

Arrazonamendu analogikoa fisika modernoan: inbariantza eta simetria¹

ALAIN ULAZIA

ILCLI (UPV/EHU)

(Analogical reasoning in modern physics: Invariance and symmetry)

Abstract

In this critical notice we discuss the role of analogical reasoning in some important fields of modern physics. We do that by analyzing the heuristic relevance of invariance and symmetry, especially of the latter, following van Fraassen's epistemological formulation of the Symmetry Principles.

Keywords: *Analogy, heuristics, Physics, invariance, symmetry, ontology*

Inbariantza, sistemaren transformazio batean zehar kontserbatzen den horren ideia, 1 eta 2 egoeran berdin dirauen kantitatearena, funtsezkoa da fisikarien pentsamoldean: energiaren, momentuaren, momentu angeluarraren, masaren kontserbazioa, edozein problema askatzeko, edozein egoera transformazio kontsideratzeko, oinarritzkoa da.

Edalontzi batean ur gainean flotatzen daukagu izotz puska bat. Apur bat beranduago edalontziari begiratu eta izotza urtu egin dela ikusi dugu. Zenbat igo ote da uraren maila?

Ez da igoko. Izotza flotatzen zegoenean (1 egoera), urpean zegoen izotz zatiaren bolumenak desplazatzen zuen ur kantitatearen pisuak izotz osoarenaren berdina izan behar zuen (Arkimedesen legea). Izotza urtzean (2 egoera), bere bolumena murriztu egingo da (izotzaren bolumena urarena baino handiagoa baita), hain justu, lehen urpean zegoen izotz zatiaren bolumen harexetara. Zergatik? Izotz zati bat urtzen denean hasierako izotzak eta amaierako urak masa berdina dutelako. Masa da 1tik 2rako transformazioan kontserbatzen dena, eta masa horrexen pisua da murgildutako izotz zatiak ur bezala desplazatu behar duena, urtzean izango dugun ur kantitea, hain zuzen.

¹ Nire esker ona iruzkinak eta aldaketarako proposamenak egindako txostengile anonimoei.

Bi egoeren artean «kontserbatzen dena», inbariantea dena topatzea, ahaztu dugun ohiko propietate bat izan edota kantitate matematiko hagitz abstraktu bat izan, gakoa izan daiteke. Horrela, inbariantza bi elementuren arteko erlazioan kokatzen da, bata bestea transformatzen den egoera batean, zeinetako bat problemaren itua izango den, analogia batean bezalaxe.

Are gehiago, analogia motatzat har daiteke. Inbariantzaren prozedura heuristikoa, alta, antzekotasuna *a posteriori* dator, ez da aldez aurreko mugapen nagusia. Inbariantzaren erabilera heuristikoak konparatzen diren bi egoerak hasiera batean desberdinak direlako eta elkarren arteko analogiari inolaz antzik ematen ez diogulako hartzen du berezko indarra. Estructura da kasu honetan mugapen nagusia, atzean dagoen estructura kontserbatua.

Inbariantzaren estatus kognitiboa analogiaren perfektzionamendu batera murriz daitekeela dirudi. Beraz, inbariantzaren izaera, pentsamendu analogikoarekin zuzenki loturik, heuristikaren domeinuan sar daiteke, analogiari funtsezko balio kognitiboa emanda (Clement 2008).

Hala eta guztiz ere, euren eginbeharrarekiko handiustez akaso, maiz naturaren baitan estatus ontologikoa eman izan diete fisikariek (maizago fisikaz ari diren filosofoek) nire ustez tresna heuristikoak baino ez diren halako kontzeptuei. Adibide nabarmenena simetriena da, natura deskribatzen duten ekuazio batzuk transformazio talde batzuen pean duten inbariantzarena.

Noetherren teorema, halakoetan, kontserbatzen den magnituderen bategon behar duela iragartzen du, sistema fisikoaren barnean usu esangura fisiko garrantzitsuren bat izaten duena. «Esangura fisiko garrantzitsu» bati bide eman arren (adierazpide horixe erabili ohi dute fisikariek), neure iritzian, simetriak fisikariaren pentsatzeko eta sortzeko artearen baitan baino ez dira kokatzen, eta ez naturaren ontologiaren muinean.

Are gehiago esango nuke, heuristikaren barnean identifikatu ohi diren alderdi kognitibo desberdinen artean, simetrien erabilerak fisikariaren gogoprozesu sortzaile batekin bat egiten du klarki: analogiarekin.

Oro har, sormen handiko genesi teorikoen kasuan ere, fisikariaren inbariantza abstraktu eta matematikoaren adierak kontserbatu behar den eskema batean hartzen du gorputza. Fisika bezain «gogorak» ez diren zientzietan kontserbazio eskema batzuek sormen prozesuaren baitako aurrerabide teorikoan aingura finko bat eskaintzen dute eraldatzen ari den ezagutzasarean.

Aproposa da, etsenplurako, Gruberren (1974) epistemologia genetikoaren araberrako Darwinen kasu azterketa aipatzea, biologia bezalako zientzia «bigunago» baten baitan. Gruberrek Darwinen 1837-1839 epealdiko koadernoak erabili zituen honen hautespen naturalari buruzko ideien eraldaketa azter-

tzeko. Piageten asimilazio/egokitzapen mekanismoa erakusten duen Darwinen pentsamenduaren mailakako transformazio bat atzeman zuen. Bilakaera horretan zehar, Gruberren aburuz, gutxi gorabehera finko dirauen ideia multzo bat badago beti, ideioi parte hartzen duteneko ezagutza sistema orokorra nabarmenki aldatzen den arren. Inbariante bat bezalakoa litzateke ideia multzo hau. Darwinen hasierako teoretan inbariante bat zen existitzen zen espezie kopuruaren kontserbazioa. Gruberrek «kontserbazio eskema» deitzen zien elementu mota hauei, bere ustez naturan jarraitasun bat bilatzeko konpromisoari eusten ziotenei, hain zuzen. Bere bigarren inbariantza mota bat «orekatze eskema» zen, moldaketa, aldaketa moldatzailea eta formen serie jarraituak barne zituena. Análisi honen bidez Gruberrek ardatz finkoak marraztu zituen aldatzen ari zen sare teoriko batean. Lakatosen hitzetan Darwinen ikerketa-programaren nukleoa litzateke kontserbazio eskema eta programaren historian zehar lerratzten den inbariantzaren beharra heuristika negatiboak bermatuko luke.

Semantika adibidetzat hartuta ere, teoria semantiko moderno bezala, Barwise eta Perryren 80. hamarkadako semantika situazionalak egoera moten arteko informazio transferentzia ildo honetan du aipagai (Barwise & Perry 1981). S egoera batek S' egoeraz informaziorik baldin badu, komun euren ezaugarrien arteko korrelazio sistematiko bat dutelako da. Korrelazio hori emanda, S egoerak S' egoera adierazten duela esan dezakegu. Eboluzio biologikoaren ondorioz, organismoak egoera arrotzei buruzko informazioa orainean lortzeko kapazak dira, egoera horren zenbait ezaugarri gailen atzemanaz eta beste egoerei buruz informazio lortzeko baliatuz, dagozkien korrelazioak ezagutzeari esker. Mintzaira ez da salbuespen bat. Berez, esaldi deklaratiibo baten adiera berau proferitzen den egoeraren eta beronek deskribatzen dituen egoeren arteko erlazio bat baino ez da. Horrela, semantika minimalista baten baitan kokatuta, pragmatikoki egoeraz egoera eman daitezkeen aldaera anitzetatik libre helduleku inbariante bat dago proferentzia jakin bakoitzean, kontserbatzen den muin bat, zientzialarien arteko elkarrizketetan teoria berri bat sortzen ari denean oinarri zientifiko handirik gabe, kale edo bale, erabaki beharra dagoena. Antza, fisikarien komunitatearen elkarrizketen baitako teoria baten genesian kontserbazio eskema deritzogunak figura ilustratibotzat ezezik, pentsalariaren iturri analogikotzat funtzionatu ahal du.

Energiaren kontserbazio legea, adibidez, kimikan erreakzioen masa kontserbazioarekiko analogiaz, mekanikan energia zinetikoa eta potentziala kontuan hartuta kontserbatzen denarekikoaz, eta termodinamikan lana eta beroa kontuan hartuta kontserbatzen denarekiko analogiaz ordena altuko erlazio mikrofisiko eta kosmologikoetaraino hedatu den lege bat da, bide horretan jasan duen jasokunde nomologikoaren ondorioz naturaren funtsezko printzipioaren estatusa lortu duena. Hala ere, edozein ontologiatan duten konfidantzaren ispilu, problema korapilatsu baten aurrean ezinean

daudenean horrelako printzipio funtsezko bat ere dudan jartzeko gai dira fisikariak.

Adibideok ilustragarriak dira, izan ere, aldagaiztasunaren ideiak bete-betean bat egiten du pentsamendu analogikoarenarekin. Fisikari dagokionez, natura deskribatzen duten ekuazioek, transformazio batzuk aplikatu eta gero, ekturura bera mantentzen segitzen dute eta modu batean antzekoak edo *analogoak* izaten. Fisikariek badakite ekuazioek natura egokiro deskribatuko badute, transformazio talde batzuen pean aldagaitzak izan behar dutela. Funtzio hori bete zuten Lorentzen transformazioek elektrodinamika erlatibistan ekuazio klasikoak abiadura handitarako birformulatzean. Funtzio hori bete zuten Gauge transformazioek, Lorentzeneri beste berri batzuk gehiago batzen dizkietenek, eremuen teoria kuantikoko ekuazioak eraikitzean eta oinarritzko partikula berrien bilaketan. Hor kokatzen dira fisikariengandik hainbestetan entzuten ditugun simetriak.

Halaz, definizioan ekturura gailena inbariante mantentzen duen transformazio bat dela esan ohi da simetriaz. Transformazioa *simetria taldeak* du. Jakina, *gailen* hartu beharrekoa aldatu egiten da testuinguru batetik bestera. Zentzu honetan, simetriaren nozioak berezko izaera *pragmatiko* bat badauka. Testuinguru jakin batean pentsalariak gailena irizten dionaren arabera determinatuko da ektururaren zein ezaugarrik irautea nahi den, eta zeinek ez. Honen ez du esan nahi pentsalariari nahikoa zaionik aldagaitz zein ezaugarrik iraugo duen erabakitzea. Mugapen objektiboak daude tartean, pentsalariaren edo testuinguruaren menpekoak ez direnak. Adibidez, ez da existitzen zenbaki naturalen kardinaltasuna inbariante mantentzen duen transformaziorik zenbaki naturaleratik zenbaki erreale tara banan-banako korrespondentzia ezarri nahi denean, Cantorrek diagonalaren teoremarekin argi frogatu zuenez. Hala, ekturura hauentzat ezinezkoa da halako inbariantza bat topatzea. Batek ezin du inbariantza bat sortzea hala-moduz erabaki. Alta, izaera pragmatikoak badirau. Azken buruan, ezinbestekoa da ektururaren iraupen prozesuan ekturura baten zein osagai hartuko den gailentzat kontestuarrekiko libreki erabakitzea.

Ezaguna denez, ektururaren aldagaiztasun nozioak isomorfismo nozioaz hartzen du bere formulazio matematikoa, aplikazio linealetako homomorfismo bijektiboez, alegia. Horrela, ez da harritzekoa isomorfismoa ere testuinguruaren menpekoa izatea: ekturura mota diferenteek diraude aldagaitz testuinguru diferenteetan. Adibidez, aritmetikan, bi ekturura isomorforen artean kontserbatzen direnak, zenbaki naturalen ordenaz aparte, zenbaki horien gaineko eragiketa aritmetikoak dira. Talde teoriaran, ekturura isomorfoez kontserbatu beharreko ezaugarri gailenduak apur bat diferenteak dira, taldeen arteko kidezta erlazioen ezaugarriekin zerikusia dute-eta. Edota, algebra linealean, beste propietate batzuek diraude: isomorfismoak bektoreen propietate matematikoak kontserbatzen ditu.

Inbariantza kontzeptua azpimarratzerakoan inportantea da, berriro ere, inbariante dirauten elementu motak argi izatea. Inbariantza mota inportante bat Tarskyren eredu teoriaren egia-balioena da (Hodges 2001). Hots, lehen mailako bi estruktura homologo elementalki baliokideak badira, orduan estruktura batean egia den edozein enuntziatu egia izango da bestean, eta alderantziz. Inbariantzak, kasu honetan, aintzat hartutako enuntziatuen egia-balioarekin du zerikusia.

Baina zer dute komunean fisikaren simetriek, matematikaren isomorfismoek, eta Tarskyren baliokidetza elementalak? Hirurak har daitezke tresna heuristiko inportantetzat. Bi estruktura isomorfoak badira, orduan elementalki baliokideak dira. Jo dezagun P enuntziatu bat egia dela S estruktura batean. Orduan $S S'$ -rekiko isomorfoa dela ezarriz (edota S' -rekiko elementalki baliokideak) segituan ondoriozta dezakegu $P S'$ -n ere egia dela. *Transferentzia-printzipio* bat da hau, emaitzak domeinu batetik bestera transferitzea ahalbidetzen duen printzipio bat. Simetriak ere, hain justu, transferentzia-printzipio bat eskaintzen du. Estruktura bat inbariante mantenduz, simetriak emaitzak domeinu batetik bestera hedatzea ahalbideratzen digu, domeinuen arteko *antzekotasun estrukturalean* oinarrituta, analogia matematiko doietan oinarrituta. Simetria printzipioetan topa ditzakegu, zehatzago, simetria, isomorfismoa eta baliokidetza elementala erlazionatzen dituen erabilera heuristikoaren gakoak.

Simetriak zein printzipiopean formula ditzakegu filosofian? Neuk aukeratu dudana, van Fraassen aintzat hartuta (1989, 223-246 or.), simetrien zeregin heuristikoa azpimarratzen duen ikuspegia da, zenbaiten iritziaren kontra, naturaren berariazko izaera egituratuko lukeen simetrien estatus ontologiko batetik at. Heuristikoa da, neure ustetan, fisikan simetriek duten zeregin nagusia (adibidez mekanika kuantikoan), eta argi izan behar da zeregin hau aurerra egin baino lehen.

Ikus ditzagun bada, modu lauean, van Fraassenen bi simetria printzipioak, (SP1) eta (SP2):

(SP1) *Funtsean berdinak diren problemek funtsean soluzio berdina izan behar dute.*

Formulazio honek simetrien zeregin heuristiko analogikoa nabarmentzen du: simetriek problema baten formulazioa gidatzen dute eta bere soluziorako estrategiak adierazten dituzte, bi problema analogoren artean. Alde batetik, (SP1) printzipioak problema batean simetriak bilatzeak eta problema ezaugarritzen duten propietate gailenak identifikatzeak daukaten garrantzia aldarrikatzen du. Ezaugarriok jatorrizko problemarekiko esanguratsuki antzekoa den problema berri bat sortzeko erabiliko dira gero. Problema berria ebatziz, (SP1)-ek soluzioa jatorrizko problemara transferitzea ahalbidetzen digu. Muinean, (SP1)-ek gida orokor bat eskaintzen digu problema ebazpenerako, eta gida hau

segituz, estruktura gehiago eratzen da, problema berri bat gorpuzten baita. Finean, estruktura analogo gehigarri bat erabiliz, diferentea den baina erlazionatua dagoen problema bat ebazten da, zeinak jatorrizko problemaren soluzioa eskaintzen duen.

Esaterako, Erlatibitate Orokorrean, hiperazalera esferikoki simetrikoez xehe daitekeen grabitate eremu bat Schwarzschilden eremu bat da, zeinaren metrika Einsteinen eremu ekuazioentzat ezagutzen den soluzio zehatz bakarratarikoa den. Beste soluzio mota zehatz famatu batek ere, Friedmann-Robertson-Walkerren metrikak, simetriak aitzin-suposatzen ditu. *Simetriari arabera soluzio motak* definitzen dira, horrela problemak soluziobide motaren arabera sailkatzeko. Problema mota zehaztean problemaren eduki fisikoa ezezik soluziobidea ere zehazten da.

Edota espazio eta denbora translaziopean inbariantek diren fenomenoek leku eta une partikular batean egiaztaturiko esperimenteren errepikaportasuna eta lege naturalen aplikagarritasun unibertsala bermatzen dituzte. Halaz, problema zinematikoa mota jakin bat funtsean soluziobide batera murriztuko da.

Espazio-denboraren baitako arazootan, Galileok jada behatu zuen prozesu fisikoak modu berean garatzen direla geldik dagoen laborategi batean edo mugimendu uniformean den batean. Naturaren simetria hau erlatibitate printzipioaren oinarria da: newtondarra, simetria taldea Galileoren taldea bada; eintendarra, simetria taldea Lorentzen taldea bada. Erlatibitateari buruzko hausnarketak, Einsteinen obran inspiratuta, inbariantzia eta simetria, ontologikoki, objektibotasun edo errealtate irizpidetzat hartzea dakar zenbaitentzat (Winnie 1986). Denbora propioa eta geldioneko masa bezalako kantitateak, Lorentzen transformazioen pean inbariante dirautenak, bene-benetako errealtate fisikoak liriateke; ez, aitzitik, dimentsio espazialak edota denbora tartekak. Baina, jakina, zer esango dugu masa erlatibistaz, hots, gorpuzak laborategiarekiko azelerazioari jartzen dion erresistentziaz? Ez dirudi zentzuzkoa irrealtzat hartzea partikula azeleragailuak eraikitzen eta administratzen dituztenentzat, eragiten dituen kostuak kontuan hartuta. Edozein ontologia eraiki nahi izateak dirudi irrealia simetriaren inguruan.

(SP2) *Problema batean edozein asimetria beste asimetria batetik dator.*

Van Fraassenen simetria printzipioaren bigarren formulazio honek simetria estruktura kontserbazioaren itzalpekoa dela nabarmentzen du. Simetriaren bat hausten baldin bada, aurretik kontuan hartu ez den asimetriaren batengatik izan behar du derrigor. *Simetria hausturaren* nozioa, etsenplurako, partikula elementaletan n -koteetan SU(3) taldeko zortzikotean, nahiz kosmologian, materia eta antimateriaren arteko asimetria txiki baten karira eboluzionatu duen gure unibertsoa deskribatzean, hitz egiteko modu ohikoa da egungo fisikarien lengoaiari.

Har dezagun adibidez isospin simetria interakzio ahulean, aipaturiko SU(3) Lieren taldekoa. Neutroiak eta potroiak masa igualtsua dutela ikusita eta edozein bi nukleiren (protoi edo neutroi) arteko interakzio gogorraren indarra berdina dela aintzat hartuta, simetria fundamentalago batek egon behar du quarken artean. Halaz, *up* eta *downquarkekin* hasitako simetria triangularretan *strange* quarka sartu zenean sortu zen zortzikotea, mesoiak eta barioiak sailkatzeko erabiltzen dena. Izan ere, interakzio gogorra inbariantea da quark diferenteen trukaketarekiko. Isospin simetriaren bortxaketa *up* eta *down* quarken masak eta kargak diferenteak direlako agertzen da. Baina interakzio gogorrean asimetria hau mespretxagarria denez, isospin simetriak kalkulu tresna erabilgarria izaten segitzen du. Gell-Man fisikariak proposaturiko Ω^- partikularen bilaketa harrigarria ere simetria talde honen pean burutu zen, konfigurazio simetrikoa ixteko falta zen partikularen existentzia iragarritz.

Laburki esanda, simetria tresna heuristiko indartsuenetakoa da partikula fisikan. Simetriaren bortxaketak eta asimetrien agerpenak naturaren ulerpen sakonagora garamatzaten problema teoriko eta esperimentalak dakartza.

Honenbestez, simetriek seinala ditzaketen transferentzia zilegien baitan, fisikarien sormen prozesuarentzat honelako galderak ardatz dira: zein eraldaketaren pean segitzen dute aldagaitz ekuazio esanguratsuek? Eta alderantziz hobeki, transformazio-ekuazio funtsezkoak aintzat hartuta (Lorentz edo Galileorenak adibidez), zeintzuk dira hauen bahetik pasatzen ez diren ekuazio deskribatzaileak? Galdera hauek, klarki, pentsamendu analogikoaren baitan daude, nahiz eta teknika matematiko sotilez formalizatuak eta jantziak egon; eta, inportanteena, honen arabera ebatzi beharreko problema motak (eduki fisiko zehazdunak) planteatzen ditu.

Adibidez, eremuen teoria kuantikoaren baitako *gauge* simetriek eurek *gauge* eremu baten existentzia eskatzen dute (espazio-denboran puntuz puntu aldatzen den transformazio talde bat). Horrela, taldearen propietate matematikoez lotura estua dute teoriarik errepresentagarria den eduki fisikoarekin, eta irmoki mugatzen dute hau. Henneaux eta Teitelboimen arabera (1992), teoria mota honetan askatasun graduak baino aldagai gehiago erabiltzen dira deskripzio fisikoan; fisikoki esanguratsuak diren kantitateak inbariantek dira *gauge* transformazioen pean; azkenik, aldagai gehigarrien erabilera deskripzioa argiagoa egiten du eta honekin batera teoriaren eduki fisikoa seinalatzen eta azpimarratzen duen simetria bat eratzen du.

Beraz, meta-problema ikuspegitik, ebazpen analogikoak hainbat problema ezberdin batzen ditu simetria taldeen kasuan. Simetria eskakizunak dakarkigun *problem-solving* hau, alabaina, fisikarien sormenean analogiak hartzen duen eremu zabalaren barneko ebazpen mota bat baino ez da, teoria modernoetan berebiziko garrantzia izan duena. Neure ustez, zientzialarien analogien eboluzioak, pentsamendu prezientifikotik eta alkimisten metafora plura-

listatik (Lloyd 1966) fisikari modernoen analogia matematikora, *gauge* transformazioak gisako formalismo matematiko konplexuetan jotzen du goia. Izan ere, jada azken etapa honetan, *irudikagarritasun* oro galtzen da inbariantzaren metodoan analogia erabat formalizatzean. Hala eta guztiz ere, ahozko komunikazioan eta elkarrizketa ez-formalean betiko irudiak mantenduko dituzte fisikariek, eta berriak sortuko.

Finean, fisika matematikoak, bere sormen prozesu teorikoa ahalbideratzearen, analogian oinarritutako formalismo matematiko oso bat garatzea lortu du. Halatan, *irudi* batean ainguratu ohi zen analogia sortzaileak bitarteko sistematiko bat aurkitu du bere garapenean, arrazonamendu analogikoaren barnean dagoen prozedura bat formalizatzeraino. Psikologiako inplizitu/esplizitu terminoetan hitz eginda, irudi inplizitu batek forma kognitibo esplizitu bat hartu du.

Erreferentziak

- BARWISE, JON and JOHN PERRY (1981), «Semantic Innocence and Uncompromising Situations». In P. French, T. Uehling and H. Wettstein (eds.), *Midwest Studies in the Philosophy of Language*, vol. VI. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- CLEMENT, J. J. (2008), *Creative Model Construction in Scientists and Students: The Role of Imagery, Analogy, and Mental Simulation*. London: Springer.
- GRUBER, HOWARD E. (1974), *Darwin on Man: A Psychological Study of Scientific Creativity*. New York: Dutton.
- HENNEAUX, M. and C. TEITELBOIM (1992), *Quantization of Gauge Systems*. Princeton: Princeton University Press.
- HODGES, WILFRID (2001), «Tarski's truth definitions». In Stanford Encyclopedia of Philosophy. See: <http://plato.stanford.edu/entries/tarski-truth/>
- LLOYD, G.E.R. (1966), *Polarity and Analogy*. Bristol: Bristol University Press.
- VAN FRAASSEN, B. C. (1989): *Laws and Symmetry*. Oxford: Clarendon Press.
- WINNIE, J. A. (1986), «Invariants and objectivity: a theory with applications to relativity and geometry». In R. G. Colodny (ed.), *From Quarks to Quasars: Philosophical Problems of Modern Physics*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 71-180 or.