

# Grabitazio-uhinak

*Ruth Lazkoz*

Fisika Teorikoaren eta Zientziaren Historiaren Saila  
Euskal Herriko Unibertsitatea

*J.A. Valiente-Kroon*

Max-Planck Institut fuer Gravitationsphysik  
Albert Einstein Institute

**Laburpena:** Artikulu honek grabitazio-uhinen gaia oinarrizko mailan jorratzen du, irakurleek Erlatibitate Orokorrari buruzko aurrez aurretiko noziorik ez dutelako us-tetik abiatuz. Einstein-en grabitazioaren teoriari buruzko sarrera aurkeztu ondoren, grabitazio-uhinek hedatzen diren espazio-denboraren perturbazio gisa jokatzeko du-tela eztabaidatu eta itsas indarretan sortzen dituzten oszilazioak deskribatuko ditu-gu. Grabitazio-uhinek, elektromagnetikoek ez bezala, ez dute gainezarmenaren prin-tzipioa betetzen, hau da, ez dira linealak. Gainera, haien iturriak ezin dira guztiz simetrikoak izan, hots, ez dago grabitazio-uhin esferikorik. Grabitazio-erradiazioak iturriaren informazio globala eskaintzen duenez, uhinak detektatzeko tresnak eraiki-tzera bideratutako ahalegin handiak egin dituzte zenbait ikerkuntza-taldek. Lehen detekzioak hurrengo hamarkadan lortuko direla espero da, eta hala balitz, Astrono-mian lehia berria irekiko litzateke. Guztiaz gain, aztertutako erreferentzien zerrenda emango dugu.

## 1. SARRERA

Naturan lau oinarrizko elkarrekintza daude: elektromagnetikoa, nuklear ahula, nuklear sendoa eta grabitazionala. Elkarrekintza nuklearrak oso iris-men laburrekoak dira. Gainerako biak, hau da, elektromagnetikoa eta gra-bitazionala, irismen luzekoak dira, baina grabitatea da nagusi eskala astro-nomikoetan, nahiz eta indar elektromagnetikoarekin konparatuta oso ahula den. Adibidez, bi elektroiren arteko aldentze-indarraren eta grabitazio-era-karpenaren arteko arazoia ondokoa da:

$$\frac{F_{elect}}{F_{grav}} = 4.17 \cdot 10^{42}$$

Orduan, zergatik da grabitatea elkarrekintza menperatzailea distantzia handietan? Erantzuna oso erraza da: Unibertsoa funtsean elektrikoki neutroa da eta.

Gure eskura dugun grabitazioaren teoria onena Erlatibitate Orokorrena da. Honen arabera, grabitazio-indarrak *espazio-denboraren* kurbadura-aren agerpena baino ez dira. Horri dagokionez, grabitatearen izaera eta beste hiru oinarritzko indarrenena ezberdinak dira. Grabitazioaren teoria newtondarrean ez bezala, non «abiadura infinituko» distantzia-elkarrekintza dagoen, Erlatibitate Orokorrean grabitazio-elkarrekintza «abiadura finituaz» hedatzen da, argiaren abiaduraz hain zuzen ere. Beraz, gorputz jakin baten grabitazio-eremua aldatzen denean, espazio-denboran zehar hedatzen diren «zimurdurak» edo inhomogeneitateak sortzen dira. Gertakari honi *grabitazio-erradiazioa* deritzen, eta aipatutako zimurdurei grabitazio-uhin edo uhin grabitazionalak.

Uhin horiek oso ahulak dira eta beraien uhin-luzera hain da handia ezen oraindik ezin izan baitzaizkie zuzenean behatu. Dena den, bada haien existentziaren zeharkako ebidentzia fidagarria. Nolanahi ere, grabitazio-erradiazioaren lehenbiziko detekzioa hurrengo hamarkadan gertatuko da balioespen moderatuki baikorren arabera.

Zergatik da interesgarria grabitazio-uhinak aztertzea? Masadun gorputzak osatzen dituzte banakako atomo eta elektroiek igorritako uhin elektromagnetikoen ez bezala, grabitazio-uhinak gorputzek beraien osotasunean igortzen dituzte. Horren ondorioz, erradiazio elektromagnetikoak eta grabitazio-erradiazioak informazio mota ezberdinak garraiatzen dituzte: grabitateari dagokiona lokala baino, globala dela esan daiteke.

Hain ahulak direnez, grabitazio-uhinek ez dute kasik elkarreragiten materiarekin. Izan ere, luzaroan ibil daitezke aldaketa nabarmenik jasan gabe. Are gehiago, aldaketaren bat gertatuz gero, honek ere informazio ugaria emango du. Ahulak badira ere, uhinek energia asko atera dezakete masadun gorputzetatik. Adibidez, bi zulo beltzen artean aurrez aurreko talka gertatzen denean, haien masaren %3a erradiazio gisa galtzen da. Zulo beltzen ildoari jarraiki, grabitazio-erradiazioa haietatik aldegin dezakeen erradiazio mota bakarra dela esan behar da. Horregatik, grabitazio-uhinen detekzioa zulo beltzei behatzeko aukera bakarra dugu.

Uhinek materiarekin duten elkarrekintza ahulak garrantzi paregabea du Kosmologian, zeren Unibertsoaren garai goiztiarretan sortutako uhinek garraiatzen duten informazioa ailegatuko bailitzaiguke ia aldatu gabe. Oso ezaugarri bereziak dituzten uhin hauek detektatuko bagenu, garrantzizko zenbait parametro kosmologikori borneak jarri ahal izango genitzkieke. Hots, informazio mota honi esker, unibertsoaren historiaren hasierari buruzko ideia eta nozioak bikaindu ahal genituzke.

Grabitazio-uhinei buruzko lau ikerketa-arlo nagusi daude. Lehenengo eta behin, Erlatibitate Matematikoa dugu, non Erlatibitate Orokorren ekuazioen ebazpenak aztertzen diren, eta bereziki uhinei dagozkienak. Bigarrenik, uhin-gertaeren ordenagailuen bidezko zenbakizko ikerketak aipatu behar ditugu. Hirugarrenik, uhinak detektatzeko lan esperimentalak ditugu. Azkenik, grabitazio-uhinen aplikazio kosmologiko eta astrofisikoen arloa dugu. Esan dugunez, horrelako ikerketek unibertsoaren egiturari buruzko informazioa lortzeko asmoz egiten dira.

## 2. GRABITAZIO-UHINAK ERLATIBITATEAREN TEORIAN

Aipatu denez, Erlatibitate Orokorrean grabitatea unibertsoaren kurbaduraren ondoriotzat jotzen da. Espazio-denbora unibertsoaren gertaera guztien bilduma da:

$$\text{gertaera} = (\text{kokagunea}, \text{unea}).$$

Matematikoki mintzo bagara, espazio-denborak lau dimentsioko barriatearen izaera dauka: dimentsio batek unea zehazten du eta beste hiru kokagunea. Erabiltzen diren koordenatuek ez dute esangurarik teoria honetan; horrek esan nahi du ez dagoela erreferentzia-sistema pribilegiaturik.

Espazio-denborari bi gertaeren arteko distantziaren nozioa atxiki ahal zaio, eta  $d(\text{gertaera}_1, \text{gertaera}_2)$  moduan adieraziko dugu orduan. Distantzia hori *tentsore metriko* deritzon  $\mathbf{g}$  objektu matematikoan kodetzen da. Esan behar da edozein bi gertaera argi-izpi baten bidez lotu ahal badira, hau da, argi-izpi baten bidez informazioa trukatu ahal badute, orduan

$$d(\text{gertaera}_1, \text{gertaera}_2) = 0$$

beteko dela. Definitutako distantziaren ezaugarri nagusien artean azken emaitza hau dugu hain zuzen ere.

Espazio-denboraren kurbadurak eragin erabakigarria du argi-izpien hedatzeko eraren gainean. Kurbaduraren esangura ulertzen laguntzeko azter dezagun barriate zeharo espazial baten adibidea. Barriatearen edozein hiru puntu hartu eta lotzen baditugu, triangelu bat eratzen da, noski, baina barriatearen kurbadura ez bada nulua, orduan triangeluaren angeluen batzura ez da  $180^\circ$  izango oro har.

Kurbadura gabeko espazio-denboretan bi argi-izpiren arteko distantziarako bi aukera daude, edo erritmo konstantez aldatzea, edo bat ere ez aldatzea. Argi-izpiek Fermat-en legea betetzen dutela gogoratu behar dugu, hots, barriatearen kurbaduraren menpeko ibilbide minimoetan zehar hedatzen direla. Behaketek erakutsi dutenez, eta bitxia bada ere, masa handia

duten objektuen inguruan hedatzen diren argi-izpiak ez dira espazio-denbora launa bailitzan hedatzen: desbideratu egiten dira. Horrelako efektuak esperimentalki ikusi dira eguzki-eklipseetan, adibidez. Masa handia duten gorputzen inguruan grabitazio-eremua oso ez-homogeneoa denez, hau da, puntutik puntura nabariki aldatzen denez, argi-izpiak aldendu egiten dira. Grabitazio-eremuaren homogeneitate ezak itsas-indarrak sortarazten ditu: grabitazio-eremuaren eraginpeko gorputz hedatuek esfortzuak jasaten dituzte oro har, zeren gorputz beraren puntu ezberdinen gaineko indarrak ezberdinak baitira. Informazio hau matematikoki kodetzen da *Riemann-en kurbadura-tentsorean*, zeina **Riemann**-en bidez adierazten den. Tentsore hau **g** metrika tentsorearen deribatu bigarrenen zenbait konbinazioen bidez eraikitzen da.

Erlatibitate Orokorren arabera materia eta energia<sup>1</sup> grabitazio-eremuaren iturriak dira, hau da, halako eremuak sortzen dituzte. Izan ere, materiak eta energiak espazio-denbora kurbatzen dute. Hala ere, grabitazio-eremuak berezko energia daukanez, bere buruaren iturria ere bada. Grabitazio-eremuaren bitxitasun honen ondorioa dugu hura deskribatzen duten ekuazioen ez-linealtasuna.

Imajina dezagun unibertso guztiz huts eta laua. Aurreko eztabaidaren arabera,

$$\mathbf{Riemann} = 0$$

beteko da eta beraz, haren grabitazio-eremua nulua izango da. Egoera horri dagokion espazio-denbora Erlatibitate Bereziarena da, Minkowski espazio-denbora delakoa hain zuzen ere. Beraz, materia eta energia banatuta dauden erak, espazio-denboraren kurbadura zehazten du, eta aldi berean, kurbadurak energia eta materia bertan higitzeko edota hedatzeko modua ere menperatzen du.

Erlatibitate orokorrean metrika tentsorerako hamar deribatu partzialeko ekuazioek menperatzen dute geometriaren eta materiaren arteko *uztardura*. Ekuazio horiei *Einstein-en ekuazio* deritze. Koordenatuen sistema aukeratzeko askatasuna dagoenez, posible da oro har sistema egokia aurkitzea sei ekuazio baino gehiago ebatzi behar ez izateko. Esan bezala, ekuazioak ez-linealak izatea, espazio-denborak grabitazio-eremua sortzeko duen ahalmenarekin lotuta dago, baina linealtasun ezaren ondorio garrantzitsuena gainezarmenaren printzipioa baliagarria ez izatearena dugu. Grabitazioaren teoria newtondarra lineala denez, arlo honetan behin gorputz batek sortzen duen eremua ezaguna izan, orduan distantzia jakin bat

---

<sup>1</sup> Erlatibitate Bereziaren teoriak dioenez, materia eta energia baliokideak dira, ondoko formula ospetsuaren arabera:

$$E = mc^2.$$

banatutako horrelako bi gorputzek sortzen duten eremua erraz kalkula daiteke gainezarmen-printzipioaz baliatuz. Prozedura hau ez da posible Erlatibitate Orokorrean. Are gehiago, grabitazio newtondarrean, gorputz bakoitzaren grabitazio-eremua defini daiteke, baina Erlatibitate Orokorrean ezin da hori egin. Grabitazio-eremua energia espazio-denboraren ezaugarri globala da teoria honetan.

### 2.1. Uhin linealizatuak

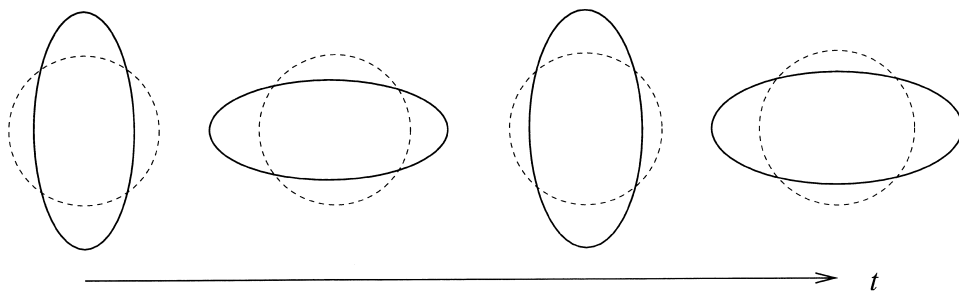
Demagun materia-banaketa batek bera dagoen espazioaren aldean sortzen duen grabitazio-eremua kalkulatu nahi dugula. Intuizio fisikoak huts egiten ez badu, iturrietatik hurbil eremua gainbeheratuko da, hau da, espazio-denboraren kurbaturaren efektuak indargabetuko dira. Alde horri asintotiko deritzo, eta bertan

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

betetzen da, non  $\eta_{\mu\nu}$  Minkowski espazio-denboraren metrika tentsorea baita eta  $h_{\mu\nu}$  espazio-denbora perturbaziotzat joko baitugu. Aurreko adierazpena Einstein-en ekuazioetan ordezkatzuz,  $\square h_{\mu\nu} = 0$  argumentuan ordena kuadratikoko gaiak arbuiatuz, eta koordenatu-sistema aukeratzeko (gauge choice) dagoen askatasunaz baliatuz, alde asintotikoan hauxe beteko da:

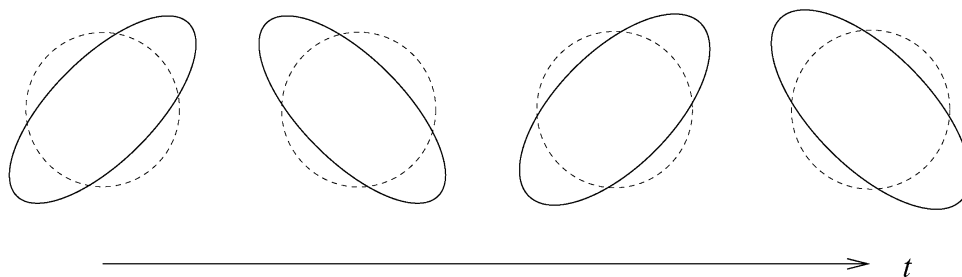
$$\square h_{\mu\nu} = 0 \tag{1}$$

Ekuazio honen ebazpenak grabitazio linealizatua deritzonak deskribatzen ditu. Ageri denez, metrika tentsorearen perturbazioen osagai bakoitzak uhin-ekuazioa betetzen du! Uhinaren hedapen-abiadura  $c$  erradiazio elektromagnetikoarena bezalakoa da, hots, argiaren abiadura da.



**1.irudia.** + polarizazio-egoeraren eskema. Uhinaren hedapen-norabidea eraztunarekiko ortogonal da. Lerro eteneko eraztunek, jatorrizko eraztunek uhinak ez balaude izango luketen itxura adierazten dute.

Uhin grabitazionalek eta elektromagnetikoen antzeko ezaugarriak dituzte. Adibidez, biek dituzte bi polarizazio-gradu eta beraien efektuak uhinaren hedapen-norabidean zeharkako norabideetan agertzen dira. Zeintzuk dira grabitazio-uhinen polarizazio-graduen ekarpen fisikoak? Gogora dezagun espazio-denboraren kurbadura itsas-ingar gisa agertzen dela. Demagun uhin baten hedapen-norabidearekiko perpendikularra den planoan partikulez egindako eraztun bat dugula. Uhinaren polarizazio-egoera + deritzona bada, orduan eraztuna norabide ortogonaletan zabalduko eta uzurtuko da. Baina uhinaren polarizazio-egoera - deritzona bada, orduan eraztunak antzeko deformazioa jasango du, baina deformazioaren norabideak aurreko kasukoekin konparatuta,  $1/4$  biratuta egongo lirarteke.



**2.irudia.** polarizazio-egoeraren eskema. Uhinaren hedapen-norabidea eraztuneko ortogonalak da. Lerro eteneko eraztunek, jatorrizko eraztunek uhinak ez baleude izango luketen itxura adierazten dute.

## 2.2. Uhin ez-linealak

Grabitazio-erradiazioak Erlatibitate Orokorren arloari badagokio ere, teoria linealizatua oso erabilgarria da gertaera hauen izaera ulertzeko. Izatez, Lurretik detektatzea espero den grabitazio-erradiazioaren jokaera hurbildua uhin linealizatuen bidez egokiro eman daiteke. Esan bezala, Erlatibitate Orokorra teoria ez-lineala da, baina, teoria linealizatua erabiltzen denean alde batera uzten dira efektu interesgarri eta agian ustekabeak.

Lehenengo eta behin, erradiazio grabitazionalak energia garraiatzen du eremuaren iturrietatik alde asintotikoetara. Hau era matematiko zehatzean adieraz daiteke eta, esan dugunez, pultsarrez egindako sistema bitarretan ikusi da. Beraz, iturrien energia sekulako txikitzen da erradiazioak daraman energia konpentsatuz. Bestalde, grabitazio-uhinek espazio-denboran zehar hedatzen diren bitartean, beraien uhin-fronteen itxura aldatzen da, hau da, uhinak errefraktatu egiten dira. Uhin-luzera ere aldatzen da, gero eta gorriago bihurtuz. Are gehiago, uhinak sakabanatu (backscatter) ahal dira eta pultso-itxura badaukate, orduan beraien itxura eta polarizazioa aldatuko dira, eta beraien atzean adatsak sortuko dira.

Einstein-en ekuazioen ez-linealtasuna dela eta, bi uhin zuzen espazio-denboraren alde berean badaude, ez dira gainezarriko uhin elektromagnetikoen modura. Aitzitik, elkarren artean topo egingo lukete eta beraien uhin-fronteen itxura aldatu eta sakabanatzea gertatuko litzateke. Berealdiko egoeretan uhin grabitazionalek intentsitate adina izango dute elkarrekin topo egitean fokaketaren ondorioz zulo beltzetan agertzen direnen moduko espazio-denboraren *singularitateak* sortzeko. Horrelako singularitateetan gure eskura ditugun teorien lege fisikoek ez dute balio.

Arloko ikertzaileak ados daude generikoki *grabitazio kuantikoa* deritzon eta egunera arte sendoki formulatu ez den teoria berriak singularitateetan gertatzen dena azaldu beharko duela. Singularitateak eta beraien sortze-prozesua, zulo beltzek ezkututzen dituzte printzipioz; beraz, ezin zaie zuzenean behatu. Berrero ere, prozesu hauei buruz lor dezakegun informazio bakarra beraiek igortzen duten grabitazio-erradiazioak emango digu.

### 3. HISTORIA APUR BAT

Egun ditugun grabitazio-uhinei buruzko nozioak ikertzaile askok egin-dako ekarpenetan oinarritutako ausnarketa prozesu luzeen ondorio dira. Einstein-ek 1915. urtean eremu grabitazionalaren ekuazioen behin-betiko adierazpena lortu zuen. Eremu-ekuazioen konplexutasunagatik eta haien ebazpen zehatzak eraikitzeke itxurazko ezintasunagatik, Einstein-ek teoria linealizatuaren oinarriak garatu zituen 1916. urtean. Bere ikerketek erregimen linealizaturako uhinen existentzia auresatera bultzatu zuten. Arraro ematen badu ere, Einstein-ek uhinak naturan ager zitezkeela luzaroan jarri zuen zalantzan, haren ustez linealizazioaren ondorio artifiziuala ziren uhinak, teoria osoa jorratzean desagertuko zirenak. Beste ikertzaileek ontzat jo zuten Einstein-en iritzia, bereziki, Arthur Eddington astronomo ingelesak, zeina bere iruzkizun erradikal eta xeblebreengatik ospetsua baitzen: uhinak espuriotzat jotzen zituen eta «pentsamenduaren abiaduraz» hedatzen zirela uste zuen.

Teoria osorako uhinen lehen adibideak pasa den mendearen 30eko hamarkadan lortu ziren. 50eko hamarkadan bazeuden oraindik grabitazio-uhinek informazioa garraia dezaketela sinisten ez zuten ospe handiko ikertzaileak. Roger Penrose-k 60eko hamarkadan proposatu zituen *metodo globalek* gaiaren ikuskera modernoaren oinarriak jarri zituzten. Hurrengo hamarkadetan Geometria Diferentzialaren eta Analisi Funtzionalaren metodo indartsuez baliatu dira ikertzaileak uhinen ezaugarri matematikoak aztertzeke. Lehen zenbakizko simulazioak 60eko urteetan egin ziren, eta ordenagailuen bidezko simulazioez egindako lehen uhin-profil errealistikoak 90eko hamarkadan lortu dira.

Uhin detekzioari dagokionez, lehen saiakerak Joseph Weber-ek burutu zituen 60eko hamarkadan. Saiakera hauek eta handik egunera egin diren guztiak alferrekoak izan dira, baina egun lanean hasi diren detektagailu berriek hurrengo hamarkadan arrakasta izango dutelako ustea zabaldu da. Egun ia inork ez du kolokan jartzen uhinen existentzia; behaketa zuzenik egon ez bada ere, ebidentzia nabarmena badago. Hulse-k eta Taylor-ek PSR1913+16 pultsarrari behatuz, bere jokaera uhinen igorpenak sortutako energia-galerekin bat datorrela frogatu zuten, eta ekarpen honengatik Nobel saria eskuratu zuten 1993.ean.

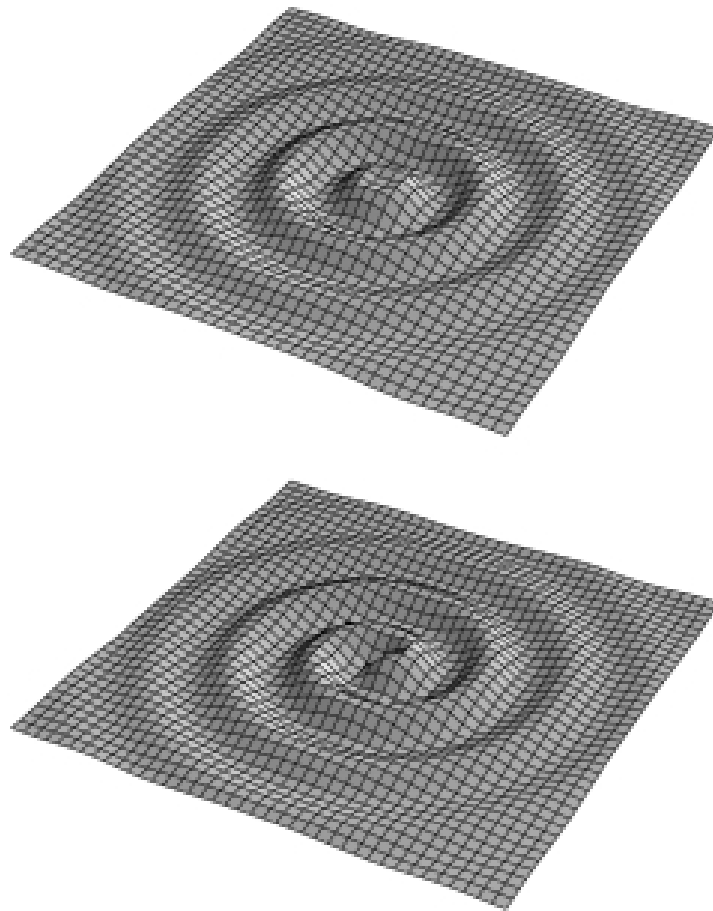
#### 4. GRABITAZIO-UHINEN IGORPENA

Elektrodinamika klasikoaren arabera, eremu elektromagnetikoaren aldaketa dipolarrek erradiazioa sortzen dute. Grabitazio-eremurako, ostera, egoera nolabait konplexuagoa da. Erlatibitate Orokorren teorema baten arabera, zulo beltz batek edo leku berean kokatutako eta masa bereko gorputz esferiko batek eremu berdina sortzen dute gorputzaren kanpoaldean; gainera, emaitza bera lortzen da gorputza esferikoki pultsatuz dagoen kasuan. Teorema honek grabitazio-eremurako Gaussen teoremaren antza du. Beraz, grabitazio-erradiazioa sortzen duten pultsaketa ez-esferikoa izan behar dute derrigorrean. Zehazkiago, grabitazio-erradiazioaren existentziarako eremuak aldaketa kuadrupolarrak izan behar ditu. Erlatibitate Orokorra teoria nabariki ez-lineala bada ere, grabitazio-erradiazioa sor dezaketen zenbait prozesu ezagutzen dira zehatz-mehatz.

Neutroi-izarretan dauden gailurtxoen ondorioz sortzen diren grabitazio-eremuen aldaketa kuadrupolarrak gai dira erradiazio detektagarria sortzeko. Gure galaxiaren izar-populazioaren %1 neutroi-izarrekoa denez eta haien biraketa-maiztasun tipikoa 300 Hz ingurukoa denez, baikortasunez begiratzen diote uhin hauen detekzioan aritzen direnek.

Grabitazio-uhinen hiru iturri mota daude. Lehenean alde batetik supernoben leherketak, eta bestetik izar arrunten, zulo beltzen edo neutroi-izarren sistema bitarrak ditugu. Azken iturri azpimota honetan sailkatutako sistemek energia erradiazio gisa galtzen dutenez, beraien orbiten periodoak txikitzen dira denboran zehar. Gertakari honi *koaleszentzia* deritzo. Hau da hain zuen ere Hulse-k eta Taylor-ek PSR1913+16 sisteman sumatu zuten efektua. Bigarren mota banda meheko iturriek osatzen dute, honen adibide biraka eta bakarrik dauden izar ez-axisimetrikoak, edo koaleszentziatik urrun dauden izar bitarrak ditugu. Sistema hauek uhinen igorpenaz energia galtzen dutelako ez dira guztiz periodikoak. Azken iturri mota hondo estokastikoak dira. Hauek hainbat zio dituzte: gure galaxiako iturri periodiko askoren efektu integratua, distantzia handietan kokatutako leherketa-iturriak, garai goiztiarretan gertatutako supernoba edo koaleszentzia-proze-





**3.irudia.** Uhin-iturriek espazio-denboran eragindako zimurduren adierapen grafikoa. Goiko irudia iturri axisimetriko bati dagokio, eta behekoa berriz, sistema bitar bati.

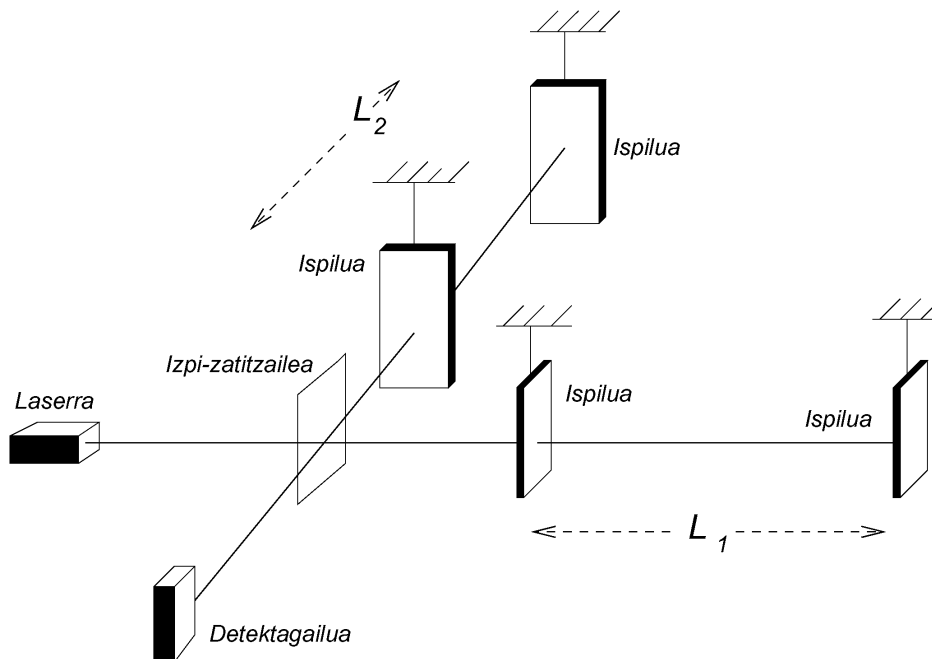
suak. Bereziki, espero da etorkizunean Big Bang delakoan sorturiko grabitazio-uhinak neurtzea ere. Big-Bang-en ondoren inflazio-garaia egon bazen, uhin horiek amplifikazioa jasan zuten eta haiek emandako informazioa inflazioaren paradigma balioesteko erabil liteke. Izatez, uhin hauek behatuak izanez gero, saiakuntza-banku modura jokatuko lukete partikula-azeleragailuek irispidean ez dituzten energia-mailetarako.

## 5. DETEKZIOA

Aipatu dugunez, uhinei behatzeko lehen saiakerak Joseph Weber-ek burutu zituen. Harek erabilitako tresnari erresonantzia bidezko detektagailua deritzo egun, eta ohikoena da tonaren inguruko masako aluminiozko zi-

lindro erraldoiez eginda egotea. Horrelako detektagailuak behatu nahi diren uhinen uhin-luzeraren neurrikoak izan behar dira. Itsas-indarrek zilindroan sortutako oszilazioak amplifikatu egiten dira eta, printzipioz, uhinei eta detektagailuaren zaratari dagozkien seinaleak bereiz daitezke. Erresonantzaileak uhinaren eragina gogoratzen du, zeren oszilatzen jarraitzen baitu uhina igaro eta azkoz geroago. Oro har horrelako tresnetan teknika kriogenikoak erabiltzen dira zarata termikoaren eragina txikitzeko. Ohiko erresonantzia bidezko detektagailuak kHz balioko maiztasuneko uhinak detektatzeko baliagarriak dira eta horregatik banda meheko detektagailu ere baderitze.

Beste detektagailu-aukera interferometroa da. Norabide perpendikularretan kokatutako masen arteko kokagune-aldaketa erlatiboak neurtzeko gaitasuna duen edozein interferometro erabil daiteke uhinak detektatzeko. Uhina igarotzean, detektagailuaren adarren luzera aldatuko da antifasez, eta ondorioz, tresnaren hargailura iristen den argiaren uhin-luzera ere aldatuko da.



4.irudia. Laser-interferometroaren eskema

Grabitazio-uhinen detekzioa jorratzen ari garela, Feynmann Nobel sari-dunari egozten zaion ondoko pasadizoa primeran datorkigu. Ikasle baten doktoretza-azterketan Feynmann haserre zegoen tesi-lana matematikoegia baitzen, eta ikasleari argi ikusgaiaren uhin-luzera balioesteko eskatu zion.

Galderak harritu zuen ikaslea eta honek ez zekiela erantzuten esan zion Feynmann-i. Honek galderari ekin zion eta besoak zabalduz zenbait luzera iradoki zizkion. Ikasleak, nahastuta zegoela, aipatutako uhin-luzera gutxi gorabehera aztertzailearen eskuen arteko distantzia zela esan zuen. Feynmann-ek sarkastikoki galdetu zion ikasleari ea nola zuen posible orduan bere sudurra ikustea. Uhin-en interferometroen bidezko detekzioaren kasuan antzeko zerbait gertatzen da. Grabitazio-uhinak detektatzeko, erabilitako interferometroen adarren luzera haien uhin-luzerekin konparagarriak izan behar dira. Honek esan nahi du 1 kHz-en inguruko maiztasuneko grabitazio-erradiazioa detektatu nahi balitz, 300 km-ko detektagailua beharko litzatekeela! Are gehiago, 1 Hz-en inguruko uhinak detektatzeko  $3 \cdot 10^5$  km-ko detektorea eraiki beharko genuke!

Uhin-detektagailu interferometrikoak erabiltzeko proiektu aipagarrienak LIGO eta VIRGO ditugu. Estatu Batuetakoa den LIGO proiektuaren barnean 4 eta 2 km-ko detektore pare bat eraiki da han. VIRGO proiektuak, zeina talde italiar eta frantsesen lankidetzak sustatzen duen, 3 km-ko detektorea eraiki du Italian. Detektagailu hauen ispiluetan islapen anitz inplementatu dira nahi den uhin-luzeraren dimentsioetara ailegatzeko. Ohiko islapen kopurua 100 ingurukoa da.



**5.irudia.** LIGO Livingston behategiaren airetiko ikuspegia (LIGO proiektuaren adeitasunez. Argazkilaria: Aero-Data Corp., Baton Rouge, Louisiana, USA)

Badira beste bi proiektu ere, Geo600 (Alemania/Erresuma Batua, 600 m) eta TAMA300 (Japoi, 300 m), dimentsio txikiagokoak baina teknologia finagokoak. Azkenik, ESA eta NASA elkarrekin lanean ari dira espazioan LISA detektore interferometrikoa eraikitzeko asmoz. Misiok hiru espaziontzi izango lituzke, haien artean  $5 \cdot 10^6$  km-ko aldea izanik. Distan-

tzia hori 300 mHz baino maiztasun handiagoko uhinen uhin-luzeraren erdia baino gehiago da. LISA martxan jarriko da 2010.ean eta  $10^{-4}$  Hz -1 Hz-eko bandan jardungo du.

## ESKERRAK

Raúl Pérez Sáez-i adierazpen grafikoekin laguntzeagatik eta LIGO proiektuko Bonnie Wascom-i argazkiez hornitzeagatik eskerrak eman nahi dizkiegu. Ruth Lazkoz-en lana Eusko Jaurlaritzak emandako BFI01.412 bekaren bitartez egin ahal izan da.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] S. HACYAN. *Relatividad para principiantes*. Colección la Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México, 2000. Erlatibitate Berezia eta Orokorrari buruzko dibulgazio-liburu ona. Askotariko irakurleentzat egokitua. Kontzeptu fisikoen teknizismo eta formula edo ekuazioak erabili gabeko azalpena.
- [2] S. HACYAN. *Los hoyos negros y la curvatura del espacio-tiempo*. Colección la Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México, 1998. Aurrekoaren antzeko beste dibulgazio-liburu on bat.
- [3] J. FLORES. *La gran ilusión III: las ondas gravitacionales*. Colección la Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México, 1997. Uhin kontzeptua eta Weber-en detekzio-esperimentuen dibulgazio mailako eztabaida.
- [4] J.L. SYNGE. *Hablando de la Relatividad*. Eunsa 1976. Erlatibitatearen kontzeptuen aurkezpen argi eta atsegina, ezohiko eskema eta tratamenduetan oinarritua.
- [5] B. Rusell. *ABC de la Relatividad*. Einstein-en teoriak oso era ulergarrian azalduta. Fisika edota Matematikako ezagupen sakontzik gabeko irakurleentzat.
- [6] P.C.W. DAVIES. *The search for gravity waves*. Cambridge University Press, 1980. Grabitazio-uhinen kontzeptuaren oso azalpen ona. Sorrera, hedapen eta detekzioari buruzko eztabaida uhin elektromagnetikoekiko antzekotasunaz baliatuz.
- [7] R. FEYMAN, R.B. LEIGHTON & M. SANDS. *Lectures on Physics, volume II: electromagnetism and matter*. Addison-Wesley, 1964. 42. kapituluan, gainontzeko kapituluaren independente, espazio-denboraren kurbaduraren ideiarene azalpen argi eta intuitiboa dago. Oso gomendagarria.
- [8] C. M. WILL. *The renaissance of General Relativity*. The New Physics. P.C.W. Davies (ed.). Cambridge University Press. Erlatibitate Orokorrari buruzko egungo ikerketei buruzko eztabaida kontzeptual landua, bereziki grabitazio-uhinei buruz.
- [9] B. F. SCHUTZ. *Gravitational Radiation*. *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics* delakorako prestatua. Interneten bada bertsio bat, gr-qc/0003069. Oinarriko printzipioen eztabaida erraza.

- [10] B. F. SCHUTZ. *Gravitational wave astronomy*. Class. Quantum Grav. 16, A131 (1999). Dagoeneko eraiki diren eta egitasmoak baino ez diren detektatze gailuek ezaugarrien eta uhinak detektatzeko ahalmenaren eztabaida.
- [11] B. F. SCHUTZ. *Lighthouses of gravitational wave astronomy*. *Lighthouses of the Universe* konferentziarako prestatua (Garching, 2001). Interneten bada bertsio bat, gr-qc/0111095. Aurreko erreferentziaren bertsio eguneratua, astronomo eta astrofisikoei zuzendua.
- [12] R. D'INVERNO. *Introducing Einstein's Relativity*. Clarendon Press, Oxford, 1992. Gaian sartzeko liburuetatik onenetarikoa. Aurrebetekizun matematikoen eztabaida egokia. 20. eta 21. kapituluetan uhin printzipioak eztabaidatzen dira, bereziki teoria linealizatua eta objektu isolatuek sortzen duten grabitazio-erradiazioak.
- [13] C. W. MISNER, K. S. THORNE & J. A. WHEELER. *Gravitation*. Freeman, 1973. Irakurle ausartentzat! Teoria linealizatua ezagutzen duten irakurleei uhin ez-linealei buruzko eztabaida oso interesgarri gertatuko zaie (35. kapitula, 960 orrialdea).