ditzakegun *unibertso osoari* dagozkion teoriak. Azterketa horretan datza *kausalitate horizontearen* behaketek zein errola duten ikertzea, eta haietan oinarriturik zer nolako hipotesiak eta oinarri orokorrak ondoriozta ditzakegun unibertso osorako. Beraz, artikulua honen helburu nagusia ondokoa da: aztertzea zein noranzkori jarraituz iker dezakegun unibertsoaren egitura globala, jakinik behaketek eurek ere muga intrintsekoak dituztela, eta teoria hauek eraikitzean dauden aukera epistemologiak zein diren kontuan hartuz behaketen limitazio intrintsekoak direla medio, eta aztertzea zein aukera epistemologiko dugun (aukerarik baldin bada) teoria hauek eraikitzeoan.

2. PRINTZIPIO ANTROPIKOA

Printzipio Antropikoaren [1,2] arabera, behatu diren unibertsoaren lege fisikoak eta oinarrizko konstanteen balioak egokiak dira, *giza bizitza* ahalbidetzeko modukoak baitira; eta horren lekuko, gu geu, gizakiak eta behatzaile fisikoak. Beraz, oinarrizko konstanteek ezin dute beste baliorik izan; hala balitz, ez bailitzateke gizakia esistituko. Printzipio Antropikoak (PA) zenbait berformulazio izan du [2], nahiz eta artikulua honetan lehen aipatutakoa erabili eta landuko dugun.

PA-k oinarrizko konstanteen balioak mugatu ditu; beraz, oinarrizko konstanteen balioak eta beren arteko zatidurak ez datozkigu bat etortze huts-hutsez, baizik eta PA-ak hala eskatu duelako, halabeharrean. Giza behatzaileak agertu ahal izateko hala behar baitu, hain zuzen. Modu berean ere, ondorioak zabalak dira. Lehenik, Carter-ek [3] adierazi zuen moduan, *egitura fineko konstantea* ($\alpha \equiv e^2/\hbar c \sim 1/137$) eta «*grabitateko*» *egitura fi-*

neko konstantearen ($\alpha_G \equiv Gm_p^2/\hbar c \sim 10^{-38}$) arteko zatiduraren balioak honako hau izan behar du: $\alpha_G \sim \alpha^{20}$.²

Hori zehaztasun handiz beteko bada, izar erradiatiboen eta konbektiboen koexistentzia ziurta daiteke. Carr-en eta Rees-en [4] arabera, bi izar-mota hauen koexistentziak ahalbidetu du bizitza biologikoaren hedapena; eta beraz, PA-ren arabera behar-beharrezkoak dira biak. Alde batetik, izar erradiatiboek elementuak sintetizatzen dituzte, oso etekin handiz. Prozesu hori bukatutakoan, supernoba leherketaren bidez elementu hauek izar arteko ingurunean zehar zakabanatzen dira. Beste alde batetik, izar konbektiboak bere gunetik kanpora oso ongi nahasturik daude, eta etekin txikiagoz eta astiroago sintetizatzen dituzte elementuak. Izar hauek, ordea, erradiatiboak baino bizitza luzeagokoak dira, epe-luzeko egonkortasunari esker. Berauen inguruetan planetak eratzen dira. Supernobaren eztanda gertatu baino lehen, inguruko egonkortasuna ziurtatu egin behar da, luzaroan, nolabaiteko bizitza biologiko konplexua ager dadin. Izar konbektiboek baino ezin dute aipatu egonkortasuna ziurtatu. Laburbilduz, beraz, bi motatako izarrek behar dira kosmosean: (1) *izar erradiatiboak*, elementu pisutsu gehienak izarren arteko espaziora kanporatuko dituztenak; (2) *izar konbektiboak*, planetei ingurune egokia eskainiko dietenak, energia-iturri egonkor eta orokor izanik, planeta hauetan bizitza biologikoa hazi ahal izateko.

Beraz, α -ren eta α_G -ren arteko funtzio-erlazio zehatza ez da Jainkotasunak emandako bat etortzea; PA-aren bidez argudio astrofisiko zehatza dugu esku artean hori horrela dela baieztatzeko, halabeharrea. Aipatu erlazio zehatz horretatik aldenduz gero ($\alpha_G \sim \alpha^n$), izar guztiak erradiatiboak izango lirateke ($n < 20$), edo, bestela, guztiz konbektiboak ($n > 20$), ikus [4]. PA-aren arabera bi izar-mota hauek koexistitu behar dute, eta ondorioz, $\alpha_G \sim \alpha^{20}$ PA-ren ondorio zuzena da.

PA-k, gure unibertsoaren adinari buruz ere, badu zer esana. Unibertsoaren adina, $t_o \sim 15$ gigaurtekoa da, gutxi gorabehera (1 Gur = 10^9 urte), izar baten erretze nuklearraren adinaren antzekoa (~ 10 Gur). Gazteagoa litzatekeen unibertsoak ez luke izango giza bizitza (bizitza biologikoa) bermatzeko behar adinako konplexitate kimikoa. Aldiz, zaharragoak, errekin nuklear gehiena erreta izango du; eta ondorioz zulo beltzak gailenduko dira galaxia gehienetan, eta baita neutroi izarrek ere, ipotx zuriak eta beste izarren aztarna zaharrak eta itzalak. Dirudienez, gaur egungo unibertsoaren

² α eta α_G konstanteak dimentsio-gabekoak dira, eta hain zuzen, c (argi abiadura), \hbar (Planck konstantea), G (grabitazional konstantea), e (elektroi karga elektrikoa) eta m_p (protioiaren masa) oinarritzko Natura konstanteekin osatu daitezkeen dimentsio-gabeko konstante bakarrak. α -k indar elektromagnetikoaren intentsitatearen neurria deskribatzen du eta α_G grabitazional indarrarena. Hauek dira indar horiek deskribatzeko erabiltzen ahal diren erreferentzi sistemaz independenteak diren kantitate bakarrak.

adina une a proposean dago, [giza] bizitza biologikoaren hedapen gehiena lortzeko.

Bestalde, PA-ren ondorioz ere mikrouhin erradiazioaren behaketak adieraz ditzakegu. *COBE* satelitearen 4 urtetako (1992-6) datuen arabera, mikrouhin-erradiazio kosmikoa guztiz homogeneoa da, eta bere tenperaturaren fluktuazioak txikiak dira. *COBE* (eta baita beste zenbait mikrouhin-esperimentuk ere: QMAP, Saskatoon, BOOMERANG, besteak beste) erradiazioaren tenperatura behatu du, eta leku bakoitzean batezbestekoarengatik den aldea $\delta T \equiv T - \langle T \rangle$ neurtu. Dakigunez, $\langle \delta T / T \rangle \sim 10^{-6}$. Beraz, mikrouhin-erradiazioaren tenperatura-fluktuazioaren anplitudea benetan txikia da. Jakin nahi izango genuke, benetan, aipatu anplitudea patuaren edo bat etortze kosmikoen bidez finkatua izan den, ala bestela, PA-k horri buruz zerbait esaterik duenentz. Erantzuna ondokoa da. Mikrouhinak unibertsoaren aldiune kritiko batean igorri ziren. Unibertsoa 10^4 -bat urtekoa zenean, materialak eta erradiazioak elkarrekin nahasturan egoteari utzi zioten, eta guztiz banandu egin ziren. Aldiune horri *azken scattering*-eko gainazala deritzo; unibertsoak zeuzkan argi partikula guztiak, fotoiak, *argi flash* baten modura hedatu ziren noranzko guztietara. Aipatu aldiunean igorritako erradiazioa ez zen mikrouhinaren uhin-luzerakoa, jakina, baizik eta energetikoagoa. Orduetik gaurdaino, guregana iristeko, ibilbide luzea egin ondoren, erradiazioak energia-kantitate handia galdu du (15-bat argi G urte-ko distantzian zehar), eta *gorritu* egin da. Mikrouhin hauek *azken scattering*-eko informazioa ere badaramate, tenperaturaren balioaren bidez; aldiune hartan materiarekin nahasturik-edo, *mihiztaturik* baitzeuden. Beraz, ondokoa froga daiteke: mikrouhineko tenperatura-fluktuazioek garai hartako materiaren dentsitate-fluktuazioei buruzko informazioa dakarkigute. Horri *SachsWolfe* efektua deritzo. Efektu horren arabera, gaur egungo mikrouhineko tenperatura-fluktuazioak kontuan hartuz, badakigu hasiera batean materiaren dentsitate-fluktuazioen anplitudea honako hau izan zela: $Q \equiv \langle \delta\rho/\rho \rangle \sim 10^{-5}$. Hastapeneko dentsitate-fluktuazio hauek izarrak sorrarazi dituzte, denborak aurrera egin ahala; ondoren, izar horiek multzoetan uzartuz, galaxiak sortuz joan dira; eta azkenik, *cluster*-ak ageri dira, *galaxia-multzoak*. Dentsitate-fluktuazioen anplitude horri buruz PA-k badu zer esana, Tegmark & Rees-ek [5] bikoteak frogatu duen moduan. Anplitude hori txikiagoa balitz, $Q \lesssim 10^{-5}$, hastapeneko dentsitate handiko inguru-neek ez lukete hozteko aukerarik izango; eta beraz, materia-hodei horiek ez lukete aukerarik izango inolako izarririk sorrarazteko. Elementu pisutsuak ez lirarteke sintetizatuko, eta beraz, ez legoke molekula organikoak sintetizatzeke modurik. Bestalde, $Q \gtrsim 10^{-5}$ -aren kasuan, materia gehiegi izanik, planeten orbitek disrupzioak izango lituzkete, denbora-escala laburrean, $\tau \lesssim 10^7 - 10^8$ urte. Hau da, batezbesteko planeta batek ehunbat milioi urteko epean topaketa deusestagarria izateko aukera handia izango luke, eta ondorioz, eraldaketa biologikoak ez luke astirik izango garai aurreratura iristeko.

3. UNIBERTSOAREN HEDAPENA

1927. urtean Edwin Hubble-ek galaxiak guregandik urruntzen direla aurkitu zuen. Harrezkero, unibertsoaren hedapena adierazten duen teoria asko proposatu izan da. Arrakastatsuenetakoa, azken hamarkadetan, zalan-tzarik gabe, jatorrizko *Big Bang* teoria (BB) da. BB teoriak unibertsoaren hedapena adierazteaz gain, unibertsoaren hastapenari buruzko azalpena ere bazuen: hasierako eztanda erraldoi baten bidezkoa, «big bang» delakoa hain zuzen. BB teoria osatzeko oinarritzko *kosmologia-printzipioa* behar da. Printzipio horren arabera unibertsoak bi ezaugarri ditu: *homogeneotasuna* (dentsitate-fluktuazioak txikiak dira, batez beste, distantzia handietan), eta *isotropia*. Kosmologia-printzipioaren aipatu bi oinarriak kontuan hartuz espazio-denboraren egitura globalean simetriak finka daitezke. Erlatibitate Orokorrak aurreikusi du, Einstein-en ekuazioen bidez, bi simetria hauek bete dituen unibertsoak *Friedman-Robertson-Walker* (FRW) metrikaren bidez gobernaturik egon behar duela, halabeharrean. Hori da, beraz, kosmologia-printzipioan oinarrituriko unibertsoaren geometria globala. FRW metrikaren parametrorik garrantzitsuena Ω dentsitate-parametroa da, dimentsiorik gabekoa. Unibertsoaren eraldaketaren ezaugarri nagusia da, zalantzarik gabe. $\Omega = 1$ bete den kasuan, unibertsoa *laua* da (koordinatualdaketa egokiaren bidez oinarritzko Minkowski espazioa dela ikus daiteke), eta gainera, hedapena mugagabea da. Aldiz, $\Omega < 1$ bete den kasuan, unibertsoa *irekia* da (topologikoki biribila), eta lauaren kasuan aipatu den moduan, hedapena mugagabea da. Azkenik, $\Omega > 1$ bete den kasuan, *itxia* da (topologikoki hiperbolikoa), eta hedapenari dagokionez, aldiuneren batean eten egingo da eta unibertsoa uzkurketa-fasera pasatuko da. Unibertso itxiak, eta berak soilik, masa nahikoa dauka berezko grabitate-indarraren bidez hedapena geldiarazteko. Gaur egungo behaketan bidez jakin ahal izan dugu azken kasua ez dela ezagutzen duguna.

Mikrouhin kosmikoaren behaketek erakutsi digute BB teoriaren arazo nagusia. FRW metrika erabiliz, unibertsoaren hedapen-faktorea honako hau da: $a(t) \propto t^\beta$ ($\beta = 1/2$ erradiazioa gailentzen denean, eta $\beta = 2/3$ materia nagusitzean). Hedapen-faktore hori kontuan hartuz, eta unibertsoaren adina ~ 15 G urte dela jakinik, FRW metrikak aurreikusi duena baino handiagoa da gaur egungo unibertsoa, magnitude-ordena handiz, gainera. Jakin badakigu unibertsoa $\sim 10^4$ urtekoa zenean igorri izan zela mikrouhin-erradiazioa. Berau noranzko guztietatik dator eta bata bestearengandik oso urrun daudela esan nahiko luke. Hala izanik ere, harrigarria da erradiazioa homogeneoa izatea: aipatu toki kosmikoak, nahiz eta distantzia handiz banandurik egon, kausalitate-erlazioaz loturik daude. Unibertsoak FRW eraldaketari jarraituko balio, $\sim 10^4$ urteko unibertsoa azkoz txikiagoa izango litzateke, eta ingurune kosmikoek ez lukete kausalitatearen bidezko harremanik. Mikrouhin kosmikoak erakutsi digun homogeneotasuna ezin

da bat etortze hutsaren bidez ulertu, eta *azken scattering*-eko ingurune guztiek iraganean kausalitatearen bidezko loturaren bat bazutela, pentsatu behar dugu nahitaez. Emaitza hori lortzearen *inflazio* ideia proposatu zuen, lehen aldiz, Guth-ek [6], hurrengo atalean adieraziko denez.

4. INFLAZIODUN KOSMOLOGIA

Inflazioaren ideia nagusia unibertsoaren hedapen esponentziala da. *Inflazioa* gertatzean, unibertsoaren hedapen-faktorea ondokoa den: $a(t) \propto \exp(Ht)$ (non H Hubble-ren parametroa den).

Hedapen-mota horrek ohiko *big bang* eredu kosmologikoaren zenbait arazo konponduko ditu, esaterako unibertsoaren neurriarena. Aurreko atalean eztabaidatutakoaren arabera, mikrouhin-erradiazioaren homogeneitateak kausalitatearen bidez loturik ez dauden guneen tenperaturak berdinak direla ekarri du ondorio gisa. Berau *big bang* kosmologiaren arazo nagusienetakoa da. Inflazio-hedapenaren ondoren, mikrouhin-erradiazioa igortzen duten ingurune guztiak kausalitate-horizonte berberaren barruan kokaturik daude.

Beraz, hedapen esponentziala sortzeko mekanismoa aurkitzea da helburu nagusia. Horretarako inflazio-ereduak *eremu eskalarra* erabili ohi du. Inflazio-eremu eskalarra ϕ inflazioa sortzeko soilik erabiltzen da, ez du beste oinarri fisikorik. Zentzu horretan, erabat *ad hoc* eredu delako onartu behar dugu. Eremu eskalarrak bere energia potentzial propioa du, $V(\phi)$, eta honi dagokio inflazioa sortzeko behar den baldintza bakarra. Hau da: inflazioa sortzearen, eremu eskalarraren energiak unibertso osoaren energia gailendu behar du. Aipatu energiak, unibertsoan bertan diren materia eta erradiazioaren dentsitatean du jatorria, jakina. Inflazio-eredu sinpleenean, hasiera batean eremu eskalarraren energia ($V(\phi) \propto \lambda\phi^{2n}$ motakoa da³) handia da, unibertsoaren osagarrien energia baino handiagoa. Inflazioan, ϕ eremua balioetan behera doa, potentzialaren *maldan behera*, esan ohi den modura. «Maldan behera»ko higidura honek nahitaez *motela* izan behar du; bestela eremuaren energia zinetikoak gailendu dezake energia potentziala.

Azken hamarkadan, inflazioa oso arrakastatsua izan da kosmologiako fenomeno ugari adierazteko. Adibidez, inflazioak aurreikus dezake $\Omega = 1$

³ V -ren forma funtzionala ugari aukera dezakegu. Oinarrizko hautaketa honen arrazoia ondoko hau da: hasiera batean eremua handia denean V handia da, eta unibertsoaren energia gailenduko du. Ondoren, ϕ delakoa balio txikiagoko tartera pasatuko da, eta azkenik, *benetako hutsaren* baliora, $\phi \approx 0$. Ideia orokor horrekin bat etor daitezkeen potentzialen forma funtzionala erabat zabala da, jakina.

(mikrouhinen espektroaren behaketek konfirmatu dutenez [7], eta galaxien katalogoen bidez⁴); hastapeneko dentsitate-fluktuazioen espektroa distantzia-eskalarekiko independentea dela (hau da *Harrison-Zel'dovich* motakoa); fluktuazio horien estatistikak gaussiarrak direla.

Inflaziodun kosmologiaren teknika modu sakonean ukitu gabe, hauexek dira ondorio nagusiak. ϕ eremua handia den bitartean, hastapeneko biribil-formako espazio-denborako ingurune homogeanoan inflazioa gertatzen da. Higidura klasikoari jarraitzen dio gehienbat eremuak. Higidura, ordea, guztiz klasikoa balitz, inflazioak amaiera joko lukeen aldiunera iritsiko litzateke denbora mugatuan. Hori gertatzeko ϕ delakoak nahiko txikia izan behar du (V energia potentzialaren gailentzea haustearren). Garrantzitsua da prozesu horretan higidura klasikoaz gain fluktuazio kuantikoak kontuan hartzea. Horren ondorioz, hastapeneko homogeneousitatea inhomogeneousitate bihurtuko da berehala, eta eremuak balio ugari izan ditzake balio klasikoaren inguruan, inflaziodun espazio-denboran ϕ . Hau da: $\phi = \phi_K + \delta\phi$. Fluktuazioak aldakerrak dira leku batzuetatik besteetara, baina batesbesteko anplitudea honako hau da, $\langle \delta\phi \rangle \approx H/2\pi$.

Fluktuazio kuantikoen eraginez inflazioak sortzen duen unibertsoaren egitura globala guztiz ezberdina da, higidura klasikoari soilik jarraitzen dion unibertsoarekin alderatuz. Eremu eskalarra inflazioa amaitzeko behar duen baliotik beherako balioetarantz gerturatzean, positiboak diren fluktuazio kuantikoen gorantz bultzada dezakete, eta nahiz eta inflazioa zenbait inguruetan amaitu ere, beste zenbaitetan amaigabea izan daiteke, aipatu bultzada kuantikoei esker. Hau da, inflazioak betiko iraun dezake. Gainera, espazio-denboraren hedapenak eremu eskalarraren balioarekiko mendekotasuna dauka, eta inflazio-prozesua zenbat eta handiagoa izan hainbat eta handiagoa izango da ϕ ingurune horren hedapena. Inflazioa esponentziala denez, ϕ_1 eta ϕ_2 ($\phi_1 < \phi_2$) eremuek dituzten bi bolumenen arteko zatidura:

$$\frac{V_2}{V_1} \propto \exp\{3[H(\phi_2) - H(\phi_1)]\Delta t\}, \quad (1)$$

eta, jakina, $H_2 > H_1$ izanik, bi bolumenen arteko aldea zeharo handia izan daiteke. Beraz, anplitude handiko fluktuazio kuantikoen probabilitatea nahiz eta oso txikia izan, ϕ eremua zeharo handituko dute, hedapen-abiadura oso handia izango da, eta hori kontuan hartzeko efektua da. Litekeena da edozein momentutan unibertso osoko bolumenaren frakziorik handienak

⁴ Egungo behaketen arabera, eredurik konsistenteena $\Omega_m = 0,3$ (materiaz osatutako osagarria), eta $\Omega_\Lambda = 0,7$ (*konstante kosmologikoa* A deritzon osagaia). Beraz, guztira $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$.

inflazioan jarraitzea eta kasu horretan, ϕ -ren balioa ahal den handiena da, zalantzarik gabe.

5. MUGA EPISTEMOLOGIKOAK

Aurreko ataleko ondorioak laburbilduz, inflazio-prozesua mugagabea eta amaigabea izan daiteke, eta horren bidez sortzen den unibertsoaren egitura honako hau da. Alde batetik, espazio-denborako ingurune askotan inflazioak amaiera jo du, eta *unibertso txiki* hauen hedapena FRW-motako bihurtu da (ingurune horietan galaxien formazioa eta beste fenomeno astrofisikoak gerta daitezke, gure unibertso hurbila honelako ingurunea da). Bestalde, beste ingurune askotan, hedapenak inflazioaren bidez jarraitzen du eta, jakina, unibertsoaren bolumenaren frakziorik handiena bete badute ere, inflazioan jarraitzen duten inguruneetan ezin dira egitura kimikoak eratu. Azken ingurune horietan beraz, PA-ren argudioak erabiliz ezin daiteke giza motako bizitza biologikorik izan, eta inflazioa amaitu den inguruneetan soilik aurki ditzakegu baldintza egokiak bizitza izan eta heda dadin.

Unibertsoaren irudi globala aipatu modukoa izanik, ondoren datozen oinarrizko arazoak aztertzea dagokio behatzaileari. Alde batetik, badakigu gaur egun gure unibertsoa auzunean FRW hedapena dugula; baina, inflazioidun kosmologiaren deskribapenari jarraituz, unibertsoaren bolumen gehiena gure *kausaltate-horizontetik* kanpo dago. Gure eremu esperimentalak *kausaltate-horizontea* denez, mugatze horrek zenbait zailtasun potentzial lekarkiguke, eta baliteke teoriaren aurreikuspen guztiak frogatzerik ez izatea. Muga hori oinarrizkoa den edo nolabait teoriei buruz esperimentaliki, zeharka, ezer esan daitekeen erabaki behar da. *Inflazioaren* kasuan mugatze epistemologikoa sakona dela zalantzarik ez dago. Unibertsoaren egitura globala *unibertso txiki* osaturik dago, eta hauek inflazio-prozesuaren aldiune ezberdinetan daude. Intuitiboki ondokoa esan dezakegu: inflazioidun unibertsoa *burbuilez osaturiko aparraren* antzekoa da, burbuila bakarra aztertuz ez dago gainontzeko aparrari buruz asko jakiterik, burbuila guztiak ez baitira berdinak. Bestalde, inflazioidun unibertsoan beste aldakortasun garrantzitsuak ere gerta daitezke: Naturaren konstanteak aldakorrak badira (adibidez, eremu eskalarren bidez sortutakoak, eta hauen higadura *Oinarrizko Teorien Batasunak* ezartzen baldin badu), litekeena da burbuila batzuetatik besteetara hauen balioak guztiz desberdinak izatea. Gure unibertsoa auzunea aztertzearekin, *a priori*, ez dago jakiterik unibertsoa osotasunean zer nolako aldakortasuna izan dezaketen *konstante* hauek, adibidez G , h , c eta oinarrizko partikulen masak. Esan dezakeguna guztiz mugatua da: hau da, PA-k esaten digu gure auzunean Naturako konstanteek zein baliokoak izan behar duten, baina baldintzatze horrek ez dakarkigu unibertsoaren beste inguruneei buruzko inolako ezagutzarik.

6. MEDIOKRITATE PRINTZPIOA ETA BESTELAKO AUKERAK

Gaur egungo metodologia epistemologikoari jarraituz, hots Karl Popper-en [8] eta bere jarraitzaileenari segituz, teoria fisikoen indarra beren *gezurtatzeko ahalmenean* datza. Hau da, ez dago teoria bat *frogatzerik*, edo benetakoa dela positiboki *baieztatzerik*. Aldiz, teoriaren aurreikuspenak eta ondorio esperimentalak kontuan hartuz, egin daitekeena teoria *gezurtatzea* da. Beraz, teoria baliagarri guztiak gezurtagarriak dira, eta gezurtatuak izan ez diren bitartean hauei eutsi egiten diegu, baina gezurtatu bezain laster beste teoriak ordezkatzeko dituzte. Paradigma epistemologiko horri jarraitzea ohikoa da, eta hori burutzearen oinarritzko baldintza teoriaren aplikagarritasun-esparrua eta eremu esperimentalak berdinak izatea da. Zientzia askotan eremu esperimentalak teoriaren aplikagarritasun-esparrua baino zabalagoa da, eta berau ideala da, baina biak berdinak izatea ere onargarria da ikuspegi epistemologikoaren aldetik. Dena den, aurreko ataletan aipatu den moduan, kosmologian ez da baldintza hori betetzen; are gutxiago, inflazioidun kosmologian, behatzeko gai garen unibertsoa auzunea unibertso osoaren atal oso txikia eta mugatua da.

Muga epistemologikoak oinarritzkoak dira kosmologian, eta unibertsoaren egitura globala ikertzeko teorien gezurtatzeko prozesu arruntari jarraitzerik ez dago. Horrek ez du esan nahi, ordea, bide itxi batean kokaturik gaudenik, eta kosmologiari buruzko gure ezagutza garatzea ezinezkoa denik. Alabaina, helburu horri ekiteko elementu berrien beharra dugu; hauek dira *kosmologia-printzipioak*. Hutsune bat betetzera datoz printzipio hauek, esparru esperimentalaren mugek utzitakoa, eta nolabait *ad hoc* direla onartzera behartuak gaude. Bestalde, kosmologia-printzipioen aukera ez da bakarria, eta egungo astronomiak edo energia altuko fisikak ez dizkigu arrazoi dogmatikorik eskaintzen printzipio batzuk beste batzuen aldean baztertzeko.

Printzipio kosmologikoak aztertzerakoan PA delakoa beti kontuan edukitzea behar dugu. Hau da, unibertsoaren egitura globala edozein modutakoa izanda, beti izan beharko du ingurune txikiren bat giza bizitza biologikoa sortzeko gauza dena. Gainera, unibertso osoaren mekanismo fisikoek horrelako ingurunea sortu behar dute. Bestalde, printzipioen aukerak erabat zabalak dira. Adibidez, Vilenkin-en *mediokritate printzipioak* [9] adierazi duenez, gure giza zibilizazioa unibertsoan *tipikoa* da, hau da, litezkeen zibilizazio guztien artean probabilitate handiena dutenen motakoak gara. Mediokritate printzipioa, esaterako, nahiko arrazionala da. Giza zibilizazioa ezer berezia ez dela onartzen baldin badugu, edo bat etortze kosmiko baten emaitza, orduan bizitza biologikoa sortzen duten unibertsoko inguruneek probabilitate handiz giza zibilizazioak sortuko dituzte. Printzipio horren ondorioak sakonak dira. Alde batetik Naturaren konstanteen aldakortasuna mugatzen du. Demagun zenbait inflazioidun kosmologia-eredu-

tan Naturaren konstanteak aldakorak izan daitezkeela. Ondorioz, inflazioa amaitu den espazio-denborako ingurune bakoitzak zenbait baldintza fisiko izango du, aipatuen konstante balioekiko menpekoak direnak. Ingurune horien eraldaketa astrofisikoa, izarren eraketa, eta ondoren bizitza biologikoaren hazkuntza balio horien pean izango da.

Mediokritate printzipioa aukera interesgarria da, baina ez bakarra. Argi dago inflaziodun kosmologian eremu experimentalaren mugek arazo epistemologikoak sortzen dituztela, eta argudio antropikoa eta *ad hoc*-a den printzipio kosmologikoak lagungarriak direla, unibertsoaren egitura globalari buruzko ikerketa burutzearren. Sinesgaitza da, ordea, hori azken hitza izatea, epistemologia bihurri horri dagokionez.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. CARTER, in I.A.U. Symposium 63: *Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data*, ed. M.S. Longair, Dordrecht: Reidel (1974); B. CARTER, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **310**, 347-363 (1983).
- [2] J.D. BARROW and F.J. TIPLER, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oxford (1988); J.D. BARROW and J. SILK, *Scient. Am.* **242**, 127.
- [3] B. CARTER, in *Confrontation of Cosmological Theories with observation*, ed. M.S. Longair, (Reidel, Dordrecht).
- [4] B.J. CARR and M.J. REES, *Nature* **278**, 605 (1979); B.J. CARR, *Acta Cosmologica* **11**, 143 (1982); B.J. CARR, *J. Brit. Interpl. Soc.* **44**, 63 (1991).
- [5] M. TEGMARK and M.J. REES, *Ap. J.* **499**, 526 (1998).
- [6] A. GUTH, *Phys. Rev. D* **23**, 347 (1981).
- [7] P.D. MAUSKOPF *et al.*, astro-ph/9911444; A. MELCHIORRI *et al.*, astro-ph/9911445.
- [8] K.R. POPPER, *The Logic of Scientific Discovery*, Routledge (1992); K.R. POPPER, *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*, Routledge (1992).
- [9] A. VILENKIN, *Quantum Cosmology and the Constants of Nature*, Procs. RESCEU Symposium, Tokyo, World Scientific (1995) (baitare gr-qc/9512031).