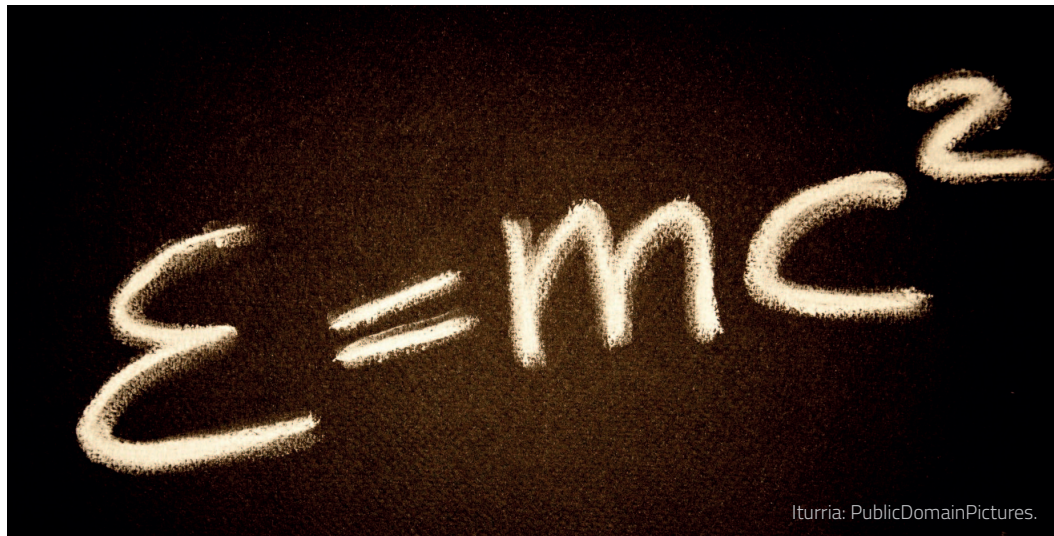


# Neutrinoak: antimateriaren sekretuak argitzen



Noiz eta nola sortu zen gure unibertsoa? Zergatik dago materiak beteta? Gizateriak betidanik hausnartutako galderak dira horiek. Eta, harrigarria badirudi ere, zientzia galdera horiei erantzuten hasi den unean bizi gara.

Horretarako, azken mendean, hainbat ideia teoriko ausart, esperimentu erraldoiak eta zortea behar izan dira. Azken urte hauetan, galdera horiei erantzunen bat aurkitzekotan, zientzialariak partikula iheskor bat ikertzen dabilta: neutrinoa.

## Leherketa Handi baten hautsa gara

Dauzkagun datuen arabera, gure unibertsoa leherketa handi batean hasi zen (Big Bang izenekoa), izugarrizko energiaz: trilioi bat bonba atomiko baino gehiagoren energia zentimetro kubiko bakoitzeko. Energia horrek guztiak gaur egun dagoen materia

sortu zuen, Einsteinen formula famatuak azaltzen duen bezala:  $E = mc^2$ . Formularen arabera, energia masa bihurtu daiteke. Edo, alderantziz, energia-kantitate izugarriak, masa sortu.

Teoria horrek, edonola ere, arazo handi bat dauka. XX. mendearen hasieran, zientzialariek partikula bixi batzuk aurkitu zituzten: materia arrunta ziruditen, baina materia arruntarekin topo egitean, elkar suntsitzen zuten argi-distira bat sortuz. Gauzaki horri *antimateria* deitu zitzaion, eta gehiago iker-tu ahala aurkitu zen partikula guztiek *antipartikula* bat zutela. Are gehiago, esperimentu guztietan, materiak eta antimateriak bereizezinak ziruditen: sistema baten partikula guztiak haien antipartikulekin trukatzeko baziren, sistemaren jokaera ez zen batere aldatzen.



Idatzi zuk zeuk  
Gai librean atalean

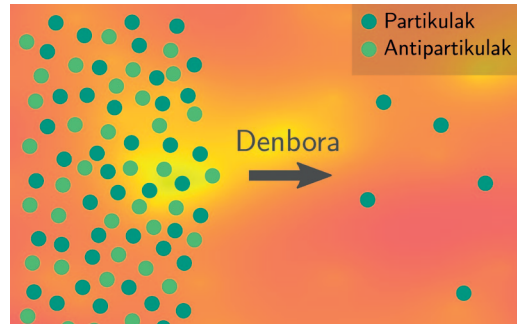
Gai librean aritzeko, bidali zure artikulua  
aldizkaria@elhuyar.eus helbidera.

Hortaz, partikulak eta antipartikulak bereizezinak badira, Big Bangean partikula eta antipartikula kopuru bera sortuko zen. Berehala elkar suntsitu, eta, gero, unibertsoa argiz beterik utziko zuten. Eta ez litzateke materiari geratuko galaxiak, izarrak, planetak eta gu osatzeko.

### Materia eta antimateriaren arteko ezberdintasunen bila

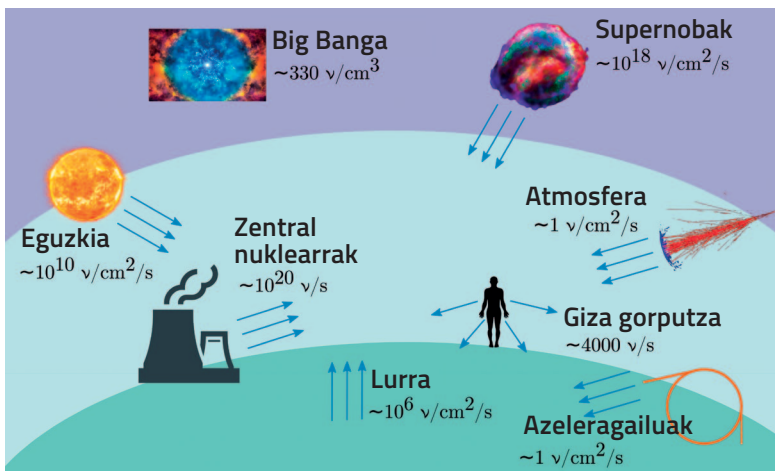
Paradoxa hori dela eta, XX. mendeko bigarren erdialdetik aurrera, zientzialari gehienek uste zuten materia eta antimateria ez direla berdin-berdinak. Ezberdintasun txikienak ere antipartikula baino partikula gehiago sortuko litzuzke Big Bangean, antipartikula guztiak partikulekin suntsituko liriteke, eta geratuko liritekeen partikulek gaur egungo unibertsoa osatuko lukete. Baina esperimenduek soilik sustraitzen dute zientzia. Zorionez, 1964. urtean, AEBko ikerketa-talde batek aurkitu zuen erreakzio nuklearretan sortutako partikula batzuk eta haien antipartikulak era ezberdinean desintegratzen direla. Hala ere, gehiago ikertu ahala esperimendu guztiek ondorio bera zuten: aurkitutako ezberdintasuna ahulegia zen gure unibertsoan dagoen partikula-kopuru handia azaltzeko.

Hori dela eta, gure unibertsoa ulertzeko ahaleginean, beste partikula batzuetan jarri zuen arreta



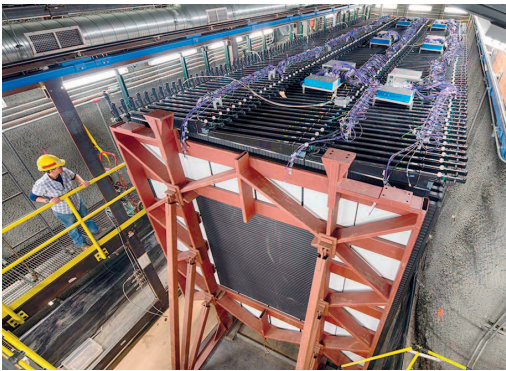
Big Banga eta materiaren jatorria. Big Bangean partikulak eta antipartikulak sortu ziren [ezkerra]. Haien arteko ezberdintasun txiki batek antipartikula baino partikula gehiago sortuko litzuzke. Denborak aurrera egin ahala [eskuina], antipartikulak partikulekin suntsituko liriteke, eta gure unibertsoa osatzen duten partikulak utzi.

zientziak: neutrinoetan, hain zuzen ere. Zientziak aurkitutako partikularik arinetarikoak eta iheskorrenak dira neutrinoak. Erreakzio nuklearretan ugari sortu arren, 25 urte pasa ziren teorikoki proposatu zirenetik esperimentaliki aurkitu ziren arte, haien elkarrekintzak ahulegiak baitira. Izan ere, segundo bakoitzeko Eguzkitik datozen ehun bilioi neutrinoek gure gorputza zeharkatzen badute ere, gure bizitzan batek bakarrik egingo du talka gurekin, batez beste. Horregatik, detektagailu handiak behar dira neutrinoak ikertzeko: zenbat eta materia gehiago egon detektagailuan, orduan eta probabilitate handiagoz eragingo diote elkarri neutrino batek eta materiak. Gaur egungo detektagailuak kontinentearteko hegazkinak baino handiagoak dira!



Neutrinoen iturriak, eta zentimetro karratu eta segundo bakoitzeko sortzen duten neutrino-kopurua. Unibertsoan, Big Bangean, supernobetan edota Eguzkian neutrino asko eta asko sortzen da. Izpi kosmiko batek atmosferarekin talka egitean ere neutrinoak sortzen dira. Lurrean, zentral nuklearretan edo giza gorputzean dauden elementu erradioaktiboek ere sortzen dituzte neutrinoak. Azkenik, partikula-azeleragailuetan neutrino-izpiak sor ditzakegu.

lheskorrak izan arren, sortzeko errazak dira neutrinoak. Eguzkira begiratu, eta bilioika neutrino jasoko dituzu. Zentral nuklear batera hurbildu, eta milioi bat aldiz gehiago neutrino iritsiko da zure detektagailura. Protoi-izpi batek material dentsu batekin talka egin, eta neutrino-izpi bat sortuko da.



*NOvA* neutrino-esperimentuaren detektagailua. Neutrinoek interakzio gutxi dutenez, detektagailuak erraldoiak dira neutrino baten talka egiteko probabilitatea handitzeko.

Partikula guztiek bezala, antipartikula bat dute neutrinoek: antineutrinoa. Eta, azken urteotan, neutrinoen eta antineutrinoen arteko ezberdintasunak agertzen hasi dira esperimentuetan.

### Neutrinoak: hiru *zaporen* istorioa

Ezberdintasun horiek ulertzeko, neutrinoen propietate garrantzitsu bat ulertu behar da: *zaporea*. Partikula-teorien eta -esperimentuen arabera, hiru neutrino-mota edo -*zapore* daude. Zapore bakoitza erreakzio ezberdin batean sortzen da, eta era ezberdineko elkarrekintzak ditu. Are gehiago, teorikoki neutrino batek ez du inoiz bere zaporea aldatzen.

Edo hori uste zuten zientzialariek. XX. mendearen amaieran, zenbait esperimentu erraldoi egin zen Eguzkitik eta izpi kosmikoetatik datozen neutrinoak detektatzeko. Neutrino horien zaporea oso ondo ulertzen da teorikoki, baina detektagailuetara neutrino batzuk beste zapore batekin iristen

ziren. Are gehiago, zenbat eta distantzia gehiago zeharkatu, orduan eta neutrino gehiagok aldatzen zuten beren zaporea. Gertakari horrek guztiz harriz zituen zientzialariak, eta eredu teorikoak aldatzera behartu zituen.

Esperimentu horien emaitzak azaltzeko, proposatu zen neutrinoek masa txiki bat zutela. Azalpenik sinpleena zen hori, eta masa ñimiño bat ere ( $10^{-37}$  kg, gutxi gorabehera: elektroi bat baino milioi bat aldiz gutxiagoa) nahikoa zen neutrinoen zapore-aldaketak ulertzeko. Proposamen hori ikertzen hastean, ondorio harrigarri batez konturatu ziren zientzialariak: neutrinoen masak zapore-aldaketak eragiten bazituen, posible litzateke neutrinoak eta antineutrinoak era ezberdinean aldatzea zaporez. Hau da, materiaren eta antimateriaren arteko ezberdintasunak ikertzeko aukera berri bat eskaintzen zuten neutrinoek.

### Antimateria ulertzen, neutrino-esperimentuekin

Neutrinoen zapore-aldaketei buruz gehiago jakin ahala, gero eta nabariagoa zen neutrinoek eta antineutrinoek era ezberdinean alda zezaketela zaporea. Eta horrek azaldu lezake zergatik dagoen gure unibertsoa materiaz beteta. Hori hobeto ulertzeko, bi esperimentutan ari dira datuak hartzen gaur egun: *NOvA*, *AEBn*; eta *T2K*, Japonian. Esperimentu horietan, protoi-izpi batek grafito zati batekin egiten du talka, hainbat partikula sortuz. Partikula horiek desintegratzean, neutrino- eta antineutrino-kopuru handia sortzen da. Are gehiago, protoiek grafitoaren aurka talka egitean sortutako partikulak eremu magnetikoen bidez kontrola daitezke, soilik neutrinoetara edo antineutrinoetara desintegrate daitezten.

Horrela, neutrino- edo antineutrino-izpiak sor daitezke. 500-800 bat kilometro zeharkatzen dituzte lur azpitik, eta detektagailu erraldoietan detektatzen dira. Esperimentu horietako emaitzak aztertu



*NOvA* esperimentuan neutrinoek zeharkatzen duten distantzia [ezkerra], Chicagotik Minnesotara. Eskuineko irudian, distantzia bera Europako mapa batean: neutrinoak Bergaratik irtengo balira, Compiègneraino (Parisetik 80 kilometrorra) iritsiko liriateke. Mapen iturria: Google Maps.

eta gero, jakin daiteke ea neutrinoek eta antineutrinoek era berean aldatzen duten zaporea ala ez.

Hala ere, esperimentu bakar bat ez da nahikoa behin betiko emaitzak lortzeko. Horretarako, esperimentu askoren datuak batu behar dira eredu teoriko bakarrean. Eta hori da nire tesiaren oinarria. Lehenik eta behin, *T2K* eta *NOvA* esperimentuen simulazioak garatu ditut, haien emaitzak esparru komun batean ulertu ahal izateko. Azken hamarkadetako beste neutrino-esperimentu batzuen emaitzekin bat egin eta gero, neutrinoen zapore-aldaketei buruz dakigun guztia kuantifika daiteke tresna estatistikoekin.

Analisi horren emaitza izan da neutrinoak eta antineutrinoak ezberdinak direla. Are gehiago, ezberdintasun hori nahiko handia da: 1964. urtean aurkitutakoa baino mila aldiz indartsuagoa! Hortaz, emaitza hori harrigarria zein zirraragarria da: baliteke neutrinoak Big Bangeko materia eta antimateriaren arteko ezberdintasunaren giltza izatea.

Hala ere, esperimentu horien emaitzak ulertzea ez da erraza. Detektagailura iritsi baino lehen, neutrinoek ehunka kilometro zeharkatzen dituzte. Gure teoriaren arabera, horrek ez luke emaitzetan eragin handirik izan behar. Baina neutrinoek teoriak ezez-

tatu zituzten jada orain dela 30 urte: nahitaezkoa da datuak aurreiritzi teorikorik gabe aztertzea. Eta, neutrinoek materiarekin elkarrekin arraroak badituzte, baliteke datuak beste modu batera interpretatu behar izatea.

Horixe izan da nire tesiaren bigarren zatia. Neutrinoek materiarekin izan ditzaketen elkarrekin aztertu ditut, baita beste esperimentu batzuek elkarrekin horiek baliogabetu ote dituzten ere. Are gehiago, elkarrekin berriek materiaren eta antimateriaren arteko ezberdintasunak ekar ditzakete. Hori ulertzea ere funtsezkoa da neutrinoen eta antineutrinoen arteko ezberdintasunak ulertzeko.

Horrela, eredu teoriko orokorragoetan aztertu ahal izan ditut esperimentuen datu guztiak. Horrek emaitza interesgarria izan du: badirudi esperimentuek oraindik aurkitu dutena izan dela neutrinoak eta antineutrinoak ezberdinak direla, eta ez beste elkarrekin batzuen ondorioa. Hori ondorioztatzeke, garrantzitsua izan da orain arte neutrinoekin hainbat esperimentu egin izatea, eta ezinbestekoa izango da etorkizunean.

Interesgarriki, Euskal Herrian egiten ari dira halako esperimentu batentzako oinarritzko osagai batzuk. Urte gutxi barru, Neutrinoien Espazio Iturri Europa-



rra (*ESS*, ingelesez) eraikiko da Suedian, Bilbo aldeko enpresa batzuen partaidetzaz. *ESS*-k neutroi-izpi bat sortuko du materialen zientzia ikertzeko. Baina neutroiak sortzeko prozesu berak hamaika neutrino sortuko du. Neutrino horiek ez dute beren zaporea aldatuko, eta ez dute balioko materia eta antimateriaren arteko ezberdintasuna aztertzeko. Hala ere, nire tesiaren atal batek frogatu duenez, neutrino horientzat detektagailu egokiak erabiliz, haien elkarrreraginak ederki miatu ditzakegu. Horri esker, hobeto ulertu ahal izango dira neutrinoen zapore-aldaketen esperimenduak, eta, horrenbestez, neutrinoen eta antineutrinoen arteko ezberdintasunak.

Eta hori ez da neutrinoen teknologiaren eta Euskal Herriaren arteko lotura bakarra. Neutrinoen ikerketa errealitatetik urrun dagoela dirudien arren, hala-ko partikulak behatzeko detektagailu zehatzak garatu dira. DIPCKo PETALO proiektuak detektagailu zehatz hauek medikuntza nuklearrean erabili nahi ditu. Neutrinoei buruzko ezagutza ere bada txertoa!

Horrenbestez, pixkanaka-pixkanaka gizakiak gero eta gehiago daki unibertsoaren hasieraz. Antimateriaren misterioa argitzen doa partikula-esperimenduak egin ahala. Azken urteotan, badirudi neutrinoak izan daitezkeela giltza, eta horretarako hainbat esperimendu eraikitzen ari da munduan zehar. Horietatik zer ikasiko dugun eta emaitzek zer galdera berri ekarriko dizkiguten... auskalo! ●

## Erreferentziak

- [1] A. D. Sakharov, "Violation of CP Invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe," *Sov. Phys. Usp.* 34 (1991) no.5, 392-393 doi:10.1070/PU1991v034n05ABEH002497.
- [2] J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch eta R. Turlay, "Evidence for the  $2\pi$  Decay of the  $K_2^0$  Meson," *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964), 138-140 doi:10.1103/PhysRevLett.13.138.
- [3] C. L. Cowan, F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse eta A. D. McGuire, "Detection of the free neutrino: A Confirmation," *Science* 124 (1956), 103-104 doi:10.1126/science.124.3212.103.
- [4] Q. R. Ahmad *et al.* [SNO], "Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory," *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002), 011301 doi:10.1103/PhysRevLett.89.011301.
- [5] Y. Fukuda *et al.* [Super-Kamiokande], "Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos," *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998), 1562-1567 doi:10.1103/PhysRevLett.81.1562.
- [6] D. S. Ayres *et al.* [NOvA], "NOvA: Proposal to Build a 30 Kiloton Off-Axis Detector to Study  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  Oscillations in the NuMI Beamline," arXiv:hep-ex/0503053 [hep-ex].
- [7] K. Abe *et al.* [T2K], "The T2K Experiment," *Nucl. Instrum. Meth. A* 659 (2011), 106-135 doi:10.1016/j.nima.2011.06.067.
- [8] K. Abe *et al.* [T2K], "Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations," *Nature* 580 (2020) no.7803, 339-344 [erratum: *Nature* 583 (2020) no.7814, E16] doi:10.1038/s41586-020-2177-0.
- [9] I. Esteban, M. C. Gonzalez-Garcia, A. Hernandez-Cabezudo, M. Maltoni eta T. Schwetz, "Global analysis of three-flavour neutrino oscillations: synergies and tensions in the determination of  $\theta_{23}$ ,  $\delta_{CP}$ , and the mass ordering," *JHEP* 01 (2019), 106 doi:10.1007/JHEP01(2019)106.
- [10] I. Esteban, M. C. Gonzalez-Garcia eta M. Maltoni, "On the Determination of Leptonic CP Violation and Neutrino Mass Ordering in Presence of Non-Standard Interactions: Present Status," *JHEP* 06 (2019), 055 doi:10.1007/JHEP06(2019)055.
- [11] D. Baxter *et al.* "Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering at the European Spallation Source," *JHEP* 02 (2020), 123 doi:10.1007/JHEP02(2020)123.
- [12] P. Ferrario, V. Herrero-Bosch, J. M. Benlloch-Rodríguez, C. Romo-Luque eta J. J. Gómez-Cadenas, "PETALO: Time-of-Flight PET with liquid xenon," doi:10.1109/NSSMIC.2018.8824744.