

Positroi igorpenaren bidezko tomografia

Ainhoa Urzelai & Jose Miguel Campillo*

Askotan, oinarritzko fisikari buruz hitz egiten dugunean, gai hori oso teorikoa dela eta eguneroko bizitzatik kanpo dagoela ematen du. Lan honetan aurreko hori ez dela egia ikusiko dugu.

Horretarako, medikuntzan ikerketa eta azterketarako erabiltzen den teknika nuklear bat azalduko dugu: Positroi Igorpenaren bidezko Tomografia (PIT), igelesez *Positron Emission Tomography* izenez ezaguna dena. Teknika hori 1953. urtean hasi zen garatzen medikuntzan, irudien bidez gorputzaren funtzionamendua ikusteko. Teknikaren oinarri fisikoa positroien fisikan datza eta horregatik, positroiaren fisika aztertzen hasiko gara, geroago teknikaren zehaztasunak argitzeko.

Zer da positroia?

Positroia elektroiaren antipartikula da. Antipartikula izanik, berari dagokion partikularen kontrako karga eta energia dauka. Horregatik, elektroiak definitziaz karga negatiboa duenez, positroiak karga positiboa dauka. Masari dagokionez, positroiak elektroiaren pausaguneko masa bera dauka. I. taulan laburbildu

ditugu elektroiaren eta positroiaren pausaguneko ezaugarriak.

Positroiaren aurkikuntza

Paul Adrien Maurice Dirac-ek (1902-1984) positroiaren aurkikuntza teorikoa egin zuen 1928. urtean. Garai hartan, Dirac elektroiaren ekuazio kuantiko erlatibista ikertzen ari zen eta emaitzen artean, energiaren baliorako bi ebazpen lortu zituen, bata positiboa eta bestea negatiboa; honako hauek, hain zuzen ere:

$$E = \pm \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$$

non m_0 eta p elektroiaren pausaguneko masa eta momentu lineala diren eta c argiaren abiadura. Hasiera batean, egindako kalkuluak berregin zituen, gaizki eginda zeudelako susmotan. Azkenean, ondo zeudela konturatu zen eta orduan zeinu positiboko soluzioa elektroiari esleitu zitzaion; alabaina, ez zegoen jakiterik zeinu negatibokoa zeri zegokion. Geroago

	Elektroia - e^-	Positroia - e^+
Karga (C)	- 1.60219x10 ⁻¹⁹	+ 1.60219x10 ⁻¹⁹
Energia (keV)	+ 511	- 511
Masa (g)	9.1095x10 ⁻²⁸	9.1095x10 ⁻²⁸
Spina	1/2	1/2

I. taula. Elektroia eta positroiaren pausaguneko ezaugarriak.

ohartu ziren zientzilariak ebazpen hori partikula berri batena zela eta partikula aurkitu berriari *positroi* izena eman zioten. Dirac-ek elektroia/positroi sistema azaltzeko garatu zuen teoriari *zuloen teoria* deritzo. Bi partikula hauen pausaguneko energia ezagutzeko aurreko ekuazioa erabili behar dugu eta I. taulan ikus ditzakegun balioak lortuko ditugu.

Lehen behaketa esperimentalak Carl David Anderson-ek (1905-1991) egin zuen 1932. urtean. Behaketa hori eremu magnetiko batean kokaturiko Wilson laino-ganbaran gertatu zen. Anderson-ek ganbara horren bidez izpi kosmikoen eta materiaren arteko elkarrekintza aztertu nahi izan zuen. Hala ere, positroiaren behaketa gertatu zenean, berak ez zituen Dirac-en lanak ezagutzen. Horregatik, aurkitu zuen partikula hori zer zen ez zuen jakin. 1939. urtera arte ez zen frogatu esperimentalki behaturiko partikula berriaren propietateak

Dirac-en teoriak aurrea-ten zituen berak ziren. Behin hori argituta, Anderson-ek *positroi* izena eman zion. Aurkikuntza hori zela eta, 1936. urtean Fisikako Nobel saria eskuratu zuen, behatutako lehen antipartikula positroia izan zelarik.

Bestalde, 1934. urtean Irene Curie-ek (1897-1956) eta bere senarrak, Jean Frédéric Joliot-ek (1900-1958), lehen positroia aurkitu zuten laborategiko baldintzetan. Bikoteak nukleo arinak α partikulez bonbardatu zituzten eta horren ostean β^+ desintegrazioa behatu zuten laginetan. Konkretuki Al, B eta Mg, α partikulekin talka egin ondoren, P, N eta Si elementu erradioaktibo artifizialak sortu zituzten. Modu horretan, erradio-aktibitate artifizialaren aurkikuntza egiteagatik, zientzilari hauek

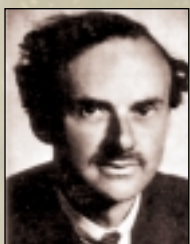
1935. urtean eskuratu zuten Kimikako Nobel saria.

Nola sortzen dira positroiak?

Gure Unibertsoa, ezaguna dugun zatitxo hau behintzat, batez ere materia osatuta dago. Beraz, positroiak antimateria izanik, ezin ditugu edozein tokitan topatu. Hori horrela izanik, nola ageri dira? Positroiak bi bide erabiliz sor daitezke; bata energia altuko erradiazioetik e^-/e^+ bikoteak sortuz eta bestea β^+ desintegrazioaren bidez. Gure azalpenetan aurrera egiteko, bi bide hauek aztertuko ditugu.

Lehenik aztertuko dugun positroi-iturria partikula/antipartikula bikoteen sorrera da. Bikote hauek energia handiko fotoi batetik sortzen dira. Horretarako, fotoiaren energiak gutxienez bikotearen pausaguneko energia

Positroiaren aurkikuntzak

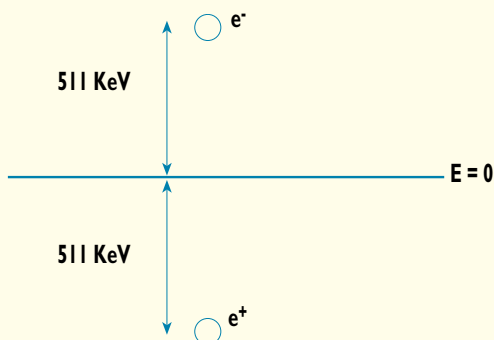


Paul Adrien Maurice Dirac-ek positroiaren aurkikuntza-teoria egin zuen 1928an.

Carl David Anderson izan zen, 1932an positroiaren lehen behaketa esperimentalak egin zuena. Berak ipini zion elektroia antipartikulari positroi izena.



1934. urtean Irene Curie eta bere senarrak, Jean Frédéric Joliot-ek lehen positroia aurkitu zuten laborategiko baldintzetan.



I. irudia. Positroi eta elektroia pausaguneko energi mailak.

baino handiagoa izan behar du. Baieztapen hau matematikoki ondoko formularen bidez adierazten da.

fotoiaren energia	partikula/antipartikula bikotearen pausaguneko energia
$\hbar\nu$	$\geq 2m_0c^2$

$$\hbar\nu \geq 2m_0c^2$$

non $\hbar$ Planck-en konstantea, ν fotoiaren maiztasuna, m_0 partikularen (antipartikularen) pausaguneko masa eta c argiaren abiadura diren.

Bigarren positroi-iturria β^+ desintegrazioan datza. PIT teknikan erabiltzen diren positroiak prozesu horren bidez sortzen dira, hain zuzen ere. β^+ desintegrazioa zer den ikusteko adibide bat erabiliko dugu. Demagun oxigeno atomoak dauzkagula. Oxigeno atomo baten nukleoak 8 protoi eta 10 neutroi dauzka (^{18}O). Dauzkagun atomoak protoiez (p^+) bonbardatzen baditugu, oxigeno baten nukleoak protoi bat har dezake. Hori gertatzen bada, atomoa beste elementu bat izango da, fluoroa hain zuzen, eta neutroi (n) bat askatuko du.



Fluoroaren isotopo honek 9 protoi eta 9 neutroi dauzka. Hala ere, fluoro atomo batek egonkorra izateko 10 neutroi izan behar ditu, hots, ^{19}F izan beha du. ^{18}F -ren nukleoak neutroi bat gutxiago duenez, ez da egonkorra. Orduan, egonkortasunera heltzeko, nukleoko protoi bat neutroi bilakatuko da eta prozesu horretan positroi bat eta neutri-no (ν) bat igorriko dira, ondoko formulari ikus dezakegun modura.



Honela, fluoro isotopoa oxigeno bilakatuko da berriro ere. Adibi-

de honetan protoiak erabili dira bonbardatzeko, baina beste partikula-mota batzuk ere erabil daitezke, α partikulak edo deuterioa, esate baterako.

Nola desagertzen dira?

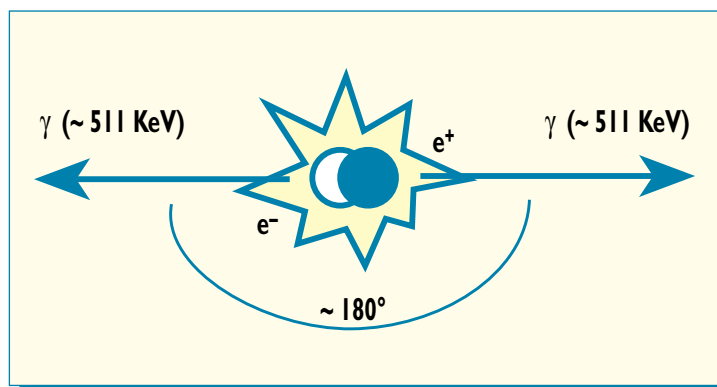
Positroiak β^+ desintegrazioaren bidez sortzen denean, energia zinetiko handia dauka (MeV-aren ingurukoa). Positroiarekin batera neutri-no bat ere sortzen da. Honek oso masa txikia du (masa edukitzekotan, gaur egun ez baita ezagutzen) eta ez du kargarik. Horregatik, neutri-no eta materiaren arteko elkarrekintza oso txikia da eta ez dugu kontuan hartuko.

Positroiak sortzen denean duen energia zinetikoa *termalizazio* deritzogun prozesua dela eta, galduz joaten da, geldirik geratu arte. Egiten duen batezbesteko ibilbidearen luzera, batez ere positroiak dagoeneko materialaren arabera da. Adibidez, uretan milimetro batzuetakoa da; pertso-nen gorputzaren pisuaren % 75 ura denez, positroi baten batezbesteko ibilbidearen luzera gorputzean ere milimetrokoa izaten da. Batezbesteko ibilbidearen luzeran eragina duen beste faktore bat erabiltzen den isotopoaren izaera da. ^{18}F isotopoaren kasuan, batezbesteko ibilbidea 1,2 mm da eta ^{82}Rb -ren kasuan 12,4 mm-koa. Termalizazioa jazo eta gero, positroiak deuseztapenerako prest

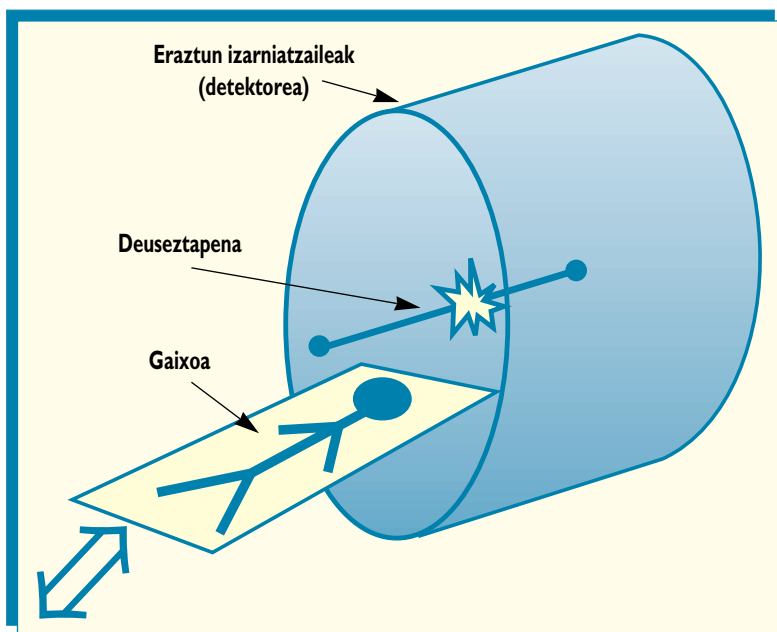
dago. Deuseztapena positroiak elektroiei batekin topo egiten duenean gertatzen da. Orduan, Dirac-en zuloen teoriak azaltzen duenez, elektroia positroiak dagoeneko energi mailaraino jaitzen da, sistemak masa moduan daukan energia guztia askatuz. Konkretuki, elektroia eta positroiaren deuseztapena gertatu eta gero, bi fotoi ageri dira energia guztia eramanez. Prozesu horretan energia zinetikoa ere kontserbatu egin behar da, beraz, bi fotoien energian aurreko bi kontribuzio hauek egongo dira. Hurbilpen gisa elektroia geldirik dagoela suposatzen badugu, fotoiak 511 keV-koak izango dira, hau da, gamma (γ) fotoiak izango dira.

Deuseztapenean, energia ezezik, momentu lineala ere kontserbatu egin behar da. Elektroia geldirik dagoela suposatuz segitzen badugu, deuseztapenaren ondoren sortzen diren bi fotoien sistemen momentu lineala ere nuloa izango da. Hori posible izateko, fotoiak norabide berean eta kontrako norantzan higituko dira (ikus 2. irudia).

Orain arte elektroia geldirik dagoela jo dugu, baina hau ez da guztiz egia. Deuseztapena gertatu baino lehen, elektroiak energia zinetikoa dauka eta horren eragina ondokoa da; fotoien ibilbideen arteko angelua zehazki 180° ez izatea eta haien energia 511 keV balio idealetik pixka bat urruntzea.



2. irudia. Positroi eta elektroien deuseztapena.



3. irudia. PIT teknikan erabiltzen den tomografo baten eskema.

Zertan erabiltzen da PITa?

Medikuntzan askotan jakin nahi izaten dugu gorputzaren barruan substantziak nora joaten diren, nola heltzen diren organuetara edo zenbat denbora behar duten heltzeko edo irteteko. Kasu askotan, ez da erraza izaten informazio hori lortzea. Hemen aztertzen ari garen PIT teknika hori guztia ezagutu ahal izateko garatu zen. Tomografia honen helburua gure gorputzaren barruan gertatzen diren prozesu kimikoak eta fisiologikoak nola dabilen ikustea da. Hau da, PIT erabiliz metabolismoa edota gorputzaren funtzio desberdin asko azter daitezke. Teknika hau medikuntzaren arlo askotan erabilia da, neurologian edo kardiologian, esaterako.

Zertan datza PITa?

Hasteko, gorputzean zehar jarraitu nahi dugun substantzia markatzen da; substantzia horri positroi-igorle diren isotopoak itsasten egiten da hori. PIT teknikan erabiltzen diren markatzaileak

gorputzean bertan dauden molekula dira. Horregatik, markatutako substantzien jokabide fisiko-kimikoa markatu gabekoena bezalakoa da.

Aztertu nahi dugun gorputz-atalaren eta funtzioaren arabera aukeratzen dira markatzaileak eta horietan jartzen den isotopo. Adibidez, ^{15}O isotopo (batezbesteko bizitza 2,2 minutu) ur-molekuletan itsasten bada, garuneko odol-garraioa ikusteko erabil daiteke, baina oxigeno molekuletan erabiliz gero, oxigenoaren erabilpena metabolismoan aztertu ahal izango dugu; modu berean, ^{18}F isotopo (batezbesteko bizitza 110 minutu) fluorodeoxiglukosari itsatsita erabiltzen da garuneko metabolismo erregionala ikusteko.

Markatutako substantzia gaixoa- ren barruan dagoenean, gaixoa eratzun izarniatzaile batzuen barruan sartzen da. Eratzun hau-

en betebeharra fotoiak detektatzea da. Fotoien ibilbideek 180° osatzen dutela suposatuko da. Beraz, bi fotoiak heltzen direneko lekuak eta hara heltzean eduki duten denbora-diferentzia aztertuz, elektroio/positroia deuseztapena non gertatu den jakin ahal izango dugu. Deuseztapena isotopo igorletik “hurbil” jazotzen denez, edukiko dugu isotopoaren kokapenari buruzko informazioa, 3. irudian ikus dezakegunez.

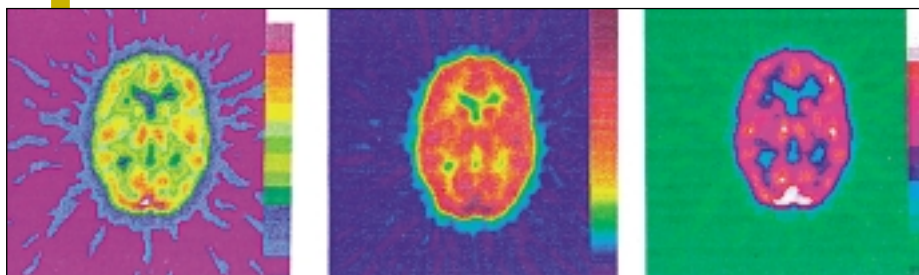
Isotopoa gorputzaren barnean mugitu ahala, fotoiak leku desberdinetan detektatuko dira eta, horri esker, interesatzen zaigun substantziaren higidura jarraitzea izango dugu, noraino heltzen den ikusiz.

Lortutako datuak modu egokian prozesatzen dira eta, azkenik, emaitzen interpretazioa egiten da, berariaz prestatutako softwarea erabiliz. 4. irudian ikus daiteke datuen manipulazioaren garrantzia. Aurreko irudian datu berak era desberdinetan manipulatu diren hiru irudiak lortzeko.

Abantailak eta arazoak

PIT teknikak badauka beste prozedura askok ez duten abantaila ugari. Gaixotasun gehienek gorputzari biokimikoki egiten diote eraso egiturak kaltetu baino lehen. Horregatik komeni da gorputzaren kimika aztertzea. PIT teknikak gorputzeko prozesu funtzionalen neurketa koantitatiboak *in vivo* egin ditzake. Honela, beste teknikak ematen duten

4. irudia. Buru baten sekzioa modu desberdinetan manipulatu.



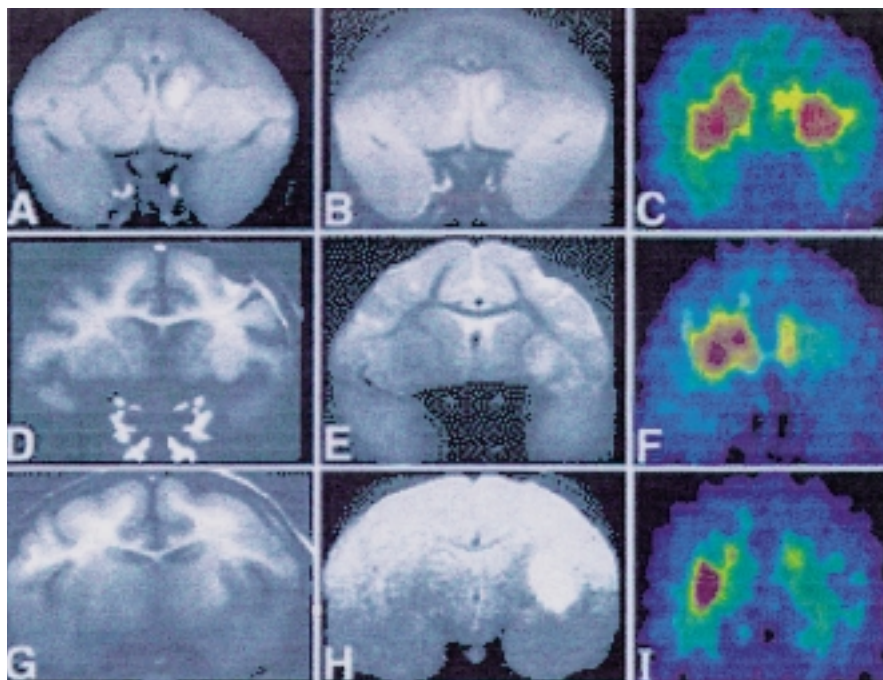


informazioa osa dezake. Adibidez, erresonantzia magnetikoak prezisio handiagoko irudiak eginen ditu eta batzuetan, PIT teknikaren irudiekin batera erabiltzen da (ikus 6. irudia)

Beste abantaila nagusi bat erabiltzen diren isotopoak gorputzean dauden elementuak erabiltzea da. Izan ere, gorputzarentzat arrarokak izan daitezkeen substantziak ez dira erabiltzen eta hori, noski, gure gorputzaren onerako. Horrez gain, teknikak duen sentikortasun handia dela eta, konposatu hauek oso kantitate txikiak erabiltzen dira (nanomolarra baino txikiagoa) eta, horren ondorioz, gaixoaren metabolismoa ez da aldatzen.

Bestalde, isotopoen batezbesteko bizitza laburra denez, ikerketa azkarra da eta gaixoak erradiazio-dosi txikiak jasotzen ditu. Erradiazio-dosi hori, izan ere, bularrean bi X izpizko plakak egitean jasan behar den dosiaren antzekoa izaten da.

Abantailekin batera, arazoak ere aipatu behar dira. Hauetariko bat prezisioa da. Lehen aipatu dugun bezala, fotoien ibilbideen arteko angelua ez da zehazki 180°. Horrek prezisioa murriztu egiten du, baina hala eta guztiz ere, errore sortzailerik handiena positroiak deuseztapena baino lehen egiten duen ibilbidea da. Teknikaren bidez badakigu deuseztapena non gertatzen den, baina isotopoa hortik milimetro batzuetara dago.



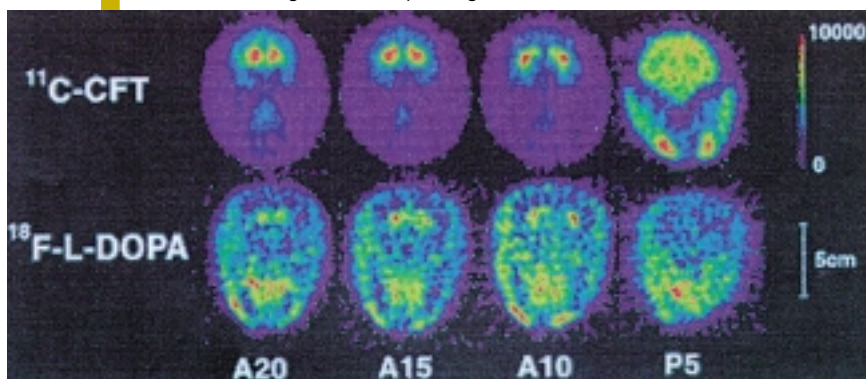
6. irudia. Lehen bi zutabeak erresonantzia magnetikoko irudiak dira. Hirugarren zutabea PIT teknikaren bidez lortutako irudiek osatzen dute. Argi ikusten da, beraz, teknika desberdinen prezisioa. Azken zutabeen marroiez ageri diren eskualdetan zauri bat ageri da.

Aipatuko dugun azken desabantailak ez du zientziarekin harreman zuzena, baina garrantzitsua izan daiteke. Arazo ekonomikoaz hitz egin behar da. Teknika hau, izan ere, oso garestia da, isotopoak ziklotroi baten bidez sortzen baitira. Ziklotroia ez da batere merkea eta, horregatik, PIT teknika ez dago oso hedatuta. Adibidez, Euskal Herrian ez da oraindik aplikatzen.

Bukatzeko, komeni da kontuan hartzea erradiazioa erabiltzen duten teknika guztiak arriskutsuak direla; PIT teknika, beraz, ez da salbuespena. Soilik behar-beharrezkoa denean erabili behar da.

* CAF-Elhuyar sarietan hirugarren saria.
Fisikariak eta UEUko Fisika Saileko kideak.

5. irudia. ^{11}C eta ^{18}F isotopoek konposatu desberdinetan ematen dituzten irudiak Parkinson gaixotasunak jotako gaixo baten buruan.



INFORMAZIO GEHIAGORAKO

<http://www.nucmed.buffalo.edu/pet.def.htm>
<http://www.nucmed.wthscsa.edu/williams/wmstoc.htm>
<http://www.desacc.com/images/pet/pet.html>
<http://www.icppet.org/AboutPET.html>
<http://www.topo.ucl.ac.be>
<http://laxmi.nuc.ucla.edu:8000/lpp>

Iñigo Alonso, "Oinarrizko partikulak", UEUko XXI. Udako Ikastaroetan emandako hitzaldia, 1993an Iruñean (argitaratu gabe)
 UEUko Fisika Saila, "Fisikaren historia laburra", Heda Saila 9, Udako Euskal Unibertsitatea, Iruñea, 1990.