

# OINARRIZKO PARTIKULEN EREDU STANDARRA, *SM*, KINKA LARRIAN OTE?

Fernando Plazaola

Zientzia eta Teknologia Fakultatea (UPV/EHU)

## LABURPENA

Duela 3 hilabete aurkeztutako *muoiaren g-2* esperimenduaren emaitzak oinarrizko partikulen eredu standarra, *SM*, kinka larrian utzi dute, balio esperimenteren eta teorikoen arteko desadostasuna, «anomalía»,  $5\sigma$  balioa hartu baitu. «Anomalía» baten balio horrek adierazi izaten du ereduak ez dela gai neurketa esperimenterak azaltzeko eta beraz, derrigorrez, ereduak aldatu behar dela. Hala eta guztiz ere, artikulu honen idazleak apustu egiten du *muoiaren g-2* esperimenduaren emaitzak ez duela *SM* ereduak hankaz gora jarriko.

## SARRERA

Duela urte pare bat kuadrillako lagun batek whatshap bat bidali zigun esanez *muoiaren g-2* esperimendu berria zela eta oinarrizko partikulen eredu estandarra kinka larrian zegoela. Whatshapean, youtubeko bideo bat atxikiturik zetorren. Kuadrilla honetan zientzia eta teknologiako hainbat eztabaida izaten ditugu eta ez da arraro bazkariak antolatzea eta bazkalostekoan gutariko batek gai zientifiko bati buruz aurkezpen bat ematea eta ostean eztabaidatzea. Bidalitako whatsapeko bideoa aztertu nuenean ohartu nintzen *g-2* «anomaliaz» ziharduela. Bi urte pasa dira eta uda honetan (2023ko udan) iragarritako emaitzek bultzatu naute lan hau idaztera.

Azken urte hauetan, lehen ez bezala, partikuletako fisikarien artean «anomalía» hitza asko erabiltzen da. Aurretik *Ororen/Guztiaren Teoria* («Theory of Everything», ToF) lortu nahia edo materia iluna sortzen duten partikulak zeintzuk diren ezagutzeko gogoak askoz arruntagoak ziren, orain berriz, esperimenteren «anomalietaz» ari dira. «Anomalíak» arakutzen egon naiz, zeren, hainbat egon dira. Bilatze lan horretan D. Gariston-en eta P. Cushman-en «anomalíei» buruzko lan oso interesgarriak topatu ditut [1, 2], eta beraiek idatzitako hainbat zati hona aldatuko ditut. Baina «anomaliaz» ari garenean, zerekiko anomalietaz ari dira? Oinarrizko Partikulen Eredu Estandarrak dioenarekiko, hain zuzen. Ingelesez «Standard Model of Particle Physics» edo «Standard Model of Elementary Particles» deritzo eta *SM* akronimoaz ezagutzen da. Hemendik aurrera *SM* akronimo hori erabiliko dugu Oinarrizko Partikulen Eredu Estandarra adierazteko.

*SM* ereduak unibertsoan ezagutzen diren lau oinarrizko indarretatik hiru deskribatzen dituen teoria da (indar elektromagnetikoa, indar nuklear ahula eta indar nuklear bortitza). *SM* ereduak grabitatea alde batera uzten du, eta ezagutzen diren oinarrizko partikula guztiak sailkatzen ditu ere (ikus 1 eranskina).

Eredu Estandarra teorikoki auto-bateragarria dela uste den arren, eta aurreikuspen esperimenterak azaltzean arrakasta itzelak erakutsi dituen arren, zenbait fenomeno azaldu gabe uzten ditu eta oinarrizko elkarrekintzen teoria osoa izateko txiki geratzen da. Izan ere, besteen artean, ez du barioien asimetria (materia eta antimateriaren arteko asimetria) erabat azaltzen, ez du erlatibitate orokorrak deskribatutako grabitazioaren teoria osoa barneratzen, ez eta Unibertsoaren hedapen esponentzialaren ondorioz proposatutako energia iluna, ez eta behaketa-kosmologikoetatik ondorioztatutako

materia ilunaren oinarrian egon daitezkeen partikularik ere. Gainera, ez ditu neutrino-oszilazioak eta haien masa ez-nuluak kontuan hartzen (ikus **1 KUTXA**).

Ondo gogoratzen dut aurreko milurtekoaren amaiera aldera fisikari teorikoen artean zegoen burrunba itzela *Ororen/Guztiaren Teoria* («Theory of Everything» ToE) heltzear zegoela ziotenean. Hau da, eredu simple baten bidez naturaren oinarritzko indar/elkarrekintza guztiak (grabitatea barne) bateratu edo azaldu ditzakeen teoria. Izan ere, JAKIN aldizkaritik eskatu ziguten milurteko berri honetarako artikulu bat idaztea fisikaren panoramari buruz, eta horrela egin genuen [3].

### **1 KUTXA**

*SM* ereduak ezin daitezke azken teoria izan!

Arazoak:

1. Indar grabitatorioa ez du kontuan hartzen
2. Hierarkiaren arazoa
3. Hiru indarrak ez ditu bateratzen (elektromagnetikoa, nuklear ahula, nuklear bortitza)
4. Materia iluna ez dago sartuta
5. Unibertsoaren barioien asimetria ez du azaltzen
6. Neutrinoen masak ez daude sartuta
7. Muoiaren momentu magnetiko «anomaloa»
8. PROPOSATURIKO KEZKA: Aurkitutako Higgs partikula ezin daitezke «*SM* barneko Higgs partikula» izan.

Iturria [4]

### **ANOMALIAK**

Sarreran adierazi bezala, fisikariak problema handien ebazpenaren atzetik zebiltzan: *Ororen/Guztiaren Teoria*-ren bila. Orain berriz ez! 2012an Higgs bosoiaren aurkikuntzaren ostean bereziki «anomalieta» ari dira. Hala ere, ohar zaitez irakurle, zenbait zientzialarik zalantzan jartzen duela 2012an aurkitu zen Higgs bosoiaren *SM* ereduarena denik (ikus **1 KUTXA**). Baina «anomalia» terminoak zer esan nahi du? «Anomalia» hitzak esan nahi du *SM*-ren iragarpen teorikoarekiko desadostasun esperimentala *estatistikoki* esanguratsua dela. *Muoiaren  $g-2$*  «anomalia» ez da *SM* ereduaren aurka egiten duen bakarra, *bottom quarkena*, *neutrinoena* eta *kaoiena* adibidez, beste «anomalia» batzuk dira. Azken urteetan, «anomalia» horiek garrantzi maila berria hartu dute *fisika berrirantz* bide posible gisa. Izan ere, *SM* ereduak azaldu ez dituen fenomenoak aterki bilakatu dira. Goian aipatu bezala, *Fisika berria* topatzeko bide nabarmenagoak daude, hala nola, *materia ilunaren* partikula bat aurkitzea edo grabitazioa fisika kuantikoarekin bateratzea. Baina problema handi horiek oso egoskorak dira, beraz, partikula-fisikari askok arazo txikiagoen inspirazioa bilatzen dute.

Topatu diren «anomalieta» ziurgabetasun sistematikoak murriztu arren, lortutako datuak aztertzerik eta esperimentu zehatzagoak egiteko moduak aurkitzerik behartzen ditu fisikari esperimentalak. Bitartean, fisikari teorikoek emaitza «anomaloiei» heldu behar diete, askotan partikula berriak dituzten ereduak eraikiz.

Orain arte, proposamen horietako bat ere ez da gauzatu. *Muoiaren  $g-2$*  bezalako esperimentuetatik datozen datu gehiagorekin «anomaliak» aurkikuntza bihurtzen ote diren zain daude ikertzaileak.

Azken hamarkadetan, *SM*-ren iragarpenekin gatazkan egon diren emaitza esperimental guztiak, «anomaliak», denborarekin bertan behera geratu dira. Datu gehiago jaso ahala, gero eta desoreka txikiagoa izan da *SM* ereduaren iragarpenekiko.

«Anomaliak» "*sigma* maila" edo "*sigma* balioa" dute ezaugarri eta balio hori  $\sigma$  desbideratze estandar unitateetan neurtzen da. Adibidez,  $3\sigma$  balioak adierazten du neurtutako emaitza 3 desbideratze estandar urruntzen dela teoriak ematen duen baliotik. *Muoiaren  $g-2$*  «anomaliaren» kasuan, neurketa esperimentala *SM* ereduaren iragarpenetik nabarmen aldentzen bada, aurrez ezagutu gabeko fisika berri baten presentzian egon gaitezke. *Sigma* balio altu batek fenomeno berrien existentzia probableagoa dela iradokitzen du.

Anomaliari «anomalia» deitu ahal izateko, hau da, desadostasuna esanguratsua bilakatzeko,  $3\sigma$  baliokoa izan behar du gutxienez. «Anomalia» gehienak ez dira inoiz  $5\sigma$  izatera iristen, aurkikuntza aldarrikatzeko beharrezkoa dena. Baina iristen denean ere, oraindik ez da txanpaina ateratzeko garaia. 2011n, OPERA esperimentukoek (tau-neutrinoak muoi-neutrinoen oszilazioetatik detektatzeko erabilitako instrumentua CERN eta Laboratori Nazionali del Gran Sasso LNGS laborategien arteko kolaborazioan erabilia) informatu zuten neutrinoak argiaren abiadura baino arinago mugitzen neurtu zituztela. Behaketa  $6\sigma$  baino esanguratsuagoa izan zen, baina —agian ez ustekabeen— akats esperimentala izan zen.

Urte batzuk geroago, CERNeke «Hadron Collider» handian bi lankidetzek jakinarazi zuten protoi-protoi talkek espero baino fotoi bikote gehiago sortu zituztela 750 GeV inguruko energiek. Emaitza horrek 750 GeV-eko masa duen partikula berri baten existentzia iradokitzen zuela zirudien. Teorikoek pentsatu zuten partikula hori supersimetriaren ebidentzia izan zitekeela (fisika berriaren teoria matematikoki dotorea); fisikari askok denbora luzez egia izatea espero zutena. Zirrara horrek «anomalia» horri buruz 500 artikulua baino gehiago argitaratzea ekarri zuen. Baina, azkenean, aukera hura ere desagertu egin zen. Ez zen akats esperimentalik gertatu, baina  $3,5\sigma$  emaitza desagertu egin zen. Izan ere, datu gehiago hartzeak erakutsi zuen, fluktuazio estatistikoa baino ez zela.

### **Muoiaren $g-2$ esperimentua**

Duela hogeita bi urte, 2001ean, BNL-n (Brookhaven National Laboratory) *muoiaren  $g-2$*  esperimentuak muoiaren momentu magnetiko «anomaloaren» balio bat neurtu zuen (ikus **2 KUTXA**), milioi bakoitzeko hainbat zatitan ados ez zegoena *SM* ereduaren oinarritutako kalkuluekin [5]. Izan ere, *muoiaren  $g-2$*  esperimentuak bi balio oso zehatzen arteko desadostasun neurgarri bat eman zuen: *kalkulu teoriko mekaniko-kuantiko oso zehatzen* eta *oinarrizko konstante baten neurketa oso zehatzaren* artekoa;  $2.7\sigma$  balioko desadostasuna, hain zuzen.

Goian aipatu bezala, fisikariak denbora luzez ulertu dute *SM* eredu osatu gabe dagoela (ikus **1 KUTXA**), baina XXI. mendearen hasieran instalazio garrantzitsuetatik jasotzen zen albiste bakarra, elektroien eta positroien LHC Kolisionatzaile Handitik hasi eta FNAL

Fermilab-eko Tevatroitik (2011an itxi zen) jarraituz, *SM* ereduak ondo funtzionatzen zuela zen. Beraz,  $2.7\sigma$  balioko desadostasuna zirrargarria zen.

BNL-ko azeleragailua 2001ean gelditu zen eta berarekin batera bertan egiten ziren esperimentuen datu-bilketa. Ziurgabetasun estatistikoa  $2.7\sigma$  baliotik  $5\sigma$  balioraino igotzeko (desadostasuna fisika berri posiblerako bidea eman dezakeena) intentsitate handiagoko muoi sorta bat beharko litzateke, eta ziurgabetasun sistematikoa murrizteak hobekuntza handiak eskatuko lituzke ingeniartzan. Hori lortzeko partikulen fisikariak zerua eta lurra —eta baita magneto erraldoiak ere— mugitzeko prest zeuden (ikus 1. irudia). 2013an, ikertzaileek saskibaloi-kantxa baten zabalerako magneto zirkularra bildu zuten eta New Yorketik Bataviara (Illinois) eramanez, 5000 Km-ko baino bidaia luzeagoa egin zuten [6]. Gaur egun magneto bera da FNAL-ean, Illinoiseko Batavian kokatutako *muoien g-2* esperimentu berriaren elementu nagusia. FNAL Fermilab-ean muoiaren momentu magnetiko «anomaloa» askoz zehatzago neurtu dute, 4 faktore batez zehatzago, eta honek aukera emango du jakiteko BNL-eko emaitzek *SM*-tik at iradoki zuten fisika berria benetakoa den jakiteko. Izan ere, *muoien g-2* desadostasuna partikulen fisikan dagoen «anomalia» zaharrena ez bada, zaharrenetarikoa da.

Aipatuenez, «anomaliak» aurreikuspen teorikoen eta/edo neurketa esperimentalen arteko desadostasunak dira. Muoiaren momentu magnetikoaren balio esperimentalak funtsean ez da aldatu 2001 urtetik. Baina muoiaren elkarrekintza magnetikoen kalkulu teorikoak hobetu diren heinean «anomaliak» indarra hartu du. Izan ere, 2020ean BNL-eko esperimentuaren emaitzarekiko  $3,7\sigma$ -ra iristen ziren [7].

Argi zegoen dilemaren alde esperimentalak berriro aztertzeko unea iritsi zela.



1. irudia. *Muoien g-2* «anomalia» ikertzeko biltegitratze-eraztun erraldoian instalatzeko, BNL-tik Bataviara (Illinois) garraiatutako magneto erraldoia 2013ko udan.

### Zertan datzan *muoien g-2* anomalia?

Elektroiek (muoiek, protoiek, neutroiek eta beste hainbat partikulek bezala) momentu magnetiko intrintseko bat dute. Izan ere, momentu magnetiko horrek elektroia eremu

magnetiko baten aurrean nola erantzuten duen adierazten du, elektroien kargak eremu elektriko baten aurrean nola erantzuten duen neurtzen duen bezalaxe.

Fisika klasikoaren kasuan, bere ardatzaren inguruan biraka dagoen gorputz kargatuak duen momentu angeluarra, sortzen den momentu magnetikoaren proportzionala da (ikus 2 KUTXA). Biraketa gero eta arinagoa bada, handiagoa izango da momentu magnetikoa. Gorputzaren momentu magnetikoaren eta momentu angeluarraren arteko arrazoiari gorputzaren  $g$ -faktorea deitzen zaio ( $g$  hizkia giromagnetiko hitzaren ordeztatzen da). Objektu klasikoetarako  $g = 1$  da.

Fisikariak harrituta geratu ziren elektroiekin egindako esperimentuek  $g = 2$  ematen zutelako (ikus 2 KUTXA). Misterio hori distira zorrotz batekin Dirac-ek azaldu zuen. Baina gauzak ez ziren hor amaitu, teknika esperimentalak hobetu ahala, elektroien  $g$  2 baino apurtxo bat gehiago zela neurtu zen. 2008-an fisikari esperimentalek neurtu zuten elektroien honako  $g$ -faktorea:

$$g_e^{EXP} = 2.0023193043617(15) \quad (1a)$$

Aldera dezagun balio esperimental hori aurrean edo predikzio teorikoarekin:

$$g_e^{teorikoa} = 2.00231930436256(35) \quad (1b)$$

Desadostasuna  $g_e$ -faktorearen balioetan gorri adierazitako zenbakietan hasten da, edo adierazpen honek agertzen duen bezala, balio esperimentalak eta teorikoak bat egiten dute 12. hamarrekora arte, *SINESKAITZA!!!* Fisikaren historian topatu den balio fisiko baten egiaztapen zehatzena da!!

Balio horiek, 2 KUTXako adierazpenak kontuan hartuz honela adieraz ditzakegu ere:

$$\frac{\mu_e^{teorikoa}}{\mu_e^{EXP}} = \frac{g_e^{teorikoa}}{g_e^{EXP}} = \frac{2.00231930436256(35)}{2.0023193043617(15)} = 1,00000000000043. \quad (2)$$

non ageriago ageri den balio teoriko eta esperimentalen arteko bat egitea 12 hamarrekora heltzen dela.

$g_e$ -faktorea, apurtxo bat bada ere, zergatik 2 baino handiagoa da? Elektrodinamika Kuantikoaren (QED) arabera, bigarren kuantizazioaren ondorioz ikuspegi klasikotik ezezagunak diren fenomeno berriak sor daitezkelako. Horien artean, *hutsaren polarizazio*arena. Hau da, kanpo eremu elektriko eta/edo magnetiko oso bortitzetan partikula-antipartikula bikoteak, birtualak deituak, hutsean sor daitezkeela aurrean du, Heisenberg-en ziurgabetasun printzipioa urratu gabe, edo hobe Heisenberg-en ziurgabetasun printzipioa oinarri dutela. Baina sorturiko partikula-antipartikula horiek ezin dezakete bakoitza bere aldetik bidaiatu; denbora tarte labur batean (Heisenberg-en ziurgabetasun printzipioaren arabera) berriro partikula-antipartikula birtual horiek bat eginik desagertu behar dute, 2. irudian erakusten den bezala. Horrek esan nahi du hutsa, etengabe sortzen eta desagertzen diren partikula birtualez beterik dagoela. Are gehiago, partikula horiek elektroiekin, edo muoi batekin, edo beste edozein partikula batekin, interakziona dezakete. Ondorioz, eremu magnetiko baten barneko elektroien edo muoiaren erantzuna alda dezakete eta beraz, partikularen momentu magnetikoa eta  $g$ -faktorea aldatuko dira. Teorikoek, itxaron daitekeen partikularen  $g$ -faktorea kalkula dezakete, kontuan hartuz SM ereduaren barnean

existitzen diren oinarritzko partikulak. Hori da (1b) adierazpenean ageri den balioa lortzeko erabili den prozedura.

## 2 KUTXA

$g$ -faktorea ( $g$ -balioa edo dimentsio gabeko momentu magnetikoa ere deitua) atomo baten, nukleo baten edo orokorrean partikula baten  $\mu$  momentu magnetikoa eta bere momentu angeluarra lotzen dituen dimentsiorik gabeko balioa da.

Kasu klasikoa hartzen badugu, bere simetria ardatzaren inguruan biraka dabilen  $q$  karga duen gorputzaren kasurako, karga eta masa era uniformean banatuta egonez gero, bere momentu magnetikoa ( $\mu$ ) eta momentu angeluarra ( $L$ ) honako harreman honetaz lotuta daude:

$$\mu = \frac{q}{2m} L = g \frac{q}{2m} L, \text{ non } g=1 \text{ den.}$$

Mekanika kuantikoaren ereduari jarraituz ere,  $g$ -faktorea konstantea eta dimentsio gabekoa da, partikulan behaturiko  $\mu$  momentu magnetikoa eta berari dagokion momentu angeluarraren zenbaki kuantikoaren artekoa (faktorea dimentsio gabekoa izan dadin momentu magnetikoaren unitatea sartzen da, hots, Bohr magnetoiia).

Barne egiturarik ez duen spin  $\frac{1}{2}$  balioko eta kargaturiko partikularen spinaren  $\mu$  momentu magnetikoa (Diracen partikula) da,

$$\mu = g \frac{e}{2m} S$$

, non  $g$  partikularen  $g$ -faktorea,  $e$  partikularen oinarritzko karga,  $m$  partikularen masa eta  $S$  partikularen spinaren momentu angeluarra diren (azken hori  $\hbar/2$  baliokoa Diracen partikuletarako, non  $\hbar = h/2\pi$  den eta  $h$  Plancken konstantea).

$S_\mu$  spineko muoiari dagokion  $g_\mu$ -faktorea honako hau da:

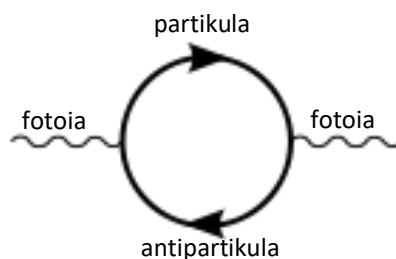
$$\mu_\mu = g_\mu \frac{e}{2m_\mu} S_\mu$$

, non  $\mu_\mu$  muoiaren spinaren momentu magnetikoa,  $g_\mu$  muoiaren  $g$ -faktorea,  $e$  muoiaren karga,  $m_\mu$  muoiaren masa eta  $S_\mu$  muoiaren spinaren momentu angeluarra diren.

*Hutsaren polarizazioa* gertatu ahal izateko, hau da partikula-antipartikula birtualak sortzeko, kanpo eremuak oso-oso bortitza izan behar du. Eremu elektrikoaren balioa  $10^{18}$  V/m ingurukoa eta/edo eremu magnetikoaren kasuan  $10^9$ T ingurukoa. Balio horien handitasunaz jabetzeko erakuts ditzagun gure planetan gizakiak lortu dituen balio handienak. 2022ko abenduaren 5ean NIF-ean lorturiko laserren bidezko fusio-ignizioan erabili ziren laserren ezaugarriak honako hauek ziren: energia = 2,05 MJ, sortaren sekzioa = 40 cm<sup>2</sup> eta iraupena = 4 ns. Beraz, kalkulu txiki batzuk eginez eremu elektrikoak  $10^{10}$  V/m ingurukoa zela ondoriozta dezakegu. Bestalde, 2022an ere, baina abuztuaren 15ean Txinako "Steady High Magnetic Field Facility"-n 45,22 T lortu ziren. Beraz, agerian geratzen da partikula birtualak sortu ahal izateko eremuak oso-oso bortitzak direla, maila makroskopikoan lortu ezinak. Baina, eskolan egiten dugun bezala, elektroio puntualari eremu elektrikoak kalkulatzeko Coulomben legea aplikatzen badiogu ohartuko gara elektroien kokapenetik 40 femtometro ingurura ( $40 \times 10^{-15}$  m) eremu elektrikoak balio bortitz horren ingurukoa dela. Beraz, distantzia horietara partikula-antipartikula birtualen sorrera posible da. Partikula-antipartikula bikote birtuala sortzeko biderik errazena, probableena, elektroio-positroi bikote birtuala sortzea da, partikula arinenak baitira. Halaber, ezagutzen ditugun partikula guztien birtualak (partikula-antipartikula bikote guztiak) sor daitezke, probabilitate txikiagoekin bada ere.

Muoia elektroien lehengusu pisutsua da. Biek propietate kuantiko berak dituzte, hala nola, besteen artean, karga elektrikoak eta spina. Biak leptoiak dira, baina muoia

elektroia baino 207 aldiz pisutsuagoa. Honek, muoiak egonkorak ez izatea egiten du, betiko ez bizitzea. Izan ere,  $2,2 \mu s$  baino ez dira bizi (zuzenagoa da idaztea hori dela muoiaren semidesintegrazio-periodoa, hemendik aurrera errazte arren erdibizitza deituko duguna) eta partikula arinagoetan desintegratzen da. Honexegatik ez dute molekula osatzen, ez eta mendiak edo materia makroskopikoa ere.



2. irudia. Partikula-antipartikula bikote birtual baten begizta-diagrama, hutsaren polarizazioa adierazten duena.

Muoiak aurkituak izan zirenean inork ez zituen espero. Erradiazio kosmikoa aztertzen *Carl David Anderson* eta *Seth Neddermeyer* zientzilariek 1936ean aurkitu zituzten. Izan ere, *Openheimerren* lagunak, *Isidor Isaac Rabi* fisikariak (Openheimer filmean hainbatetan ageri denak), 1944eko Nobel saridunak esan zuen: "*Nor eskatu du partikula hau?*" (Who ever ordered that?). Muoiaren  $g-2$  esperimentuaren ondorioa da muoia, oraindik ere, barrabasadak egiten diharduela.

Muoia eta elektroia hain antzekoak izanik, honako hau galde diezaiokegu geure buruari: elektroien momentu magnetikoaren kalkulu teorikoa eta neurketa esperimentala *doitasun hain handiz bat egiten dutenez*, nola liteke,  $g-2$  esperimentuak erakusten duen bezala, muoiaren kasuan hain berdinak ez izatea? Muoiaren kasuan ere elektroiarekin erabilitako metodologia berari jarraitu diote (jarraitzen ari dira) kalkulu teorikoak egiteko, baina muoiaren momentu magnetikoaren emaitza teorikoa eta esperimentala ez datoz bat zehaztasun berarekin (azken kasu honetan, (4) adierazpenaren arabera, 8 hamarrekora mugatzen da).

Muoiaren kasurako kalkulu teorikoek balio esperimentalekin bat ez datozela ziurtatzen bada, *SM* ereduan zerbait falta daitekeela adieraz dezake. Hau da, *SM* ereduaren barnean egun existitzen diren partikulez edo indarrez/interakzioez gaindi zerbait gehiago egon beharko litzatekela. Horrek esan nahi du, elektroien kasuan gertatzen ez den bezala, muoiek hutsa polarizatzen dutenean *SM* ereduan barne ez dagoen beste partikularen bat parte hartzen duela.

Gainera, emaitza biren (teorikoaren eta esperimentalaren) arteko alderaketari erreparatuz desadostasuna handitzen ari dela esan dezakegu. Izan ere, 2001ean BNL-n egindako esperimentuen arabera desadostasuna  $2.7\sigma$  baliokoa zen. Ostean, teorikoek kalkuluaren zehaztasuna hobetzen jarraitu dute, eta horrek, aipatu bezala, desorekaren garrantzia  $3,7\sigma$ -raino handitu zuen 2020an [7]. Orain berriz, FNAL Fermilab-ean, BNL-ko magnetoak erabiliz egindako azeleragailu berriaren lehen esperimentuek diote desadostasuna  $4.2\sigma$  baliora (ikus 4. irudia) igo dela [8].

Muoia etengabe elkarrekiten ari da etengabe agertzen eta desagertzen diren partikula birtualekin (elektroien kasuan ere gauza bera gertatzen da). Partikula birtual horien agerpen eta desagerpen jarraituen probabilitate mekaniko-kuantikoak zehaztasun

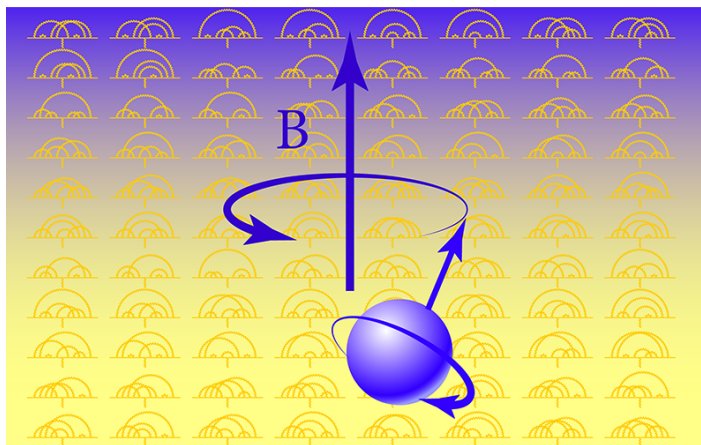
itzelez kalkula daitezke. Partikula birtualen jario fluktuatzaile horrek  $g$ -faktorea aldatzen du. *Muoiaren  $g-2$*  «anomalia» honela definitzen da:

$$a_{\mu} = \frac{g-2}{2} \quad (3)$$

eta honi, muoiaren kasuan *muoiaren  $g-2$*  «anomalia» deitzen zaio ( $g=2$  balitz, Dirac-en partikularen kasuan bezala  $a_{\mu}=0$  litzateke). Horrexegatik gainera, esperimentuak «*muoiaren  $g-2$* » izena hartzen du.

«Anomaliak» jarraitzen badu, hots, desadostasuna benetakoa bada, horrek esan nahiko luke egun ezagutzen dugun *SM* ereduak proposatzen dituen partikulak ez direla guztiak, desadostasuna azaltzeko beste partikularen bat kontuan hartu beharko litzatekeela. Hau da, muoiak bere inguru oso hurbileko *hutsa polarizatzen* duenean orain ezagututako partikula-antipartikula bikoteak ez direla nahiko desadostasuna azaltzeko esan nahi du. Beraz, beste partikula (eta bere antipartikula), *SM* erudian ez dagoena, proposatu beharko litzateke. Horietako batzuk, honako hauek izan daitezke:

- (1) *Z* bosoiaren lehengusua izan daitekeen *Z'* izeneko partikula berria. Beste partikula batzuekin dituen elkarrekintzengatik *Z* bosoiarekiko apur bat desberdintzen den bikotekidea.
- (2) *leptoquarka*, materiaren partikula-mota biren arteko hibrido hipotetikoa (partikula hipotetiko horrek leptoien eta quarken arteko zubia osatuko luke *Leptoien unibertsalitatea* apurtuz), edo
- (3) Higgs bosoiaren senide bat edo beste partikula ezezagunaren bat.



3. irudia. Muoi baten momentu magnetikoaren prezesio-biraketa  $B$  eremu magnetikoaren inguruan. Hondoan ageri diren diagramak Feynman-en diagramak dira. Fisikari teorikoek partikularen momentu magnetikoa eta bere momentu angeluarra lotzen dituen  $g$ -faktorea kalkulatzeko erabiltzen dituzte.

### Muoiaren $g-2$ Esperimentua

Muoiaren eremu magnetiko batean jartzen bada, bere spinak eremuaren norabidearen inguruan prezesatuko du (mekanika kuantikoaren ziba birakaria). Biraketa-maiztasunaren balioa muoiarekin etengabe elkarrekiten ari diren partikula birtualen karga-banaketaren arabera denez, oso garrantzitsua da neurketa ahal den finenak egitea, prezesio-maiztasunaren neurketak «anomaliaren» eta, beraz, partikula birtualen efektu orokorra determinatzen baitu.

Fermilab-eko azeleragailuak *muoiaren  $g-2$*  esperimentuak BNL-n, erabilitako teknika bera jarraitzen du. Muoi polarizatuak, spinak euren mugimenduaren norabidearekin

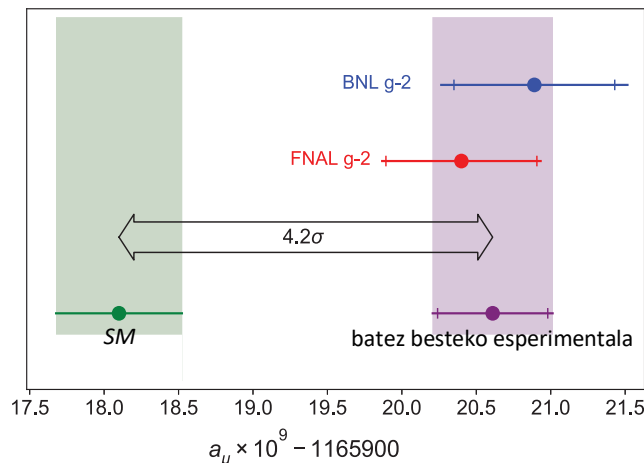


lerrokatuta dutenak, 14,2 metro diametroko biltegitratze-eratzun batean injektatzen dira argiaren abiaduratik hurbil, eta bertan, milaka aldiz biratzen dute. Desintegratu ahala, muoiak positroi bilakatzen dira, eta azken horiek eratzunaren barneko zirkunferentzia estaltzen duten kalorimetroen bidez detektatzen dira, muoiaren presentzia horrela ondorioztatzen delarik. Eratzunaren barruan, muoiak zirkulu batean bidaiatzen mantentzen dituen 1,45 T-ko eremu magnetikoak muoiaren ibilbidean spinaren prezesia eragiten duen «indar-momentu» magnetikoa ere ematen du. Muoiak jasaten duten eremu magnetikoa biltegitratze-planoarekiko perpendikularra da.

$g$ -ren balioa zehazki 2 balitz, prezesio-periodoa ziklotroiaren periodoaren berdina izango litzateke ( $T_{zk} = 2\pi/\omega_{zk}$ , non  $\omega_{zk} = qB/m$  den abiadura ez-erlabistetarako), eta muoiaren biraketa-norabideak muoiaren momentu-bektorearen erritmo berean biratuko litzateke. Aldiz, BLN-n egindako esperimenduek erakusten dute biraketa-norabidea apurka-apurka sinkronizazioa galtzen duela. Maiztasun ezberdintasun horri  $\omega_a$  prezesio «anomaloa» deritzo. Aurretik aipatu bezala, prezesio anomaloa gertatzen da etengabe sortzen/deuseztatzen diren partikula/antipartikula bikoteen jarioak muoiaren gainean duen eraginagatik (elektroiaren kasuan gertatzen den bezala). Elektroiaren kasuarekin alderatzen badugu, beheko (4) adierazpenak dio 2020an plazaratutako muoiaren  $\mu_\mu$ -ren balio teorikoak eta Fermilaben 2021ean neurtutakoak ez dutela bat egiten elektroiaren kasuan bezain ongi (ikus (2) adierazpena). Elektroiaren kasuan desadostasuna 12. hamarrekoan gertatzen da, muoiaren kasuan berriz, 8.ean, hots:

$$\frac{\mu_\mu^{teorikoa}}{\mu_\mu^{EXP}} = \frac{g_\mu^{teorikoa(2020)}}{g_\mu^{EXP(2021)}} = \frac{2.00233183620(86)}{2.00233184122(82)} = 0,99999999749. \quad (4)$$

$\Sigma$  balioa kontuan hartzen badugu, desberdintasuna  $4,2\sigma$  balioraino iristen da.



4. irudia. Goitik behera eta eskuman:  $a_\mu$  muoiaren anomaliaren balio experimentalak, BNL (E821) eta FNAL (E989) esperimenduetan lortuak, eta bi emaitza experimentalen konbinatuaren batez bestekoa. Ezkerrean: “Muon  $g-2$  Theory Initiative”-k SM-rako gomendatutako balio teorikoa ageri da [7]. Marra zabalek adierazten dute ekarpen estatistikoa ziurgabetasun osoari. Iturria [8].

**Muoiaren  $g-2$**  esperimenduetan ez dira batere errazak, oso-oso korapilatsuak dira. Errore parametro asko daude eta bereziki, nire ikuspegitik, lau dira nabarmenenak:

- 1) FNAL Fermilab-eko eratzunetan muoiak jarraitzen duten ibilbidea, muoiak ez baitira zuzenean detektatzen. Desintegratu ostean sorturiko positroiak dira detektatzen direnak.
- 2) Kalorimetroen analitikatik eratorritako  $\omega_a$  prezesio «anomaloa».

- 3) Muoiek jarraitzen duten ibilbidean dagoen eremu magnetikoa. Fermilab-en eremu hori neurtzeko erresonantzia magnetiko nuklearrean, RMNn, oinarrituriko zundak erabiltzen dira, finkoak eta mugikorak, eta horretarako zundetako protoien maiztasuna neurtzen da eta eskalatu eta ibilbiderako batezbestekoa egin ostean  $\omega'_p$  balioa lortzen dute.
- 4) Maiztasun biak mugatzeko muoi-sortaren dinamikaren ezagutza oso xehea behar da.

Guzti horrek egiten du «anomalia» bi maiztasunen ratio bezala definitu beharra, hots:

$$R' = \frac{\omega_a}{\omega_p}. \quad (5)$$

$R'$  balioa, bi maiztasunen zatiketa izanik oso arriskutsua da, oharkabean ikertzaileek analisia zuzendu eta erantzun jakin bat emateko bidea ireki baitaiteke. Hori saihesteko “*itsua*” deritzon metodologia erabiltzen da. Lankidetzatik kanpoko bi zaindarik isilpeko  $\omega_a$  maiztasun bat aplikatzen diote kalibratzeko erabiltzen den erloju bati, eta maiztasun horren balioa datuen azterketa osatu ondoren bakarrik adierazten dute [9].

2023ko uztailaren 24ean, duela hiru hilabete, Liverpool-eko unibertsitatean, Fermilab-en egindako azken neurketen emaitzak plazaratu zituzten [10]. Izan ere, zientzialariak aipatu unibertsitatean bildu ziren “*itsu*” metodologiari jarraitu ostean emaitzak itsugabetzeko (to unblind blinding results). Honako emaitza hau lortu zuten:

$$\frac{\mu_\mu^{teorikoa}}{\mu_\mu^{EXP}} = \frac{g_\mu^{teorikoa(2020)}}{g_\mu^{EXP(2023)}} = \frac{2.00233183620(86)}{2.00233184110(48)} = 0,99999999755. \quad (6)$$

Ohar daitekeenez, 2023ko esperimentuaren emaitza 2021ekoa baino bi aldiz zehatzagoa da (ikus zehaztasuna adierazten duten parentesien arteko balioak) eta *sigma* balio estatistikoa kontuan hartzen badugu, desberdintasuna  $5\sigma$  balioraino iristen da.

$5\sigma$  balioa, aurretik aipatu bezala, nahiko izan zitekeen ondorioztatzeko *SM* eredua kasu honetan ez dabilela ongi eta partikula-antipartikula birtualen artean, egun *SM* eremuan ez dagoen beste partikularen bat kontuan hartu behar dela.

Hala ere,  $g-2$  esperimentuaren komunitatea zuhurtiaz jokutzen ari da, alde esperimentalean konfiantza eduki arren zati teorikoaren aurreikuspena, beren ustez, are gehiago zehaztea komenigarria litzateke eta. Aipatu beharra dago 2021ean “*lattice-QCD*”-ren bidez egindako kalkuluak hemen erakutsi direnak baino hurbilago zeudela esperimentuetatik [10].

Ez nau harritzen  $g-2$  esperimentuaren komunitatearen zuhurtzia, zeren urte honetan bertan, *Belle II* eta *LHCb* lankidetzek plazaratu dutenez, beste «anomalia» bat, *leptoiaren unibertsalitate*arena, lan horien arabera ez dirudi *SM* ereduarekiko «anomalia» izaten jarraitzen duenik. Beraz, azken aipatutako emaitzek,  $g-2$  esperimentuak ez bezala, *SM* eredua sendotzen dute.

Bestalde, 2023an argitaratutako elektroien  $g$ -faktore esperimentalek berresten dute (2) adierazpenean erakusten direnak [11]. Hau da, balio esperimentalek eta teorikoek elektroien kasuan bat egiten dutela 12 hamarrekotan.

*Muoiaren g-2* «anomaliaren» *sigma* balioa 2023ko udan handitu den arren apustu egin beharko banu «anomalia» hori azkenean desagertuko denaren alde egingo nuke. Bereziki, ez dudalako ulertzen muoiaren «anomalia» benetakoa balitz zergatik ez den

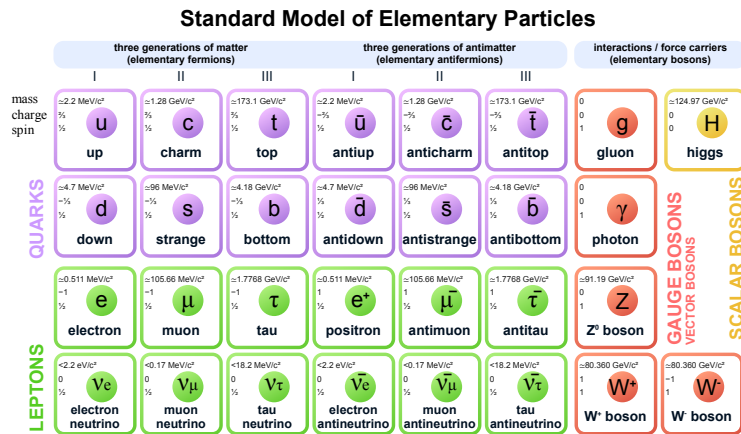
elektroiaren kasuan detektatzen. Balio teorikoen eta esperimentalen arteko desadostasuna *fisika berriaren* sinadura balitz, elektroiaren kasuan ere behatu beharko litzateke, eta ez da behatu!! [11].

Beraz, idatzita geratzen da nire apustua!!

## BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Garisto, 2020, "The Era of Anomalies" *Physics* **13**, 79.
- [2] P. Cushman, 2021, "Muon's Escalating Challenge to the Standard Model" *Physics* **14**, 56.
- [3] P.M. Etxenike, J.M. Pitarke, F. Plazaola, 2001, "Sinpletasunetik konplexutasunerantz, milurteko berriaren atarian" *JAKIN* **125**, 10-41.
- [4] Sven Heinemeyer, 2022, "Future perspectives for Higgs physics and theoretical challenges" *XIV CPAN DAYS*, Bilbao, 24.11.2022. <https://indico.ific.uv.es/event/6735/sessions/2769/>
- [5] G. W. Bennett *et al.* (Muon  $g-2$  Collaboration), 2006, "Final report of the E821 muon anomalous magnetic moment measurement at BNL," *Phys. Rev. D* **73**, 072003.
- [6] <https://muon-g-2.fnal.gov/bigmove/>.
- [7] T. Aoyama *et al.*, 2020, "The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model," *Phys. Rep.* **887**, 1.
- [8] B. Abi *et al.* (Muon  $g-2$  Collaboration), 2021, "Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.46 ppm" *Phys. Rev. Letter* **126**, 141801.
- [9] "Blinding experiments" <https://www.youtube.com/watch?v=HtdVH1Wp7fs&t=74s>.
- [10] K. Wright, 2023, "Mismatch with Standard-Model predictions reaches 5 sigma" *Physics* **16**, 139.
- [11] X. Fan *et al.*, 2023, "Measurement of the electron magnetic moment" *Phys. Rev. Letter* **130**, 071801.

# 1 eranskina: Oinarrizko Partikulen Eredu Standarra (SM)



Oinarrizko Partikulen Eredu Standarra (SM). Irudian antipartikulak ere irudikatu dira. ITURRIA Wikimedia Commons.

Oinarrizko Partikulen Eredu Estandarra partikulen fisikaren esparru teoriko bat da, funtsezko partikulak eta horien elkarrekin deskribatzen dituen indar elektromagnetikoen, nuklear ahulen eta nuklear bortitzen bidez. Materiaren funtsezko osagaien eta bere portaera zuzentzen duten oinarrizko indarren ulermen orokorra ematen du. Eredu Estandarrak sekulako arrakasta izan du behaketa esperimental sorta zabala azaldu eta iragartzeko orduan, baina mugak ere baditu eta ez da *Ororen/Guztiaren Teoria* osoa, ez baitu, beste gauzen artean, grabitatea barne hartzen.

## 1. Oinarrizko Partikulak

Eredu estandarrak bi talde nagusitan sailkatzen ditu partikulak: fermioiak eta bosoiak.

**Fermioiak:** Fermioiak materiaren oinarrizko adreiluak dira, eta spin balio erdiosoak dituzten partikulak dira. Bi azpitaldetan banatzen dira: quarkak eta leptoiak.

**Quarkak:** Quarkak protoien eta neutroien osagaiak dira, nukleo atomikoak osatzen dituztenak. Sei Quark mota edo zapora daude: *up*, *down*, *charm*, *strange*, *top* eta *bottom*. Quarkak ez dira inoiz isolatuta egoten konfinamendua deritzon fenomeno baten ondorioz, non beti hadroiak izeneko partikuletan (protoiak eta neutroiak, adibidez) lotuta dauden.

**Leptoiak:** Leptoiak oinarrizko partikulak dira, eta indar nuklear bortitzak ez die eragiten. Kargatutako hiru leptoi daude: *elektroia*, *muoia* eta *tau*, bakoitza bere neutrinoarekin: *neutrino elektronikoa*, *neutrino muonikoa* eta *tau neutrino*.

**Bosoiak:** Spin balio osoak dituzten partikulak dira eta oinarrizko indarren bitartekaritzaren arduradunak.

**Gluiak:** Indar nuklear bortitzaren bitartekariak dira, quarkak hadroien barruan elkartzen dituenak. Gainerako indar-bitartekari gehienek ez bezala, gluiak beraiek garraiatzen dute indar bortitzaren kolore-karga.

**Fotoiak:** Indar elektromagnetikoaren bitartekariak dira, kargatutako partikulen arteko elkarrekin arduraduna. Ez du masarik eta argiaren abiadura bidaiatzen du.

**W eta Z bosoiak:** indar nuklear ahularen bitartekaritzaren arduradunak dira, partikula erradioaktiboen beta desintegrazioa bezalako prozesuak zuzentzen dituenak. W bosoiak bi barietatetan agertzen dira: W<sup>+</sup> eta W<sup>-</sup> alde batetik, eta Z bosoiak bestetik, azkeneko hau elektrikoki neutroa dena.

**Higgs bosoiak:** Higgs eremuarekin lotuta dago, uste baita azken honek beste partikula batzuei masa ematen diela, Higgs mekanismoa izeneko prozesu baten bidez. 2012an CERNen aurkitu izanak Eredu Estandarraren berrespen garrantzitsua ekarri zuen.

## 2. Oinarrizko Indarrak

Eredu Estandarrak naturaren funtsezko lau indarretatik hiru deskribatzen ditu:

**Indar Elektromagnetikoa:** Elektrodinamika kuantikoak (QED) deskribatuta, indar hau kargatutako partikulen arteko elkarrekintzen erantzulea da eta indarraren bitartekariak fotoiak dira.

**Indar Nuklear Ahula:** Teoria elektroahulak deskribatuta, indar honek W eta Z bosoiak trukea dakarten prozesuak zuzentzen ditu. Beta desintegrazioaren eta neutrinoen arteko interakzioen ardura du.

**Indar Nuklear Bortitza:** Kromodinamika kuantikoak (QCD) deskribatua, indar honek quarkak hadroiaren barnean batzen ditu eta gluoiak dira indar honen bitartekariak.

## 3. Bateratze Elektroahula

Eredu Estandarrak ( $SM$ -k) indar elektromagnetikoa eta indar nuklear ahula indar elektroahul bakar batean bateratzen ditu energia altuetan. Bateratze hau Sheldon Glashow, Abdus Salam eta Steven Weinbergekin proposatu zuten.

Teoriaren gako bat da indar elektroahularen bitarteko lau partikuletatik hiru masiboak zergatik diren azaltzea da (fotoia da masarik ez duena).

Oinarrizko Partikulen Eredu Estandarra ( $SM$ ) funtsezko partikulak, horien elkarrekintzak eta haien portaera zuzentzen duten indarrak deskribatzen dituen esparru teorikoa da. Partikulen fisikaren giltzarria izan da hamarkada askotan, eta proba esperimental ugari egin zaizkio. Hala ere, ez da teoria osoa eta unibertsoaren izaerari buruzko galdera asko uzten ditu irekita fisikariak etengabe ikertzen ari direnak.