

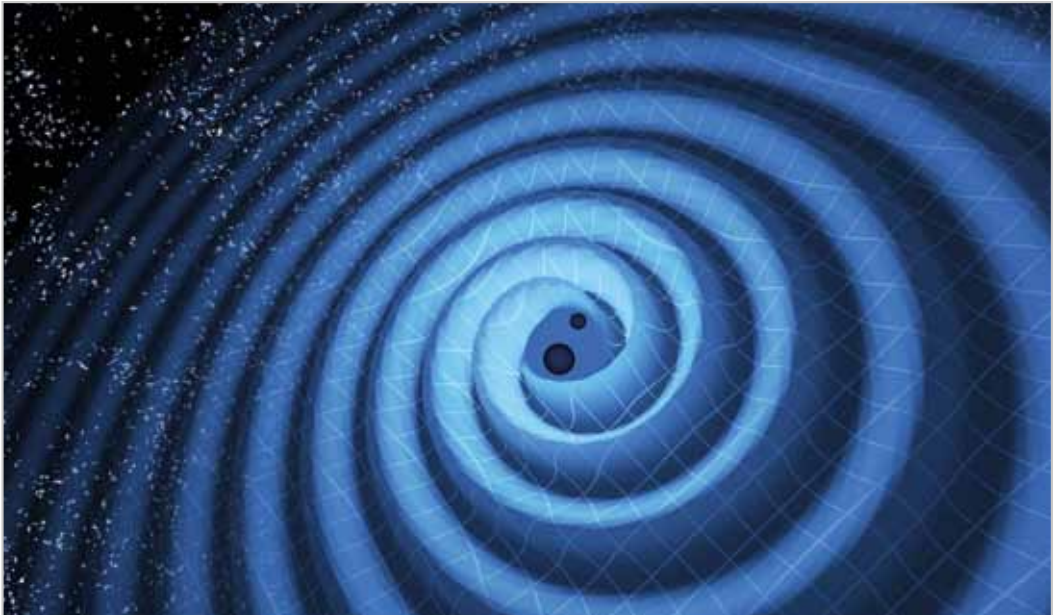
Unibertsoaren musikaren bila: uhin grabitazionalak

Duela 1.000 milioi urte inguru, Proterozoiko garai geologikoa amaitzen ari zen Lurrean. Bizitza konplexurik ez zen artean eratu, baina organismo sinpleak existitzen ziren, eta gure atmosfera oxigenoz betetzen ari zen; planeta, organismo konplexuagoetarako aproposa bihurtzen.

Bitartean, unibertsoaren beste muturrean, 30 km-ko erradioko bi zulo beltz ikaragarri zeuden, bata bestearen inguruan biraka; unibertsoan izan den gertakari bortitzenetariko bati bide emango zioten. Euren arteko distantzia 350 km inguru zen, eta abiadura erlatiboak, 100.000 km/s. Unetxo bat (0,2 segundo) baino ez zen falta biek talka egin eta zulo beltz bakarra osatzeko. Mugitzen ziren heinean, deformazio itzelak sortzen zituzten espazio-

denbora jarraituan. Prozesu horren lekuko izan ahalko bagina, neurturiko denbora-tarteak eta distantzia espazialak periodikoki murrizten eta hazten nabarituko genituzke, eremu grabitazionala zulo beltzen aldaketen arabera moldatzen den heinean. Horiek dira, hain zuzen, segundo gutxi batzuek biraka egon ondoren erraldoi horiek bidali zituzten uhin grabitazionalak. Orduantxe hasi zuen perturbazio horrek unibertsoan zeharreko bidaia.

Bien bitartean, gure atmosfera egonkortu eta lurrean organismo bizidun konplexuagoak sortzen hasi ziren. Horien artean, duela milioi bat urte baino gutxiago, gizakiak; zeinak pentsamendu abstraktuz dohaindurik, natura ulertzeko asmoarekin teoriak eraikitzen hasi baitziren. Grabitazioari dagokionez,



Bi zulo beltzen arteko talka. Orbita eliptikoak egiten dituzte euren masa-zentroaren inguruan. Bitartean, uhin grabitazionalak igortzen dituzte, eta energia galdu. Horrek eragiten du bata bestetik hurbilago egotea, azkenean biek talka egin eta zulo beltz bakarra osatu arte. ARG.: T. Pyle/LIGO.

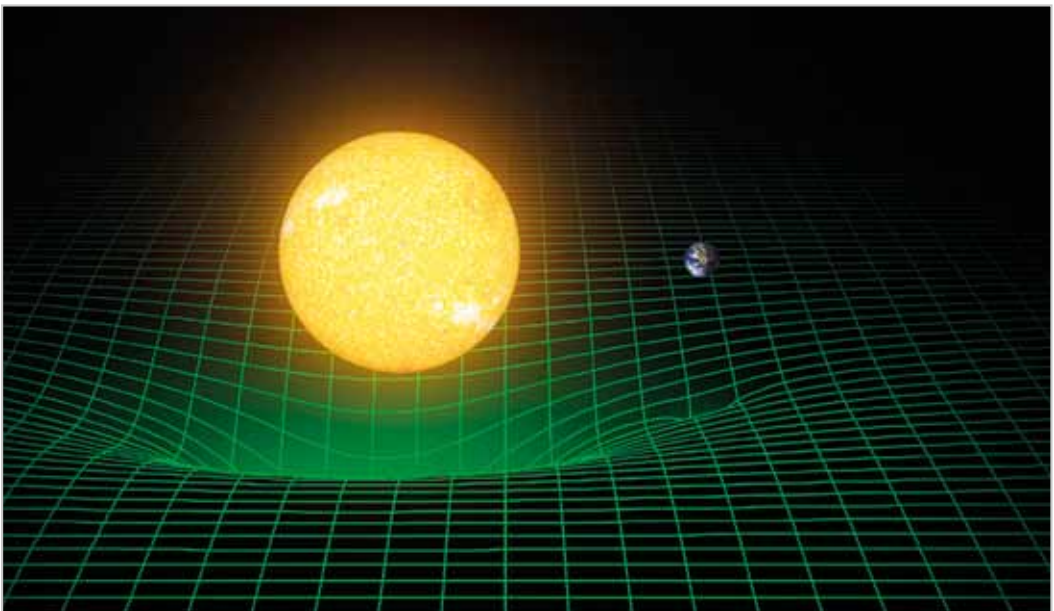
azkenengo mendean, asko ikasi dugu. Izatez, uhin grabitazionalen existentzia ez zen onartu 1950eko hamarkada arte. Baina orduko zientzialari gehienek pentsatzen zuten ezinezkoa izango zela haiek detektatzea, euren efektuak hain dira txikiak. Alabaina, historiak ez zuen luze joko zientzialari horiei arrazoia kentzeko.

Izan ere, 2015eko irailaren 14an, LIGOren (Ingelesez, Laser Interferometria bidezko Uhin Gravitazionalen Behatokiaren) bi detektagailuk seinale bat neurtu zuten: euren 4 km-ko besoak bibratzen ari ziren, luzatzen eta laburtzen. Luzera aldaketa hori zeharo txikia zen (protoi baten tamaina baino txikiagoa), baina LIGOrentzat garaturiko teknologiaz neurgarria. Seinalea aztertu ondoren, ondorioztatu zen bi zulo beltz haien arteko talkan osaturiko uhin grabitazionala detektatu zela. Bi zulo beltz haiek sorturiko seinalea, bidaia oso luze bat egin ondoren, azkenean, Lurrera iritsia zen, eta, izatez, izan gara, bai, haien talkaren lekuko.

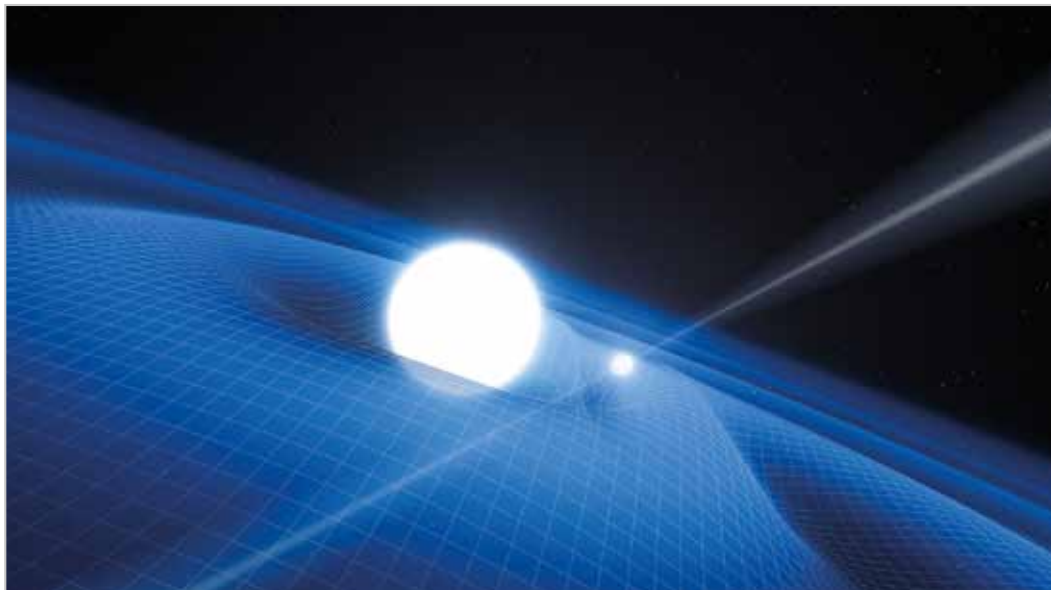
Erlatibitate orokorra

1915. urtean, interakzio grabitatorioa deskribatzeko teoria berria argitaratu zuen Albert Einsteinek: erlatibitate orokorra [1]. Ordura arte ezagutzen ziren efektuak ezin hobeto deskribatzen zituen. Baina, horrez gain, ezusteko hainbat ondorio ere bazeuzkan teoriak ezkutaturik. Besteak beste uhin grabitazionalak: espazio-denbora jarraituaren bi-brazioak.

Interakzio grabitatorioa deskribatzeko, erlatibitate orokorrak suposatzen du lau dimentsioko continuum batean bizi garela. Lau dimentsioetako hiru ohiko dimentsio espazialak dira (sakonera, zabalera eta altuera) eta laugarrena, berriz, denbora. Continuum hori deformatu egiten da, bertan energia edo masa jartzen dugunean. Erdigunean pisu bat jartzen diogunean sare elastiko bati gertatzen zaion moduan, pilota bat askatzen badugu sarearen gainean, erdian dagoen gorputzerantz eroriko da, higidura kurbatu bati jarraituz. Horixe bera da



Eguzkiak deformaturiko espazio-denboran zehar mugitzean, Lurrak orbita kurbatuak egiten ditu, lerro zuzenei jarraitu beharrean. ARG.: T. Pyle/Caltech/MIT/LIGO Lab.



Pulsar batek erradiazioa emititzen du bere polo magnetikoetatik. Irudian, beste izar baten inguruan biraka dabilen pulsar bat ageri da. Sistemak, uhin grabitazionalak bidaliz, energia galtzen du, eta izarren arteko distantzia murrizten doa. ARG.: ESO/L. Calçada.

planetei gertatzen zaiena Eguzkiak deformaturiko espazio-denboran higitzen direnean. Zuzen mugitu beharrean, orbita kurbatuak egiten dituzte. Beraz, interakzio grabitatorioa espazio-denbora jarraituaren deformazio gisa azaltzen du erlatibitate orokorrak.

Uhin grabitazionalak dagokienez, Einsteinek berak aurrean zituen, bere teoria argitaratu ondorengo urteetan [2-3], eta Oliver Heavisidek eta Henri Poincarék lehenago postulaturiko ideiare [4-5] formulazio matematiko zehatza eman zion. Karga elektriko azeleratuek uhin elektromagnetikoak (argia) igortzen zituzten moduan, masa azeleratuek ere uhin grabitazionalak igorri beharko lituzkete. Gorputzak mugitzen direnean, espazio-denbora jarraituan sortzen duten deformazioa aldatzen doa, eta aldaketa hori kontinuumean zehar transmititzen da, ontzi batek itsasoan higitzean sortzen dituen olatuen modura.

Baina uhin grabitazionalak ur edalontzi bat berotu al dezakete?

Hurrengo lau hamarkadetan, eztabaida zientifiko sakona izan zen, uhin horien existentziari buruz.

Hain zen konplexua erlatibitate orokorraren formalismo matematikoa, ezen oso zaila baitzen hartatik interpretazio fisiko argiak ondorioztatzea. Laburtuz, galdera honako hau zen: matematikoki teoriarik agertzen ziren uhin horiek fisikoak al ziren? Hots, energia garraiatzen al dute?

Einstein bera hainbatetan aldatu zen iritziz. 1936. urtean, uhin grabitazionalen existentzia ukatzen zuen frogapen matematikoa argitaratzen saiatu zen, haren kolaboratzailea zen Nathan Rosenekin batera. Artikulua ez zuten onartu *Physical Review* aldizkari ospetsuan; baina ondorioak aldatu eta beste aldizkari batean argitaratu zuten [6], orduan uhin-mota berezi bat aurkitu zutela ondorioztatuz (gaur egun, Einstein-Rosen uhin esaten zaie). Azkenik, 1950eko hamarkadan, uhin grabitazionalen existentziaren froga teoriko ukaezinak lortu zituzten hainbat fisikarrik [7-8].

Uhin horiek esperimentalki detektatzea zen hurrengo pausoa. Uhin energetikoenak sortzen dira gertaera astrofisiko bortitzak gertatzen direnean (objektu trinkoen talketan edo unibertsoaren hasieran), espazio-denboraren deformazioa oso handia

baita. Baina zehaztasun ikaragarria behar da uhin horiek Lurrera iristean sortzen dituzten deformazioak neurtzeko: Lurretik izar hurbilenera dagoen distantzia ile baten zabaleraren errorearekin neurtzearen parekoa. Hala ere, ondoko urteetan, bi esperimentu ezagunetan detektatu zituzten uhin horiek.

Hulse-Taylor pulsarra

Pulsar bat dentsitate oso handiko eta tamaina txikiko (10-100 km-ko erradioko) izar bat da, bere ardatzaren inguruan oso azkar biratzen dena (gehienez segundo gutxi batzuk behar ditu buelta oso bat emateko). Haren inguruko eremu magnetikoa oso handia denez, erradiazio elektromagnetikoa (argia) bidaltzen du. Erradiazio hori polo magnetikoetatik ateratzen da, eta horrek itsasargi itxura ematen die biraka eta kontrako norabidean ateratzen diren bi argi-izpi igortzen dituzten izar hauei.



Irudi hauetan, LIGOn uhin grabitazionalen bi detektagailuak ikus daitezke; 4 km-ko luzerako besoak dituzte. Bi kopia berdin eraiki ziren, bata Luisianan eta bestea Washingtonen, tokiko efektuek sor ditzaketen sasiseinaleak baztertzeko. ARG.: Caltech/MIT/LIGO Lab.

1974. urtean halako pulsar tipiko bat aztertzen ari ziren, Russel Hulse eta Joseph Taylor astronomoak. Segundoero 17 aldiz biratzen zuen bere ardatzaren inguruan —arrunta da hori horrelako izarren artean—, eta, beraz, 59 milisegundoko periodoa zuen (bi pultsoren arteko tartea). Pulsar horrek bazuen berezitasun bat: beste izar baten inguruan zebilela orbitan.

Horri behaturik, ondorioztatu zuten bi izarrek bere masa-zentroaren inguruko orbita eliptikoak egiten zituztela, baina, halaber, bien arteko distantzia murrizten ari zela. Hurbilpen hori gerta zedin, sistemak energia galtzen egon behar zuen, eta hori gertatzeko modu bakarra zen uhin grabitazionalak igortzen ari zela. Hipotesi hori probatu, eta egiaztatu zuten datu esperimentalak zehaztasun handiz zetozeela bat erlatibitate orokorrak auresandako energia-galerarekin [9]. Beraz, horixe jo daiteke uhin grabitazionalen lehenengo behaketatzat, eta horregatik jaso zuten Hulse eta Taylorrek 1993. urteko fisikako Nobel saria.

Interferometria bidezko neurketak

Baina Hulse eta Taylorren behaketa ez zen zuzeneko izan, zeharkakoa baizik. Hau da, uhin grabitazionalak beharrezkoak izan ziren sistema bitar horren dinamika azaltzeko, baina oraindik ez zegoen horiek detektatzeko gailurik.



1990eko hamarkadan, proposatu zen uhin grabitazionalak interferometria bidez neur zitezkeela, eta hainbat detektagailu eraiki ziren (LIGO Estatu Batuetan [10], VIRGO Italian [11] eta GEO-600 Alemanian [12]). Honetan oinarritu ziren guztiak: uhin grabitazionalak sortzen dituzten deformazio erlatiboak oso txikiak direnez, oso handia den zerbait deformatu beharko da. Horregatik, 3-4 km-ko bi beso perpendikularrez osaturik daude detekta-

gailuak. Horrez gain, laser bat erabiltzen da beso bakoitzaren luzera doitasun handiz neurtzeko. Laserra besoak elkartzan diren puntutik bidaltzen da, eta, beso bakoitzaren amaieran kokaturik dagoen ispilu batean islatu ondoren, jatorrira itzultzen da. Azkenik, beso bakoitzetik itzultzen diren laser-izpiak gainezartzen dira. Besoen luzerak aldatzen ez diren bitartean, izpien gainezarmena ez da aldatuko, baina luzera aldatzen denean, agerian geratuko da gainezarmenak sortzen duen profilea.

Horixe da teoria. Baina jardunean, arazo teknologiko asko ebatzi behar izan dira detektagailu horien sentikortasuna hobetu eta uhin grabitazionalak detektatzeko. Urte askoan lanean jardun ondoren, LIGO taldeak lortu zuen azkenik, 2015. urtean, uhin grabitazionalak neurtzeko sentikortasunera iristea eta lehenengo uhin grabitazionala zuzenean detektatzea [13]. Azken mendeko aurkikuntza zientifiko garrantzitsuenetariko bat izan da emaitza hori. Izaitez, 2017. urteko Fisikako Nobel saria Barry Barish, Kip Thorne eta Rainer Weiss zientzialariek jaso zuten, proiektu horren buru izateagatik.

Uhin grabitazionalen bidezko astronomia

Orain arte, uhin elektromagnetikoen (argi ikusgaiaren, izpi infragorrien, X izpien, irrati-uhinen...) bidez behatu dugu unibertsoa, baina gor geunden uhin grabitazionalak dagokienez. Halako uhinak gertatzen oso energetikoetan sortzen dira, hala nola zulo beltz edo izar trinkoen arteko talketan eta unibertsoaren hasieran. Gainera, materialen zehar higitzen dira, energia-galera oso baxuarekin, eta, horregatik, oso urrun sortutako uhinak, bidean izarrak eta galaxia osoak zeharkatu badituzte ere, euren jatorriko forma ia aldatu gabe dutela iristen dira guregana.

Espero dugu hurrengo hamarkadetan era sistematikoki detektatzea halako uhinak. Izan ere, haiek aztertuz, unibertsoaren prozesu bortitzenei buruzko informazio oso baliagarria lortu, eta espazio-dentzora jarraituaren oinarriko propietateak ikertu ahal izango ditugu. Sorpresarik ez da faltako, ziur. ●

Bibliografia

- [1] A. Einstein, *Feldgleichungen der Gravitation*, Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, 844 (1915).
- [2] A. Einstein, *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*, Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, 688 (1916).
- [3] A. Einstein, *Gravitationswellen*, Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, 154 (1918).
- [4] O. Heaviside, *A gravitational and electromagnetic analogy*, *The Electrician* 31, 281 (1893).
- [5] H. Poincaré, *Sur la dynamique de l'électron*, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 140, 1504 (1905).
- [6] A. Einstein eta N. Rosen, *On gravitational waves*, *Journal of the Franklin Institute* 223, 43 (1937).
- [7] F. A. E. Pirani, *On the physical significance of the Riemann tensor*, *Acta Physica Polonica* 15, 389 (1956).
- [8] H. Bondi, *Plane gravitational waves in general relativity*, *Nature* 179, 1072 (1957).
- [9] R. A. Hulse eta J. H. Taylor, *Discovery of a pulsar in a binary system*, *Astrophysical Journal* 195, 51 (1975).
- [10] <https://www.ligo.org/>
- [11] <http://www.virgo-gw.eu/>
- [12] <http://www.geo600.org/>
- [13] B. P. Abbott et al., *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*, *Physical Review Letters* 116, 061102 (2016).