



IKER  
GAZTE  
NAZIOARTEKO  
IKERKETA EUSKARAZ

## V. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2023ko maiatzaren 17, 18 eta 19a  
Donostia, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:  
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 3.0

## ZIENTZIAK ETA NATURA ZIENTZIAK

### Axioi Inflazioa

*Daniel G. Figueroa,  
Joanes Lizarraga Olano,  
Ander Urio Garmendia  
eta Jon Urrestilla Urizabal*

293-300 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.v.05.37>

ANTOLATZAILEA:



BABESLEAK:



LAGUNTZAILEAK:



## Axioi Inflazioa

Daniel G. Figueroa<sup>1</sup>, Joanes Lizarraga<sup>2,3</sup>, Ander Urio<sup>2,3</sup>, Jon Urrestilla<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Física Corpuscular (IFIC), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) eta Universitat de València, 46980, Valentzia

<sup>2</sup> Fisika saila, Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU, 48080, Bilbo

<sup>3</sup> EHU Quantum Center, Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU

ander.urio@ehu.eus

### Laburpena

Lan honetan axioi inflazio ereduaren dinamika ez-lineala ikertu dugu. Horretarako *gauge* eremuek inflatoiaren dinamikan eragiten duten erreakzioa aztertu dugu, eta tresna gisa *lattice* simulazioak erabili ditugu, askatasun gradu guztiak aldi berean eboluzionatuta. Gainera, lortutako emaitzak lehenik zeudenekin konparatu ditugu, non azken hauek hurbilketa analitikoak erabilia eta efektu inhomogeneoak ekidinda lortuak diren. Inflazioaren dinamika era egokian deskribatzeko ekuazio inhomogeneoak bere osotasunean kontsideratu behar direla ondorioztatzen dugu, eta, beraz, beharrezkoa dela fenomenologiako muga eta emaitzak birkalkulatzeko.

**Hitz gakoak:** Kosmologia, unibertso goiztiarra, axioi inflazioa, dinamika ez-lineala

### Abstract

*We have studied the non-linear dynamics of the axion-inflation model. The analysis is based on how the gauge fields backreact on the inflaton dynamics by using lattice simulations, where we simulate all degrees of freedom simultaneously. In addition, we have compared the results from our lattice simulations with those that use analytical approximations and where inhomogeneous effects are neglected. We conclude that in order to correctly describe the inflationary dynamics, it is crucial to consider the full inhomogeneous equations, and it is necessary to recalculate the current bounds and constraints from the phenomenology.*

**Keywords:** *Cosmology, early universe, axion inflation, non-linear dynamics*

## 1 Sarrera eta motibazioa

Egun behatzen dugun unibertsoa eta ordura arteko bilakaera era egoki batean deskribatzen du *Big Bang* edo hasierako singularitatearen ereduak. Einsteinen erlatibitate orokorra oinarri gisa hartuta, unibertsoaren geometriaren eta edukiaren arteko elkarrekintza posible da azaltzea. Are gehiago, fenomeno txundigarri askoren izaera deskribatzeko tresna aparta da; horien artean, zulo beltzak eta grabitazio-uhinak.

Dena den, *Big Bang* ereduaren arrakastatsua izan arren, ez da gai hainbat fenomeno fisikori azalpena emateko. Adibide argiena Hondoko Mikrouhin Erradiazioa (CMB siglak ingelesez) dugu; hein handi batean *Big Bang* ereduaren mugak erakusten ditu eta. CMBa hasierako singularitatetik 300.000 urte igaro eta gero libreki bidaiatu zuten fotoien hondo ia uniformea da. Hala ere, hondoaren uniformetasun hori soilik eskala handietan behatu daiteke; anisotropiak daude CMBan eta jatorria ulertzeko beharrezkoa da haratago joatea.

Anisotropia horien jatorria inflazioa deritzon garaian aurki dezakegu. Inflazioa era ezberdinetan definitu daiteke, baina bere muinean espazioaren hedapen azeleratuko garaia da. Behin hasierako singularitatetik abiatuta, alegia, *Big Bang*-etik, unibertsoa segundo gutxi batzuetan izugarri hedatu zen, gutxi gorabehera  $10^{22}$  faktore bat inguru (Baumann, 2011). Hedapen esponentziala gertatu baino lehen, unibertsoa hutsean zegoen, baina txikitasun horretan fluktuazio kuantikoak zeuden. Horregatik, unibertsoa oso txikia zenean presente zeuden fluktuazio edo ezpurutasun horiek hedapen azeleratuan zehar barreiatu ziren, eta egungo unibertsoaren tamainan zehar hedatu. Horrela, CMBan ikusten ditugun anisotropiak inflazioan zabalduko fluktuazio kuantikoen aztarna besterik ez dira.

Inflazioa, esan dugun bezala, unibertsoa esponentzialki hazten den garaia da, baina fisikoki nolako eredia da? Kasurik sinpleenean, aipatutako hedapen azeleratua izateko, partikula eskalar bat,  $\phi$ , inflatoi deitu ohi zaiona, eta potentzial,  $V(\phi)$ , nahikoa lau bat behar dira, honen gainean geldoki higitzeko (ingeleszko *slow-roll* higidura deritzona). Askotariko ereduak daude baldintza horiek betetzen dituztenak: Starobinski inflazio eredia, inflazio eredu hibridoak, amaigabeko inflazioa... Guztiarekin ere, eredu horietan kontu handia izan behar da ultramoreko (ingeleszko siglak UV) efektu fisiko ezezagunekin. Eredu sorta horien artean, eredu arrakastatsuenetako bat axioi inflazioa da. Bertan axioi itxurako partikula batek,  $\phi \rightarrow \phi + c$  simetrikoa denak, gidatzen du inflazioa. Berau da eredu horretako inflatoiaren. Axioien simetriaren izaera dela eta, inflatoiaren eta ereduko beste edozein osagairen arteko elkarrekintza oso mugatuta dago, eta inflazioren dinamika UVko efektu fisiko ezezagunetatik babestuta dago.

Axioiak gidatutako inflazio eredu ugari proposatu dira orain arte: inflazio naturala (Freese et al., 1990; Adams et al., 1993), N-flazioa (Dimopoulos et al., 2008; Easther eta McAllister, 2006; Bachlechner et al., 2015) edo axioi monodromia inflazioa (McAllister et al., 2010; Silverstein eta Westphal, 2008). Hala ere, guk aztergai dugun axioi inflazio ereduan,  $\phi$  inflatoiaren eta  $A_\mu$  gauge abeldarraren arteko elkarrekintza ikertu nahi dugu, eta interakzio terminorako aukera bakarra hau da

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -\frac{\sqrt{-g}}{4\Lambda} \phi F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}. \quad (1)$$

Bertan  $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$  tentsore elektromagnetikoa da eta  $\tilde{F}^{\mu\nu} = \frac{1}{2} \varepsilon^{\mu\nu\sigma\alpha} F^{\sigma\alpha}$  bere duala. Bestalde,  $1/\Lambda$  da eremu eskalarren eta gauge eremuaren arteko mihizadura. Horretaz gain, literaturako aurreko emaitzekin konparaketa egin ahal izateko darabilgun potentziala,  $V(\phi) = \frac{1}{2} m^2 \phi^2$ , koadratikoa da.

Hortaz, materiari dagokion ekintza hau da

$$\mathcal{S}_m = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ -\frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{1}{2} m^2 \phi^2 - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \frac{1}{4\Lambda} \phi F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} \right]. \quad (2)$$

Ereduaren higidura-ekuazioak lor daitezke aurreko ekintza bariatuta eta denbora-gaugea,  $A_0 = 0$ , hautatuta (Cuissa eta Figueroa, 2019)

$$\dot{\pi}_\phi = -3H\pi_\phi + \frac{1}{a^2} \vec{\nabla}^2 \phi - m^2 \phi + \frac{1}{a^3 \Lambda} \vec{E} \cdot \vec{B}, \quad (3)$$

$$\dot{\vec{E}} = -H\vec{E} - \frac{1}{a^2} \vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{1}{a\Lambda} \pi_\phi \vec{B} + \frac{1}{a\Lambda} \vec{\nabla} \phi \times \vec{E}, \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\frac{1}{a\Lambda} \vec{\nabla} \phi \cdot \vec{B}, \quad (5)$$

Ekuazioetan  $a$  eskala-faktorea da, eta unibertsoaren espantsioa kontrolatzen du. Bertatik, Hubble-ren parametroa,  $H = \frac{\dot{a}}{a}$ , lor daiteke, ekuazioetan ere presente dagoena. Higidura-ekuazioetan goi-puntuak denborakiko deribatuak adierazten dituzte; denbora kosmikoarekiko,  $t$ , hain zuzen ere. Hala ere, ekuazioetan denbora kosmikoa erakusten dugun arren, behagarriak *efold*-ekiko,  $N_e$ , irudikatzen dira; izan ere, unibertsoa oso denbora epe laburrean izugarri hedatzen da, eta  $t$  denbora eta  $a$  eskala faktorea erlazionatzen dituen denbora-parametroa beharrezkoa da

$$N_e = \int \frac{dt}{a(t)}. \quad (6)$$

Bestalde, esan den bezala, ereduan bi eremu mota dauzkagu, bata eskalarra eta bestea gauge eremua. Horien momentu konjokatuak hauek dira: axioi momentua, abiadura ere deitua,  $\pi_\phi \equiv \dot{\phi}$ , eta eremu elektrikoa,  $E_i \equiv \dot{A}_i$ . Gauge-arekin lotutako eremu magnetikoa, berriz, ohikoa den gisan definitu dugu,  $B_i \equiv \varepsilon_{ijk} \partial_j A_k$ .

Axioi inflazioa oso interesgarria da, besteak beste, gauge eremuaren polarizazioetako baten hazkuntza esponentziala dakarrelako inflazioren garapenean, eta lehen definitu dugun (1) elkarrekintza terminoa du oinarri (Turner eta Widrow, 1988; Garretson et al., 1992; Anber eta Sorbo, 2006, 2010; Barnaby eta Peloso, 2011; Adshead et al., 2013; Cheng et al., 2016). Kitzikapen horrek bide ematen dio fenomenologia oso aberatsari; garrantzitsuenak dentsitate handiko perturbazioen sorrera (Barnaby eta Peloso, 2011; Barnaby et al., 2012, 2011; Cook eta Sorbo, 2012; Pajer eta Peloso, 2013) eta grabitazio-uhin (kiralen) ekoizpena dira (Adshead et al., 2013; Barnaby et al., 2012; Sorbo, 2011; Cook eta Sorbo, 2013). Gainera, posible da fenomenologia horren aztarnak CMBaren neurketetan, jatorrizko zulo beltzen bilaketan (ingelsezko siglak PBH) (Cheng et al., 2016; Pajer eta Peloso, 2013; Linde et al., 2013; Bugaev eta Klimai, 2014; Garcia-Bellido et al., 2016; Domcke et al., 2017; Cheng et al., 2018) edo

grabitazio-uhin detektagailuetan topatzea (Cook eta Sorbo, 2012; Anber eta Sorbo, 2012; Domcke et al., 2016; Bartolo et al., 2016).

Horren ondorioz, argi dago axioi inflazio ereduaren azterketak unibertsoaren sorrerako lehen aldiuneen informazio oso garrantzitsua eman dakigukeela; izan ere, eredu bera fisikoki esanguratsua izateaz gain, behaketen bidez aurkitu daitezkeen fenomenologia aberatsa du.

## 2 Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Aurkeztutako higidura-ekuazioen ez-linealtasuna dela-eta ez da posible analitikoki bere osotasunean ebaztea ereduaren dinamika. Orain arte egin diren ikerketa eta emaitza guztietan maila ezberdinetako hurbilketetara jo da.

Lehen aukera eta sinpleena, *erregimen lineala* deritzona kontsideratzea da, eta soilik inflazioaren amaieratik urrun da onargarria hurbilketa. Kasu horretan, inflatoiaren dinamikan eremu elektrikoaren eta magnetikoaren eragina arbuigarria dela onartzen da, eta, beraz, eremu eskalarrak lehen aipatutako *slow-roll* higidura jarraituko luke. Hurbilketa horretan inflatoiak ez du iturririk inhomogeneotasunak sortzeko. *Gauge* eremuak, berriz, kitzikatu egiten dira axioiaren abiadurarekin,  $\dot{\phi}$ , duten elkarrekintzagatik. Horrek ezegonkortasun kirala dakar, hots, polarizazioetako bat,  $A^+$  gure kasuan, esponentzialki hazten da, eta, bestea,  $A^-$ , aldiz, ez da kitzikatzen.

Hazkuntza hori kontrolatzen duen parametroa hau da

$$\xi = \frac{\dot{\phi}}{2H\Lambda}. \quad (7)$$

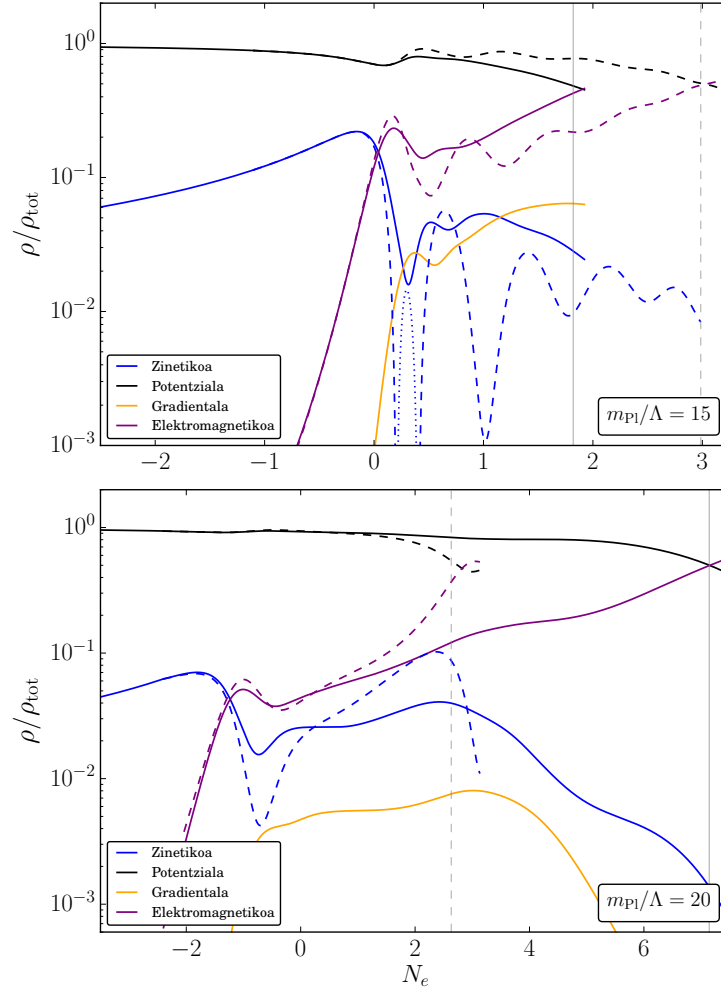
Dena den, argi dago hurbilketa ez dela onargarria inflazioaren iraupen osoan zehar; izan ere, *gauge* eremuak hazi ahala, euren efektua geroz eta garrantzitsuagoa da eremu eskalarraren dinamikan. Gainera, mihiztadura-parametroa,  $1/\Lambda$ , zenbat eta handiagoa izan, orduan eta bortitzagoa da efektua, (3) ekuazioko azken terminoa horren adierazgarri.

Hurrengo hurbilketa mailan *gauge* eremuek inflatoiaren dinamikan duten eragina sartzen da, baina eremu eskalarra homogeno mantenduta. Beraz, hurbilketan inhomogeitateak ez dira kontuan hartzen. Orain arte, literaturan bi era ezberdinetara ebatzi da inhomogeneotasunik gabe axioi inflazioa. Lehengoan ekuazio integro-diferenzial dinamikoaren sistema bat modu autokontsistentean (iteratiboki) ebazten dute (Cheng et al., 2016; Notari eta Tywoniuk, 2016; Dall'Agata et al., 2020; Domcke et al., 2020). Bigarreanean, *gradient expansion* deritzon metodoa erabiltzen dute, zeinak ekuazioetan eremu elektriko eta magnetikoen ekarpena erduztatzen duen, horretarako eraikuntza bilinealetan oinarritzen diren esperotako balioak erabilita (Sobol et al., 2019; Gorbar et al., 2021). Era batean zein bestean antzeko ondoretara iristen dira: eremu eskalarraren abiaduraren portaera oszilakorraren ondorioz, *gauge* eremuaren ekoizpena handitzen da erresonanteki; eta izaera horrek berak *gauge*-aren zein perturbazio eskalar eta tentsorialen espektroan ezaugarri oszilakorrak sortzen ditu.

Lehen aipatutako axioi inflazioko fenomenologia aberatsa azken hurbilketa mailarako lortu da, hau da, auresandako behagarrien mugak eta balioak kasu homogeneorako lortu dira soilik. Ondorioz, eredu ez da bere osotasunean aztertu. Horregatik, guk gauzatutako lanaren helburua lehen aldiz eredu inongo hurbilketarik gabe aztertzea da, eta lortutako emaitzak lehengoekin konparatzea. Horretarako, eta esan bezala analitikoki ebazpena ezinezko den heinean, *lattice* eremu teoria erabiltzea da gure estrategia, hau da, hiru dimentsiotan espazialki diskretizatutako kutxa batean, higidura-ekuazioak osorik eboluzionatzea. Hori dena konputazionalki. Beraz, zehazki lan honen helburua axioi inflazio aztertzeke oinarriak finkatzea da, formalismo egoki bat izatea; horrela, behin edukita, fenomenologiako muga eta balioak birkalkulatzea ahalbidetuko du. Gainera, konparaziorako kasu homogeneo propioak izateko, diseinatutako formalismoa egokitu dugu eta gisa horretako simulazioak ere egin ditugu.

## 3 Ikerketaren muina

Artikulu honetan axioi inflazio ereduaren dinamika ez-lineala aztertu dugu bere osotasunean. Horretarako (3), (4) eta (5) higidura-ekuazioak ebatzi ditugu, unibertsoaren hedapena zehazten duten Friedmann-en ekuazioekin batera. Herraminta nagusia *lattice* diskretizatuak dira, eta horretarako CosmoLattice liburutegiaz baliatu gara (Figueroa et al., 2023). Gainera, diskretizazio espaziala era kontsistentean egiteko (Figueroa eta Shaposhnikov, 2018; Cuissa eta Figueroa, 2019) erreferentzietan aurkeztutako gidalerroetan oinarritu gara. Horretaz gain, denbora diskretizatzeke bigarren ordenako Runge-Kutta eskema baliatu dugu. Horiek horrela,  $\mathcal{O}(dx^2, dt^2)$  ordenako sistema

**1. Irudia: Energia-dentsitateak  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 15$  eta  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 20$  kasuetarako.**


diskretu baten bidez eboluzionatzen dugu axioi inflazio ereduko dinamika, hots, bai espazioan eta bai denboran gure 3 dimentsioko kutxan (3), (4) eta (5) ekuazio jarraituak bigarren ordenara arte betetzen ditugu.

Artikulu honetan bi mihizatadura-parametroren emaitzak erakusten ditugu,  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 15$  eta  $20$ , non  $m_{\text{pl}} = \sqrt{c\hbar/8\pi G}$  Planck-en masa murriztua den; eta  $c$  argiaren abiadura,  $G$  grabitazio unibertsalaren konstantea eta  $\hbar$  Planck-en konstante murriztua. Bi balio horietara jo dugu literaturan kasu homogeneousarako jada aztertu direlako eta fenomenologian ezarritako mugetatik gertu daudelako. Gainera, aurkeztuko ditugun emaitza guztietan guk eboluzionatutako kasu homogeneousarekin ikusten ditugun aldeak azpimarratuko ditugu. Hala nola, lehen azpimarratu dugun moduan denbora unitate gisa *efold*-ak,  $N_e$ , erabili ditugu.

Aztertu dugun lehen behagarria  $\rho$  energia dentsitatea da. 1. irudian  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 15$  (goian) eta  $20$  (behean) kasuen energia-dentsitateak aztertu ditugu. Zehazki energia dentsitatearen gai ezberdinen eboluzioa, energia totalarekiko,  $\rho_{\text{tot}}$ , normalizatuta: energia eskalar potentziala beltzez, eskalar zinetikoa urdinez, eskalar gradientea laranja eta elektromagnetikoa morez. Lerro jarraituak dinamika ez-lineal osoarentzako eta etenak kasu homogeneousarako. Inflazioaren amaiera lerro bertikal baten bidez adierazi dugu, aipatu dugun lerro mota bereizketa berarekin, jarraitua ez-lineal osoa eta etena homogeneousoa. Azkenik, abiadura negatiboa denean puntu bidezko lerroak erabili ditugu.

Hurbilketa homogeneousan zein ez-lineal osoan *gauge*-en ekarpena, alegia, energia elektromagnetikoarena, igo-tzen doa inflatoiaren abiaduran eragin arte. Efektu hori energia zinetikoaren portaeran isladatzen da. Horrek, era berean, *gauge*-en hazkuntza moteltzen du. Bestalde, simulazio ez-lineal osoan gradienteen energia nabarmenki hazten da, energia zinetikoarekin konpargarria izan arte edo kasu batzuetan gailentzera iritsi arte.  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 15$

mihizadura-parametrorako lehenago gertatzen da,  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 20$ -rako baino, baina bietan efektu berbera ikusten dugu. Horretaz gain, kontuan izan definizioz kasu homogeneoan ez daukagula gradienteen ekarpenik.

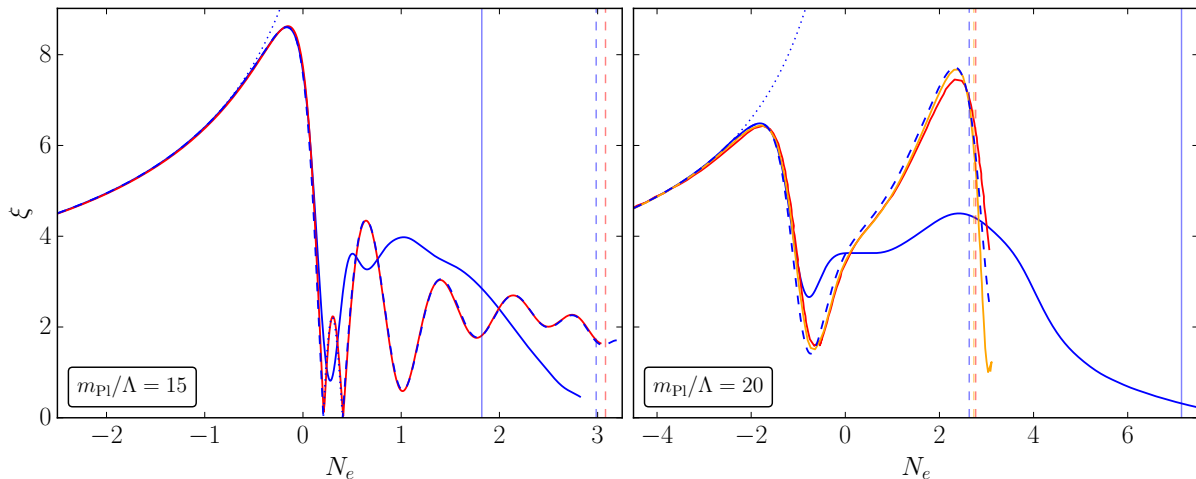
Inflazioaren amaierari dagokionez, bai hurbilketa homogeneoan, bai ez-lineal osoan erregimen linealean aurre-saten denarekiko nabarmen atzeratzen da (gogoratu kasu linealean inflazioa  $N_e = 0$ -n amaitzen dela). Hala ere, inflazio amaiera uneak ez datoz bat homogeneoan eta ez-lineal osoan.  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 15$ -rako inflazioak homogeneoan gehiago irauten duen arren,  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 20$  kasuan aurkakoa gertatzen da.

Inflazioa amaitzeko mekanismoa homogeneoan zein ez-lineal osoan berbera da. Aipatu dugun gisa ekarpen zinetikoak energia elektromagnetikoaren hazkuntza atzeratzen du, baina ez du eteten. *Gauge*-en kontribuzioak igotzen jarraitzen du, eta kontribuzioa energia eskalar potentzialaren hainakoa denean inflazioa bukatu egiten da.

Sistema ez-lineal osoan *gauge* eremuek dinamika eskalarraren gainean duten eragina aztertzeko  $\xi$  behargarria baliatu dugu, (7) ekuazioan definitu duguna. Emaitzak 2. irudian barnebildu ditugu. Oraingo honetan  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 15$  (ezkerrean) eta 20 (eskuinean) kasuetako portaera erakutsi dugu. Lerro urdin jarraiek sistema ez-lineal osoaren eboluzioa erakusten dute, eten urdinek guk gauzatutako kasu homogeneoarena. Azkenik, literaturatik lehen esandako kasu homogeneoak ere sartu ditugu, lerro gorritz Domcke et al. (2020) eta laranja Gorbar et al. (2021). Horrela, gure kasu homogeneoak ondo gauzatuta daudela konproba dezakegu. Bestalde, kasu bakoitzerako kolore kode berarekin, lerro bertikalek inflazioaren amaiera adierazten dute. Erreferentzia gisa erregimen linealaren eboluzioa ere gehitu dugu, puntu bidezko lerroen bidez.

Erregimen linealaren kasuan  $\xi$  monotonoki hazten da, puntu bidezko lerroek adierazten duten gisa. Ez-lineal osoan zein homogeneoan *gauge* eremuek eremu eskalarraren dinamikan eragiten dute eta jarrera monotono hori aldatzen dute, bai  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 15$ , bai  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 20$  kasuetan. Bestalde, guk *lattice*-an egindako kasu homogeneoan lortzen duguna hein handi batean bat dator literaturan aurki daitezkeen aurreko emaitzekin.

## 2. Irudia: $\xi$ -ren eboluzioa $m_{\text{pl}}/\Lambda = 15$ eta $m_{\text{pl}}/\Lambda = 20$ kasuetarako



Literaturako aurreko emaitzek  $\xi$ -n jarrera oszilakorra auresaten zuten, bereziki  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 15$  kasurako. Hori inflatioaren  $\dot{\phi}$  abiaduraren jarrera oszilakorrak sortua da. Izatez,  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 15$  kasuan, 0 eta 1 *efold*-en inguruan abiadurak zeinuz aldatzen du (puntuak erabili ditugu lerro etenen ordez).

Sistema ez-lineal osoan ez dugu jarrera oszilakor hori ikusten,  $\xi$  ez da monotonoa, baina ez dauka aipatutako jarrera.  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 15$  kasuan oso argi ikusten dira aldeak, eta, gainera, ez-lineal osoan ez dago homogeneorako aipatu dugun zeinu aldaketa abiaduran.

$m_{\text{pl}}/\Lambda = 20$  mihizadura-parametroaren kasuan ere jarrera oszilakorra behatzen dugu kasu homogeneoan. Dena den, ez da  $m_{\text{pl}}/\Lambda = 15$  kasuko homogeneoa bezain nabaria, leunagoa da efektua. Horretaz gain, berriro ere, sistema ez-lineal osoan  $\xi$ -ren jarrera homogeneoan baino lauagoa da, eta inflazioaren amaiera asko luzatzen da, homogeneoa baino 4 *efold* gehiago.

## 4 Ondorioak

Lan honetan lehenengo aldiz axioi inflazio ereduaren azterketa egin dugu sistema ez-lineal osorako, inhomogeneotasunak arbuia gabe eta simulazioak inflazioaren amaierara arte luzatuta. Emaitzetan mihiztadura-parametro ezberdinetarako energiaren eta  $\xi$  parametroaren eboluzioa erakutsi dugu, bai guk gauzatutako kasu homogeneorako, bai ez-lineal osorako; eta euren arteko aldeak nabariak dira:

- Kasu homogeneoan auresaten zenarekin bat, inflazioaren amaiera erregimen linealak auresandakoaren ondoren gertatzen da sistema ez-lineal osoa eboluzionatzen dugunean, baina amaiera horiek ez datoz bat euren artean. Gainera, mihiztadura-parametroaren arabera inflazioaren iraupena homogeneoan baino luzeagoa edo motzagoa izan daiteke sistema ez-lineal osoan.
- Gradienteen energiaren eragina nabaria da, beste ekarpen batzuen mailara iritsi arte. Beraz, inhomogeneotasun eskalarrak ez dira arbuia garriak.
- $\xi$  behagarriaren forma guztiz ezberdina da ez-lineal osoan homogeneoarekin alderatuta. Era orokorrean, hurbilketa homogeneoan auresandako oszilazio bortitzik ez dela nabari behatu dugu, ezta kasu batzuetan ager daitezkeen abiaduraren zeinu aldaketak ere.

Oro har, lan honetatik atera dezakegun ondorio nagusia da beharrezkoa dela axioi inflazio eredu bere osotasunean kontsideratzea. Hurbilketa homogeneoak ez dira nahikoa dinamikaren azterketa egokia egiteko, eta plazaratu ditugun emaitzek erakusten duten gisan inhomogeneotasunek garrantzi handia dute sisteman.

Azkenik, aipatu nahi genuke artikuluan honen xedea ez dela izan gauzatu ditugun simulazioen teknikasunetan sartzea, lortutako emaitza fisikoak azpimarratzea baizik. Hala ere, orain arte ez da aukerarik izan axioi inflazio ereduaren dinamika bere osotasunean simulatzeko. Artikulu honetara eraman duen lanaren muina oinarri tekniko hori guztia garatzea izan da: diskretizazio eskema kontsistentea proposatzea, denbora integratzaile egokia aukeratzeko, Cosmolattice bezalako ingurune konputazional eraginkor batean inplementatzea, hasierako baldintza egokiak topatzea eta gauzatzea, eta abar. Ondorioz, nahiz eta hemen alderdi hauetan ez dugun sakondu, nabarmentzeko iruditzen zaigu beharrezko tresneria guztia garatzeko egindako lana aldarrikatzea, eta, gainera, erakustea guztiz beharrezkoa dela eredu era egoki batean aztertzeke.

## 5 Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Artikuluan argi gelditu den moduan, axioi inflazio eredu era egokian aztertzeke beharrezkoa da sistema ez-lineal osoa kontsideratzea. Ez dira makalak orain arte literaturan aurki genitzakeen eta guk lortutako emaitzen arteko aldeak. Horrek orain arte lortu diren iragarpen fenomenologikoei berrikuspen sistematikoa egiteko beharra azaleratzen du. Hori egiteko, gainera, jadanik garatua dugu dinamika ez-lineala era egokian eboluzionatzen duen kodea.

Hori kontuan izanik, hainbat kolaborazio ditugu martxan eredu honek daukan fenomenologia aberatsari lotutako iragarpenak berrikusten hasteko. Horien artean, azpimarragarrienak, inflazioan zein hau amaitu eta laster sortutakoa grabitazio-uhinen hondo kosmikoaren kalkulua edo jatorrizko zulo beltzei bide ematen dieten perturbazio eskalarren lorpena genituzke. Biek hala biek emandako iragarpenak behaketa esperimenter modernoekin datuekin epe labur-ertainean kontrastean jarriko ditugu, axio inflazioaren baliagarritasuna ahalik eta zehatzen ebaluatzeke.

Horretaz gain, epe ertain-luzean, eredu orokortzea helburu duten gehipenak ere sartzea da gure beste ideietako bat; hala nola, axioiak *gauge* simetria handiagotik eratorritako *gauge* eremuekin izan ditzakeen mihiztadurak gehituz edo fermioiekin elkarrekintza jasoko luketen korranteak sartuz adibidez.

Argi dago beraz lan honetan aurrerapauso izugarria eman dugula axioi inflazio ereduaren fisika aztertzeke. Hala ere, ikerkuntzaren hasierako fasean gaude soilik, esan dugun gisa espektro zabala dugu aztertzeke oraindik, bai martxan dauzkagun kolaborazioetan baita etorriko diren berrietan ere. Funtsean oinarria finkatu dugu eta egoera ezin hobean gaude etorkizunean aurrerapausoak emateko.

## Erreferentziak

Adams, F. C., Bond, J. R., Freese, K., Frieman, J. A., & Olinto, A. V. (1993). Natural inflation: Particle physics models, power law spectra for large scale structure, and constraints from COBE. *Phys. Rev. D*, 47:426–455.

- Adshead, P., Martinec, E., & Wyman, M. (2013). Gauge fields and inflation: Chiral gravitational waves, fluctuations, and the Lyth bound. *Phys. Rev. D*, 88(2):021302.
- Anber, M. M. & Sorbo, L. (2006). N-flationary magnetic fields. *JCAP*, 10:018.
- Anber, M. M. & Sorbo, L. (2010). Naturally inflating on steep potentials through electromagnetic dissipation. *Phys. Rev. D*, 81:043534.
- Anber, M. M. & Sorbo, L. (2012). Non-Gaussianities and chiral gravitational waves in natural steep inflation. *Phys. Rev. D*, 85:123537.
- Bachlechner, T. C., Dias, M., Frazer, J., & McAllister, L. (2015). Chaotic inflation with kinetic alignment of axion fields. *Phys. Rev. D*, 91(2):023520.
- Barnaby, N., Namba, R., & Peloso, M. (2011). Phenomenology of a Pseudo-Scalar Inflaton: Naturally Large Nongaussianity. *JCAP*, 04:009.
- Barnaby, N., Pajer, E., & Peloso, M. (2012). Gauge Field Production in Axion Inflation: Consequences for Monodromy, non-Gaussianity in the CMB, and Gravitational Waves at Interferometers. *Phys. Rev. D*, 85:023525.
- Barnaby, N. & Peloso, M. (2011). Large Nongaussianity in Axion Inflation. *Phys. Rev. Lett.*, 106:181301.
- Bartolo, N. et al. (2016). Science with the space-based interferometer LISA. IV: Probing inflation with gravitational waves. *JCAP*, 12:026.
- Baumann, D. (2011). Inflation. In *Theoretical Advanced Study Institute in Elementary Particle Physics: Physics of the Large and the Small*, 523–686.
- Bugaev, E. & Klimai, P. (2014). Axion inflation with gauge field production and primordial black holes. *Phys. Rev. D*, 90(10):103501.
- Cheng, S.-L., Lee, W., & Ng, K.-W. (2016). Numerical study of pseudoscalar inflation with an axion-gauge field coupling. *Phys. Rev. D*, 93(6):063510.
- Cheng, S.-L., Lee, W., & Ng, K.-W. (2018). Primordial black holes and associated gravitational waves in axion monodromy inflation. *JCAP*, 07:001.
- Cook, J. L. & Sorbo, L. (2012). Particle production during inflation and gravitational waves detectable by ground-based interferometers. *Phys. Rev. D*, 85:023534. [Erratum: *Phys.Rev.D* 86, 069901 (2012)].
- Cook, J. L. & Sorbo, L. (2013). An inflationary model with small scalar and large tensor nongaussianities. *JCAP*, 11:047.
- Cuissa, J. R. C. & Figueroa, D. G. (2019). Lattice formulation of axion inflation. Application to preheating. *JCAP*, 06:002.
- Dall’Agata, G., González-Martín, S., Papageorgiou, A., & Peloso, M. (2020). Warm dark energy. *JCAP*, 08:032.
- Dimopoulos, S., Kachru, S., McGreevy, J., & Wacker, J. G. (2008). N-flation. *JCAP*, 08:003.
- Domcke, V., Ema, Y., & Mukaida, K. (2020). Chiral Anomaly, Schwinger Effect, Euler-Heisenberg Lagrangian, and application to axion inflation. *JHEP*, 02:055.
- Domcke, V., Muia, F., Pieroni, M., & Witkowski, L. T. (2017). PBH dark matter from axion inflation. *JCAP*, 07:048.
- Domcke, V., Pieroni, M., & Binétruy, P. (2016). Primordial gravitational waves for universality classes of pseudoscalar inflation. *JCAP*, 06:031.
- Easther, R. & McAllister, L. (2006). Random matrices and the spectrum of N-flation. *JCAP*, 05:018.
- Figueroa, D. G., Florio, A., Torrenti, F., & Valkenburg, W. (2023). CosmoLattice: A modern code for lattice simulations of scalar and gauge field dynamics in an expanding universe. *Comput. Phys. Commun.*, 283:108586.
- Figueroa, D. G. & Shaposhnikov, M. (2018). Lattice implementation of Abelian gauge theories with Chern–Simons number and an axion field. *Nucl. Phys. B*, 926:544–569.
- Freese, K., Frieman, J. A., & Olinto, A. V. (1990). Natural inflation with pseudo - Nambu-Goldstone bosons. *Phys. Rev. Lett.*, 65:3233–3236.
- Garcia-Bellido, J., Peloso, M., & Unal, C. (2016). Gravitational waves at interferometer scales and primordial black holes in axion inflation. *JCAP*, 12:031.



- Garretson, W. D., Field, G. B., & Carroll, S. M. (1992). Primordial magnetic fields from pseudoGoldstone bosons. *Phys. Rev. D*, 46:5346–5351.
- Gorbar, E. V., Schmitz, K., Sobol, O. O., & Vilchinskii, S. I. (2021). Gauge-field production during axion inflation in the gradient expansion formalism. *Phys. Rev. D*, 104(12):123504.
- Linde, A., Mooij, S., & Pajer, E. (2013). Gauge field production in supergravity inflation: Local non-Gaussianity and primordial black holes. *Phys. Rev. D*, 87(10):103506.
- McAllister, L., Silverstein, E., & Westphal, A. (2010). Gravity Waves and Linear Inflation from Axion Monodromy. *Phys. Rev. D*, 82:046003.
- Notari, A. & Tywoniuk, K. (2016). Dissipative Axial Inflation. *JCAP*, 12:038.
- Pajer, E. & Peloso, M. (2013). A review of Axion Inflation in the era of Planck. *Class. Quant. Grav.*, 30:214002.
- Silverstein, E. & Westphal, A. (2008). Monodromy in the CMB: Gravity Waves and String Inflation. *Phys. Rev. D*, 78:106003.
- Sobol, O. O., Gorbar, E. V., & Vilchinskii, S. I. (2019). Backreaction of electromagnetic fields and the Schwinger effect in pseudoscalar inflation magnetogenesis. *Phys. Rev. D*, 100(6):063523.
- Sorbo, L. (2011). Parity violation in the Cosmic Microwave Background from a pseudoscalar inflaton. *JCAP*, 06:003.
- Turner, M. S. & Widrow, L. M. (1988). Gravitational Production of Scalar Particles in Inflationary Universe Models. *Phys. Rev. D*, 37:3428.

## 6 Eskerrak eta oharrak

Lan honetako kodea Cosmolattice simulazio paketea garatu da, eta simulazio guztiak ARINA klusterrean gauzatu dira. Ander Urio egileak eskerrak eman nahi dizkio Juan Luis Bidarteri testuan egindako zuzenketengatik, eta erreferentzia egiten dio Euskal Herriko Unibertsitateko PIF20/151 diru-laguntzari.