

Oinarrizko partikulen eredu standarra, *SM*, kinka larrian ote?

(Standard elementary particle model, is it in crisis?)

Fernando Plazaola*

Zientzia eta Teknologia Fakultatea (UPV/EHU)

LABURPENA: 2023ko udan aurkeztutako muoiaren $g-2$ esperimentuaren emaitzak oinarrizko partikulen eredu estandarra, *SM*, kinka larrian utzi ote duten kezka dago, balio esperimentalen eta teorikoen arteko desadostasuna, «anomalia», 5σ balioa hartu duela iragarrita. «Anomalia» baten balio horrek adierazi ohi du ereduak ez dela gai neurketa esperimentalak azaltzeko, eta, beraz, nahitaez, ereduak aldatu behar dela. Autoreak kezkak azaltzen ditu emaitzak iragartzeko hainbatetan aukeratzen diren prentsa agerraldiez, eta artikulu honen idazleak apustu egiten du muoiaren $g-2$ esperimentuaren iragarritako emaitzak ez duela *SM* ereduak hankaz gora jarriko.

HITZ GAKOAK: *SM*, muoiaren $g-2$ esperimentua, g -faktorea.

ABSTRACT: *The results presented in the summer of 2023 for the $g-2$ muon experiment may have put the standard elementary particle model, the *SM*, in serious trouble by announcing that the discrepancy between experimental and theoretical values has taken on a value of 5σ . Such a high value of an «anomaly» usually indicates that the theoretical model is not able to explain the experimental measurements and needs to be changed. It is not uncommon nowadays for scientific results to be announced in press conferences, and the author expresses his concerns about this form of dissemination and briefly discusses them. Likewise, the author of this article bets that the announced result of the $g-2$ muon experiment will not turn the *SM* model upside down.*

KEYWORDS: *SM, $g-2$ muon experiment, g -factor.*

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Fernando Plazaola. Elektrizitatea eta Elektronika Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Sarriena auzoa (48940 Leioa). – fernando.plazaola@ehu.eus – <https://orcid.org/0000-0002-0081-8131>

Nola aipatu / How to cite: Plazaola, Fernando (2024). «Oinarrizko partikulen eredu standarra, *SM*, kinka larrian ote?». *Ekaia*, 46, 2024, 57-85. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.25874>).

Jasotze-data: 2024, urtarrilak 02; Onartze-data: 2024, apiriliak 18.

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © UPV/EHU Press



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-PartekatuBerdin 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA

Duela urte pare bat kuadrillako lagun batek whatshap bat bidali zidan esanez *muoiaren* $g-2$ esperimentu berria zela-eta oinarrizko partikulen eredu estandarra kinka larrian zegoela. Whatshapean Youtubeko bideo bat atxikiturik zetorren. Bidalitako whatshapeko 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. Idaztera bultzatu nauena aipaturiko bideoa izan denez, bideoaren izenburuari lan honetan eustea erabaki dut, eta ondorioetan izenburuaren galderari erantzuna emango diot; nire ikuspegitik, jakina.

Azken urte hauetan, lehen ez bezala, partikuletako fisikarien artean «anomalia» hitza asko erabiltzen da. Aurretik *Ororen/Guztiaren Teoria* («Theory of Everything», ToF) lortu nahia edo materia iluna sortzen duten partikulak zein diren ezagutzeko gogoia askoz arruntagoak ziren. Orain berriz, esperimentuen «anomaliak» ari dira. «Anomaliak» arakutzen aritu naiz, zeren hainbat egon baitira. Bilatze lan horretan, D. Gariston-en eta P. Cushman-en «anomaliak» buruzko lan oso interesgarriak aurkitu ditut [1, 2], eta haiek idatzitako zati batzuk hona aldatu ditut. Baina «anomaliaz» ari garenean, zerekiko anomaliaz ari dira? Oinarrizko Partikulen Eredu Estandarrak dioenarekiko, hain zuzen. Ingelesez «Standard Model of Particle Physics» edo «Standard Model of Elementary Particles» deritzo, eta *SM* akronimoaren bidez 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 grabitatearen alde batera uzten du, eta ezagutzen diren oinarrizko partikula guztiak ere sailkatzen ditu (ikus 1 eranskina).

Eredu Estandarra teorikoki autobateragarria dela uste den arren, eta aurreikuspen esperimentalak azaltzean arrakasta itzela erakutsi duen arren, zenbait fenomeno azaldu gabe uzten ditu, eta oinarrizko interakzioen teoria osoa txiki geratzen da *Ororen/Guztiaren Teoria* izateko. Izan ere, besteak beste, ez du barioien asimetria (materiaren eta antimateriaren arteko asimetria) erabat azaltzen, ez du erlatibitate orokorrak deskribatutako grabitazioaren teoria osoa barneratzen, ez eta Unibertsoaren hedapen espontzialaren ondorioz proposatutako energia iluna, ez eta behaketa kosmologikoetatik ondorioztatutako materia ilunaren oinarrian egon daitezkeen partikularik ere (ikus 1 KUTXA). Esan daiteke *SM* ez duela inoiz azken teoria (*Ororen/Guztiaren Teoria*) izateko bokaziorik izan. Aitzitik, indar grabitatorioa ez du kontuan hartzen, ez delako inoiz izan bere helburua. Partikuletan lana egiten duen hainbat fisikari ez dago grabitateaz arduratuta. *SM* ereduaren eta *Ororen/Guztiaren teoriak* izateko diseinatu-

tako ereduak, soken teoria, kasurako, desberdinu beharreko ereduak dira. Hala ere, aipatutakoa aipatuta, oso gogoan dut, han nengoelako, entzuten, *Sven Heinemeyer* zientzialariak, partikulen fisikan adituak, 2022. urtean *XIV CPAN DAYS* jardunaldien barne UPV/EHUko Zientzia eta Teknologia Fakultateko paraninfoan eman zuen «Future perspectives for Higgs physics and theoretical challenges» hitzaldian jarri zuen gardenkiaz ([4] erreferentzian topatu daiteke), non idatzita baitago «SM ereduak ezin daiteke azken teoria izan!». Han, beste gauza batzuen artean idazten ditu arrazoiak (indar grabitatorioa ez duela kontuan hartzen, indar elektromagnetikoa, nuklear ahula eta bortitza ez dituela bateratzen...). Horregatik, 1 KUTXAN SM ereduak erantzuten ez dituen kontzeptu batzuk idatzi ditut.

1 KUTXA. *Oinarritzko Partikulen eredu Estandarrak, SM ereduak azaltzen ez dituen fenomenoak.*

Arazoak:

1. Indar grabitatorioa ez du kontuan hartzen (*)
2. Hiru indarrak ez ditu bateratzen (elektromagnetikoa, nuklear ahula, nuklear bortitza) (2*)
3. Materia iluna ez dago sartuta (3*)
4. Energia Iluna (4*)
5. Unibertsoaren barioien asimetria ez du azaltzen (5*)
6. Neutrinoen masak ez daude sartuta (6*)
7. Muoiaren momentu magnetiko «anomaloa»

(*) SM-ren helburua ez da indar grabitatorioa azaltzea izan, ez baitzen *Ororen/Guztiaren Teoria* izateko jaio. Gainera, grabitoia proposatua izan arren, ez dakigu bide horretatik azaldu daitekeen.

(2*) SM ez zen *Ororen/Guztiaren Teoria* izateko jaio.

(3*) Interakzio grabitatorioarekin lotuta egon daiteke, eta, horregatik, baliteke materia ilunaren partikularik ez egotea. Gerta liteke egotea ere, energia ilunaren kasuan ez bezala.

(4*) Interakzio grabitatorioarekin lotuta egon daiteke, baina ez dago energia ilunaren partikularik. Beraz, ez dago zertan SM-ren barne egon.

(5*) SM-ren berezkoa izan daiteke.

(6*) Neutrinoek masa dutela zenbait bide osagarritatik dakigu.

Aurreko paragrafoan esandakoa esanda, irmoki azpimarratu beharra dago SM teoria eredu oso sendo eta potentzialitate handikoa dela, teoria kuantiko sendoenetako batean errotuta baitago, eremuen teoria kuantikoan,

hain zuzen ere. Are gehiago, fisikan gaur egun iragarpen onenak ematen duen eredu *SM*-a da. Gaur egun ezagutzen den balio teoriko eta esperimentalaren arteko adostasun handiena elektroiaren momentu magnetikoari dagokio, 12 hamarrekotara heltzen da, aurrerago zehazten den bezala (ikus (2) adierazpena).

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/interakzio 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].

1.1. «Anomaliak»

Sarreran adierazi bezala, fisikariak problema handien ebazpenaren atzetik zebiltzan: *Ororen/Guztiaren Teoria*-ren bila. Orain berriz ez! 2012an Higgs bosoiaren aurkikuntzaren ostean bereziki «anomaliez» ari dira. Baina «anomalia» terminoak zer esan nahi du? «Anomalia» hitzak esan nahi du *SM*-ren iragarpen teorikoarekiko desadostasun esperimentalak *estatistikoki* esanguratsua dela. *Muoiaren $g-2$* «anomalia» ez da *SM* ereduaren aurka egiten duen bakarra; *bottom quarkena*, *neutrinoena* eta *kaioena*, 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 fenomenoen aterki bilakatu dira. Goian aipatu bezala, *fisika berria* aurkitzeko bide nabarmenagoak daude, hala nola, *materia iluna*-ren partikula bat aurkitzea edo grabitate fisika kuantikoarekin bateratzea. Baina problema handi horiek oso egoskorak dira; beraz, partikula-fisikari askok arazo txikiagoen inspirazioa bilatzen dute.

Aurkitu diren «anomaliatan» ziurgabetasun sistematikoak murriztu arren, lortutako datuak aztertzeraz eta esperimentu zehatzagoak egiteko moduak aurkitzeraz behartzen ditu fisikari esperimentalak. Bitartean, fisikari teorikoek emaitza «anomaloiei» heldu behar diete, gehienetan partikula berriak dituzten ereduak eraikiz (1 eranskinean ez daudenak, hots, *SM*-n ez daudenak).

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», bertan behera geratu dira. Datu gehiago jaso ahala, gero eta desoreka txikiagoa izan da *SM* ereduaren iragarpenekiko. *SM* ereduaren sendotasuna behin eta berriro erakutsiz.

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

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

Urte batzuk geroago, CERNe «Hadron Collider» handian bi lankide-tzek jakinarazi zuten protoi-protoi talkek espero baino fotoi bikote gehiago sortu zituztela 750 GeV inguruko energiekin [6]. Emaitza horrek 750 GeV-eko masa duen partikula berri baten existentzia iradokitzen zuela zirudien. Teorikoez 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.

Gertakizun horiek SM ereduaren sendotasunaren adierazle dira, esperimentu horiek guztiak egiten diren energia eskaletan. Beraz, SM ereduak partikulen elkarrekintzak deskribatzeko eredu oso egokia da; baina, azken bi paragrafo hauek galde erazten digute egun dugun baliabideekin *fisika berria* eskura ote dugun ala oso urrun dagoen? Hau da, geratzen zaigun bide bakarra *fisika berria* garatzeko «anomalia»-rena ote den? Argitaratu berri den «*The end of the particle era?*» artikuluan Halander eta haren lankideek [7] zuzenean adierazten dute «*partikulak natura ulertzeko funtsezkoak ziren aro baten amaiera ikusten egon gaitezke*». Izan ere, *W* eta *Z* bosoiaren aurkikuntza 1980ko hamarkadaren hasieran, *top quark*-arena 1990ko hamarkadaren erdialdera eta *Higgs bosoiaren* 2012an, partikulen fisika modernoaren azken erronka esperimentalen artean leudeke. Gaur egun dugun ulermenaren arabera, edozein *fisika berri*, hots, SM-k deskribatzen ez dituen oinarritzko egiturak, M_{BSM} masa-eskalarekin erlazionatuta egongo da.

BSM ikurrak *SM*-tik haratago adierazten du (*Beyon the Standard Model*). Eremuen Teoria Kuantikoaren arabera, *fisika berri* horrek elkartuta egon beharko luke M_{BSM} masa-inguruko partikulekin. Hau da $E > M_{BSM}c^2$ energietaraino heldu behar da *fisika berri* hori topatzeko. Izan ere *Halander* eta haren lankideek [7] diote gaur egun ez dagoela pisuzko arrazoirik M_{SBM} masen eskala Plancken masa (M_p) baino nabarmen txikiagoa izatea espero izateko (ikus 2 KUTXA); horrek esan nahi du «*onshell*» aurkikuntzak iraganekoak izan daitezkeela. Hala ere, komenigarria da nabarmentzea, energia eskala horietan gertatutako fenomenoak kosmologian diharduen komunitatea, zeharka bada ere, aztertzeko gai dela. Beraz, eztabaida horrek esaten digu oinarritzko partikulen fisikaren lan esparrua ez genukeela azelegailuen mundura soilik mugatu behar.

2 KUTXA. *PLANCK-en unitate eskala*

Fisika egiteko masa, luzera eta denbora neurtzeko unitateak behar ditugu. Gainera, unibertsalak beharko lukete. Izan ere, zer zentzu luke *estralurtar* batekin komunikatzea eta masa unitate bezala 2019ra arte Parisen bi kanpainaren kokaturiko platino-iridiodzko zilindroa hartu behar dela esango bagenio? *Max Planck* fisikariak \hbar konstantea sartu bezain laster ohartu zen 3 oinarritzko konstanteen bidez (G , c eta \hbar) unibertso osoan uler zitekeen hiru oinarritzko unitateak eraiki zitezkeela, eta artikulu oso interesgarria idatzi zuen 1899an [8], non gaur egun Planck unitateak edo unitate Unibertsalak edo unitate naturalak deiturikoak azaltzen duen. Izan ere, honako hauek:

$$\text{Planck-en masa } M_p = (\hbar c/G)^{1/2}$$

$$\text{Planck-en luzera } l_p = \hbar/M_p c = (\hbar G/c^3)^{1/2}, M_p\text{-ri dagokion } de\ Broglie\ uhin\text{-luzera}$$

$$\text{Planck-en denbora } t_p = l_p/c = (\hbar G/c^5)^{1/2}, \text{ argiak behar duen denbora Planck-en luzera zeharkatzeko.}$$

Planck-en masak adierazten digu zein den masa naturala edo energia eskala non grabitate kuantikoa ageri den. $M_p = 10^{19}m_p$, non m_p protoiaren masa den (Genevako LHC azeleragailua 10^4m_p ordenaren inguruko energia balio-kidean funtzionatzen du). Hain itzela da balio hori, ezen ez dugu uste sekula helduko garenik grabitate kuantikoari esperimentera zuzenean aurre egitera. M_p partikula ezagun guztiekiko hain handia izateak adierazten digu grabitate-indarra oso ahula dela: G txikia, beraz M_p itzela.

Planck-en masa M_p itzela izateak Planck-en luzera eta denbora oso-oso txikiak izatea dakar ($t_p \approx 5,4 \times 10^{-44}$ s eta $l_p \approx 1,6 \times 10^{-33}$ cm). Gizakion esperientziatik oso-oso urrun geratzen dira.

Iturria [9]

1.2. Muoien $g-2$ esperimentua 2001ean Brookhaven National Laboratory-n

Duela hogeita hiru urte, 2001ean, BNL-n (Brookhaven National Laboratory) *muoien $g-2$* esperimentuak muoiaren momentu magnetiko «anomaloaren» balio bat neurtu zuen (g -faktorea zer den ezagutzeko ikus 3 KUTXA), milioi bakoitzeko hainbat zatitan ados ez zegoena SM ereduaren oinarritutako kalkuluekin [10]. Izan ere, *muoien $g-2$* esperimentuak bi balio oso zehatzen arteko desadostasun neurgarri bat eman zuen: *kalkulu teoriko mekaniko-kuantiko oso zehatzen* eta *oinarritzko konstante baten neurketa oso zehatzaren* artekoa; 2.7σ balioko desadostasuna, hain zuzen.

Goian aipatu bezala, fisikariak denbora luzez ulertu dute SM ereduaren osatu gabe dagoela (ikus 1 KUTXA), baina XXI. mendearen hasieran instalazio garrantzitsuetatik jasotzen zen albiste bakarra zen SM ereduak ondo funtzionatzen zuela, elektroien eta positroien LHC Kolisionatzaile Handitik hasi eta FNAL Fermilab-eko Tevatroitik (2011an itxi zen) jarraituz. Beraz, 2.7σ balioko desadostasuna zirrargarria zen.

BNL-ko azeleragailua 2001ean gelditu zen eta harekin batera han egiten ziren esperimentuen datu-bilketa. Ziurgabetasun estatistikoa 2.7σ baliotik 5σ balioraino igotzeko (desadostasunak *fisika berri* posiblerako bidea eman lezakeena) intentsitate handiagoko muoi sorta bat beharko litzateke, eta ziurgabetasun sistematikoa murrizteak hobekuntza handiak eskatuko litzuzke ingeniartzan [11]. Hori lortzeko, partikulen fisikariak zerua eta lurra —eta baita magneto erraldoiak ere— mugitzeko prest zeuden (ikus 1. irudia). 2013an, ikertzaileek saskibaloi-kantxa baten zabalera magneto zirkularra bildu zuten eta gabarra batean eraman zuten Long Island-etik (New York) Mexikoko Golkora, Floridatik pasatuz, eta gero, gauez, Mississippi ibaian gora kamioiez Bataviara (Illinois), errepideak beste ibilgailuetarako itxiz. 5.000 kilometrokoa baino bidaia luzeagoa egin zuten [12]. Gaur egun magneto bera da FNAL-ean, Illinoiseko Batavian kokatutako *muoien $g-2$* esperimentu berrituaren elementu nagusia. FNAL Fermilab-ean muoiaren momentu magnetiko «anomaloa» askoz zehatzago neurtu dute, 4 faktore batez zehatzago [11], eta horrek 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, zaharrenetakoa 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 interakzio magnetikoen kalkulu teorikoak hobetu diren heinean «anomaliak» indarra hartu du. Izan ere, 2020an BNL-eko esperimentuaren emaitzarekiko $3,7\sigma$ -ra iristen ziren [13].

Argi zegoen dilemaren alde esperimentalak berriro aztertzeko unea iritsi zela.



1. irudia. *Muoien $g-2$ «anomalía»* ikertzeko biltegitratze-eraztun erraldoian instalatzeko, BNL-tik Bataviara (Illinois) garraiatutako magneto erraldoia 2013ko udan. Iturria <https://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=24180>

2. ZERTAN DATZA MUOIEN $g-2$ ANOMALIA?

Elektroiek (muoiek, protoiek, neutroiek eta beste hainbat partikulak bezala) momentu magnetiko intrintseko bat dute. Izan ere, momentu magnetiko horrek elektroiak eremu magnetiko batean nola erantzuten duen adierazten du, elektroien kargak eremu elektriko batean nola erantzuten duen neurtzen duen bezalaxe (edo ziba mekanikoa zoruan biraka jartzen dugunean, eremu grabitatorioaren aurrean nola erantzuten duen erakusten digun bezala).

Fisika klasikoaren kasuan, bere ardatzaren inguruan biraka dagoen gorputz kargatuak duen momentu angeluarra, momentu magnetikoaren proportzionala da. 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 ordez idazten da). Objektu klasikoetarako $g = 1$ da (ikus 3 KUTXA).

3 KUTXA. μ momentu magnetikoa, momentu angeluarra eta g -faktorea

Ratio giromagnetikoa, g -faktorea deituko duguna, (g -balioa edo dimentsio gabeko momentu magnetikoa ere deitua) atomo baten, nukleo baten edo orokorrean partikula baten μ 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 uniforme banatuta egonez gero, bere momentu magnetikoa (μ) eta momentu angeluarra (L) honako harreman honen bidez lotuta daude:

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

Mekanika kuantikoaren ereduari jarraituz, g -faktorea konstantea eta dimentsiogabea da, partikulan behaturiko μ momentu magnetikoa eta hari dago-kion momentu angeluarraren zenbaki kuantikoaren arteko arrazoa da (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 μ momentu magnetikoa (Diracen partikula) honako hau da,

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

non g partikularen g -faktorea, e partikularen oinarrizko 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_μ spineko muoiari dagokion g_μ -faktorea honako hau da:

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

non μ_μ muoiaren spinaren momentu magnetikoa, g_μ muoiaren g -faktorea, e muoiaren karga, m_μ muoiaren masa eta S_μ muoiaren spinaren momentu angeluarra diren.

Fisikariak harrিতuta geratu ziren elektroiekin egindako esperimenduek $g = 2$ ematen zutelako (ikus 3 KUTXA). Dirac-ek azaldu zuen misterio hori distira zorrotz batekin (ikus 4 KUTXA). Baina gauzak ez ziren hor amaitu, teknika esperimentalak hobetu ahala, elektroien g balioa 2 baino apurtxo bat gehiago zela neurtu zen. 2008an fisikari esperimentalek neurtu zuten elektroien honako g_e -faktore hau:

$$g_e^{EXP} = 2.002\ 319\ 304\ 3617(15) \quad \text{edo} \quad g_e^{EXP/2} = 1.001\ 159\ 652\ 1808(15) \quad (1a)$$

Alderatu dezagun balio esperimental hori predikzio teorikoarekin:

$$g_e^{teorikoa} = 2.002\ 319\ 304\ 36256(35) \quad \text{edo} \quad g_e^{teorikoa/2} = 1.001\ 159\ 652\ 18128(35) \quad (1b)$$

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

Balio horiek, 3 KUTXAko adierazpenak kontuan hartuz, honela ere adieraz ditzakegu:

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

non nabarmenago ageri den balio teorikoaren eta esperimentalen arteko bat egitea 12 hamarrekora heltzen dela. Eremu magnetiko batean elektroir birakari baten prezesio-abiaduraren gure ulermena, zalantzarik gabe, xx. mendeko fisikaren hamar arrakastarik handienen artean dago.

4 KUTXA. Dirac eta Schwinger zientzialarien arrakasta elektroiriaren g_e -faktorean.

Fisikako teoriaren eta esperimentuaren arteko adostasun fantastikoena elektroiriaren ratio giromagnetikoari, g_e -faktoreari, dagokio.

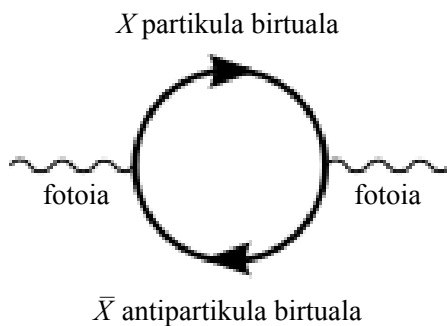
Dirac-en aurretik, iragarpen teorikoa $g_e = 1$ zen (ikus 3 KUTXA). Dirac-ek 1928an bere ekuazioa idatzi ondoren, g_e kalkulatzeko irrikaz zegoen. Dirac-en iragarpena $g_e = 2$ izan zen, hau da, egungo $g_e/2 = 1.001\ 159\ 652\ 181\ 643(764)$ balio teorikoaren lehen digitua (g_e eman beharrean ohitura dagoenez $g_e/2$ adierazteko, azken hau da hainbatetan idatziko dena). Bigarren mundu gerraren ostean, belaunaldi berri bat fisika teorikora iritsi zen, eta teknika esperimental berrituek zioten elektroiriaren momentu magnetikoa Dirac-ek lortutakoa baino handiagoa behar zuela izan. Beraz, horrek Dirac-en iragarpenaren $g_e/2 = 1$ balioarekiko desbideratzea kalkulatzeko lasterketa bat eragin zuen Schwinger eta Feynman, zientzialarien artean. 1948an, Julian Schwingerrek e^2 ordenako lehen zuzenketa kalkulatzeko lortu zuen, $\frac{g_e}{2} = \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi}\right) \approx 1.001\ 161\ 4$, baliokoa hain zuzen. Emaitza hori *Physical Review* aldizkarian 1948 urtean argitaratuta dago [14], eta zehazki orrialde bat du, ekuazio bakar bat eta kalkuluxehetasunik gabe. Emaitza «lurperatuta» dago paragrafo luze baten barruan: «= 0.001162. Benetan pozgarria da ... iragarpen hau berrestea».

Bigarren mailako zuzenketa 1957an kalkulatu zuen C. Sommerfelfek, Schwingerrek zuzendutako Harvard-eko doktore-tesian. Neurketa esperimentalek eta kalkulu teorikoek aurrera jarraitu zuten, gero eta zehaztasun handiagoarekin. 2 irudian ageri denez, fotoiak X partikula kargatu bat eta bere \bar{X} antipartikula sor ditzake, ondoren elkarren artean deuseztatzen direnak fotoi bihurtzeko (hutsaren polarizazioa): alaiki mugitzen den fotoi bat partikula eta antipartikula batean bilaka daiteke eta gero bere baitara itzuli fotoi bihurtuz; hau behin eta berriz eginez. Horrek gorago aipatutako α (egitura fineko konstantea, interakzio elektromagnetikoaren intentsitatearen adierazlea) ordenako zuzenketa sortzen du Schwingerren kalkuluan.

Mundu kuantikoaren izaera esentziala islatzen duen gakoa da, X partikula fotoiak akoplatzeko gai den edozein partikula izan daitekeela. Berdin dio elektroiaren edo muoiaren g faktoreaz ari garen, ez du horren mendekotasunik. Partikula guztien ekarpena kalkulu teorikoan sartu behar da, nahi den doitasun-maila lortu arte. Espero daitekeen bezala, zenbat eta masiboagoa izan X , orduan eta txikiago da haren ekarpena. Adibidez, Schwingerrek elektroiaren g faktorea kalkulatu zuenean, $X = \text{muoia balitz}$, horrek bere $\alpha/2\pi$ emaitza ospetsuari $\sim \alpha^2(m_e/m_\mu)^2$, ordenako gai bat gehituko lioke, ezabatua izango litzatekeena α^2 estra faktoreaz ez ezik, m_μ muoiaren masaz ere. Iturria [9]

g_e -faktorea, apurtxo bat bada ere, zergatik da 2 baino handiagoa? Elektrodinamika Kuantikoaren (QED) arabera, bigarren kuantizazioaren ondorioz ikuspegi klasikotik *ezezagunak* diren fenomeno berriak sor daitezkeelako. Horien artean, *hutsaren polarizazioa* (elektroi-positroi bikote birtualen kitzikapen/sorrera, kanpoko eremu elektromagnetiko baten aurrean). Hau da, kanpoko eremu elektriko eta/edo magnetiko oso bortizetan partikula-antipartikula bikoteak, birtualak deituak, hutsean sor daitezkeela auresaten du, Heisenberg-en ziurgabetasun printzipioa urratu gabe, edo, hobeto, 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 araberkoa) 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 birtual horiek elektroi batekin, edo muoi batekin, edo beste edozein partikularekin, interaktua dezakete. Interakzio horren ondorioz, eremu magnetiko baten barneko elektroiaren edo muoiaren erantzuna alda daiteke, partikularen momentu magnetikoa eta g -faktorea aldatuz. Teorikoek, itxaron daitekeen partikularen g -faktorea kalkulatu dezakete, kontuan hartuz SM ereduaren barnean existitzen diren oinarritzko partikulak. (1b) adierazpeneko balio teorikoa prozedura hori erabiliz lortu da.

Hutsaren polarizazioa nabarigarria bihurtzeko, hau da, partikula-antipartikula birtualak kopuru nabarigarrian sortzeko, kanpo-eremuak oso-oso bortitza izan behar du. Ereku elektrikoaren balioa 10^{18} V/m ingurukoa eta/edo, eremu magnetikoaren kasuan, 10^9 T ingurukoa [15]. Balio horien handitasunaz jabetzeko erakuts ditzagun gure planetan gizakiak lortu dituen balio handienak. 2022ko abenduaren 5ean NIFean lorturiko laserren bidezko fusio-ignizioan erabili ziren laserren ezaugarriak honako hauek ziren: energia = 2,05 MJ, sortaren sekzioa = 40 cm^2 eta iraupena = 4 ns [16]. Beraz, kalkulu txiki batzuk eginez eremu elektrikoa 10^{10} V/m ingurukoa zela ondoriozta dezakegu. Bestalde, 2022an ere, baina abuztuaren 15ean Txinako «Steady High Magnetic Field Facility»-n 45,22 T balioko eremu magnetiko egonkorra lortu zen [17]. Beraz, agerian geratzen da partikula birtualak sortu ahal izateko eremuak oso-oso bortitzak izan behar dutela, maila makroskopikoan lortu ezinak. Baina, eskolan egiten dugun bezala, elektroi puntualari eremu elektrikoa kalkulatzeko Coulomben legea aplikatzen badiogu ohartuko gara elektroiaren kokapenetik 40 femtometro ingurura (40×10^{-15} m) eremu elektrikoa balio bortitz horren ingurukoa dela. Beraz, distantzia horietara partikula-antipartikula birtualen sorrera nabarigarria da. Partikula-antipartikula bikote birtuala sortzeko biderik errazena, probableena, elektroi-positroi bikote birtuala sortzea da, partikula arinenak baitira. Halaber, ezagutzen ditugun partikula guztien birtualak (partikula-antipartikula bikote guztiak) sor daitezke, probabilitate txikiagoekin bada ere.



2. irudia. Ezkerretik eskuinera bidaiatzen duen fotoiak sortzen duen partikula-antipartikula bikote birtual baten begizta-diagrama, hutsaren polarizazioa adierazten duena. Fotoia ezkerretik eskumara joanez X - \bar{X} bikote birtuala sortzen du eta gero bikote birtualak bat egiten du berriro eskumarantz doan fotoia bilakatuz.

Muoiak elektroiaren lehengusu pisutsua da. Biek propietate kuantiko berak dituzte, hala nola, besteak beste, karga elektrikoa eta spina. Biak leptoiak dira, baina muoiak elektroia baino 207 aldiz pisutsuagoa. Horrek muoiak egonkorak ez izatea egiten du, betiko ez bizitzea. Izan ere, $2,2 \mu\text{s}$

baino ez dira bizi (zuzenagoa da idaztea hori dela muoiaren semidesintegratio-periodoa, hemendik aurrera errazte arren erdibizitza deituko duguna) eta partikula arinagoetan desintegratzen da. Honexegatik ez dituzte molekula osatzen, ez eta mendiak edo materia makroskopikoa ere.

Muoiak aurkituak izan zirenean, inork ez zituen espero. Erradiazio kosmikoa aztertzen ari zirelarik, *Carl David Anderson* eta *Seth Neddermeyer* zientzilariek 1936ean aurkitu zituzten. Izan ere, *Openheimerren* lagunak, *Isidor Isaac Rabi* fisikariak (Openheimer filmean hainbatetan agertzen denak), 1944eko Nobel saridunak, honela esan zuen: «*Nork 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 kalkulua teorikoa eta neurketa esperimentalak *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) kalkulua teorikoa egiteko, baina muoiaren momentu magnetikoaren emaitza teorikoa eta esperimentalak ez datoz bat zehaztasun berarekin (azken kasu honetan, (4) adierazpenaren arabera, 8 hamarrekora mugatzen da).

Muoiaren kasurako kalkulua teorikoa balio esperimentalekin bat ez datozela ziurtatzen bada, *SM* ereduaren zerbait falta daitekeela adieraz dezake. Hau da, *SM* ereduaren barnean gaur egun existitzen diren partikulez edo indarrez/interakzioez gaindi zerbait gehiago egon beharko litzatekeela. Horrek esan nahi du, elektroien kasuan gertatzen ez den bezala, muoiek hutsa polarizatzen dutenean *SM* ereduaren 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 esperimentuaren arabera, desadostasuna 2.7σ baliokoa zen. Ostean, teorikoa kalkulua zehaztasuna hobetzen jarraitu dute, eta horrek, aipatu bezala, desorekaren garrantzia $3,7\sigma$ -raino handitu zuen 2020an [13]. Orain, berriz, FNAL Fermilab-ean, BNL-ko magnetoak erabiliz egindako azeleragailu berriaren lehen esperimentuek diote desadostasuna 4.2σ baliora (ikus 4. irudia) igo dela [18].

Muoia etengabe interaktuatzan ari da etengabe agertzen eta desagertzen diren partikula birtualekin (elektroien kasuan ere gauza bera gertatzen da). Partikula birtual horien agerpen eta desagertzen jarraituen probabilitate mekaniko-kuantikoak zehaztasun itzelez kalkulatu daitezke, baina 2 eranskinen ikus daitekeenez borroka itzela dago elektroien kasuan lortutako finetza/zehaztasuna muoiaren kasuan lortzeko. Partikula birtualen jario fluk-

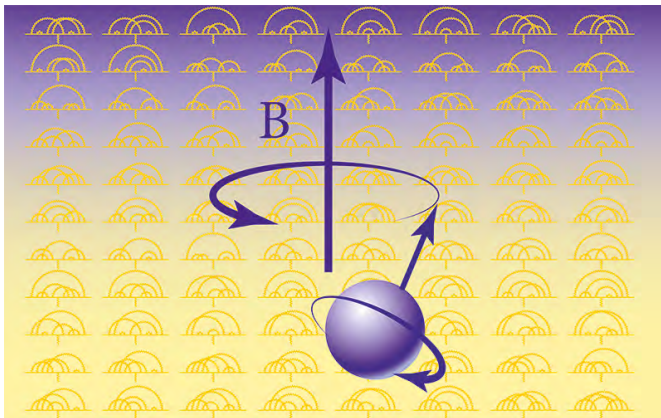
tuatzaile horrek g -faktorea aldatzen du. *Muoiaren $g-2$* «anomalia» honela definitzen da:

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

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

«Anomaliak» jarraitzen badu, hots, desadostasuna benetakoa bada, horrek esan nahiko luke gaur 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-anti-partikula bikoteak ez direla nahiko desadostasuna azaltzeko esan nahi du. Beraz, beste partikula (eta bere antipartikula), *SM* ereduan 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 interakzioengatik *Z* bosoiarekiko apur bat desberdintzen den bikotekidea [19],
2. *leptoquarka*, materiaren partikula mota biren arteko hibrido hipotetikoa (partikula hipotetiko horrek leptoiaren eta quarken arteko zubia osatuko luke *Leptoiaren unibertsalitatea* apurtuz) [20], edo
3. *Higgs bosoiaren* senide bat edo
4. beste partikula ezezagunaren bat.



3. irudia. Muoi baten momentu magnetikoaren prezisio-biraketa B eremu magnetikoaren inguruan. Hondoan ageri diren diagramak Feynman-en diagramak dira. Fisikari teorikoek partikularen momentu magnetikoa eta haren momentu angeluarra lotzen dituen g faktorea kalkulatzeko erabiltzen dituzte. Iturria: APS/Carin Cain.

3. MUOIEN $g-2$ ESPERIMENTUA FERMILABean

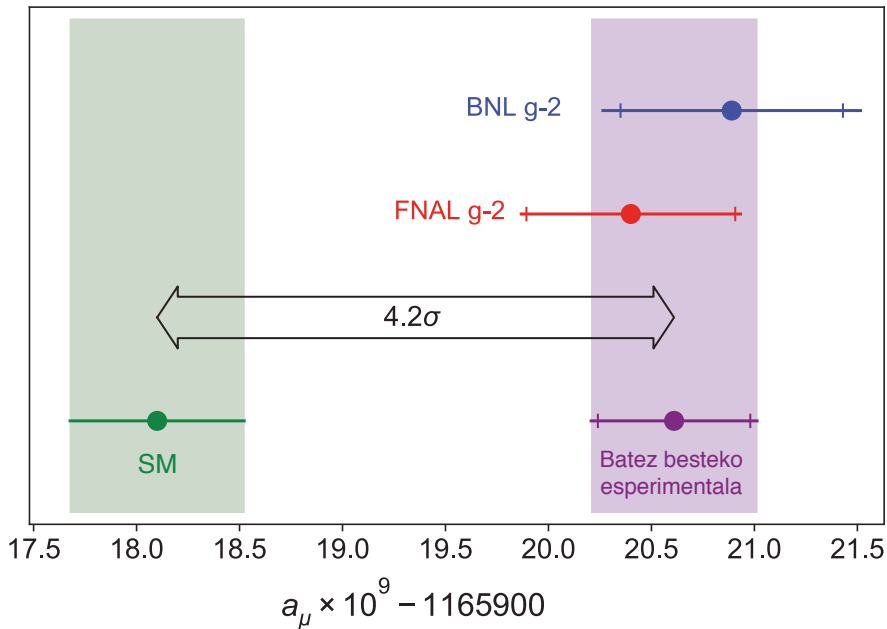
Muoia eremu magnetiko batean kokatzen bada, haren spinak eremuaren norabidearen inguruan prezesioa agertuko du (mekanika kuantikoaren ziba birakaria). Biraketa-maiztasunaren balioa muoiarekin etengabe interaktuaten ari diren partikula birtualen karga-banaketaren arabera, oso garrantzitsua da neurketa ahal den finenak egitea, zeren prezesio-maiztasunaren neurketak «anomaliaren» eta, beraz, partikula birtualen efektu orokorra determinatzen baitu.

Fermilab-eko azeleragailuak *muoi*en $g-2$ esperimentuak BNL-n, erabilitako teknika berari jarraitzen dio. Muoi polarizatuak, spinak beren mugimenduaren norabidearekin lerrotatuta dutenak, 14,2 metro diametroko biltegitratze-eratzun batean injektatzen dira argiaren abiaduratik hurbil, eta han, milaka aldiz biratzen dira. Desintegratu ahala, muoiak positroi bilakatzen dira, eta azken horiek eratzunaren barneko zirkunferentzia estaltzen duten kalorimetroen bidez detektatzen dira: muoiaren presentzia horrela ondorioztatzen da. Eratzunaren barruan, muoiak zirkulu batean bidaiatzen mantentzen dituen 1,45 T-ko eremu magnetikoak muoiaren ibilbidean spinaren prezesioa 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 bera izango litzateke ($T_{zk} = 2\pi/\omega_{zk}$, non $\omega_{zk} = qB/m$ den abiadura ez-erlatibistetarako), eta muoiaren biraketa-norabideak muoiaren momentu-bektorearen erritmo berean biratuko litzateke. Aldiz, BLN-n egindako esperimentuek erakusten dute biraketa-norabideak apurka-apurka sinkronizazioa galtzen duela. Maiztasun-ezberdintasun horri ω_a prezesio «anomaloa» deritzo [21]. Aurretik aipatu bezala, prezesio anomaloa gertatzen da etengabe sortzen/deuseztatzen diren partikula/antipartikula bikote birtualen jarioak muoiaren gainean duen eraginagatik (elektroiaren kasuan gertatzen den bezala). Elektroiaren kasuarekin alderatzen badugu, beheko (4) adierazpenak dio 2020an plazaratutako muoiaren μ_μ -ren balio teoriakoak 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:

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

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



4. irudia. Goitik behera eta eskuinean: a_μ muoien «anomaliaren» balio esperimentalak, BNL (E821) eta FNAL (E989) esperimentuetan lortuak, eta bi emaitza esperimentalen konbinatuaren batez bestekoa. Ezkerrean: «*Muon g-2 Theory Initiative*»-k SM-rako gomendatutako balio teorikoa ageri da [13]. Marra zabalek ekarpen estatistikoa ziurgabetasun osoari adierazten dute. Iturria [18].

Muoien g-2 esperimentuak ez dira batere errazak, oso-oso korapilatsuak dira. Errore-parametro asko daude, eta bereziki, nire ikuspegitik, lau dira nabarmenenak:

1. FNAL Fermilab-eko eraztunean muoiek jarraitzen duten ibilbidea, muoiak ez baitira zuzenean detektatzen. Desintegratu ostean sorturiko positroiak dira detektatzen direnak.
2. Kalorimetroen analisitik eratorritako ω_a prezisio «anomaloa».
3. Muoiek jarraitzen duten ibilbidean dagoen eremu magnetikoa. Fermilab-en eremu hori neurtzeko erresonantzia magnetiko nuklearean, *NMRn*, oinarrituriko zundak erabiltzen dira, finkoak eta mugikorak, eta horretarako zundetako protoien maiztasuna neurtzen da, eta eskalatu eta ibilbiderako batezbestekoa egin ostean, ϖ_p balioa lortzen dute [22, 23].
4. Maiztasun biak mugatzeko muoi-sortaren dinamikaren ezagutza oso xehea behar da [24].

Horrek guztiak egiten du «anomalia» bi maiztasunen ratio bezala definitu beharra; hots,

$$R' = \frac{\omega_a}{\overline{\omega}'_p}. \quad (5)$$

R' balioa, bi maiztasunen zatiketa izanik, oso arriskutsua da, oharkabean ikertzaileek analisisia zuzendu eta erantzun jakin bat emateko bidea ireki baitaiteke. Hori saihesteko, «*itsua*» deritzon metodologia erabiltzen da. Lankidetzatik kanpoko bi zaindarik isilpeko ω_a maiztasun bat aplikatzen diote kalibratzeko erabiltzen den erloju bati, eta maiztasun horren balioa datuen azterketa osatu ondoren bakarrik adierazten dute [25].

2023ko uztailaren 24an, Liverpooleko unibertsitatean, Fermilab-en egindako azken neurketen emaitzak plazaratu zituzten [26]. Izan ere, zientzialariak aipatu unibertsitatean bildu ziren, «*itsu*» metodologiari jarraitu ostean emaitzak itsugabetzeko (to unblind blinding results). Honako emaitza hau lortu zuten:

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

Ohart zaitezketenez, 2023ko esperimentuaren emaitza 2021ekoa baino bi aldiz zehatzagoa da (ikus zehaztasuna adierazten duten parentesien arteko balioak) eta σ balio estatistikoa kontuan hartzen badugu, desberdintasuna 5σ balioraino iristen da.

5σ balioa, aurretik aipatu bezala, nahikoa izan zitekeen ondorioztatzeko SM eredia kasu honetan ez dabilela ongi eta, partikula-antipartikula birtuailen artean, gaur egun SM erudian ez dagoen beste partikularenekin bat kontuan hartu behar dela.

Hala ere, $g-2$ esperimentuaren komunitatea zuhurtziaz jokatzeko arri da: alde esperimentalean konfiantza izan arren, zati teorikoaren aurreikuspena, haien ustez, are gehiago zehaztea komenigarria litzatekeelako. Aipatu beharra dago 2021ean «*lattice QCD*»-ren bidez egindako beste kalkulu batzuk hemen erakutsi direnak baino hurbilago daudela esperimentuetatik [27] (ikus 2 eranskina). Arazoa da 2. irudian ageri diren X partikula/ \bar{X} antipartikula birtuailak oso bortizki interaktuatzeko duten hadroiak izan daitezkeela ere. Adibidez, jo dezagun *charm* c quark-a eta *anticharm* \bar{c} antiquark-a direla. Horiek elkarren artean oso bortizki interaktua dezakete gluoiak igorri eta xurgatuz. Kalkulu horiek oso korapilatsuak dira, eta kalkuluen ondorioak beharrezko doitasunez lortzeko (esperimentuen doitasun-mailara heltzen direnak), «*lattice QCD*» hurbilketa erabiliz egin daitezke,

baina orain arte doitasun-maila horrekin talde bakar bat izan da gai horrelako balioak aurkezteko [27] (ikus 2 eranskina). Kalkuluak hobetzeko, fisikariak lana itzela egin dute eta egiten ari dira azken urte hauetan. Are gehiago, 2 eranskinean ageri denez, muoiaren momentu magnetiko-teorikoa lortzeko erabiltzen diren bi hurbilketek arazoak dituzte: espero gabeko emaitzak ematen ari dira, eta oraindik lan itzela geratzen zaie fisikari teoriei agertzen ari diren arazo espero gabekoak gainditzeko.

4. EZTABAIDA ZIENTZILARIEK ZIENTZIA ZABALTZEKO ERABILITAKO BIDEAZ

2021ean $4,2\sigma$ balioko desadostasuna plazaratu zenean, bildutako data guztiaren % 6 besterik ez zen aztertu, eta Fermilab-eko talde esperimentalak, argitalpen zientifiko baten bidez egin beharrean, prentsa-agerraldi bat deitu zuen lehenik, euren neurketek BNLn 2001ean egin ziren neurketekin bat zetozela adierazteko, eta, beraz, teoriarekin ez zutela bat egiten esateko. Bildutako data guztiaren % 6 aztertuta zegoen!!! Ez zuten itxaron dataren beste % 94a aztertu arte, data guztia aztertu arte, ondorio benetan esanguratsu baten berri emateko.

Aipatu ondorioa, $\frac{g_\mu}{2} = 1,00116592089$, prentsa-agerraldi batean iragarri zenean hedabideek eztanda egin zuten ratio giromagnetikoaren, g faktorearen, azken neurketei buruzko artikuluekin (*New York Times*ek prentsa-agerraldiaren ostean argitaratu zuen artikulua [28] erreferentzian aurkitu daiteke).

Bestalde, fisikariek aipatu prentsa-agerraldia egin zutenean adierazi zuten teoriarekiko desadostasunak 2021. urtean $4,2\sigma$ balioraino eta bi urte geroago, 2023an, 5σ balioraino heltzen direla [26]. Galdera da zer balio teorikorekiko? Zoritxarrez, muoiaren momentu magnetikoa kalkulatu dute bi talde teoriko erraldoiek emaitza desberdinak lortzen dituzte, eta aipatu prentsa-agerraldian alderaketa, bereziki, balio teoriko batekiko egiten da, esperimentuekiko adostasun gutxien erakusten duenarekiko, hain zuzen; hots, «*Muon $g-2$ Theory Initiative*» talde erraldoiak WP-Liburu Zurian ematen duen balio teorikoarekiko [29] (ikus 2 eranskina). Han, HVP (hutsaren polarizazio hadronikoa) zenbatesteko, kalkuluaren errore nagusia ematen duena, *datuetan oinarritutako hurbilketa* erabiltzen dute. Beste taldeak «*lattice QCD*» hurbilketa erabiliz muoiaren momentu magnetikoa kalkulatu du, eta aurkeztutako balioa esperimentaletik gutxiago aldentzen da [30] (ikus 2 eranskina). Elkarren artean lehiatzen dira, eta ez daude ados muoiaren kasuan lortutako emaitzekin, aurreko parrafoan ageri den bezala. Beraz, aipatu bi taldeen emaitzek bat egiten ez dutenez, ba al du zentzurik 5σ balioko desadostasuna iragartzeak?

Nire uste apalean, esperimentuak egin dituzten fisikariek bilduriko data osoa aztertzen bukatu arte eta lehia dauden bi metodologia/hurbilketa desberdinak erabiltzen dituzten bi talde teorikoen adostasuna lortu arte, itxaron egin beharko litzateke ondorio bat ateratzeko.

Prensa-agerraldiak ez dira berriak; nire ustez, lehena John Bardeen-ek eta Walter Brattain-ek aurkitutako kontaktu-puntuko trantsistorea aurkezteko Bell Labs-ek deitu zuena izan zen, 1948an. Harrezkero, hainbat egin dira, eta zenbait esparrutan nahikotxo. Sarreran aipatutako OPERA esperimentukoek ere, 2011n prentsa-agerraldi bat deitu zuten, neutrinoak argiaren abiadura baino arinago mugitzen zirela neurtu zutela informatzeko, behaketaren eta teoriaren arteko desadostasuna 6σ baino esanguratsuagoa zela adierazi zuten. Horrelako emaitza potoloa, gaur egungo ezagutza sendoaren erabat aurka doana, iragartzeko maila altuko nazioarteko argitalpen bat erabili beharrean (non esparruko adituek aurkeztutako materiala aztertzen baitute), prentsa-agerraldi bat deitu izana sinestezina egiten zait. Ondorioa ere horrelakoa: «Ustea erabat ustel!!».

Nire ustez, honek guztiak agerian uzten du zientzialariok ere gaur egungo hedabideek erakusten duten «presa»ren eta «morboa»ren joera berretara hurbiltzen ari garela. Arrazoiak desberdinak izan daitezke: lehenak izateko nahia, emaitzak erakusteko beharra, finantziazioa errazago lortzeko gogoia, prentsako lehen orrialdean atera nahi izana...

Bestalde, azken lerroetan eztabaidatutakoa at utzirik ere, $g-2$ esperimentuaren komunitateak zuhurtziaz jokatu beharko luke, zeren eta, urte honetan bertan, *Belle II* [31] eta *LHCb* [32,33] lankidetzek plazaratu dutenez, beste «anomalia» batek, *leptoiaren unibertsalitatearen*ak, ez baitirudi *SM* ereduarekiko «anomalia» izaten jarraitzen duenik, lan horien arabera. Beraz, azken aipatutako emaitzek, $g-2$ esperimentuak ez bezala, *SM* ereduare gehiago sendotzen dute.

Bestalde, 2023an argitaratutako elektroiaren g -faktore esperimentalek berresten dute (2) adierazpenean erakusten direnak [34]. Hau da, balio esperimentalek eta teorikoek elektroiaren kasuan bat egiten dutela 12 hamarrekotan. Gauza bera espero genezake muoiaren kasuan ere, baina *QCD*-ren ekarpenak partikularen masaren karratuaren menpekoak dira,

$$\frac{\text{Elektroiaren } QCD - \text{ekarpina}}{\text{Muoiaren } QCD - \text{ekarpina}} \approx \left(\frac{m_e}{m_\mu}\right)^2. \quad (7)$$

Elektroiaren masa muoiarena baino 207 aldiz txikiagoa denez, (7) adierazpenak dio elektroiaren *QCD*-ekarpina 40.000 aldiz txikiagoa dela muoiarena baino!! Beraz, errore esperimentala baino askoz txikiagoa. Hau da, elektroiaren $g-2$ balioari *QCD*-k egiten dion ekarpina ezin da neurtu.

Muoiaren $g-2$ «anomaliaren» *sigma* balioa 2023ko udan handitu dela iragarri den arren, apustu egin beharko banu, «anomalia» hori azkenean desagertuko dela apustu egingo nuke. *Muoiaren $g-2$* «anomalia»-ren desagertzeaz egiten dudana apustua bereziki kalkulu teorikoetan oinarritzen dut, nire ustez ez daudelako oraindik behar bezain garatuak ondorio apropos bat emateko (ikus 2 eranskina). Oraindik lan teoriko asko dago egiteko, eta prentsan agertu den 5σ balioa *WP-Liburu Zurian* argitaratutako balioarekiko da eta ez argitaratutako «*lattice QCD*» hurbilketaren bidez eginiko kalkuluekiko. Halaber, oraindik ez denez «anomalia» bat ere gauzatu, egin-dako apustuaren alde egitera bultzatzen nau.

Beraz, idatzita geratzen da nire apustua!!

Apustua galduko banu, oso ona litzateke fisika komunitaterako, *fisika berria* aurrez aurre izango genukeelako.

Amaitzeko, *Zee* zientzialariaren iragarpena idatziko dut: «*muoiaren $g-2$* «anomalia» gauzatzen bada, ez dut uste *SM* teoria oso sendoaren desagertzea ekarriko duenik. Ziurrenik, orain arte ezezaguna zen partikula kargatu berri bat sartu beharko genuke *SM* teorian, besterik ez» [9].

Beraz, irakurle, edozein kasutan ere ez dirudi Oinarrizko Partikulen Eredu Standarra, *SM*, kinka larrian dagoenik.

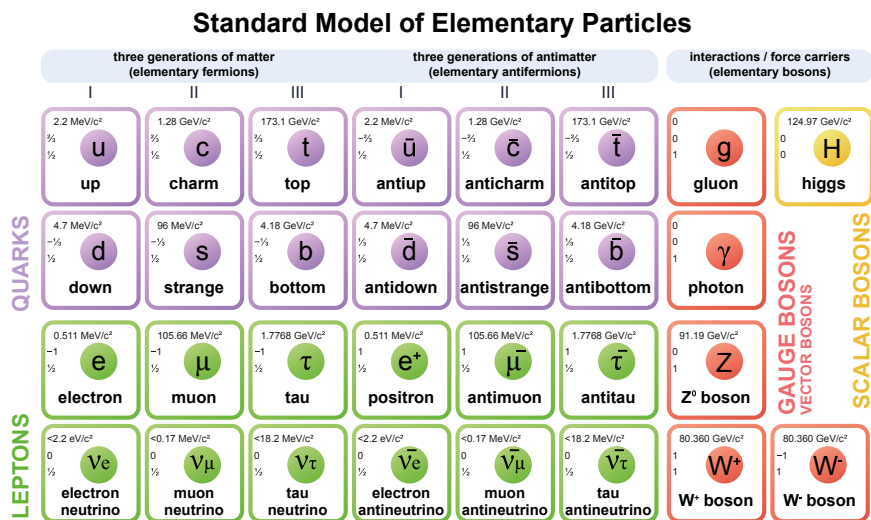
BIBLIOGRAFIA

- [1] D. GARISTO, 2020 American Physical Society. «The Era of Anomalies» *Physics*, **13**:79.
- [2] P. CUSHMAN, 2021 American Physical Society. «Muon's Escalating Challenge to the Standard Model» *Physics*, **14**:56.
- [3] Pedro Miguel ETXENIKE, José María PITARKE, Fernando 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. <https://indico.ific.uv.es/event/6735/sessions/2769/>
- [5] E. LAMB, 2012. «5 Sigma What's That?» *Scientific American (Observations)*. <https://blogs.scientificamerican.com/observations/five-sigmawhats-that/>.
- [6] EDITOR, 2016. «Editorial: Theorists React to the CERN 750 GeV Diphoton Data» *Phys. Rev. Letter*, **116**: 150001.
- [7] R. HALANDER, J. P. MARTINEZ and G. SCHIEMANN, 2023. «The end of the particle era» *Eur. Phys. J. H*, **48**:6.
- [8] Max PLANCK, 1899. «Über irreversible Strahlungsvorgänge» *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*

- 5:440-480. (478-480 orrialdetan ageri dira gaur egun deritzegun Planck-en unitateen lehen agerpena).
- [9] A. ZEE, 2023, «Quantum Field Theory, as simply as possible» Princeton University Press, New Jersey. ISBN 978-0-691-17429-7.
- [10] G. W. BENNETT *et al.*, 2006 (Muon $g-2$ Collaboration). «Final report of the E821 muon anomalous magnetic moment measurement at BNL,» *Phys. Rev. D*, **73**:072003.
- [11] J. GRANGE *et al.*, 2018. «Muon ($g-2$) Technical Design Report,» arXiv:1501.06858.
- [12] <https://muon-g-2.fnal.gov/bigmove/>.
- [13] T. AOYAMA *et al.*, 2020. «The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model» *Phys. Rep.*, **887**:1.
- [14] Julian SCHWINGER, 1948. «On Quantum-Electrodynamics and the Magnetic Moment of the Electron» *Physical Review*, **73**:416.
- [15] A. ZANGWILL, 2013. «Modern Electrodynamics» Cambridge University Press, Cambridge, UK, 47 orria. ISBN 978-0-521-89697-9.
- [16] B. EVANGELISTA, 2023. »Laser focused: Power and finesse drove fusion ignition success» (<https://www.llnl.gov/archive/news/laser-focused-power-finesse-drove-fusion-ignition-success>).
- [17] <https://www.sciencealert.com/scientists-just-broke-the-world-record-for-the-most-powerful-stable-magnetic-field>.
- [18] B. ABI *et al.*, 2021 (Muon $g-2$ Collaboration). «Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.46 ppm» *Phys. Rev. Letter*, **126**:141801.
- [19] E. K. CARLSON, 2020 American Physical Society. «Closing in on the Z' Boson» *Physics*, **13**:s43.
- [20] G. HILLER, 2014 American Physical Society. «A challenge to Lepton Universality» *Physics*, **7**:102.
- [21] T. ALBAHRI *et al.*, 2021 (Muon $g-2$ Collaboration). «Measurement of the anomalous precession frequency of the muon in the Fermilab Muon $g-2$ Experiment» *Phys. Rev. D*, **103**:072002.
- [22] M. SCHIRBER, 2021 American Physical Society. «Measuring the magnet that measures the muon» *Physics*, **14**:53.
- [23] T. ALBAHRI *et al.*, 2021 (Muon $g-2$ Collaboration). «Magnetic-field measurement and analysis for the Muon $g-2$ Experiment at Fermilab» *Phys. Rev. A*, **103**:042208.
- [24] T. ALBAHRI *et al.*, 2021 (Muon $g-2$ Collaboration). «Beam dynamics corrections to the Run-1 measurement of the muon anomalous magnetic moment at Fermilab,» *Phys. Rev. Accel. Beams*, **24**:044002.
- [25] «Blinding experiments» <https://www.youtube.com/watch?v=HtdVH1Wp7fs&t=74s>.
- [26] K. WRIGHT, 2023 American Physical Society. «Mismatch with Standard-Model predictions reaches 5 sigma» *Physics*, **16**:139.
- [27] Sz. BORSANY *et al.*, 2021. «Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD» *Nature* **593** (7857):51-55.

- [28] <https://www.nytimes.com/2021/04/07/science/particle-physics-muon-fermilab-brookhaven.html?searchResultPosition=7>.
- [29] T. AOYAMA *et al.*, «The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model» <https://arxiv.org/pdf/2006.04822.pdf>
- [30] Sz. BORSANYI *et al.*, <https://arxiv.org/pdf/2002.12347.pdf>
- [31] L. AGGARWAL *et al.*, 2023 (Belle II Collaboration). «Test of Light-Lepton Universality in the Rates of Inclusive Semileptonic B -Meson Decays at Belle II» *Phys. Rev. Letter*, **131**:051804.
- [32] R. AAJ *et al.*, 2023 (LHCb Collaboration). «Test of Lepton Universality in $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ Decays» *Phys. Rev. Letter*, **131**:051803.
- [33] R. AAJ *et al.* (LHCb Collaboration), 2023, «Measurement of lepton universality parameters in $B^+ \rightarrow K^+ \ell^+ \ell^-$ and $B^0 \rightarrow K^{*0} \ell^+ \ell^-$ decays», *Phys. Rev D* **108**, 032002.
- [34] X. FAN *et al.*, 2023. «Measurement of the electron magnetic moment» *Phys. Rev. Letter*, **130**: 071801.
- [35] D. P. AGUILLARD *et al.*, 2023, (Muon $g - 2$ Collaboration), «Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.20 ppm,» *Phys. Rev. Lett*, **131**: 161802.
- [36] Y.-B. YANG, J. LIANG, Y.-J. BI, Y. CHEN, T. DRAPER, K.-F. LIU, and Z. LIU, 2018, «Proton mass decomposition from the QCD energy momentum tensor,» *Phys. Rev. Lett*, **121**: 212001.
- [37] T. BLUM *et al.*, 2023, (RBC and UKQCD Collaborations), «Update of Euclidean windows of the hadronic vacuum polarization», *Phys. Rev. D* **108**: 054507.
- [38] F. V. IGNATOV *et al.*, 2023, (CMD-3 Collaboration), «Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ cross section from threshold to 1.2 GeV with the CMD-3 detector,» arXiv:2302.08834.

1 ERANSKINA. OINARRIZKO PARTIKULEN EREDU STANDARRA (SM)



Oinarrizko Partikulen Eredua Standarra (SM). Irudian antipartikulak ere irudikatu dira.

Iturria: Wikimedia Commons.

Oinarrizko Partikulen Eredua 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 haren portaera zuzentzen duten oinarrizko indarren ulermen orokorra ematen du. Eredua Estandarra sekulako arrakasta izan du behaketa esperimental sorta zabala azaldu eta iragartzeko orduan, baina mugak ere baditu eta ez da Orogen/Guztiaren Teoria osoa, ez baitu, beste gauza batzuen artean, grabitatea barne hartzen.

1. Oinarrizko Partikulak

Eredua estandarra 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 lepto daude: *elektroia, muoia* eta *tau*, bakoitza bere neutrinoarekin: *neutrino elektronikoa, neutrino muonikoa* eta *tau neutrinoa*.

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

Gluiak: Indar nuklear bortitzaren bitartekariak dira, quarkak hadroien barruan elkartzen dituena. Gainerako indar-bitartekari gehienek ez bezala, gluiak berek garraiatzen dute indar bortitzaren kolorekarga.

Fotoiak: Indar elektromagnetikoaren bitartekariak dira, kargatutako partikulen arteko interakzioen ardura dute. Ez du masarik eta argiaren abiaduran bidaiatzen du.

***W* eta *Z* bosoiak:** indar nuklear ahularen bitartekaritzaren arduradunak dira, partikula erradioaktiboan beta-desintegrazioa bezalako prozesuak zuzentzen dituena. *W* bosoiak bi barietatetan agertzen dira: W^+ eta W^- 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*) deskribatua, indar hau kargatutako partikulen arteko elkarrekintzen erantzulea da eta indarraren bitartekariak fotoiak dira.
- **Indar Nuklear Ahula:** Teoria elektroahulak deskribatua, indar honek *W* eta *Z* bosoi trukea dakarten prozesuak zuzentzen ditu. Beta desintegrazioaren eta neutrinoen arteko interakzioen ardura du.
- **Indar Nuklear Bortitza:** Kromodinamika kuantikoak (*QCD*) deskribatua, indar honek quarkak hadroien barnean batzen ditu eta gluiak 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 hori *Sheldon Glashow*, *Abdus Salam* eta *Steven Weinberge*k proposatu zuten.

Teoriaren gako bat 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 hamaikada 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.

2 ERANSKINA. **SM EREDUAN BARNE MUOIAREN MOMENTU MAGNETIKOAREN KALKULU TEORIKOA**

Oinarrizko Partikulen Eredu Estandarrean (*SM* ereduan) muoiaren momentu magnetikoa egitura fineko α konstantearen perturbazio-garapen baten bidez kalkulatzen da. Garapen horren ekarpenak *SM* barruan sor daitezkeen partikula-antipartikula birtual guztiak dira (ikus 1 eranskina). Izan ere, garapena deskonposa daiteke elektrodinamika kuantikoaren (*QED*) kontribuzio puruetan, elektroahuletan eta hadronikoetan. *QED*-en ekarpen purua handiena da, eta Schwinger-en $\alpha/(2\pi)$ gaia da ekarpen horren lehena (ikus 4 KUTXA) eta α^5 ordenaraino garatzen da. Azken horren eta kontribuzio elektroahulen ziurgabetasuna, esperimental baina askoz txikiagoak dira. Muoiaren momentu magnetikoaren kalkuluaren errore teorikoaren iturri nagusiak ekarpen hadronikoak dira, hau da Kromodinamika Kuantikoarekin, *QCD*-rekin, lotuak eta hauetatik nagusia α^2 -ordenako *HVP* hutsaren polarizazio hadronikoa (2 irudian *X* partikula hadroia denean) gaiarekin lotuta dagoena.

Muoiaren «anomalia» magnetikoaren, $a_\mu \equiv (g-2)_\mu/2$, balio esperimentalaren eta teorikoaren arteko gaur egungo bateraezintasunak, partikulen fisikako komunitatean interes handia sortu du. Oraindik aurkitu ez diren partikulak izan baitaitezke bateraezintasun horren sorburu.

Muoiaren «anomalia» magnetikoa nondik datorren argitzeko eta «anomalia» horrek *fisika berria* iragartzen ari ote den zehazteko, behar-beharrezkoa da:

1. muoiaren momentu magnetikoaren neurketa esperimental hobe-tzea (3 atalean adierazia) eta,
2. muoiaren momentu magnetikoaren estimazio/zenbatespen teorikoa *SM* barruan hobetzea neurketa esperimentalaren errorearekin bat datorren mailara arte.

Helburu horrekin, 2020ean «*Muon g-2 Theory Initiative*» taldea sortu zen, *SM*-ren alderdi guztiak ebaluatzeko eta muoiaren momentu magnetikoaren emaitza esperimental berriekin alderatzeko balio teoriko bakar bat gomendatzeko. Hau da, balio teoriko onartu bakar bat proposatzea neurketa esperimentalak hobetuz doazen heinean balio bakar horrekiko alderatzeko/erkatzeko.

«*Muon g-2 Theory Initiative*» taldearen lehen ondorioa izan zen 2020ean Liburu Zuria (*WP*) aurkeztea [29]. *WP*-ren idazkeran hainbat autoretok parte hartu zuten. Muoiaren momentu magnetikoaren *SM* barneko estimazio/zenbatespen teorikoaren ziurgabetasun nagusia elkarrekintza nuklear bortitzaren ekarpenetan dagoenez, hori gainditzea da «*Muon g-2 Theory Initiative*» taldearen helburu nagusia.

WP Liburu Zurian emaitza esanguratsu berriak aurkezten dira, baita aurreko lanen berrebaluazioak eta laburpenak ere. Aurrerapen bereziki garrantzitsuak lortu dira ikuspegi desberdinen azterketen ondoren, datu-multzo zahar eta berrien kopuru handia oinarritzat hartuta *HVP*-ren ekarpena lortzeko.

WP Liburu Zuria argitaratu zenean, 2020ean, *HVP*-ren balioa e^+e^- datuetatik (*datuetan oinarritutako hurbilketatik*) abiatuta zehazten da. *WP*-n aipatzen denez, «*lattice QCD*» lehen printzipioetan oinarritutako ahalegin teoriko berriaren emaitzek, etorkizun handikoak izan arren, ebaluazio globalean sartzeko beharrezko zehaztasun- eta koherentzia-mailara ez zirenez iristen, ez ziren kontuan hartu (2023an gauzak aldatu ziren; ikusi aurrerago).

Hadroi birtualek muoiaren momentu magnetikoan duten eragin garbia —hutsaren polarizazio hadronikoa (*HVP*) deiturikoa— zehaztasun handiz kalkulatzeko zeregin titanikoa da, eta, beraz, fisikari teorikoek trikimailuak/hurbilketak erabiltzen dituzte:

1. *Datuetan oinarritutako hurbilketan* (hurbilketa hau *HVP* kalkulatzeko erreferentziatzeko metodoa izan da bi hamarkadatan), *HVP* kalkulatu da elektroi-positroi talketatik lortutako datu esperimentalak erabiliz. Horretan datza trikimailua/hurbilketa. Elektroi-positroi talketan hadroiak sor daitezke, eta ikertzaileek, zati hori hautatzen dute, zehazki. Elektroiak eta muoiak partikula-familia berekoak direnez, elektroi-positroi talketan benetako hadroiak sortzeko probabilitatea hadroi «birtualek» muoiaren momentu magnetikoan duten eraginarekin lotuta dago. Hala ere, esperimentuetatik aipatutako data jasotzea ez da batere erraza. Izan ere, *HVP* kalkulatzeko behar den informazioa energia baxuko talketatik etorri behar du (≤ 2 GeV), baina instalazio gehienak ≥ 10 GeV energia altuko talkak aztertzeko diseinatuta daude (BaBar USAn eta KLOE Italian, adibidez).

Data desberdinak erabiliz egindako *HVP*-ren zenbatespenak ez dutoz bat; beraz, 2020an, «*Muon $g-2$ Theory Initiative*»-k % 0,6 inguruko ziurgabetasuna (errore-barrak) duten *datuetan oinarritutako HVP*-ren batez besteko balioa zehazteko zenbatespenak bildu zituen. Balio hori beste kalkulu batzuekin konbinatuz, «*Muon $g-2$ Theory Initiative*» taldeak iragarri zuen momentu magnetiko anomalia balio honetakoa zela:

$$a_\mu \equiv (g-2)_\mu/2 = 0,00116591810,$$

zehaztasuna 0,4 zati milioiko (ppm) baliokoa izanik eta *HVP*-ren ekarpenaren ziurgabetasuna nagusiki mugatzen du.

Balio teoriko hori 2023an *muoiaren $g-2$ esperimentuan* iragarritako balioa baino 2,1 ppm baxuagoa da [35].

2. Azken urteotan, beste metodo bat, «*lattice QCD*» delakoa, alternatiba bideragarri bihurtu da. Metodo honen trikimailua denbora-espazio diskretizatzean datza, muoi batek etengabe sortu/desagertu egiten diren hadroi birtualekin duen interakzioa kalkulatzeko. Ekarpen esperimentalik gabeko lehen printzipioetan du oinarria. «*Lattice QCD*»-ren oinarria kromodinamika kuantikoa da, quarken eta gluoiaren (indar nuklear bortitzaren eramaileen) arteko interakzioak deskribatzen dituen teoria. Kromodinamika kuantikoaren kalkuluak oso zailak dira, eta errazagoak egiteko partikula birtualen (quarken eta gluoiaren) higidura espazio-denboran, sare diskretu (*lattice*) batera murrizten da, xake-aula bateko piezen antzera. Izan ere, quarkak sare diskretuaren ebakidura-puntuetan kokatzen dira, eta gluoiak haien arteko loturetan. Sare-diskretizazio horrek integral matematiko zailak batuketa erabilgarriagoetan deskonposatzea ahalbidetzen du. Baina, horrek erroreak sortzen ditu sare diskretuaren ebakidura puntuen arteko, d distantziaren eta sarearen gutzizko neurrien menpekoak direnak. Errore horiek ezabatzeak sarearen d tartea zerora eramatea dakar. Urrats hori lortzeko, sare-konfigurazio jakin baterako, ikertzaileek hainbat simulazio egiten dituzte d aldatuz, hainbat aldiz exekutatu den esperimentu bat emulatuz eta ondoren, simulazio horien batez bestekoa kalkulatu dute. Prozesu honek konputazio kostu oso handia du, d^6 ordenakoa. Ikertzaileek $d =$ hamarren bat femtometroko (1 femtometro $= 10^{-15}$ m, hau da, nukleo baten zabalera gutxi gorabehera) diskretizazio puntuen arteko distantziak erabiltzen dituzte eta xaxen alboak hainbat femtometrokoak izan ohi dira (ikus [36] xehetasun gehiagorarako). Baldintza horietarako *HVP* balioaren kalkuluek %3 inguruko errore-barrak izan ohi dituzte, «*datuetan oinarritutako hurbilketan*» lortutako emaitzen erroreak baino handiagoak.

Egoera hori 2021ean erabat aldatu egin zen, Budapest-Marseilla-Wuppertal Lankidetzak (*BMW*) %0,8ko erroreko (errore-barrak) *HVP* balioa argitaratu zuenean [27]. Hau izan zen «*lattice QCD*» delakoa benetan «*datuetan oinarritutako hurbilketan*»-rekin lehiakorra izan zen lehen aldia. Lankidetzak sare-simulazio ugari egin zituen, eta, horri esker, kalkuluen ziurgabetasun estatistikoak eta sistematikoak murriztu zituzten. Lanak hainbat urte eta ehunka milioi orduko prozesamendua eraman zuen superordenagailu handietan. Beste kalkulu batzuekin konbinatzen denean, *BMW*ren *HVP* balioa honako momentu magnetiko anomalo honi dagokio: $a_\mu = 0,00116591954$, eta hori *datuetan oinarritutako iragarpena* baino handiagoa da, gutxi gorabehera 1,2 ppm-tan. *BMW*ren «*lattice QCD*»-ren iragarpena balio esperimenteralera *datuetan oinarritutako hurbilketak* baino gehiago hurbiltzen da, 0,9 ppm-ko desberdintasunarekin.

*BMW*ren emaitzaren eta *datuetan oinarritutako hurbilketaren* arteko desadostasunak muoiaren momentu magnetikoaren ulermen teorikoari bu-

ruzko zalantzak sortu zituen. *BMW*ren emaitza kalkulu ikaragarria da, baina zoritxarrez oraindik %1etik beherako doitasun-maila duen bakarra. Komunitatea, diskretizazio-teknikak eta erroreak murrizteko metodo desberdinak erabiltzen dituzten beste «*lattice QCD*» talde batzuen maila bereko emaitza zehatzen zain dago.

Izan ere, «*lattice QCD*» talde desberdinen emaitzak alderatu arren, eta bide beretik doazen ala ez jakiteko, kalkulu arinagoak lantzen ari dira, *Blumek* eta lankideek frogatu ostean *HVP*ren kalkulua hiru zatitan banatu daitekeela muoiak hadroi birtualekin elkarreragiten duen distantziaren arabera [37]. Bereziki erdiko zatian, «tarteko leihoan», dihardute bertan simulazioek, diskretizazio puntuen arteko distantzien eta erroreak zuzentzeko metodoen mendekotasun txikia izan dezaketelako. Talde horiek, bakoitzak bere aldetik lortutako *HVP*ren emaitzak «tarteko leihoan» bateragarriak dira, baina ez datoz bat *datuetan oinarritutako hurbilketaren* bidez kalkulaturako «tarteko leihoaren» estimazioarekin. Izan ere, «*lattice QCD*» eta *datuetan oinarritutako hurbilketen* bidez erdietsitako «tarteko leihoari» buruzko balioen arteko aldea handiagoa da —estatistikari dagokionez— bi ikuspegi horien *HVP* osoaren zenbatespenen arteko aldea baino. Horrek iradokitzen du «*lattice QCD*» eta *datuetan oinarritutako hurbilketek* «tarteko leihoan» dibergitzen dutela ziurgabetasunak txikienak zirela uste zen tartean, hain zuzen.

Aurreko paragrafoan «*lattice QCD*» hurbilketaren bidez ondorioztutakoa «tarteko leihoan» ez bada ulertzen, *datuetan oinarritutako hurbilketari* ere arazoak agertu zaizkio berriki. 2023ko otsailean Errusiako CMD3 kolaborazioak ≤ 2 GeV energiatan elektroi-positroi talkak eragiten duen VEPP 2000 kolisionatzailean lortutako data aurkeztu zuen, hots, data hori zuzenki adierazgarria da *HVP*-ren kalkuluetarako, talkak ≤ 2 GeV energia aproposetan egiten baitira goian aipatu bezala [38]. Argitaratutako emaitzak, 30 milioi hadroi ekoizle baino gehiagok sortuak (aurreko esperimentuetan baino hainbat aldiz gehiago) ez datoz bat beste neurketekin. Egun, zehaztasun estatistiko handiena emaitza horiek dute. Desadostasunaren jatorria oraingoz ezezaguna da. Beraz, *datuetan oinarritutako hurbilketaren* bidez *HVP* ekarpenaren lortzea ez dago ere oso argi nola bideratuko den etorkizun hurbil batean.

