

Principis no físics de la Física

JOSEP PLANELLES
Universitat Jaume I

*Natura enim simplex est et rerum
causis superfluis non luxuriat*¹

Isaac Newton
Principia, llibre III, regla 1

SIMETRIA I FÍSICA

Simetria implica simplicitat. Per exemple, si un objecte posseeix un plànol de simetria només ens cal descriure'n una meitat i declarar la seua simetria. L'altra meitat està automàticament descrita. No és d'estranyar, doncs, que (seguint la regla newtoniana que presideix aquest article) la simetria jugue un rol essencial en la física (Yang, 1994: 1437):

Si repassem la física del segle XX, trobem que la simetria ha sorgit com el tema més fonamental, ocupant una posició central en la física actual. No podem saber allò que el segle XXI ens portarà, però jo em sent segur en afirmar que, durant els propers deu o vint anys, molts físics teòrics continuaran investigant variacions del tema fonamental de la simetria en els més profunds fonaments del nostre enteniment teòric de l'estructura de l'univers.

I és que una mirada al que ens envolta ens alligona que hi ha simetria a tot arreu. A la naturalesa en trobem una llista in comptable d'exemples: la simetria bilateral de les ales d'una papallona o la del mateix cos humà; la simetria de rotació dels pètals de moltes flors, de les estrelles de mar; la simetria translacional de cristalls i polímers, etc. Els animals mateixos també produeixen objectes simètrics, com ara les cel·les en la bresca de les abelles. I, per descomptat, trobem simetria en les obres realitzades per l'home. En arquitectura, pintura i, en general, en art, el concepte d'harmonia sol anar lligat a l'existència d'elements de simetria. Weyl arriba a afirmar que (Weyl, 1991: 1): «*La bella té frontera comuna amb la simetria*».

Hi ha, en particular, una íntima connexió entre la simetria geomètrica i allò que en física anomenem lleis de conservació. De fet mostrarem en l'apèndix que les lleis de conservació de la mecànica newtoniana no són més que formulacions de simetries dels sistemes físics: la conservació de l'energia deriva de la uniformitat del temps. La conservació del moment lineal és conseqüència de l'homogeneïtat de l'espai. Finalment, la conservació del moment angular és l'expressió de la isotropia de l'espai.

1. «Doncs la natura és simple i no és pròdiga en les causes supèrflues de les coses».

Però, què és una simetria? Direm que un sistema físic té una simetria si en realitzar un determinat canvi no es produeix cap efecte mesurable en l'esmentat sistema. Per exemple, si mirem una esfera, tanquem els ulls i els tornem a obrir, cap experiment o mesura posterior no ens pot dir si hi ha hagut alguna rotació.

Hi ha simetries que s'ajusten a la definició anterior i no són simetries espacials. Per exemple una permutació. Hi ha simetries encara menys òbvies. Si tenim un sistema de càrregues elèctriques, hi ha una sèrie de forces entre elles que queden inalterades si canviem el signe de les càrregues. Aquesta simetria no pot representar-se per una rotació, però és cert que, en realitzar el canvi de signe, no es produeix cap efecte mesurable en l'esmentat sistema de càrregues.

En física la simetria es conceptualitza i converteix en un atribut abstracte sense cap relació amb imatges del món sensible. És a dir, sense que hi haja possibilitat de visualitzar-la com un moviment efectuat sobre una entitat que existeix en l'espai. Per exemple, hi ha un tipus de simetries anomenades transformacions de *gauge* que estan relacionades amb la llibertat de triar la fase complexa dels potencials que defineixen els camps²: canviem el valor de la fase i , no obstant això, el valor de tots els observables físics que es poden calcular a partir d'aquest potencial no canvien. Hi ha el requisit del canvi (canvi de fase), com hi ha el requisit de que aquest canvi no done lloc a cap efecte mesurable (les magnituds físiques calculables a partir del potencial queden inalterades). Estem, doncs, enfront d'una simetria. I com tota simetria física, va lligada amb una llei de conservació. En aquest cas amb la llei de conservació de la càrrega elèctrica.

Que la simetria siga un concepte abstracte en física no vol dir que siga un concepte indefinit i eteri. Cal emfasitzar, ben al contrari, que és un fet experimental. Tant en física com en química qualsevol simetria va necessàriament associada amb un experiment impossible. Si l'experiment es realitza, aleshores, la simetria no existeix. L'existència de simetria és sempre una afirmació provisional que únicament pot establir-se experimentalment.

Un punt important que cal assenyalar també és que l'establiment d'una simetria ens diu allò que NO és possible. Mai la simetria ens assegura alguna cosa en positiu. Per exemple, l'establiment d'una simetria ens pot dir que una transició espectrocòpica està prohibida. Mai ens dirà que una transició estarà present a l'espectre.

L'error en l'apreciació del significat dels efectes de la simetria ha estat, per exemple, l'origen de molts fracassos industrials (plantes pilot que no funcionen en ser construïdes a escala industrial). I és que des de la pura relació de proporcions no es deriven totes les propietats dels sistemes (la simetria, però, subjuga en tal manera que, de vegades, ens fa pensar equivocadament!).

Si les proporcions són similars, per què els animals petits tenen una major velocitat de metabolisme que els grans? Per què els bebès són més sensibles al fred que els adults? Per què els dinosaures tenien el cap tant menut? Aquestes són qüestions que deriven de l'esmentada hipervaloració dels efectes de la simetria. Tot i que les respostes són senzilles, no pensarem que les qüestions estan fora fritat. I és que tots participem d'una certa

2. En física es representen els camps (camp elèctric, magnètic, etc.) mitjançant funcions complexes $f(x,y,z)$ que depenen de les coordenades de l'espai euclidià tridimensional.

veneració per la simetria! Per contestar aquestes preguntes (Wybourne, 1995) hi ha prou a recordar, prèviament, algunes fórmules de la geometria: àrea del cercle r^2 , àrea de l'esfera $4r^2$, volum de l'esfera $4/3 r^3$. El metabolisme proporciona calor al volum del cos (proporcionalment a r^3) mentre que es perd calor a través la superfície (proporcionalment a r^2), aleshores, la relació entre el calor perdut i el calor produït resulta proporcional a $1/r$:

$$\frac{\text{calor perdut}}{\text{calor produït}} \propto \frac{1}{r}$$

Relació de la que inferim que com més gran és un animal, menor és la proporció de calor perdut. Què passa amb els dinosaures? Modelitzem un dinosaure mitjançant un cap esfèric, un coll cilíndric i la resta del cos mitjançant una altra esfera molt més gran. Què passa en fer créixer el dinosaure escalant els radis i la longitud del cilindre? Passa que cap i cos creixen com r^3 però la força del coll, que és proporcional a l'àrea de la secció dels seus músculs, creix com r^2 . Si fem créixer molt el dinosaure, el coll no podrà aguantar el cap i li quedarà penjant. Aquesta és una raó *de pes* que condicionà l'evolució dels dinosaures.

La simetria és, també, una guia en la recerca. Cap a 1850, J.C. Maxwell tractà d'unificar el camp elèctric i magnètic en un únic sistema d'equacions i observà que hi havia una determinada asimetria. La llei de Faraday d'inducció diu que en una regió de l'espai on el flux magnètic varia amb el temps apareix un camp elèctric. No hi havia, però, l'equació recíproca. Maxwell introduí el concepte de "corrent de desplaçament" i demostrà que un camp elèctric variable pot generar un camp magnètic. Més tard, Lorentz i Poincaré investigaren la simetria de les equacions de Maxwell i descobriren que eren invariants enfront d'un tipus especial de "rotacions" que mesclaven espai i temps (!). Va caldre Einstein per a comprendre aquestes subtils rotacions. No eren matemàtica abstracta, eren la base d'una nova teoria: la teoria de la relativitat, on, per a velocitats elevades, l'espai i el temps es distorsionen d'una forma simètrica, d'acord amb les subtils rotacions de Lorentz i Poincaré.

Paul Davis (Davis, 1988: 67 ss) diu fins i tot que «les teories fructíferes sempre són belles. Són belles no perquè siguin fructíferes, sino a causa de la seua simetria inherent». Hem començat aquest apartat fent referència a que la presència de simetries en les obres d'art proporciona sensació d'harmonia. Per a molts físics, les simetries abstractes proporcionen la mateixa sensació estètica en les fórmules matemàtiques. Continuem citant Paul Davis:

Una de les grans tragèdies de la nostra societat és que [...] la immensa majoria de gent s'ha girat d'esquena a la poesia matemàtica i la música de la natura [...] a tota una dimensió d'experiències estètiques.

Potser el camp de la física on el paper de la simetria ha estat més espectacular és el camp de les partícules elementals (Young, 1971). El concepte de partícula elemental representa un intent d'entendre la constitució de la matèria sobre la base de blocs constituents bàsics.

S'havien observat senyals en la radiació còsmica i en experiments de laboratori amb

acceleradors d'alta energia que semblaven trajectòries de partícules que es creaven i aniquilaven. Molt aviat (en 1930) la teoria relativista de l'electró proporcionava un model en el qual les partícules poden crear-se i aniquilar-se, a la vegada que obria la porta a una interpretació raonable de les observacions experimentals en base a una nova manera d'entendre la interacció entre partícules com un intercanvi d'altres partícules inestables³.

Tot i poder interpretar els senyals observats en la radiació còsmica i en els experiments de laboratori amb acceleradors d'alta energia sobre la base d'aquestes teories, els físics de trenta anys enrere estaven perplexos enfront del nombre i varietat de partícules subatòmiques identificades. Un llum d'enteniment derivà del següent paral·lelisme: dos electrons amb distint spin són dues partícules idèntiques en tot excepte en la seua interacció amb un camp magnètic. També un protó i un neutró són pràcticament idèntics excepte en les seues propietats electromagnètiques. Per què no tractar el protó i neutró com dos estats d'un únic nucleó? (de la mateixa manera que un electró amb spin positiu i un amb spin negatiu es consideren dos estats distins de l'entitat bàsica anomenada electró). Una vegada generalitzada aquesta consideració a altres partícules, entra en joc la maquinària de les representacions dels grups de transformacions unitàries i es posa ordre al caos aparent de les partícules descobertes.

És instructiu fer una petita ressenya històrica. Quan Gell-Mann (Ne'eman i Gell-Mann, 1964) proposa el grup de simetria SU(3) per a la classificar partícules troba que hi havia un buit en la seua construcció. Calia l'existència d'una partícula encara no observada aleshores amb unes determinades propietats. Aquesta partícula és trobada poc més tard en el laboratori. És aquesta una història paral·lela a la de la tabla periòdica dels elements de Mendeleev, la qual va predir l'existència d'àtoms encara no coneguts.

Potser és interessant reflexionar sobre com la simetria, en formar part de la descripció física, pot alterar substancialment els propis conceptes físics. Tornem sobre la física de partícules. Hem dit que s'havien identificat un gran nombre i varietat de partícules subatòmiques distintes. Una exitosa manera de clasificar les partícules basada en la simetria (i no en cap experiment) canvia la manera en la qual la física contempla les partícules. En lloc de veure partícules subatòmiques distintes passa a veure estats excitats d'una mateixa entitat (abstracta) bàsica (Newton i Wigner, 1949: 400):

El concepte de sistema elemental [...] és una descripció d'un conjunt d'estats que formen, en llenguatge matemàtic, un espai de representació irreduïble per al grup inhomogeni de Lorentz.

La nova manera d'entendre les partícules fonamentals, com els estats excitats d'una mateixa entitat bàsica, no deu d'abrumar ni estranyar al lector no especialitzat. Una comparació amb la física atòmica ens ajudarà a considerar-la, si més no, com una hipòtesi raonable de treball. Des d'un punt de vista usual, l'àtom d'hidrogen no deixa de ser un àtom d'hidrogen quan, estant en l'estat fonamental, l'absorció d'un fotó el promociona a un estat excitat. Si no hi hagués una teoria de l'estructura atòmica que ens fa "entendre"

3. Per exemple, un xoc entre dos electrons es descriu en termes de l'intercanvi d'un fotó. El fotó actua com el mecanisme per transferir energia i quantitat de moviment d'una partícula a l'altra i alterar, així, l'estat de moviment de les dues partícules col·lisionants. La interacció es descriu no com una força sinó com una emissió o absorció d'una partícula. (Situació anàloga a la de dos jugadors de bàsquet que realitzen una força de repulsió mútua en llençar-se la pilota de l'un a l'altre).

aquest procés, podríem pensar que s'ha generat un àtom distint (l'energia, la massa, el moment angular etc. d'un estat excitat són diferents de les corresponents magnituds de l'estat fonamental). El paral·lelisme amb la física de partícules es pot estendre encara més: el nou àtom creat és inestable i decau espontàniament amb generació d'hidrogen fonamental i un fotó.

Malgrat tot el que hem dit, un examen minuciós dels objectes que presenten simetries (incloent-hi els sistemes, equacions, etc. amb simetries abstractes) ens portaria a la conclusió que la simetria no existeix sinó de forma aproximada. És la nostra idealització (simplificació) dels objectes la que ens fa descobrir la simetria. Veïem, doncs, una tendència de l'ésser humà a pensar en termes de simetries per simplificar el món que l'envolta. Potser la simetria no existesca més que en el cervell humà (fins i tot els cristalls més perfectes presenten impureses que trenquen la perfecta simetria espacial). Encara que aquest fos el cas (o potser especialment en el cas que ho siga), no importa. Brian Wybourne (1994: 9) fins i tot afirma: «Què imperfecte seria el món si totes les simetries foren perfectes!». I és que la simetria té una utilitat extrema tant a l'hora de resoldre problemes pràctics com a l'hora d'entendre el món físic. Citem F. Iachello (1986: 10):

La majoria de les simetries que trobem en física (i en art) no són exactes sino aproximades [...] Malgrat el fet que la majoria de les simetries dinàmiques són aproximades, no obstant això, són una eina fonamental per a comprendre les estructures complexes.

EL CRITERI DE SIMPLICITAT

En la secció anterior hem relatat el paper essencial que té la simetria en física. La simetria no és més que un cas particular (potser, el més significatiu) de l'aplicació del principi de simplicitat. Aquest principi, enunciat com la regla 1 als *Principia* de Newton, és, potser, el condicionant no físic que més influència té en el desenvolupament de la física. I el que és més important, la física l'ha acceptat sense questionar-lo: Si som capaços de trobar dues teories que expliquen un mateix fet, cal triar aquella que siga més simple. Mentre fem recerca científica devem evitar fins i tot mamprendre camins que impliquen conceptualitzacions complicades. Aquestes han de ser simples i han de poder ser exposades de manera curta, clara, nítida i inambíguia. La regla 1 empeny brutalment la física. Fa, per exemple, que les matemàtiques siguin el seu llenguatge.

Un llenguatge, però, no és una eina assèptica. L'ésser humà no fa conceptualitzacions que, en una etapa posterior i amb el llenguatge com a vehicle, comunica. El llenguatge és consubstancial al pensament i el condiciona. Hi haurà coses que seran fàcils de conceptualitzar amb un llenguatge particular i d'altres que seran difícils. Un exemple clar el constitueix els diversos llenguatges especialitzats de programació. Qualsevol d'ells pot ser utilitzat per a qualsevol finalitat, però hi ha construccions que resulten elementals amb un llenguatge de programació i molt complicades amb un altre.

En haver triat el camí de les matemàtiques, la física focalitza la seua atenció en aquells problemes que són fàcilment abordables (problemes que són exactament resolubles i que seran elevats a la categoria de problemes model). Qualsevol temàtica no relacionada amb aquests problemes model serà, inconscientment, poc o gens estudiada. El motiu d'aquesta actuació deriva del fet que l'estudi que la física fa de la resta de problemes s'aborda, exclusivament, a partir de la perspectiva que s'assoleix des de la solució i estudi dels

problemes model.

Diversos autors han emfasitzat reiteradament la importància del models. Per exemple Pilar (1968: 84), que ha estat llibre essencial d'aprenentatge de la química quàntica als anys 70 i que encara conserva vigència ens molts dels seus capítols, diu:

[...] Mitjançant aquests exemples simples podem il·lustrar una enorme quantitat d'aspectes fonamentals de la teoria quàntica sense introduir excessiva complexitat matemàtica. En la pràctica, la solució de problemes mecano quàntics és un exercici inevitable de matemàtica aplicada, sovint de nivell prou sofisticat. Un domini complet d'alguns problemes més simples és una necessària primera etapa en la eventual extensió a problemes més complexos. Els sistemes simples [...] il·lustren els conceptes i les tècniques que s'utilitzen en els problemes més complexos.

La estratègia que la física segueix en abordar nous problemes consisteix a mantenir la senzillesa conceptual dels problemes model de referència a canvi de descarregar (conscientment) la dificultat d'aquests nous problemes en la pròpia matemàtica. Els conceptes, l'anomenada física dels problemes, no canvien en abordar noves situacions. Vejam per exemple, establerta la mecànica quàntica, com s'expressa Dirac (1929: 714):

Les lleis físiques necessàries per a l'establiment d'una teoria matemàtica de gran part de la física i el conjunt de la química són conegudes, l'únic problema que hi ha és que l'aplicació exacta d'aquestes lleis condueix a equacions massa complicades per a ser solubles.

A aquest respecte potser és paradigmàtic els cas de la teoria de la relativitat general. En la seua formulació es deforma l'espai i el temps amb l'objecte de poder mantenir la senzillesa del moviment rectilini i uniform per a tots el moviments (Atkins, 1983a: 85-87; Rucker, 1977): La trajectòria d'un planeta al voltant del sol és una línia perfectament recta recorreguda amb velocitat constant, encara que la contemplem com una òrbita tancada recorreguda amb velocitat variable. La pujada i caiguda d'una pilota és també un recorregut rectilini i uniforme, però la distorsió induïda en l'espai-temps deforma la nostra percepció com una lupa i ens fa pensar que hi ha una força que frena la pilota quan puja i l'accelera quan baixa. En realitat la força no existeix i la trajectòria no és més que una il·lusió. Gravitació és la paraula que utilitzem per referir-nos a aquesta distorsió. En realitat la gravitació no existeix.

Hi ha moltes paraules en física que no tenen sentit més enllà d'un significat aparent per a etiquetar fenòmens i facilitar la seua descripció. No obstant això, sovint, els mots han anat arropant-se de *quotidianitat* que els ha convertit en alguna cosa real. Tothom parla, per exemple, d'energia. Si alcem un cos, realitzem treball i diem que hem gastat energia. Podem observar el músculs tensos que alcen el cos i imaginar que veïem realment l'energia en acció. Una volta el cos ha estat alçat, on a anat a parar aquesta energia? Diem que aquesta s'ha acumulat en forma d'energia potencial del cos elevat, però en realitat no ens podem fer ni una lleu idea d'on està. Malgrat açò, podem recuperar l'energia amb facilitat. En deixar caure el cos i produir-se el xoc contra el sol, veïem la dissipació de l'energia que tenia magatzemada el cos: hi ha soroll, es produeix calor, etc. L'energia és un concepte imaginari i abstracte que s'ha vestit de quotidianitat en tal manera que cap persona es pregunta quin color té, quin volum ocupa però tothom accepta, sense més

qüestions, que poseeix energia, de la mateixa manera que poseeix ossos o pell (Davis, 1988). Veiem ací una altra estratègia de la física: descarrega complexitat en conceptes abstractes que faciliten (simplifiquen) la descripció física del fenòmens.

Fem ara un breu apunt sobre el rol de l'experimentació com a guia de la física. El llibre de Atkins, *Mecànica Quàntica Molecular* (Atkins, 1983b), comença amb una cita textual de Max Planck: «Els experiments són els únics mitjans de coneixement que disposem. La resta és poesia, imaginació». Al costat d'acò tenim la coneguda frase d'Einstein: «És la teoria qui decideix què podem observar». No podem deslligar els dos elements d'un mateix paradigma. Totes dues afirmacions són simultàniament certes i falses. No podem dir que l'experiment va davant de la teoria o la teoria va davant de l'experiment. No descobrim res en dir, però, que el pensament va davant de l'acció, i que el pensament es construeix amb un llenguatge determinat i amb una càrrega de prejudicis i de condicionants externs (no científics) determinada.

A manera de resum, finalitzem aquest article emfasitzant que, seguint les lliçons de Newton, la física ha acceptat, sense questionar-lo, el criteri de simplicitat i, com una conseqüència, s'ha vestit de llenguatge matemàtic i ha explorat la natura sota les ulleres d'aquest llenguatge.

AGRAÏMENTS

Vull agrair-li a Joan Bisquert la detinguda i crítica lectura que ha fet del manuscrit així com els molts valuables suggeriments que m'ha fet per tal de millorar la presentació de l'article.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- ATKINS, P.W. (1983a): *La creació*, Barcelona, Labor, 85-87.
 — (1983b): *Molecular Quantum Mechanics*, Oxford University Press.
 DAVIS, P. (1988): *Superfuerza*, Barcelona, Salvat, 67 ss.
 DIRAC, P.A.M. (1929): *Proc. Roy. Soc.*, A123, 714.
 IACHELLO, F. (1986): "The mysterious world of symmetry in physics" en *Symmetries in science II*, B Gruber i R. Lenczewski eds., Nova York, Plenum, 10.
 LANDAU, L. i E. LIFCHITZ (1981): *Mecanique*, Moscou, Mir.
 NE'EMAN, Y i M. GELL-MANN (1964): *The Eightfold Way*, Nova York, Benjamin.
 NEWTON, T.D. i E.P. WIGNER (1949): *Rev. Mod. Phys.* 21, 400.
 PILAR, F. L. (1968): *Elementary Quantum Chemistry*, Nova York, McGrawHill, 84.
 RUCKER, R. v. B. (1977): *Geometry, Relativity and the Fourth Dimension*, Nova York, Dover.
 WEYL, H. (1991): *Simetria*, Madrid, MacGraw Hill, p.1.
 WYBOURNE, B.G. (1994): *Rept. Math. Phys.* 34, 9.
 — (1995): *The Physicists conception of the universe*, Torun, Lecture Notes, University M. Kopernika.
 YANG, C.N. (1994): *Chinese J. Phys.* 32, 1437.
 YOUNG, H.D. (1971): *Óptica y Física Moderna*, Mèxic, McGrawHill, cap. 13.

APÈNDIX

Les lleis de conservació deriven directament de les lleis de moviment de Newton, però és en la seua posterior reformulació de Lagrange i Hamilton (Landau i Lifchitz, 1981) on assoleixen un aspecte més suggestiu, tot revelant una estreta connexió amb la simetria. En l'esmentat llibre de Landau i Lifchitz es desenvolupa aquesta relació dins la formulació lagrangiana. Ací presentem una alternativa, basada en la formulació hamiltoniana, que resulta més directa i senzilla. Comencem escrivint les equacions de Hamilton:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p} \right) = \dot{x} ; \quad \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) = -\dot{p} ; \quad \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) = \frac{dH}{dt}$$

H representa la funció característica de Hamilton (hamiltoniana), x, p i t són, respectivament, coordenada, moment lineal i temps. Finalment, \dot{z} representa la derivada temporal de z.

Considerem que l'espai és homogeni. Açò vol dir que un canvi ($x \rightarrow x + dx$) no ha d'afectar l'hamiltoniana: $H(x + dx, p, t) = H(x, p, t)$. Aleshores $(\partial H / \partial x) = 0$. Des de la segona equació de Hamilton concloem que la derivada temporal del moment lineal és zero, per la qual cosa el moment lineal és constant (es conserva).

Les coordenades (x,p) de l'hamiltoniana representen, en realitat, dues variables generalitzades conjugades arbitràries (La coordenada x i moment lineal p són variables conjugades. També ho són l'angle de rotació ϕ i moment angular L). El raonament anterior dóna lloc igualment, a partir de la isotropia de l'espai, a la conservació del moment angular L: $(\partial H / \partial t) = 0$.

Finalment, la uniformitat del temps significa que $\partial H / \partial t = 0$. Des de la tercera equació de Hamilton concloem que $dH/dt = 0$. És a dir, l'hamiltoniana H és una constant de moviment (conservació de l'energia).