

Fosil kosmikoak

Unibertsoa misterioz beteriko gunea da, eta, agian, horregatik lilurutzen gaitu hainbeste. Mendeetan sakontasun eta ekinbide handienez aztertu izan den arren, oraindik bada fisikarion galdera eta buruhauste garrantzitsuenetariko batzuen sortzaile. Izan ere, bide luzea gelditzen zaigu zehatz-mehatz ulertzeko zer fase pasatu dituen sorreratik egun agertzen digun itxura izatera iritsi arte. Artikulu honetan, lehenik, zeregin horren korapilorik garrantzitsuenak aurkeztuko ditugu. Ondoren, azalduko dugu zer saiakera egin ditugun gure ikerlanean.

Eredu kosmologiko arrakastatsua

Hainbat galdera erantzuten saiatzen da kosmologia, hala nola kosmosaren jatorria, eboluzioa eta etorkizunean izanen duen patuaren inguruko galderak. Horretarako, ezinbestekoak zaizkio tresna matematiko zein behaketa esperimenterik zehatzak. Alde batetik, grabitatea azaltzeko inoiz izan den teoriarik onenean oinarritzen da: Einsteinen erlatibitate orokorrarenean. Bestetik, aurrerapen teknologikoen bultzatutako behaketa eta neurketa astronomiko gero eta zehatzagoetan. Teoria eta ebidentzia esperimenterik uztartzearen ondorioz lortu dugu unibertsoaren deskribapen oso zehatza emateko gai den eredu osatzea: kosmologiaren eredu estandarra [1]. Kosmologiako komunitatean kontsentsu zabala du eredu horrek, eta balio digu, besteak beste, unibertsoan aurkitu ditzakegun galaxien edota galaxia-multzoen ezaugarri nagusien iragarpen fidagarriak izateko.

Hala eta guztiz ere, oraindik oso urrun gaude unibertsoaren misterio guztiak argitzera iritsiko den eredu osatzetik; batik bat ez delako garatu orain-

dik unibertsoaren historian funtsezkoak izan diren zenbait gertakizun eta osagaien atzean dagoen fisika. Esate baterako, nola gertatu zen *Big Bang-a*? Zer dira energia iluna eta materia iluna? Zein da haien izatea azaltzeko beharrezkoa dugun fisika? Hainbat dira galderak, eta hainbat, kosmologia garaiak irekiak dituen ikerkuntza-lerroak.

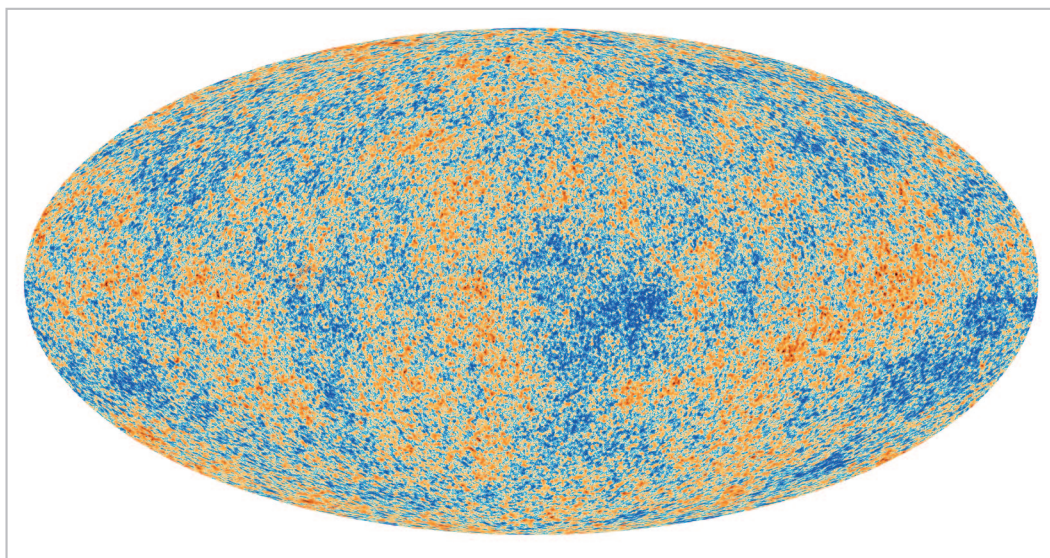
Unibertso gaztea, misterioz beteriko garaia

Galdera-ikur gehienak eta nagusiak unibertso gaztean kokatzen dira. Unibertso goiztiarraren inguruko ikuspegi oso kualitatiboa dugu oraindik. Adibidez, modu zabalean onartzen da unibertsoaren lehen uneetan espazioaren zabalkunde esponenzial eta bizkorra gertatu zela, inflazioa deiturikoa. Behaketa eta neurketa gehienek berresten dute inflazioa, baina ez dugu arrastorik zein prozesu fisikok eragin zuen. Ez da lan erraza horrelako eta antzeko galderari erantzutea, batik bat orain dela milioika urte gertatutako fenomenoak direlako eta garai hartako partikulak eta elkarrekintzak ezezagunak zaizkigulako. Haatik, saiakera asko egin dira une horietako fisika ulertzeko. Genevan kokatutako *Large Hadron*



Idatzi zuk zeuk
Gai librean atalean

Gai librean aritzeko, bidali zure artikulua
aldizkaria@elhuyar.eus helbidera.



1. irudia. Unibertsoak 300.000 urte zituenean askatutako CMB erradiazioan gaur egun neurtzen diren tenperaturaren anisotropiak: urdinez batezbestekoa baino gune hotzagoak; laranja, beroagoak. ARG.: ESA eta Planck Lankidetzak.

Collider (LHC) azeleragailu ikaragarriaren helburu nagusietako bat horixe da. Bertan, azeleratutako protoien arteko talketan lortu da unibertso gazteko zenbait momentutan izan ziren energiak errepikatzea. Besteak beste, frogatu da gaur egungo unibertsoa ulertzeko ezinbestekoa den *Higgs*-en partikularen gisako oinarritzko partikula berriak badirela.

Dena dela, Lurrean gauzatutako esperimentu horietan, energia altuko fisikari buruz asko ikasi dugun arren, oso mugatuta daude. Argi, oraindik oso urruti daude unibertsoaren lehen uneetan izan ziren energia-eskaletatik. Gainera, ditugun baliabideak eta gaitasunak kontuan harturik, ez da aurreikusten baldintza horiek errepikatuko dituen esperimenturen bat diseinatzeko teknologiarik garatuko denik ere. Zein beste bide erabil dezakegu orduan? Erantzuna: fenomenoak errepikatu ordez, saia gaitetzen benetako gertakizunen aztarnak aurkitzen. Gure ikerlanean, unibertso gaztetik guganaino iritsi zaizkigun seinale astronomikoetan bilatzen aritu gara aztarna horiek. Garrantzitsuenetako bat aztertu dugu: mikrouhin hondo kosmikoaren anisotropiak (CMB, ingelesezko sigletan). Antzina, unibertsoa oso gaztea zenean askatutako erradiazioa da

CMBa, guganaino oso aldaketa gutxi jasanda iritsi zaiguna. Ia guztiz isotropoa da, hau da, norabide guztietan berdintsua, baina isotropia horrekiko desbideratze txikietan gordetzen du muina: anisotropietan. Unibertsoa oso gaztea zeneko *argazki* ia itxuraldatu gabea eskaintzen dute erradiazio horren tenperaturaren eta polarizazioaren anisotropiek; informazio-iturri paregabea, inondik inora.

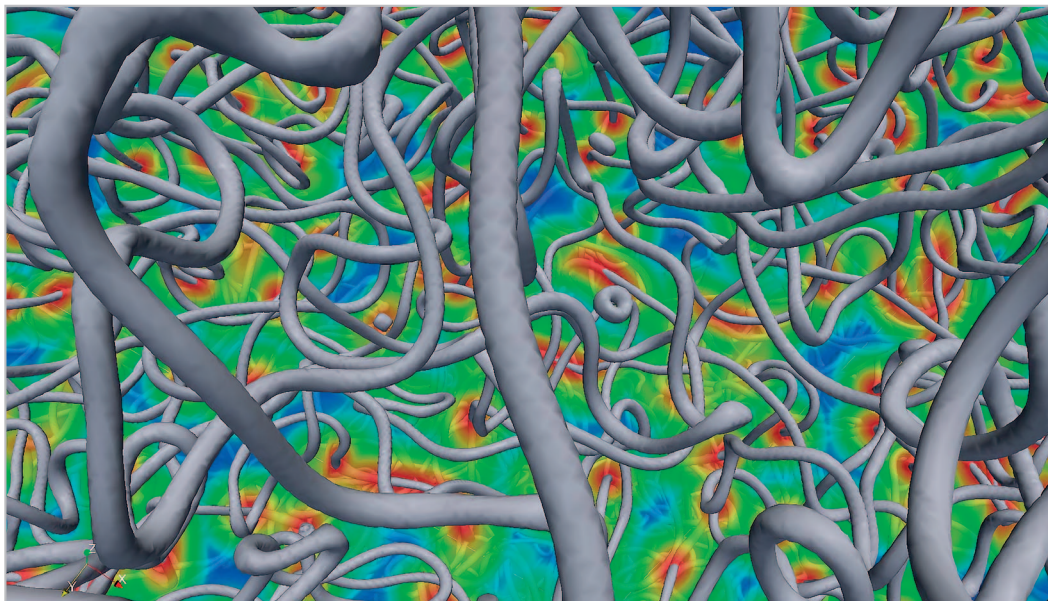
Fosil kosmikoak, unibertso gazteko kondizioen lekuko

Unibertso gaztearen inguruan hamaika galdera ditugun bezalaxe, partikulen fisikaren bidez haiek azaltzen saiatzen diren ereduak ere beste hainbeste dira: batzuek inflazioaren xehetasunak argitzea dute xede; bestetuek, materia eta antimateriaren sorrera azaltzea... Bide eta garapen desberdinak dituzten ereduak dira, baina sarritan ezaugarri komunak dituztenak. Adibidez, horietariko askotan, fase-trantsizioak gertatzen dira, temperatura igoz izotza ur likido bilakatzearen parekoak. Unibertsoak zer fase pasatu dituen eta faseen arteko trantsizioak nolakoak izan diren jakiteak asko argituko luke bila gabiltzan fisika horren izaera.

Pentsatzen da fase-trantsizio gehienen amaieran defektu kosmiko izeneko objektu bitxiak sortu zirela. Energia-kontzentrazio ikaragarriko guneak dira defektuak, eta sortu zirenetik unibertsoan zehar bidaiatu dutenak [2]. Ez dira teoriaren akatsak edo hutsuneak, fase zaharreko propietateak mantentzen dituzten *fosil kosmikoak* baizik. Temperatura altuko fasearen ezaugarriak mantentzen dituzte-nez fase *berrian*, fase zaharrari buruzko informazio argigarri asko eman dezakete: fase-aldaketaren energia, prozesuaren xehetasunak...

baikenituzke. Zalantza-izpirik gabe, defektuen fisika eta haiek eragin ditzaketen fenomenoak ulertzeak asko lagun dezake unibertsoaren garapenari lotutako eredurik egokiena eraikitzen.

Gure ikerlanean, soka kosmiko deituriko defektuak aztertu ditugu. Izenak dioen moduan, defektu horiek soka-forma dute (ikusi 2. irudia). Etengabe mugitzen dira, elkarrekin topo egin eta eite berriko sokak sortu. Dinamika oso konplikaturiko sokasareak osatzen dituzte, *eskuz* aztertzeke konple-

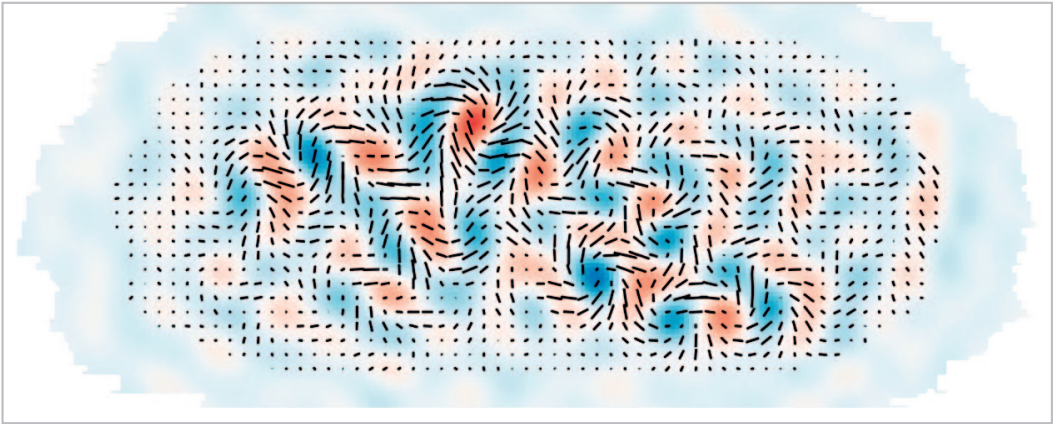


2. irudia. Suitzako CSCS superkonputagailuan egindako simulazioetan lortutako soka-sare baten argazkia. Unibertsoko kondizioak imitatzen dituen kutxako zatitxo bat ageri da. ARG.: David Daverio.

Inoiz detektatzerik izan ez den arren, aspaldiko ikerketa-lerroa da defektuen bilaketan oinarritzea unibertso gaztearen misterioen erantzuna. Alde batetik, balizko detekzioa mugarri izugarria litzateke, fase-trantsizioaren nolakotasuna argituko bailuke. Beste alde batetik, inoiz defekturik izan ez dela baieztatzeak ere informazio asko ematen digu unibertso gaztearen inguruan, defektuak badirela iragartzen duten eredu guztiak baztertu beharko

xuegiak diren sistemak. Bada, ahalik eta emaitzarik fidagarrienak lortzeko, zenbakizko tekniken bidez simulatzen da haien eboluzioa.

Suitzako CSCS superkonputagailuarekin zenbait soka-sareren eboluzioak aztertu ditugu, unibertsoaren zabalkunde-garai ezberdinen ezaugarriak erreproduzitzen dituzten kutxak erabiliz [3]. Simulazio- eta paralelizazio-teknikarik aurreratuenen



3. irudia. CMBaren polarizazioaren B osagaiaren irudikapen grafikoa. Unibertso gazteko osagaien existentzia bilatzeko ingurune aproposa. ARG.: BICEP2/Keck lankidetzak.

eskutik, gai izan gara lehendik ezagutzen ziren simulazioen tamaina 64 aldiz handitzeko. Kutxa bakoitzean soka-sare bat aztertu da, eta sokak barnebiltzen dituen balizko unibertsoaren erreproduktzio txikiak bilakatu dira kutxak. Prozesua hainbat alditan errepikatuz, soka-sareen propietateen banaketa estatistiko doienak eskuratu dira.

Simulazioen emaitzek balio izan dute soka-sareen eboluzio kosmologikoaren ulerkeran aurrerapauso nabarmenak emateko. Besteak beste, neurtu dugu sokak batez beste abiadura oso handitan mugitzen direla, gutxi gorabehera argiaren abiaduraren % 60an, hain zuzen ere. Soken arteko elkarrekintzak ere hobeki ulertzen ditugu orain, zehazki aztertu baitira talkak, soka berrien jaiotzak eta haiek desintegratzeko moduak [4].

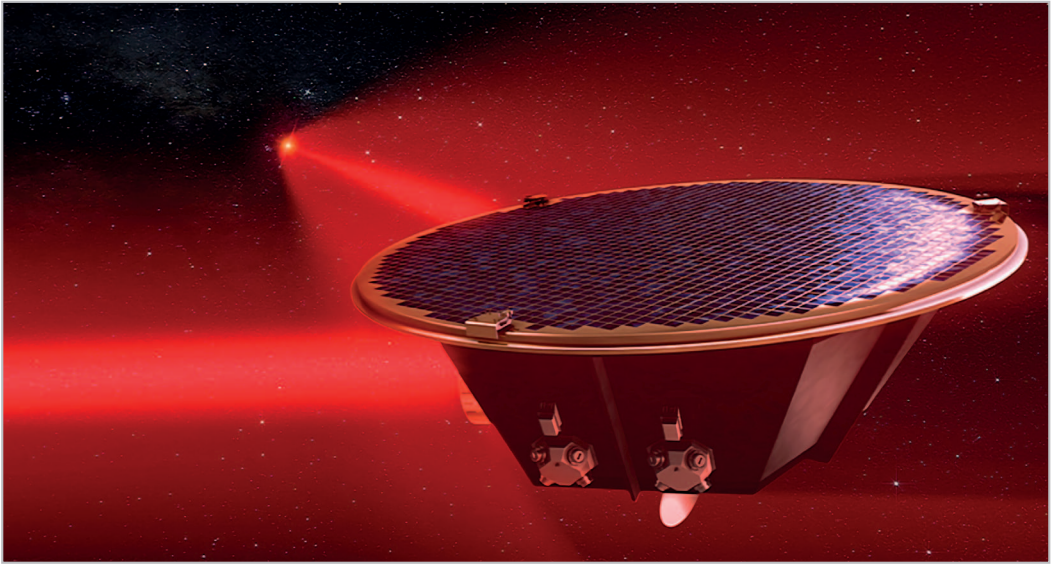
Edonola ere, tesiaren helburu nagusia izan da CMBan sokek sor ditzaketen anisotropiak ahalik eta zehaztasun handienarekin lortzea. Horretarako, xehetasunez aztertu dira soken mugimenduek eragiten dituzten perturbazioak, haiek sortzen baitute kalkulatu nahi dugun aztarna astronomikoa. Adibidez, arlo honetan lehendik egindako ikerketetan ez zen ezagutzen sareek eta perturbazioek zer portaera zuten unibertsoaren zabalkunde desberdinen arteko trantsizioetan. Simulazio berrieekin, egoera hori gaitzitu dugu, ulertzeaz gain modelizatzeko

gai ere izan baikara. Emaitzek arrazioia eman digute, eta argi erakutsi dute berebiziko garrantzia duela prozesu honek perturbazioak eta CMBaren anisotropiak kalkulatzeko. Kalkuluen arabera, modelizazio berrian agerian geratu denez, lehendik uste zena baino % 30 altuagoa da soka-sareek sortutako seinalearen anplitudea, bai tenperaturan, baita polarizazioan ere.

Inoiz egindako simulaziorik handien laguntzaz, urrats berriak eman ditugu soka kosmikoen ezaugarriak; orain, hobeki ezagutzen da haien dinamika eta CMBan eragin dezaketen efektua. Uste dugu bidea erraztu dela etorkizunean objektu bitxi hauen izatea esperimentera frogatzeko.

Urte erabakigarriak izanen dira datozenak defektuen izatearen ebidentziak lortzeko, eta unibertso gaztea sakontasun handiagoz ezagutzeko. Belaunaldi berriko neurgailuek fenomeno horietan jarriko dute fokua. Aurrerapen teknikoek ahalbidetuko dute oraindik neurtu gabe dagoen CMBaren polarizazioaren B osagaia detektatzea [5]. Inflazioaren eta defektuak dituzten ereduaren epaile ezin hobea izanen da, inflazioak eta defektuek eite berezi eta bereizgarriko B motako polarizazioa sortzen baitute.

Bestalde, martxan izanen dira grabitazio-uhinak atzematea helburu duten esperimentuak ere (*LISA*,



4. irudia. Europako Espazio Agentziak (ESA) onartutako LISA interferometro espaziala. Haren helburua izanen da maiztasun desberdineko grabitazio-uhinak ahalik eta zehatzena neurtzea. Espero da 2030. urte inguruan orbitatzen jarri eta datuak biltzen hastea. ARG.: AEI/Milde Marketing/Exozet.

kasurako [6]). Grabitazio-uhinak prozesu grabitatorio oso bortitzetan sortzen dira; zer esanik ez, unibertso gazteko prozesuetan. Euren energia altuengatik, defektuak ere hautagai sendoak dira grabitazio-uhinen iturri izateko. Denboraren joanak, hala ere, asko ahuldu ditu hain aspaldi sortutako uhinak, eta egungo kosmologia esperimentalaren erronkarik handienetakoa da unibertso gazteko uhinak atzematea. B polarizazioak bezalaxe, unibertso goiztiarreko grabitazio-uhinen detekzioak leku nabarmena izanen du gure eredu bideragarritasunaren auzian.

Zalantzarik gabe, garai paregabean gaude unibertso gaztearen misterioei erantzuna emateko, aha-lerin esperimental handiak gauzatzen ari baitira. Iragarpen eta lan teorikoek ere tamaina bereko aurrerapausoak eskatzen dituzte, eta horretan jarraituko dugu. ●

CAF-Elhuyar sarietara aurkeztutako lana.

Bibliografia

- [1] Planck Collaboration, 'Planck 2015 Results. XIII. Cosmological Parameters', *Astron. Astrophys.* 594(2016)A13.
- [2] A. Vilenkin eta E.P.S. Shellard, 'Cosmic Strings and other Topological Defects', Cambridge University Press (1994).
- [3] D. Daverio, M. Hindmarsh, M. Kunz, J. Lizarraga eta J. Urrestilla, 'Energy-momentum correlations for Abelian Higgs cosmic strings' *Phys.Rev.D93*, 085014.
- J. Lizarraga, J. Urrestilla, D. Daverio, M. Hindmarsh eta M. Kunz, 'New CMB constraints for Abelian Higgs cosmics-trings' *JCAP* 1610, 042.
- [4] M. Hindmarsh, J. Lizarraga, J. Urrestilla, D. Daverio eta M. Kunz, 'Scaling from gauge and scalar radiation in Abelian Higgs string networks', *Phys.Rev.D96*, 023525.
- [5] CMB-S4 Collaboration, 'CMB-S4 Science Book, First Edition', FERMILAB-FN-1024-A-AE. CORE Collabotation, 'Exploring Cosmic Origins with CORE: Survey requirements and mission design', arXiv: 1706.04516
- [6] LISA Collaboration, 'eLISA/NGO: Astrophysics and cosmology in the gravitational-wave millihertz regime' *GW Notes* 6, 4-110.