



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

I. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2015eko maiatzaren 13, 14 eta 15
Durango, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

ZIENTZIA ZEHATZAK ETA NATUR ZIENTZIAK

**Defektu kosmikoen zenbakizko
simulazioak**

*J. Lizarraga, A. Lopez-Eiguren
eta J. Urrestilla*

382-388 or.
<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.i.52>

ANTOLATZAILEA:



BABESLEAK:



LAGUNTZAILEAK:



Defektu kosmikoen zenbakizko simulazioak

J. Lizarraga, A. Lopez-Eiguren eta J. Urrestilla

Fisika teorikoa eta zientziaren historia saila, Zientzia eta teknologia fakultatea,
Sarriena auzoa, z/g 48940 Leioa (Bizkaia), UPV/EHU

Laburpena

Defektu kosmikoen azterketan berebiziko garrantzia dute zenbakizko simulazioek. Gure inguruan ikusten dugun unibertsoa erreproduzitu dezakegu eta defektuen moduko objektu bitxiak bertan eboluzionatu. Proiektu honetan zehar bi ildo nagusi jorratuko ditugu: batetik superordenagailuen bitartez soka kosmiko deituriko defektuen ezaugarritze zehatza eramanen da aurrera, sor ditzaketen seinale kosmologikoak ere kalkulatzuz (*mikrouhinen-hondo kosmikoko CMB anisotropiak*). Bestetik defektu konposatu diren soka semilokalen eredu efektiboak kalibratuko dira superordenagailu bidez eginiko zenbakizko simulazioak erabiliz.

Hitz gakoak: defektua kosmikoak, mikrouhinen-hondo kosmikoa, eredu efektiboak, zenbakizko simulazioak

Abstract

Numerical simulations are essential for the understanding of cosmic defects, we can reproduce such exotic objects as well as describe their evolution in expanding universes. In this project we study two main aspects: on the one hand, we analyze the properties of Abelian Higgs cosmic strings networks and characterize their possible cosmological signals (CMB anisotropies) using the biggest simulations ever performed in this area. On the other, we calibrate effective models for Semilocal strings using field theory simulations made in supercomputers.

Keywords: Cosmic defects, cosmic microwave background, effective models, numerical simulations

1 Sarrera eta motibazioa

Neurketa esperimentalen etengabeko garapenak kosmologia zehaztasunaren eran sartu du. Alor honetan *mikrouhinen-hondo kosmikoaren* (CMB ingelesez) anisotropien neurketek garrantzia berezia izan dute, *WMAP* edo *Planck* bezelako proiektuek bultzatuta. Esperimentu hauen bitartez duela mende erdi eredu teoriko soilak ziren proposamenak esperimentalki baieztatzea lortu da eta baita unibertso gaztetik hasi eta gaur egun arteko bilakaeraren deskribapen zentzuzkoa osatzea ere: kosmologiaren *eredu estandarra*.

Nahiz eta gaur egunean erabiltzen den eredu kosmologiko estandarra modu oso zabalean onartua izan, badira oraindik erantzun gabeko hainbat galdera. Hauen artean ikusgarrienak materia eta energia ilunaren ingurukoak izan litezke. Badakigu materia *normalak*, hau da, egunerokoan ikusi, ikutu edo usaindu dezakegunak unibertsoaren %5a osatzen duela soilik; gainontzekoa aurretik aipatutako osagai ilunek beteko lukete. Nahiz eta hau hala dela jakin, hauek kontrolatzen dituen fisika argitu gabe dugu. Era berean, kosmologia modernoaren oinarri diren hipotesiak baliagarriak izan daitezen, unibertso primitiboan *inflazioa* deituriko espazioaren hazkunde esponontziala beharrezkoa dela ikusten da. Aurrekoen modu berean balizko prozesu inflazionario horren deskribapen fisikoa zehaztea falta zaigu.

Aurreko galderei erantzunak sarri partikulen fisikaren ikuspuntutik ematen saiatzen gara. Oso zabaldua den ideia du oinarri lan ildo honek, hau da, unibertsoa gaztea zenean eta oso energia altuko prozesuak gertatzen zirenean gaur egungo fisikaren zutabe diren teoria nagusienak, kuantikoa eta erlatibitate orokorra, teoria orokorrago baten bilduta zeudela. Beraz erlatibitate orokorrak azal ditzazken prozesu kosmologikoen oinarri mikroskopikoa ulertzea lortzen badugu energia altuko teoriaren bitartez, egun erantzunik ez duten galderak erantzuteko gai izan gintezke.

Bi teoria nagusi hauen arteko zubi-lana egiteko hautagai erakargarriak ditugu defektu topologikoak. Unibertsoa zabaltzen joan ahala, hoztu ere egin da. Hozte honetan zehar fase desberdinak pasa dituela pentsatzen da eta fase aldaketa hauetan defektuak sortu zirela (defektuen fisikarako sarrera moduan ikusi Vilenkin eta Shellard (1994) liburua). Defektuak energia altuetako ereduetan ondorioztatzen diren arren badute zentzu kosmologikoa ere, hein handi batean neurgarriak izan daitezkeen seinale esperimentalak sor ditzazketelako. Defektuen fisika ezagutzeak ondorioz, unibertsoak pasa dituen fase ezberdinak aztertzeke leioak ireki diezazkegu.

Artikulu honetan gure proiektuan aztertzen ari garen defektu ereduak eta lan ildoak laburbiltzen saiatuko gara. Azpimarratu nahi genuke artikuluan zehar hartuko dugun ikuspuntua *pedagogikoa* izanen dela ahalik eta publiko zabalenera iris gaitezen. Beraz adierazpen matematikoak baztertuak izanen dira ulermena areagotzeko asmoarekin, irakurleak eredu eta ñabarduna matematiko zehatzetan murgildu nahi badu erreferentzia artikuluetan aurki ditzazke.

2 Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Unibertsoak jasandako fase transizioetan gertatutako simetrien hausturen ondorio zuzena dira defektu topologikoak, fase zaharraren simetria gorde eta honen propietateen inguruko informazioa eman dezake tenak. Simetria hausturen ondorioz hasieran unibertsoak zuen simetria beste simetria batera pasatzen da, zehazki simetria hauek zein izan ziren ez dakigunez simetria posible eta simetria haustura mota desberdin asko aztertzen dira. Gainera simetria haustura mota desberdin bakoitzak defektu mota desberdin baten sarea sor lezake. Gure kasuan honako defektu hauen inguruan eginen da azterketa:

1. Hautsitako simetria $U(1)$ lokala¹ baldin bada, sortuko diren defektuak soka kosmikoak izanen dira, *Abelian Higgs* soka moduan ere ezagunak (Hindmarsh eta Kibble (1995)).
2. Simetria $SU(2) \times U(1)$ (lehenea globala eta bigarrena lokala) bada, sortutako defektuak soka semi-lokalak izanen dira, defektu lokal eta globalen arteko nahastura (Vachaspati eta Achúcarro (1991)).

Nahiz eta defektu talde desberdinek oso modu desberdinean jokatu badituzte komunak diren hainbat ezaugarri, interesgarrien artean *eskalatzea* dugu. Honen ondorioz defektuz osatutako sareak (*network*-ak ingelesez) kosmologikoki bideragarriak izan daitezke, hau da, defektuak noizbait existitu izan badira unibertsoan zehar jarraituko dute. Eskalatzeak defektu sareen desagertzea ekiditen du alde batetik, baina baita defektuek unibertsoa dominatzea ere.

Defektu sistema ororen ezaugarri bereizgarria beraien dinamika konplexua dugu, dinamika zehazten duten higidura ekuazioak ez-linealak baititugu. Konplexutasun honengatik higidura ekuazioek ez dute soluzio analitikorik eta zenbakizko metodoetara jotzera behartuta gaude. Zentzu honetan zenbakizko simulazioak berebiziko garrantzia dute defektu sareek sor ditzazketan ustezko seinale kosmologikoen eza-gutzarako, ez baitago bestelako modurik hauek ezaugarritzeko.

Arloko egoerari begirada bat emanez gero ikus genezake urteetan zehar defektuen simulazioen inguruko garapena nabaria izan dela. Software nahiz hardware azpiegitura gero eta handiagoak behar dira simulazioek darabilten informazio eta kalkulu kopurua era egokian maneiatzeko. Aipamen berezia mereziko luke paraleloan eremu teorien azterketak egiteko defektuen alorrean garatu den *LATfield*² liburutegiak.

Teknikaren ikuspuntutik, hala ere, ez da bakarria defektuen deskribapenerako erabiltzen den zenbakizko metodoa. Alor honetan ikuspegi bat baino gehiago daude eta hainbat mundu mailako talde lanean. Sailkapen bat eginez gero alde batetik orain artean aipatu diren eremu teorien zuzeneko simulazioak izanen genituzke (Bevis *et al.* (2007), Urrestilla *et al.* (2008)). Hauetan zuzenean defektuak ondorioztatzen diren ereduaren higidura ekuazioak askatzen dira, orokorrean zabaltzen ari den unibertsoan kokatuak. Beste alde batetik berriz, higidura ekuazio zehatzak askatu ordeztu hurbilketa kontuan hartzen dituzten ereduak ditugu, hala nola Nambu-Goto hurbilketa (Hindmarsh eta Kibble (1995)) edo *one-scale model* teoria efektiboa soka kosmikoen kasuan (Martins eta Shellard (1996)). Orokorrean eredu hauek problema

¹Simetria globalak espazio osoan modu berean aplikatzen diren transformazioekin dauden lotuak, eta lokalak berriz espazioko puntu guztietan desberdinak izan daitezkeen transformazioekin. Azken simetria hauek, ingelesez *gauge* simetria moduan ezagunak, partikulen eredu estandarraren oinarria dira.

²Libutegiaren azken bertsioa <https://github.com/daverio/LATfield2d> web orrian eskura daiteke

asko errazten dute simulazioak sinplifikatuz, baina ezin dugu ahaztu hurbilketak izaten jarraitzen dutela eta beraien eragin esparrua mugatua dela.

Gure lana eremu teorien zenbakizko simulazioen azterketan oinarritzen da batik bat eta laburbilduz honako bi helburu nagusiak bereiziko genituzke:

- Soka kosmikoen eremu teorien zuzeneko simulazioen azterketa. Superkonputagailuen bitartez eremu teoriak gero eta zabalago eta denbora gehiagoz simulatuz defektuen ezaugarrien deskribapen ahalik eta zehatzenak lortzea. Ezaugarri hauen artean nabarmentzekoak dira sor ditzazketen mikrouhinen-hondo kosmikoko anisotropiak, grabitazio-uhinak edo sokekin osatzen dituzten *begizten* (ingelesez *loop*) banaketak.
- Soka semilokalen eredu efektiboen kalibrazioa. Zenbakizko simulazioen ikuspuntutik gehienetan *merkeagoa* izaten da bai denbora eta baita baliabideen ikuspuntutik ere hurbilketa hauetaz baliatzea. Gure asmoa eremu teorien bitartez garatutako simulazioez baliatuz, soka semilokalak erdi-analitikoki deskribatzea ahalbidetuko duen eredu efektiboen kalibrazioa aurrera eramatea da.

3 Ikerketaren muina

Muina bera zehazten hasi aurretik, azpimarratu behar da lan hau ez dela defektuen inguruko lehendabiziko lana eta noski ez dela izan azkenekoa ere, etengabe garatzen eta aldatzen ari den arloa dugulako. Horregatik hemen aipatzen diren ikerketa lerroak eta emaitza posibleak lana garatu ahala baztertuak izan daitezke beste ildo baten ekarpenak interesgarriagoak iruditu zaizkigulako. Hala eta guztiz ere, hemen azaldutako lan ildoak dira nagusiki aurrera eramaten ari direnak.

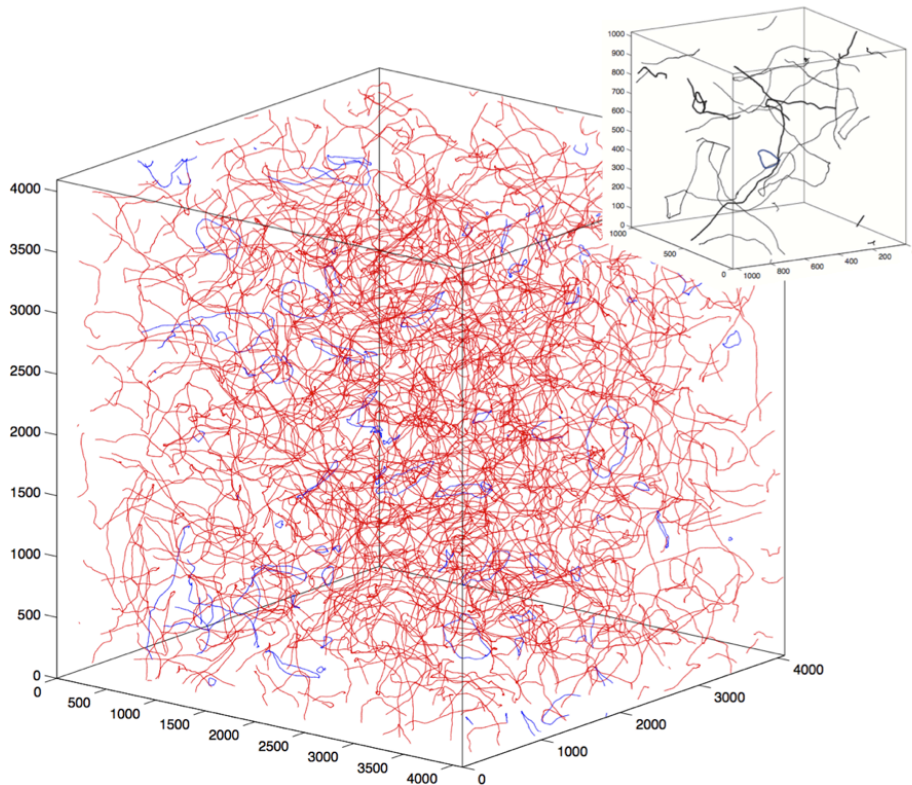
3.1 Soka kosmikoen eremu teorien azterketa: *Lattice Abelian Higgs (LAH)* simulazioak

Soka kosmikoen simulazioan *Lattice* deituriko 3D-tako sareetan gauzatzen dira, bertan eremuen higidura zuzentzen duten higidura ekuazioak askatuz. Zehazki higidura ekuazioak sareko puntu bakoitzean askatzen dira eta higidura honen ondorio direnez, sokak puntu hauetan *bizi* dira. *Abelian Higgs* sokekin osaturiko defektu sarea lehen aipatuak izan diren begizta moduko sokekin gain printzipioz bukaerarik ez duten sokaz dago osatua, hau da, soka finito eta soka infinitoz (argibide moduan ikusi 1. irudia non begiztez (urдинez) eta soka infinitoz (gorriz) osatutako soka sarea adierazi den.)

Kosmologiaren ikuspuntutik sokekin benetako unibertso batean izan lukeen higidura interesatzen zaigunez, simulazio kuboak unibertsoaren ezaugarri nagusienak barnebilduko ditu, espantsioa bereziki. Gure azterketako puntu garrantzitsuenetakoa unibertsoaren espantsioa eta sokaren benetako zabalera errespetatuko dituen simulazioak garatzea eta hauetatik ondorioak ateratzea da. Sokak bizi diren kuboa finkoa da, baina aldi berean zabaltzen ari den unibertsoaren papera jokatzeko du, nola liteke hau? Honen erantzuna sinplea da: denbora pauso bakoitzean, nahiz eta kuboa ez aldatu, kuboa osatzen duten ondoz-ondoko puntuen arteko distantzia fisikoa haundituko dugu. Bestalde soka kosmikoei luzera kosmologikoak izan ditzaketen arren beraien zabalera mikroskopikoa eta konstantea da, hau da, ez da unibertsoaren zabalerarekin batera zabaltzen. Hemen aurkitzen dugu arazoa, zabalerak bultzatuta iritsiko baita momenturen bat kuxako ondoz-ondoko bi punturen arteko distantzia fisikoa sokaren zabalera baino handiagoa izango dena eta hortik aurrera ezin izango dugu soka kuxan identifikatu, bi puntuen artean galduko da. Fenomeno hau ekiditzeko asmoarekin inoiz egin diren eremu teorien zenbakizko simulaziorik handienak egiten dihardugu: 4096^3 puntu dituzten kuxak simulatuz eta honetarako 34816 cpu erabiliz. Adibide moduan 1. irudia ikusi, bertan gaur egun darabilgun soka-sarea (4096^3 puntuko kuboa, sokak gorriz eta begizta itxiak urдинez adieraziak), 2010ean lan honen aurrekari izan zen lanean (Bevis *et al.* (2010)) aurrera eramandakoarekin konpara daiteke.

Baliabide berri hauek simulazioa orain artean defektuen alorrean inoiz eraman ez den zehaztasun mailalara eraman dute. Hau guztiagatik, soka kosmikoei sor ditzazketen CMBko anisotropien deskribapen zehatzena egiteko moduan aurkitzen gara. Hau gutxi balitz, seinale esperimental hau zehazteko oso garrantzitsuak diren trantsizio kosmologikoak gure soka kosmiko sareetan duten eragina ulertu ahal izan dugu. Sokekin CMBan sortutako marka kalkulatzeko, hauek unibertsoaren historian zehar izandako ibilera guztia ulertzea beharrezkoa da, gutxienez honen informazio estatistikoa izatea. Kosmologiaren eredu estandarrek zehazki ezartzen du unibertsoa materiaren egoera ezberdinekin dominatua izan zela

1 Irudia: Soka kosmikoen simulazioen garapena: gaur egun darabilgun kutxaren (4096^3 puntu) eta aurreko lanetan erabili zenaren (1024^3 puntu) arteko alderaketa. Irudia David Daveriok (Genevako Unibertsitatea) proiektu honen baitan egindakoa dugu.



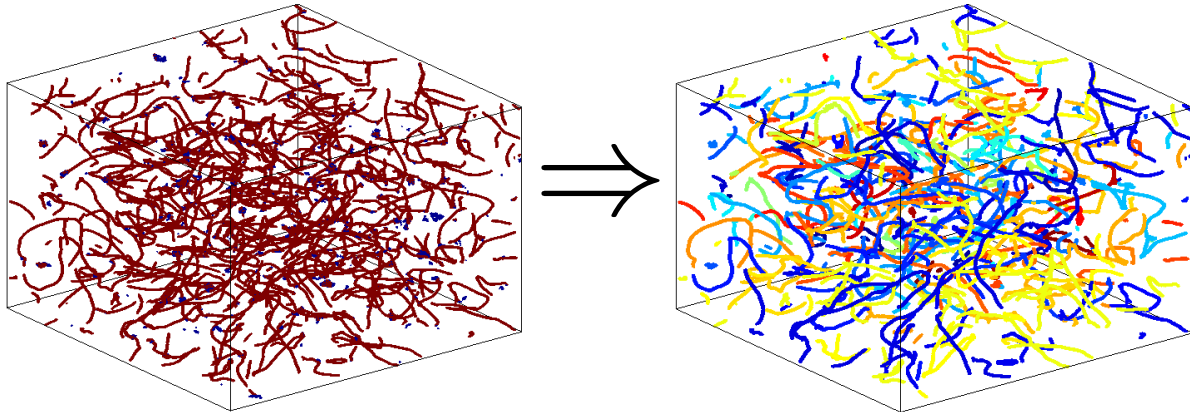
garai bakoitzean: erradiazio erlatibistatik hasi, materia ez-erlatibistaz gero eta energia ilunean bukatuz gaur egunean. Simulazioetan gai gara garai zehatz bakoitzean gure sareak dituen ezaugarri estatistikoak jakiteko, baina orain artean aztertu ez dena batetik besterako salto hauek zer nolako eragina izan zezaketen izan da. Simulazio berriak diseinatu ditugu lan honetarako, higidura ekuazioak transizio egoeretan askatzen dituztenak; ondoren lortutako emaitzak sareen propietate estatistikoetan eta amaierako CMBko anisotropien ezaugarritzean kontuan hartuko dira.

3.2 Soka semilokalen eredu efektiboak

Lehenago esan dugun bezala soka semilokalak defektu konposatuak dira. Konposatu izaera hau bi modutan ulertu dezakegu. Lehenik eta behin, simetriaren aldetik, defektu hauek sortzeko hautsitako simetriak bi talde ditu, bata globala eta bestea lokala, ondorioz sortuko den defektua defektu global eta lokalen arteko konposatu bezala ulertu dezakegu. Bestalde, izaera aldetik, esan dezakegu defektu hauek bi osagaiz osaturik baleude bezala jokatzaren dutela. Alde batetik *Abelian Higgs* soka kosmikoen itxurako izaera izango lukete baina hauek ez bezala soka semilokalek bukaerak dituzte. Bukaera hauek aldiz dimentsio bakarreko defektu topologikoen, monopoloen, gisako izaera lukete. Ondorioz soka semilokalen izaera soka kosmiko eta monopoloen arteko konposatu bezala uler daiteke.

Esan bezala eremu teorien higidura ekuazioak askatzea helburu duten zenbakizko simulazio hauek burutzeko superordenagailuen laguntza ezinbestekoa da. Askotan superordenagailuetara sarbidea izatea ez da erraza izaten edota simulazioa osorik burutzeko behar dugun denbora handia izaten da. Honi guztiari probak egiteko beharrezkoa den denbora gehitu behar zaio, adibidez defektuaren eboluzio ekuzioetako parametro batek duen eragina aztertzeako sistema behin eta berriro eboluzionatu behar baitugu parametro horren balio desberdinetarako. Honek ekar dezaken denbora eta baliabide gastua izugarria da eta askotan

2 Irudia: Ezkerreko irudian gure soka semilokalen zenbakizko simulazioetatik zuzenean lorturiko irudia ageri da eta euskuin aldean berriz analisi teknikak aplikatu ondoren lortzen duguna. Ikus daitekeenez segmentu baikoitza identifikatu dezakegu.



bideraezina. Arazo honi aurre egiteko eredu efektiboak proposatzen dira. Abiapuntu fenomenologikoa hartuta eremu teoriak deskribatzen dituzten eboluzioak imitatzen saiatzen dira. Eredu efektiboek behar duten baliabide kopurua eremu teoriak eskatzen dituzten simulazioen aldean oso txikia da eta horregatik dira hain interesgarriak, nahiz eta sinpletze honek zehaztasunaren galera ere badakarren.

Lehenago esan dugun bezala soka semilokalen izaera *Abelian Higgs* soken eta monopoloen izaeren arteko konposatu bezala uler dezakegu, hau horrela soka semilokalen eredu efektiboak lortzeko *Abelian Higgs* soken eta monopoloen eredu efektiboen nahasketa bat erabiltzen da. Gure azterketa honetan soka semilokalentzako bi eredu efektibo ditugu, gai fenomenologiko desberdinak garatuz eboluzio bera deskribatzen saiatzen direnak.

Aipatu eredu hauetako bakoitzak zehazteke dauden parametroak dituzte, gure azterketan parametro hauek ahalik eta hobekien mugatzen saiatuko gara eremu teorien bidez egindako simulazioak parametro desberdinentzako eredu efektiboek emandako eboluzioekin konparatuz (lan honen lehen zatia Achúcarro *et al.* (2014) artikuluan aurki daiteke). Horrela eboluzioa hobekien deskribatzen duten parametroak identifikatzeaz gain, bi teoria efektiboen artean parametro optimo hauentzat sistemaren benetako higidura hobekien imitatzen duena aukeratu dugu.

Garrantzia berezia du aipatu dugun konparaketa hori egiten hasi aurretik zenbakizko simulazioetatik lortzen ditugun datuei eman beharreko trataerak. Tratamentu hau oso konplexua da, izan ere gure simulazioetatik lortzen dugun datu kopurua izugarria baita eta datu asko baztergarriak, ez dutelako defektu sistemaren inguruko informazio baliagarriarik ematen. Esate baterako 2. irudiaren ezker aldean zenbakizko simulazioetatik zuzenean lortzen dugun kubo bat daukagu eta eskuinaldean berriz kubo berdina erakusten dugu tratatu ondoren. Adibide zehatz honetan soka semilokalen identifikazio zehatza eraman da aurrera, simulazioak emandako informazio ez baliagarria, benetako sokak ez diren puntuak edo zinkeria, garbituz. Kasu honetan erakusten den teknika ez da konparaketaren aurretik burutu behar dugun bakarra, soken bukarak denboran zehar duten eboluzioa edo kuboan dagoen soken luzera totala ere kalkulatu behar izaten baitira.

4 Ondorioak

Soka kosmikoen ikuspuntutik aurrera eramaten ari garen lana pauso garrantzitsua izan da eremu teorien bidez deskribatzen diren defektuen ulermenerako. Inoiz egin diren simulazio haundienak erabili dira eta honengatik soken inguruan aztertu gabe geneuzkan hainbat alde aztertzea edo aztertze bidean izatera eraman gaitu. Zentzu honetan CMBan eragin dezaketen ekarpena aurreko lanekin alderatuz asko hobetu da, batetik simulazioen tamaina dela eta lehen jakin ezin genezazken erregimenak ezagutzeko ahalmena izan dugulako eta bestetik transizio kosmologikoek duten eragina zehazki kalkulatu dugulako. Azken honetan gainera fase batetik besterako prozesua zehazten duen interpolazio funtzioa lortu dugu, beste defektu batzuen kasurako lortu denarekin alderatuz desberdina dena. Zehazki *Abelian Higgs*-entzako lortu den funtzioak transizioa espero baino motelagoa dela erakusten digu eta honek CMBan izan dezaketen

ekarpenean eragin nabaria izanen du.

Soka Semilokalen eredu efektiboen kasurako oraindik analisia ez dago bukatuta baina lortzen ari garen emaitzak oso interesgarriak dira. Soka semilokalen segmentu desberdinak desberdintzeko gai gara, baita hauen luzera kalkulatzeko ere. Informazio hau erabiliz eredu efektiboetako parametroak nahiko zehaztu ditzakegu baina zehaztasun handiagoaren bila ari gara. Horretarako segmentu bakoitza denboran zehar jarraitu nahi dugu baita segmentu bakoitzaren abiadura kalkulatu ere.

Aipatu berri ditugun emaitzak lortu ahal izateko zenbakizko simulazioetatik eratorriak diren datuak tratatzeko hainbat teknika berri garatzen ari gara. Ondorioz esan dezakegu lorturiko emaitzez gain aurretik zehazten zenbakizko simulazioetatik lorturiko datuak tratatzeko teknika berriak sortu ditugula, horrela defektuen zenbakizko simulazioen arloan lanean dabiltzan ikerlariak tresna berriz hornitu ditugu datuen analisia erraztu eta garatzeko asmoz.

5 Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Lehen aipatu den moduan defektuen azterketa ez da hemen amaitzen, etengabe garatzen doan alorra dugu. Hainbat ikerketa aukera ikusten ditugu ingurune honetan epe labur-ertainean aurrera eramanez beharrekoak.

LAH simulazioei eta soka kosmikoei dagokienez, epe laburrenara kokatzen den ikerketa lerroa lortutako emaitzen eta neurketa esperimentera kontrajartzea da, honela lortutako emaitza teorikoei egungo neurketa kosmologikoei bateragarriak diren ikusteko. Ildo honetan, lehenik eta behin lortu berri dugun CMB anisotropien ekarpena gaur egun onartua dugun eredu estandarrek sortutakoari batu eta esperimentera zehaztenekin konparatuko dugu, *Planck* satelitearen datuekin batik bat. Azkenaldian pil-pilean izan diren CMBaren polarizazioa neurtu duten esperimenterekin (sona handia izan zuen *BICEP2*-en modukoekin, Lizarraga *et al.* (2014a,b) artikuluetan egin zen moduan) alderaketa egitea ere planteatzen da, hemen aurreko esperimenterekin neurtutako datuetan baino nabariagoa izan baitaiteke defektuen ekarpena.

Epe ertainean aldiz defektu sareek CMBaz gain sor ditzazketen eragin neurgarri gehiago aztertu nahi genituzke. Soka kosmikoak teorikoki grabitazio-uhinen sorburu posible izan daitezke, soketan zehar gerta litezkeen mugimendu edo aldaketa bortitzen ondorioz. Nahiz eta eredu hurbilduetan, Nambu-Goto ereduetan, balizko uhin ekarpen hau kalkulatu izan den, eremu teorietan ez da oraindik inoiz kalkulatu izan. Gainera grabitazio-uhinen espektroaren ulermena eredu hurbilduen eta eremu teorien arteko bateraketan (edo banaketan) aurrerapauso garrantzitsua litzateke.

Lehenago esan dugun bezala soka semilokalen analisisian hainbat teknika berri garatzen ari gara. Esate baterako soka hauen bukaerako puntuen eboluzioa zehaztasun handiz jarraitzeko gai gara. Informazio honekin puntu hauen abiadura kalkulatu dezakegu zehazki, ondoren parametroen kalibrazioan erabiltzeko. Hau gutxi balitz teknika hau monopolo deritzen dimentsio bakarreko defektu topologikoen eboluzioa jarraitzeko ere erabil daiteke. Monopoloentzako ere eredu efektiboak existitzen diren arren, hauen kalibrazioan oso baliabide gutxi erabili izan da. Honengatik epe laburrean garatu berri dugun teknika erabiliz eta monopoloentzako inoiz egin izan diren eremu teorien zenbakizko simulazio handienak eginez monopoloen eredu efektiboak kalibratzeko asmoa daukagu.

Erreferentziak

- ACHÚCARRO, A., A. AVGOUSTIDIS, A.M.M. LEITE, A. LOPEZ-EIGUREN, C.J.A.P. MARTINS, eta OTHERS. 2014. Evolution of Semilocal String Networks: I. Large-scale Properties. *Phys.Rev.* D89.063503.
- BEVIS, N., M. HINDMARSH, M. KUNZ, eta J. URRESTILLA. 2007. CMB power spectrum contribution from cosmic strings using field-evolution simulations of the Abelian Higgs model. *Phys.Rev.* D75.065015.
- , —, —, eta —. 2010. CMB power spectra from cosmic strings: predictions for the Planck satellite and beyond. *Phys.Rev.* D82.065004.
- HINDMARSH, M.B., eta T.W.B. KIBBLE. 1995. Cosmic strings. *Rept.Prog.Phys.* 58.477–562.
- LIZARRAGA, J., J. URRESTILLA, D. DAVERIO, M. HINDMARSH, M. KUNZ, eta A. R. LIDDLE. 2014a. Can topological defects mimic the BICEP2 B-mode signal? *Phys.Rev.Lett.* 112.171301.

- , ——, ——, ——, ——, eta ——. 2014b. Constraining topological defects with temperature and polarization anisotropies. *Phys.Rev.* D90.103504.
- MARTINS, C.J.A.P., eta E.P.S. SHELLARD. 1996. Quantitative string evolution. *Phys.Rev.* D54.2535–2556.
- URRESTILLA, J., N. BEVIS, M. HINDMARSH, M. KUNZ, eta A. R. LIDDLE. 2008. Cosmic microwave anisotropies from BPS semilocal strings. *JCAP* 0807.010.
- VACHASPATI, T., eta A. ACHÚCARRO. 1991. Semilocal cosmic strings. *Phys.Rev.* D44.3067–3071.
- VILENKIN, A., eta E.P.S. SHELLARD. 1994. *Cosmic strings and other topological defects*. Cambridge University Press.

6 Eskerrak eta oharrak

Lan hauek i2Basque (Euskal Herria), COSMOS Consortium supercomputer (Erresuma Batua), Milipeia (Portugal) eta Swiss National Supercomputer Center-CSCS (Suitza) konputazio azpiegiturretan gauzatu dira. Hontaz gain, *Abelian Higgs* soken proiektuan D. Daverio, M. Hindmarsh eta M. Kunz izan ditugu lankide eta soka semilokalenean A.Achúcarro, A. Avgoustidis, A. M. M. Leite, C. J. A. P. Martins eta A. S. Nunes. Sinatzaileok ondoko proiektuen babesak eskertu nahi genuke: Eusko Jaurlaritza (IT-559-10), Espainiako gobernuko MINECO (FPA2012-34456) eta CPAN CSD2007-00042 eta EPI CSD2010-00064 Consolider Ingenio programak. Azkenik, A.L-E Eusko Jaurlaritzako BFI-2012-228 bekaren jabea eta J.L. UPV/EHUko PIF2011 bekaaduna.