A BELEZA COMO MOTOR DA CONSTRUCIÓN DA FÍSICA

RAMÓN CID MANZANO
IES de Sar (Santiago). Dpto Didácticas Aplicadas (USC)

Calquera que sexa a opinión dun mesmo sobre a simplicidade das leis da Natureza, do que non hai dúbida é que quen posúa esa convición está en vantaxe na carreira dos descubrimentos da Física. Aínda hai moitas conexións sinxelas por descubrir, e aquel que teña unha forte certeza da existencia destas conexións ten unha probabilidade máis alta de atopalas que quen non estea seguro de que estean aí[1].

Percy W. Bridgman[2], 1927.

INTRODUCIÓN

Ao longo de toda a historia da ciencia os homes e mulleres adicados a ela coincidiron en se esforzar por atopar regras precisas no aparente caos existente ao noso arredor, por illar patróns de comportamento nos fenómenos naturais, e, en definitiva, por procurar unha orde profunda na beleza da natureza.

Este foi o principio de acción presente desde Platón, Demócrito, Pitágoras, Aristóteles ou Ptolomeo, pasando por Copérnico, Kepler, Galileo e Newton, para chegar a Mendeleiev, Maxwell, Einstein, Noether, Dirac ou Feynman. En todos eles aparece, en maior ou menor medida, a asunción de que o universo está gobernado por unha serie de principios baseados na harmonía, o equilibrio, a proporción e a economía, como sinala Frank Wilczek[3] no seu libro *O mundo como obra de arte*, de 2016.

Dentro desa beleza na natureza hai unha serie de aspectos xustapostos entre os que destacan as simetrías internas. Así, peixes, mamíferos, insectos ou follas presentan unha clara simetría bila-

[1] Esta reflexión foi tomada do artigo que Sheldon L. Glashow (Premio Nobel de Física, 1979) publicou no monográfico dedicado á Física por ENCIGA: Glashow S.L. (2010). *Como a miña carreira científica dependeu da simplicidade, as simetrías e as matrices sinxelas*. Boletín das Ciencias, Vol 23, Nº 70, 143-151.

[2] Percy Williams Bridgman (1882–1961). Físico estadounidense gañador do Premio Nobel de Física en 1946 polo seus traballos na física de altas presións.

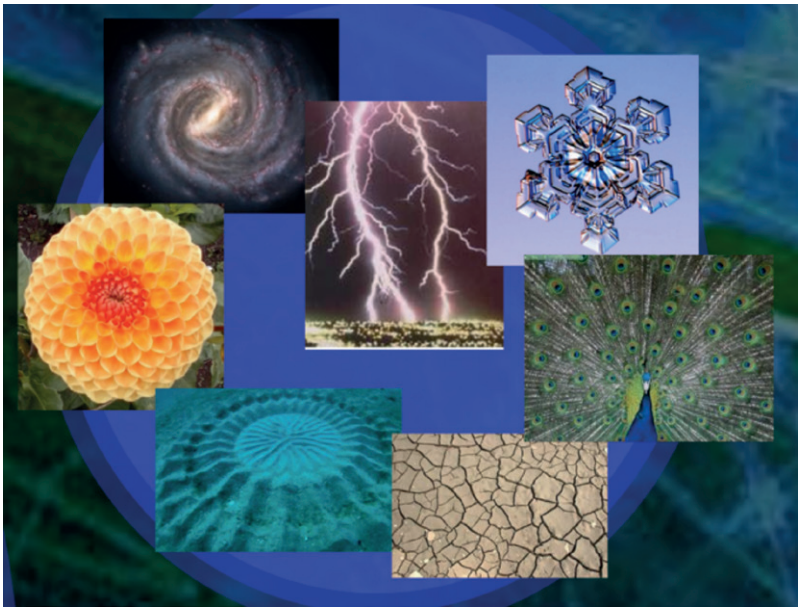
[3] Ao longo deste artigo utilizaremos algunhas das reflexións e exemplos deste Premio Nobel no libro indicado: Frank Wilczck (2016). *El mundo como obra de Arte.* CRITICA, Editorial Planeta. Barcelona.

teral; estruturas simétricas podemos atopalas nos seres vivos, desde os virus ás plantas coa súa filotaxe, desde as algas diatomeas aos grandes mamíferos. Tamén na enxeñería biolóxica vemos claros exemplos desta ansia pola simetría: o caso das abellas buscando as flores máis simétricas ou construíndo as colmeas, ou as incribles figuras realizadas no fondo do mar por unha especie de peixe globo para seducir ás femias.

Quizais as simetrías sexan un motor evolutivo, pois a fin de contas, o carbono, átomo central para os sistemas vivos, presenta unha exquisita simetría tetraédrica. A imaxe do ADN evoca esa profunda relación entre evolución e simetría. Volveremos a esta cuestión contra a parte final deste artigo.

Con todo, debemos recoñecer que as simetrías nos seres vivos non acadan a perfección xeométrica da materia inerte. As estruturas cristalinas, como o caso do diamante ou a formacións de extraordinaria regularidade nas folerpas de neve son claros exemplos disto. E aínda máis, as incribles formacións fractais que desde formacións das nubes, pasando polos debuxos que fan os lóstregos e as plumas dos pavos reais, son outro xeito de nos sinalar o camiño.

Outra maneira no que a simetría se fai presente é na chamada simetría de escala. Nela, ao modificar o tamaño de calquera parte dunha forma xeométrica un certo número de veces, a figura seguirá parecendo a mesma. Esta idea, básica para a xeometría fractal, maniféstase a miúdo, coas súas inevitables imperfeccións, nas estruturas cristalinas e no crecemento dos seres vivos.



O escenario

Pero, sen que a simetría, a proporción e a harmonía perdan un ápice do seu protagonismo, hai outro trazo fundamental no devir dos procesos naturais: a fuxida do equilibro permanente, do estático. Pequenos cambios nas condicións ambientais xeran enormes transformacións nas estruturas xeolóxicas; mutacións espontáneas dan lugar a variacións xenéticas profundas, ou desde o embrión indiferenciado aparecen formacións celulares asimétricas que dan lugar a tecidos e a órganos.

Hai, pois, unha delicada mestura entre o equilibrio baseado no imperio da simetría subxacente e os cambios que suceden cando se producen roturas desas simetrías. Nas descricións da natureza que atopamos desde a Física ocorre exactamente isto, e os grandes logros científicos están protagonizados desde a comprensión dese delicado equilibrio.

Unha definición xenérica de Arte di que é aquela actividade ou produto realizado cunha finalidade estética e tamén comunicativa, mediante a que se expresan ideas, emocións ou, en xeral, unha visión do mundo, a través de diversos recursos. Non é difícil ver que a ciencia é unha forma de arte que está nun plano non inferior ás das outras artes que se valen de recursos plásticos, lingüísticos, sonoros, corporales ou mixtos.

As reflexións, ideas e argumentos que van deseguido perseguen valorizar esa dimensión artística da ciencia, e que se fundamenta nos mesmos principios que as outras artes: estética, comunicación, expresión e emocións.

A LINGUAXE DA FÍSICA

A verdade encóntrase na simplicidade e non na multiplicidade e na confusión das cousas.

Isaac Newton.

Einstein dicía que a alegría de ver e entender é o máis perfecto don da natureza, pero como afirmaba Schrödinger, é un milagre que, a pesar da perturbadora complexidade do universo, poidamos descubrir certas regularidades nos fenómenos naturais.

Un exemplo neste sentido que pon Eugene Wigner[4] é a regularidade descuberta por Galileo de que dúas pedras, deixadas caer simultaneamente, cheguen ao chan ao mesmo tempo. E non importa o lugar da Terra onde se leve a cabo, da forma, tamaño e constitución das pedras, ou da época do ano en que se faga. Pode que alguén, lendo isto un tanto distraído, poida pensar que estamos ante un exemplo ben comprendido hai séculos, e, porén, tivo que ser a Relatividade Xeral a que establecese de xeito definitivo esta "aparente casualidade".

Como indicaba Schrödinger[5], non é en absoluto "natural" que existan leis da natureza, e moito menos que sexamos quen de as descubrir. En efecto, parece un auténtico milagre que se poidan unir no mesmo cadro de reflexión aspectos da natureza tan distantes como as leis universais que gobernan os constituintes últimos da materia, e aquelas, por exemplo, que están detrás da evolución dos seres vivos, e o desenvolvemento das súas habilidades.

Murray Gell-Mann[6] sinala a este respecto que parece haber un enorme baleiro entre a Física fundamental e outros campos do coñecemento. Así, as leis da Física de partículas son exactas, universais e inmutables, e falan de entes intercambiables –como os eléctrons ou fotóns- e que carecen de individualidade. Mentres, a historia natural ocúpase de obxectos individuais, incluíndo os propios seres humanos. As primeiras semellan inequivocamente exactas, mentres que as segundas son aproximadas. Porén, as leis mecanocuánticas fundamentais da Física son finalmente as causantes desas individualidades. A evolución física do universo, dirixida por esas

[4] Eugene Wigner (1960). *The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences.* Communications in Pure and Applied Mathematics, vol. 13, No. I. John Wiley & Sons, New York Inc.

[5] Erwin Schrödinger (1983). *¿Que es la vida?*. Tusquets Editores, Barcelona.

[6] Murray Gell-Mann (1995). *El quark y el jaguar: aventuras en lo simple y en lo complejo*. Metatemas Editorial: Tusquets Editores S.A. Barcelona

leis, foi producindo obxectos particulares espraiados por todo el, como o noso propio planeta, e despois, a través de procesos como a evolución biolóxica na Terra, esas mesmas leis deron lugar a entidades particulares como un colibrí ou un elefante, quen de se adaptaren e aprenderen. Por último, apareceron outros obxectos particulares, os seres humanos, capaces de desenvolver a linguaxe e a civilización, e de descubrir esas mesmas leis físicas fundamentais.

Murray Gell-Mann

A armazón que permite que o aparente mundo frío e abstracto da Física se conecte co outro mundo que conforma o que nos é máis cercano, é a linguaxe matemática. Adóitase adxudicar a Galileo a reflexión de que as leis da natureza están escritas na linguaxe da matemática[7], e sería o grande Isaac Newton quen na súa transcendental obra *Philosophiæ naturalis principia mathematica* sinalou definitivamente a toda a ciencia o camiño para progresar a través do cálculo matemático.

Non sempre as mátemáticas van antes que a Física, pois ás veces é a necesidade dunha explicación dun fenómeno natural o que leva a desenvolver ferramentas matemáticas. Ese foi o caso precisamente de Newton, cando crea o cálculo infinitesimal e integral para dar resposta ás súas preguntas no campo do movemento dos corpos. Pero é moi certo que na maioría dos casos foron as Matemáticas as que estiveron á espera de que os físicos as necesitasen. O matemático alemán Hermann Minkowski[8] ía aínda máis aló cando manifestaba que detrás dunha elegante construción matemática se agochaba un fenómeno físico agardando a ser explicado.

Con todo, a Física elixe determinados conceptos matemáticos para a formulación das leis da natureza utilizando unha pequena parte de todo o que lle ofrece a matemática. Ademais, é habitual que o físico faga uso do seu coñecemento matemático para desenvolver as súas propostas, independentemente que xa existise ese formulismo previamente. Son coñecidos os casos de Heisenberg na súa proposición para a mecánica cuántica a partir dunha construción abstracta que se convertiría finalmente na súa representación matricial da mecánica cuántica, e de Einstein, quen segundo avanzaba na súa relatividade xeral foi descubrindo que a estrutura matemática subxacente xa estaba formulada.

Un caso verdadeiramente notable é o de Emmy Noether[9] que conectou de forma case que máxica a estética na Física coa simetria na matemática. No seu famoso teorema expresa que calquera simetría diferenciable, proveniente dun sistema físico, ten a súa correspondente lei de conserva-

[7] Galileo no seu libro *IL SAGGIATORE* indica como segunda afirmación "A filosofía [natural] está escrita nese grandioso libro que temos aberto ante os ollos, (quero dicir, o universo), pero non se pode entender se antes non se aprende a entender a súa linguaxe, a coñecer os caracteres nos que está escrito. Está escrito na lingua matemática e os seus caracteres son triángulos, círculos e outras figuras xeométricas, sen as que é imposible entender nin unha palabra; sen eles é como xirar vanamente nun escuro labirinto".

[8] Hermann Minkowski (1854-1909), desenvolveu a teoría xeométrica dos números. Os seus traballos máis destacados foron realizados nas áreas da teoría de números, a física matemática e a Teoría Especial da Relatividade.

[9] Emmy Noether (1882-1935). Fixo contribucións moi importantes ás Matemáticas e á Física teórica. Traballou en matemáticas sobre a teoría de invariantes e a teoría de aneis en álxebras non conmutativas. En Física, chegou ao resultado crucial coñecido como Teorema de Noether, que converte condicións de invarianza en sistemas (simetrías) en leis de conservación.

ción. Así, se un sistema físico se comporta con independencia da súa orientación no espazo implica que as leis físicas que o gobernan teñen simetría de rotación. A partir desta simetría, o teorema de Noether mostra que o momento angular do sistema se debe conservar. Se un experimento físico dá o mesmo resultado en calquera lugar e en calquera momento, entón as súas leis son simétricas baixo traslacións no espazo e no tempo. Estas simetrías explican as leis de conservación do momento lineal e da enerxía deste sistema, respectivamente. É a simetría das leis físicas que gobernan o sistema a que é responsable da lei da conservación.

Emmy Noether

Este teorema converteuse nunha ferramenta fundamental na Física teórica, permitindo determinar as cantidades conservadas a partir das simetrías observadas nun sistema físico. E, recíprocamente, facilita a descrición dun sistema físico a partir de leis físicas hipotéticas. Así, se un modelo teórico que se propón para explicar un novo fenómeno físico presenta unha determinada simetría terá que aparecer a conservación dunha determinada magnitude. A observación experimental deste comportamento será a clave para saber se ese modelo proposto é correcto.

Na teoría cuántica de campos aparece un tipo especial de simetría abstracta (chamada gauge) que describe a interacción electromagnética, e, polo tanto, debe aparecer unha magnitude conservada. Ademais, dado este tipo de simetría –tecnicamente é o grupo unitario de simetría U(1)– esa magnitude conservada ten que ser un escalar. A magnitude en cuestión é a carga eléctrica. Levando a analoxía a interacción débil e á forte, emerxen de forma natural dous novas magnitudes: a carga de "sabor" e a carga de "cor" [10].

Dun xeito igual de potente, aínda que menos directo, podemos tamén relacionar o teorema da matemática alemá coa proposta da existencia dos neutrinos. A desintegración beta presentaba no primeiro terzo do século XX un problema no seu balance enerxético, pois os electróns emerxentes presentaban un espectro enerxético contínuo e variable incompatible co cumprimento do principio da conservación da enerxía. A fe dos físicos neste principio levou a Pauli a postular a existencia dos neutrinos (o por mellor dicir, neste caso, os antineutrinos), que acompañaban aos electróns nese tipo de desintegración.

Isto que vimos de considerar xa nos dá pistas da incrible relación entre a Física e as Matemáticas, baixo unha especie de conxuro baseado na harmonía, a simetría e a economía. Veremos máis adiante outros exemplos, pero cómpre facer algunha precisión tamén. Ás veces dise que a conexión entre estas dúas disciplinas débese a que, dado que a Matemática utiliza os conceptos máis simples, é inevitable que estes acaben por aparecer en calquera formalismo. Mesmo se terxiversan as palabras de Einstein cando indicaba que as únicas teorías físicas que desexamos aceptar son as fermosas e as máis simples. Pero os conceptos matemáticos non son elixidos pola súa sinxeleza conceptual, senón pola súa capacidade para dar lugar a manipulacións in-

[10] Segundo o modelo estándar da Física de Partículas, denóminase "sabor" ao atributo que distingue a cada un dos seis quarks: u (up), d (down), s (strange), c (charm), b (bottom) e t (top). A carga de "cor" é unha propiedade cuántica que permite a interacción forte entre quarks (do mesmo xeito que a carga eléctrica é a que está presente na interacción electromagnética). Os quarks teñen tres cores, análogo coas tres cores fundamentais: vermello, verde e azul.

telixentes e razonamentos brillantes. Abonda como exemplo que a mecánica cuántica ten no espazo de Hilbert complexo a súa representación matemática, estando ben lonxe de ser un formulismo simple que poida xurdir de forma natural da observación dos fenómenos cuánticos.

Stephanie Chan

Esta relación é tan misteriosa, tan inesperada, mesmo tan inevitable, que Eugene Wigner non dubidou en expresala como "a irrazoable eficacia da matemática nas ciencias naturais"[11]. Máis atrevido é o cosmólogo Max Tegmark[12], quen non dubida en afirmar que "a Física é tan exitosamente descrita pola matemática porque o mundo físico é completamente matemático e isomórfico a unha estrutura matemática".

O físico e matemático Roger Penrose sostén a existencia real do mundo matemático platónico, en oposición a outras posición que consideran produto dunha mera ficción ou imaxinación desbordante. Para el os obxectos matemáticos non son invencións, elaboradas construcións mentais que non teñen auténtica realidade, senón descubrimentos de verdades que "xa están aí", verdades cuxa existencia é independente dos matemáticos[13].

E aínda máis, Stephanie Chan[14], neurecientífica de Princeton, sinala que a través da cortiza orbitofrontal o noso cerebro é quen de ler á perfección a linguaxe matemática. Dito doutro xeito, é quen de comprender o que nos rodea, e daquela é unha vantaxe adaptativa, estando ligada, polo tanto, esa adaptación á propia evolución. Así que á aserción de Galileo, de que a natureza está escrita na linguaxe das Matemáticas, poderíaselle engadir: "por selección natural".

DA SIMETRÍA E A BELEZA NA FÍSICA

"Pulchritudo splendor veritatis"[15]

O relato que vén deseguido non pretende percorrer de xeito exhaustivo a historia das contribucións á Física, en termos de beleza, ao longo dos últimos dous mil cincocentos anos. Como é evidente, isto escapa das posibilidades desta revista, e, aínda máis, da capacidade de quen isto escribe. Imos coller aqueles acontecementos que mellor se acaen para o discurso que se pretende neste artigo, e que, non esquezamos, pretende conectar criterios estéticos, de harmonía e simetría coa aparición e evolución dos conceptos físicos. Polo tanto, a división que a continuación se fai ten soamente a intención de facilitar a lectura, e non pretende, en ningún caso, establecer unha cronoloxía precisa na que aparezan todos e cada un dos protagonistas da contribucións estéticas á Física ao longo dese tempo.

[11] Eugene Wigner (1960). *The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences...* Op. Cit.

[12] Max Tegmark (2015). *Nuestro universo matemático: En busca de la naturaleza última de la realidad.* Editorial Antoni Bosch, Barcelona.

[13] Tomado de Eduardo Badía Serra (2008). *Roger Penrose. Una aproximación elemental a su filosofía de la ciencia.* TEORÍA Y PRAXIS Julio 2008, No. 13, pp 53-80.

[14] S.C.Y. Chan, Y. Niv & KA Norman (2016). *A probability distribution over latent causes in the orbitofrontal cortex* . The Journal of Neuroscience 30(30):7817-7828.

[15] *"A beleza é o esplendor da verdade"*. Vella sentencia latina.

Botando a vista nas orixes.

Pitágoras

Evidentemente, situar no tempo o comezo da Física, tal como hoxe a concebimos, non é fácil, pero non hai que ser moi imaxinativo para ir a antiga Grecia para o descubrir. É certo que principios sinxelos como as regularidades astronómicas eran coñecidas antes, pero pódense considerar as regras musicais de Pitágoras como unha das primeiras leis cuantitativas da Física[16]. O matemático de Samos estableceu a conexión numérica entre harmonía, número e lonxitude expresando unha moi exacta conexión entre tensión da corda, lonxitude e tono. Na linguaxe actual utilizamos ecuacións que establecen como cambia a frecuencia de vibración dunha corda cando variamos a súa lonxitude. A partir desas ecuacións chegamos a que a frecuencia é proporcional á lonxitude e a raíz cadrada da tensión. Pitágoras chegou a esa conclusión previamente sen usar o concepto de frecuencia, pero, de igual xeito que o fai a linguaxe actual, estableceu que as notas soan ben xuntas se as súas frecuencias están en fraccións de número enteiros pequenos. Estas observacións provocaron unha auténtica conmoción entre os pitagóricos, pois decatáronse de que os fenómenos da natureza podían explicarse mediante unha lei matemática simple. Non é de estranar que para eles "todo é número, e o número suxeita á harmonía". Esta escola estaba conformada por astrólogos, músicos, matemáticos e filósofos, e a súa crenza máis destacada era, obviamente, que todas as cousas son, en esencia, números. O pentagrama (estrela de cinco puntas) era o seu máis importante símbolo relixioso, que o denominaban "saúde". Vén aquí moi apropiada a sentencia de James Joseph Sylvester[17]: "As Matemáticas son a música da razón".

Os pitagóricos ocupáronse, naturalmente, dos polígonos regulares, sendo o seu pentagrama unha figura de perfecta simetría en forma pentagonal. Polo demais, estas figuras matemáticas pasan da imaxinación á realidade cos hexágonos nas celas das abellas, os heptágonos nalgunhas moedas, os octógonos nos sinais de stop, e así indefinidamente ata as circunferencias, a figura ideal por antonomasia, que poden seren consideradas como polígonos de infinitos lados.

En efecto, o círculo (ou a esfera na perspectiva tridimensional) vai ser a clave de moitas das cosmoloxías na antiga Grecia. Non podemos estendernos aqui nesta cuestión[18], pero desde Anaximandro que postula os ceos esféricos que encerran a atmosfera dunha Terra cilíndrica; a Pitágoras –outra vez– que entende a Terra como unha esfera, arredor da que o Sol, a Lúa e os planetas xiran en círculos concéntricos, fixo cada un a unha esfera; ou Platón, co que axiña nos imos atopar, que fai da esfera a figura perfecta, e polo tanto entende o universo como unha esfera; ou as diferentes propostas, seguindo coa esfera como protagonista, de Parménides, Filolao,

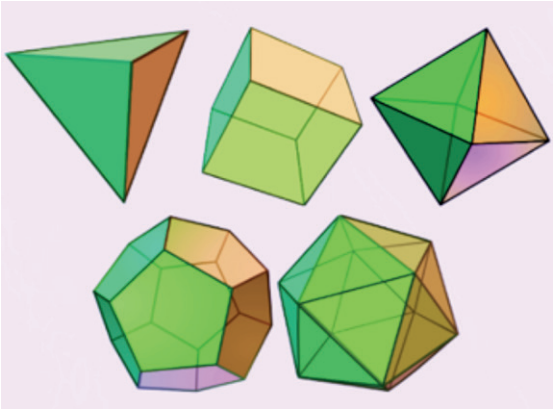
[16] Frank Wilczck (2016). *El mundo como obra de Arte...* Op. Cit.

[17] James Joseph Sylvester (1814-1897) matemático inglés, fixo importantes contribucións no campo das matrices (acuñou os termos matriz, invariante, ou discriminante, entroutros), así como á teoría dos invariantes alxebraicos, aos determinantes, á teoría de números, ás particións e á combinatoria.

[18] Para máis información sobre esta cuestión ver: Alvarez J.L., Marquina, J.E., Ridaura R. (1993). *La esfera y el círculo en la historia*. Revista Ciencias, Abril, Nº 30: 3-9. Facultad de Ciencias, UNAM, México.

Eudoxio ou Callipo; a gran síntese de Aristóteles na que aparece a esfera e o círculo nun lugar prominente: "*Hai algo que se move con movemento continuo, que é o movemento circular… todo corpo esférico é eterno e incapaz de repouso*". Aristarco de Samos, alcumado "o Copérnico da Antigüidade", situaba ás estrelas fixas e ao Sol inmóbiles, e a Terra movéndose arredor do Sol nun círculo[19]; e chegamos finalmente a Hiparco, e por suposto a Ptolomeo, que fixeron cos seus epiciclos e deferentes, unha cosmoloxía baseada nunha declaración de fe na beleza irrenunciable da figura do círculo.

Volvamos de novo ás figuras xerais, e tamén ao tempo anterior, cando buscamos a máxima regularidade nos corpos tridimensionais, obrigando a que presenten só un tipo de polígonos regulares que se atopan de maneira idéntica en cada vértice. Lonxe dunha serie infinita, como no caso das figuras planas, chegamos só a cinco posibilidades. Son os "sólidos platónicos": tetraedro, cubo, icosaedro, dodecaedro e octaedro. E non hai máis tipos, pois a simetría reduce drasticamente as opcións, sendo extraordinario que estas regularidades xeométricas só deixen lugar a esas cinco figuras. Reciben o nome do filósofo ateniense porque foi el, Platón, quen construiu a partir deles a súa particular visión do mundo físico.



Os sólidos platónicos

Pero eses sólidos tan especiais aparecen en formato natural como no caso do vírus do herpes, da hepatite ou o da sida, recreando o icosaedro ou o dodecaedro. Os radiolarios preséntanse en figuras tridimensionais que nos levan tamén aos sólidos platónicos. E pasando ao mundo inanimado dos minerais atopamos aos cubos, aos tetraedros e aos octaedros por todas partes.

Como sabemos, os antigos gregos propuxeron por un lado os catro elementos como integrantes da materia: fogo, auga, terra e aire[20]. Platón considera que cada un deses elementos se artella en catro tipo de átomos diferentes que toman a forma de catro dos cinco sólidos platónicos: os átomos de fogo son tetraedros, e esas catro esquinas puntiagudas equidistantes explican os

[19] Este sistema tivo pouca aceptación, ademais de por consideracións filosóficas, por ir en contra da "experiencia cotiá".

[20] Empédocles de Agrigento (495/490 a.C – 435/430 a.C) postulou a teoría das catro raíces, ás que Aristóteles máis tarde chamou elementos, xuntando o fogo de Heráclito, a agua de Tales de Mileto, a terra de Xenófanes e o aire de Anaxímenes.

efectos que causa; os de auga son icosaedros que se deslizan suavemente uns sobre outro; os átomos de terra son cubos que se poden empaquetar moi próximos, e os átomos de aire teñen que responder á dobre cualidade de poder ser quentes e húmidos, polo que están en médio do fogo e da auga, sendo octaedros. Outra vez simetría, harmonía e leis naturais.

Platón

Non podemos esquecer a proposta do atomismo mecanicista de Leucipo[21] e Demócrito (siglos V e IV a.C.), na que os átomos son considerados como partículas materiais indivisibles, que non posúen cualidades e que se diferencian polo seu tamaño e forma. É verdade que esta teoría atomista tivo outros defensores, con diferentes cambios, como Epicuro en Atenas ou Lucrecio en Roma, pero o rexeitamento de Aristóteles, baseado na imposibilidade da existencia do baleiro (que debería existir entre os átomos), levou á proposición atómica ao case esquecemento durante moitos séculos.

Ademais dese "horror vacui", Aristóteles introduce unha segunda idea de gran trascendencia: a lúa, os planetas e as estrelas sitúanse nun medio que non pode ser o que existe no noso mundo. Dada a imposibilidade do vacío, esa sustancia diferente onde habitan os corpos celestes ten que ser especial: o quinto elemento[22], a quinta esencia ou o éter[23]. Aí situamos o quinto sólido platónico: o dodecaedro.

É certo que todos estas proposicións fracasaron desde a perspectiva científica actual, porén detrás de todas elas, e en particular a visión de Platón, hai a intención clara de someter a calquera idea sobre a natureza ao principio de beleza conceptual, baseada na regularidade matemática e a simetría perfecta. Dos diálogos que aparecen na súa obra principal, A República, dedúcese a idea central do ideal platónico: o real non está a altura do ideal, e o mundo físico é unha representación defectuosa da realidade última que debemos perseguír. Se as teorías son fermosas, pero non concordan exactamente coas observacións, peor para as observacións[24]. Máis adiante, cando falemos da visión que tiña Einstein do universo, atoparemos unha reflexión semellante.

Finalizamos este apartado con Claudio Ptolomeo que foi herdeiro[25] da concepción do universo de Platón e Aristóteles, establecendo a beleza do círculo como eixe do seu sistema. Porén non se contentou con dar a súa cosmovisión senón que foi quen de construír un modelo xeométrico

[21] Non imos entrar no debate sobre se Leucipo existiu verdadeiramente, xa que algúns consideraron que non era máis ca unha creación de Demócrito, pois non é importante en relación á existencia real da teoría atómica antiga.

[22] Cómpre dicir que noutras cosmogonías antigas como a indú, chinesa ou xaponesa tamén apareceron os cinco elementos, ainda que con certas diferenzas conceptuais.

[23] Outro debate de interese pode abrirse a partir da proposta do "éter" durante o século XIX para entender a propagación da luz no espazo "baleiro", e outros campos cuánticos que permean o universo e que tentan explicar as súas propiedades e comportamento.

[24] Frank Wilczck (2016). *El mundo como obra de Arte...* Op. Cit., p. 73.

[25] O seu tratado astronómico foi titulado como *Almagesto* polos árabes e traducido ao español como *El gran tratado*. Estivo presente na astronomía ata ben entrado o S.XV en que comeza a decaer coa aparición dos modelos heliocéntricos.

quen de explicar a posición dos corpos celestes no pasado e de predecir as do futuro. A través dos seus epiciclos e deferentes puido explicar a retrogradación dos planetas e as súas variacións de luminosidade.

Aquela idea da antiga Grecia de que todo está feito nuns poucos bloques e que a simetría dirixe a búsqueda de respostas segue a estar vixente no camiño da Física fundamental no tempo actual.

Entrando na idade moderna.

Falar de Física na idade moderna implica comezar por Galileo. Con todo, faise necesario previamente citar aos precedentes que ao longo da idade media crearon o método científico e cuestionaron a física aristotélica. Algúns dos máis senlleiros son de seguro coñecidos para o lector ou lectora: Alhacén, Avicena, Ibn al-Haytam, Averroes, Robert Grosseteste, Roger Bacon, Alberto Magno, Duns Scoto, Guillermo de Ockham, Jean Buridan e Nicolás Oresme.

Sería moi prolixo referir as aportacións, mesmo resumidas, de cada un deles, pero cremos de especial interese, en relación ao que estamos a tratar, a aportación de Ockham no que se coñece como "principio da parsimonia" ou "principio da economía" (tamén "a navalla de Ockham") que establece que se un fenómeno pode ser explicado sen supoñer entidade hipotética algunha, non hai motivo para supoñela. Polo tanto, sempre debe optarse por unha explicación en termos do menor número posible de causas, factores ou variables. Non significa, desde logo, que a explicación máis simple sexa sempre a verdadeira, senón que o seu sentido é que en condicións idénticas sexan preferidas as teorías máis sinxelas.

Centrándonos xa no sabio de Pisa, debemos salientar no contexto da nosa reflexión, a súa aposta pola simetría física no debate sobre o sistema copernicano. O comportamento dos obxectos na Terra, tan diferente ao observado se esta xirase arredor do Sol, era un dos argumentos que utilizaban os opositores ao heliocentrismo copernicano. No seu "*Diálogos sobre os dous máximos sistemas do mundo*"[26] de 1632, Galileo sinala que ese comportamento non era de esperar poñendo como exemplo o que ocorrería cos fenómenos mecánicos analizados por un observador nun barco que se desprazase con movemento rectilíneo uniforme. Esta simetría do espazo e do tempo, que recibiría moi posteriormente o nome de "principio da relatividade de Galileo" pasou a formar rapidamente parte do núcleo da filosofía natural do século XVII. Christiaan Huygens faría uso del para explicar o problema da colisión dos corpos e Newton o engadiría como Corolario V ás súas leis do movemento nos seus "Principia" de 1687. Non menor foi a xeralización que o xenial científico italiano fixo a raíz do descubrimento dos satélites de Xúpiter. Unha vez que había corpos celestes que xiraban arredor doutros diferentes á Terra, xa non tiña sentido manter o enleado sistema tolemaico que se xustificaba por facer do noso planeta o centro de todos os movementos. Porén, a súa adhesión as propostas cosmolóxica do seu tempo, sobre todo á de Kepler, non foi incondicional. Disto falaremos uns parágrafos máis abaixo, xa que primeiro debemos comentar esas novas proposicións sobre como era o universo.

Copérnico en 1543, xa moi próximo ao seu pasamento, pon en marcha a revolución científica dos séculos XVI e XVII coa súa obra *De revolutionibus orbium coelestium*. Pero se o traemos aquí non é por esta razón, senón porque, por unha parte, a súa intención era propoñer un modelo alternativo, máis simple, ao sistema tolemaico que era demasiado complicado, e, doutra, a súa

[26] O libro, en realidade, leva o título *"Dialogo di Galileo Galilei linceo matematico sopraordinario dello Studio di Pisa. E Filosofo, e Matematico primario del Serenissimo Gr. Dvca di Toscana. Doue ne i congreffi di quattro giornate fi difcorre fopra i due Massimi sistemi del mondo Tolemaico, e Copernicano; Proponendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali tanto per l'una, quanto per l'altra parte"*.

concordancia co ideal platónico e aristotélico en relación á perfección do círculo e a esfera[27]. En efecto, considera que o o universo comprende oito esferas, co Sol inmóbil no centro e as estrela fixas na máis exterior. Os seis planetas -Mercurio, Venus, Terra, Marte, Xúpiter e Saturno- xiran en cadansúa esfera. A Lúa xira na súa propia esfera arredor da Terra.

NICOLAI
COPERNICITO
RINENSIS DE REVOLVTIONI-
bus orbium cœlestium,
Libri VI.
IN QVIBVS STELLARVM ET PLANARVM ET ERRATICARVM MOTVS, EX VETERIBVS ac recentibus observationibus, restituit hic autor. Præterea tabulas expeditas luculentasq; addidit, ex quibus eosdem motus ad ejusdem tempus Mathematicum studiosus facillime calculare poterit.
ITEM, DE LIBRIS REVOLVTIONVM NICOLAI Copernici Narratio prima, per M. Georgium Joachimum Rhæticum ad D. Ioan. Schonerum virum longe.
BASILEAE, EX OFFICINA HENRICPETRINA

"Revolutionibus" de Copérnico

Como é sabido, o modelo copernicano supoñía un auténtico problema desde o punto de vista filosófico (ideolóxico e relixioso)[28], e mesmo o astrónomo Erasmus Reinhold (1511-1553), que foi quen por primeira vez o utilizou para facer cálculos (*Táboas prusiás*), nada dixo sobre a veracidade do modelo. Con todo deixaba claro que "o movemento celestial é uniforme e circular ou composto de movementos uniformes e circulares"[29].

Mantendo a beleza do círculo e a esfera como guía central do modelo, o gran astrónomo da segunda metade do S. XVI, Tycho Brahe (1546-1601), tentou combinar a simplicidade do sistema copernicano coa ortodoxia do modelo tolemaico. No seu modelo[30] situou á Terra no centro mentres que os cinco planetas xiraban arredor do Sol, que o facía en torno ao noso planeta.

Estamos a falar dunha época que superaba en dous mil anos á de Platón e Aristóteles, pero o "culto" á harmonía e á simetría seguían a ser o eixe das propostas na explicación dos fenómenos astronómicos. Pero unha nova estética estaba a piques de se consolidar coa presentación da proposta de Johannes Kepler (1571-1631).

Porén, o alemán, nos seus primeiros tempo de astrónomo, recupera a estética platónica cando se decata de que podía construír un modelo do universo a partir dos cinco sólidos platónicos. Cada planeta xira nunha esfera que circunscribe a un sólido platónico. Dentro da esfera do movemento de Saturno –o planeta mais exterior– inserta un cubo, dentro do cal estaba a esfera á que pertencía a órbita de Xúpiter. Esta contiña un tetraedro que presentaba dentro a esfera do desprazamento de Marte, que contiña inscrito o dodecadedro. Entre as esferas da Terra e Venus

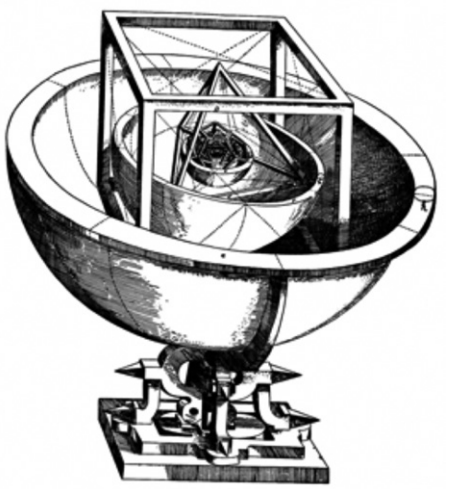
[27] A obra consta de 6 libros. No que se refire á presenza da esfera e do círculo como eixe da súa xeometría destacamos o Libro I, do capítulo 1 ao 11, no que se dá unha visión xeral da teoría heliocéntrica e unha exposición resumida da súa cosmoloxía, sendo o círculo e a esfera os protagonistas da estrutura e dos movementos; no Libro II descríbense os principios da astronomía esférica e preséntase o catálogo das estrelas fixas, mentres que no Libro III aborda a precisión dos equinoccios e explica os movementos aparentes do Sol; no libro IV trátase do movemento da Lúa, e no Libro V explícase como calcular as posicións das estrelas e se ofrecen táboas para os cinco planetas; finalmente, no Libro VI abórdase o temas sobre a latitude dos cinco planetas en relación á eclíptica.

[28] En evitación de problemas, a obra de Copernico levaba un prólogo escrito polo editor, Andreas Osiander, no que se indicaba que a órbita da Terra erá só unha ficción matemática que axudaba ao cálculo e facilitaba a comprensión dos conceptos astronómicos.

[29] Tomado de Alvarez J.L., Marquina, J.E., Ridaura R. (1993). *La esfera y el círculo en la historia...* Op.Cit.

[30] Tycho Brahe (1546-1601), aínda mantendo a irrenunciable adhesión á simetría da esfera e o círculo, proporcionou unha enorme cantidade de datos moi precisos, que servirían a Kepler para a construción do seu modelo.

estaba o icosaedro, e entre Venus e Mercurio o octaedro. Este modelo presentado na súa obra *Mysterium Cosmographicum* (1596) permitía calcular as distancias relativas entre os planetas polo que Kepler creu que chegara a coñecer "o plan divino".



"*Mysterium Cosmographicum*" de Kepler.

Johannes Kepler

A pesar da elegancia das aparentes relacións xeométricas do cosmos, o modelo resultou incorrecto, e, como sabemos, foi o propio Kepler quen, utilizando os datos astronómicos precisos disponibles, e despois de notables esforzos, chegaría á descrición das órbitas elípticas e as relacións matemáticas entre os seus parámetros en forma das súas famosas tres leis na súa obra mestra[31]. Esta renuncia á harmonía das esferas e círculos non foi incruenta, pois produciu en Kepler unha enorme frustación e dor. De feito, librou unha enorme batalla contra si mesmo tentando entender os datos astronómicos no que el mesmo denominou como "a batalla contra Marte"[32], pois foron os datos deste planeta os que desde o comezo non cadraban coa relacións xeométricas que o seu modelo de sólidos platónicos implicaba[33].

Finalmente, coa obra de Kepler, a esfera e o círculo perden o seu lugar de privilexio como formas xeométricas preferidas pola natureza. Algúns non o aceptaron, e o propio Galileo ignorou as tres leis do alemán e os descubrimentos que este realizou en óptica e co telescopio kepleriano. O italiano defendería firmemente, ata a fin da súa vida, os círculos e epiciclos como única forma aceptable para os movementos no ceo. Galileo, seguindo esta liña de pensamento, non aceptaba a existencia dos cometas dadas as súas traxectorias non circulares, interpretando que eran "obxectos aparentes" como o arco da vella ou os halos arredor do Sol ou a Lúa. Porén, non tivo problema para preferir outras figuras, como a parábola, para os movementos de obxectos na superficie terrestre.

[31] *Astronomia Nova* (1609).

[32] Bretos Linaza, J. (2000). Kepler, el último nexo entre música y astronomía. Musiker. 12, 2000, 147-159. Neste artígo pode atoparse a presentación do astrónomo alemán da súa visión da "música das esferas" producidas polos planetas no seu movemento arredor do Sol.

[33] A pesar da contundencia dos datos experimentais, Kepler regresaría parcialmente ao "ideal platónico" na segunda edición do seu *Mysterium Cosmographicum* en 1621.

E finalizamos este apartado adicado a idade moderna[34] con Newton, como non! O seu universo era una inmensa máquina que funcionaba seguindo leis creadas e mantidas por unha divinidade persoal pero trascendente. Para el Deus era literalmente un matemático, polo que entendía que o mundo físico estaba gobernado por leis matemáticas, e daquela estaba dotado dunha enorme orde e regularidade[35]. Precisamente, no "Escolio Xeral" co que conclúe os Principia indica Newton: "Este sistema tan elegante co Sol, os planetas e os cometas, non podería ter xurdido sen o designio e a soberanía dun ser intelixente e poderoso"[36].

Na década de 1670, Newton apartou a mirada da matemática "simbólica" dalgúns coetáneos e interesouse polos tratados xeométricos dos antigos[37]. Moitos dos membros da Royal Society mantiñan a idea de que os resultados deberían propoñerse como hipóteses abertas a debate. Newton, pola contra, aspiraba á certeza absoluta[38], e mentres que podía aceptar que as súa propostas no campo da filosofía natural daban lugar a controversia era categórico en relación aos seus resultados matemáticos. Esa admiración pola xeometría levouno a súa obra maestra da nova análise matemática: De methodis serierum et fluxionum. [39]

Cómpre sinalar que o maxisterio de Newton no campo da xeometría acabou por ser un problema para a matemática británica. A veneración cara a súa obra, xunto co chauvinismo pola controversia con Leibniz[40], deu lugar a que se mantivese unha adhesión ao método xeométrico no cálculo mentres no continente foi o enfoque analítico o que triunfaría.

Volvendo á filosofía natural, Newton realiza a primeira gran unificación, unindo a física celestial e a terrestre. Poderíamos citar a coñecida historia da mazá e a Lúa, pero quizais sexa a imaxe aparecida nos seus *Principia* do lanzamento dun proxectil desde unha montaña o que mellor

[34] Quedan sen considerar, obviamente, outras grandísimas figuras da Física -e das Matemáticas e ciencias en xeral- da época moderna. A seguinte listaxe -inevitablemente incompleta- explica pola súa lonxitude a imposibilidade de nos estender de forma máis ampla: Francis Bacon, Gottfried W. Leibniz, Pierre Gassendi, René Descartes, Christiaan Huygens, Robert Boyle, Robert Hooke, Jean Le Rond d'Alembert, Charles-Augustin de Coulomb, Joseph-Louis Lagrange, Pierre-Simon Laplace, Mikhail V. Lomonosov, Leonhard P. Euler, Antoine L. Lavoisier.

[35] Cómpre indicar que Newton sabía que a perfección non era total, polo que Deus tiña que facer de cando en vez certos axustes. Leibniz, cunha opinión moi diferente nas cuestións relixiosas, entendía que unha vez creado o universo evolucionaba por si mesmo, estando as intervencións divinas dirixidas a aspectos doutra índole.

[36] Unha tradución ao español dos Principia pode atoparse en: Newton, I. (1687). *Principios matemáticos de la Filosofía natural [Philosophiae Naturalis Principia Mathematica]*. Ediciones Altaya, S.A. Grandes Obras del Pensamiento, 21. Barcelona, 1993. De moito interese é a obra en galego: "*Isaac Newton. O sistema do mundo"*. Tradución de José Manuel Díaz de Bustamante. Colección Clásicos do mundo universal, Nº 5. 2004. USC – Fundación BBVA. Trátase da tradución literal da obra latina do Libro III dos Principia editada en Londres de 1728. Hai que sinalar que a Universidade de Santiago ten un exemplar dos *Principia* editado en Xenebra en 1739.

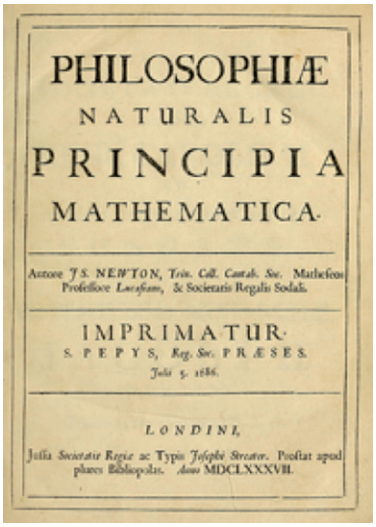
[37] Non deixa de ser unha gozosa coincidencia que o primeiro libro que impresionou a Einstein, cando tiña doce anos, fose un libriño de xeometría euclidiana. Tomado de Abraham Pais (1984). *El señor es sútil... La ciencia y la vida de Albert Einstein*. Methodos - Editorial Ariel, Barcelona.

[38] Niccolò Guicciardini (2007). *La época del punto: el legado matemático de Newton en el siglo XVIII*. Estud.filos. Nº 35, Jan./June, 2007.

[39] Para os moi interesados pódese consultar a edición crítica desta obra en Newton, Isaac. *The Mathematical Papers of Isaac Newton.* D. T. Whiteside (ed.). 8 vols. Cambridge, Cambridge University Press, 1967-1981, Traducción inglesa del latín Vol. 3, pp. 32-354.

[40] Sobre esta cuestión é moi recomendable a lectura do Capítulo titulado "La disputa sobre la prioridad" en Richard S. Westfall (1996): *Isaac Newton: una vida*. Cambridge University Press, pp 346-377.

ilustra esa gran síntese. Estamos a falar do que Frank Wilzcek denomina *"beleza dinámica"*[41], e que é menos evidente que a que xurde do enfoque de Pitágoras ou Platón. Trátase dunha beleza que está baseado las leis, e non nos obxectos ou nas sensacións. O importante en Newton non son os círculos ou as esferas, nin tan sequera as órbitas elípticas cos seus afelios e perihelios, senón que onde reside a súa marabilla estética é nos principios xerais que están detrás da explicación dos fenómenos, sendo ademais universais. En efecto, a lei de gravitación universal, xunto coas tres leis do movemento e o cálculo, permitían cuantificar e calcular o movemento de todo, desde o átomo máis pequeno ata o planeta máis grande.


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore JS. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

"Principia" de Newton.

Este programa de Newton, resultado da combinación das tres grandes tradicións – experimento, matemáticas e mecanismo- converteuse nunha guía metodolóxica para a ciencia do S. XVIII definindo unha forma de cultura científica que seguíu ata os nosos días. Pero o reducionismo que subxace neste enfoque, segundo o cal todo fenómeno complexo pode ser analizado en partes máis simples, e que o seu comportamente pode ser entendido desde o comportamento desas partes, causou un gran descaougo no campo das outras artes. Un dos claros exemplos dese desasosego móstrase no poeta romántico John Keats cando declara que Newton destruira toda a poesía do arco da vella ao reducilo a un prisma. Ese desencontro xa non deixou de medrar e segue a estar presente nos nosos días, e tivo como momento de explicitación inequívoca, hai case sesenta anos, cando o fisico e novelista británico Charles Percy Snow o presentou como o problema das "dúas culturas"[42].

Na idade contemporánea.

Xa indicamos no subapartado anterior a imposibilidade de nos estender ao longo da enorme listaxe de científicos que contribuiron a construír o edificio da ciencia moderna desde criterios de estética e simetría. Non paga a pena, xa que logo, insistir nesa cuestión cando imos afrontar deseguido esa cuestión na época contemporánea. Esa listaxe sería inabordable. Polo tanto, escolleremos un reducido grupo deles que entendemos moi representativos da liña argumental que centra estas reflexións.

A pesar diso, non habería dúbida en citar a James Clerk Maxwell como o iniciador da Física contemporánea cando publica o artigo "*Unha teoría dinámica do campo electromagnétic*o".[43]

Neste traballo, o físico escocés presentou as ecuacións do electromagnetismo, que hoxe coñe-

[41] Frank Wilczck (2016). *El mundo como obra de Arte...* Op. Cit., p.119.

[42] Este estereotipo cultural procede do título dunha influinte conferencia de C. P. Snow, pronunciada en 1959 no Senate House da Universidade de Cambridge. A súa tese establecía que a fenda de comunicación entre as ciencias e as humanidades, e a falta de interdisciplinariedade, era un dos principais inconvenientes para a resolución dos problemas mundiais.

[43] J.Clerk Maxwell (1865). *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 155, 459-512.

cemos como ecuacións de Maxwell[44], e fixo a predicción da existencia de ondas electromagnéticas, calculando a velocidade de propagación. Resultou que esa velocidade de propagación coincidía coa da luz 299792 km/s de acordo coas medidas realizadas por Hippolyte Fizeau e Jean Léon Foucault quince anos antes[45].

James C. Maxwell.

Este resultado levoulle a escribir: "Esta velocidade é tan próxima á da luz, que parece que temos sólidas razóns para concluír que a propia luz (incluindo a calor radiante, e outras radiacións, se as houber) é unha perturbación electromagnética en forma de ondas que se propagan de acordo coas leis do electromagnetismo"[46]. É decir, Maxwell estableceu a segunda gran síntese (a primeira, lembremos, foi a de Newton, como xa se indicou máis arriba) na que se unían electricidade e magnetismo nun único campo conceptual, e na que encaixaba perfectamente a teoría da propagación da luz. Trátase dun dos máis grandes logros intelectuais da humanidade[47].

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

As ecuacións de Maxwell.

De igual maneira que Newton se apoiou nas leis de Kepler, Maxwell fixo a súa síntese electromagnética a partir das dúas leis de Gauss sobre o campo eléctrico e magnético, da lei da indución

[44] Cómpre sinalar que as aportacións de Maxwell á ciencia van moito máis aló das leis do electromagnetismo, destacando noutros campos como a física molecular, física estatística, óptica, teoría da cor, mecánica de sólidos, viscosidade, teoría da elasticidade e conductividade térmica.

[45] 315000 km/s co primeiro sistema, e 298000 km/s cunha técnica máis depurada en 1862.

[46] José Ignacio Íñiguez de la Torre Bayo (2015). *Sesquicentenario de las Ecuaciones de Maxwell*. Lección Inaugural del Curso Académico 2015-2016. Universidad de Salamanca.

[47] En palabras Richard P. Feynman, Premio Nobel de Física en 1965: "Desde unha futura mirada da historia da humanidade, digamos que dentro de dez mil anos, hai poucas dúbidas de que o suceso máis significativo do S. XIX será o descubrimento das leis do electromagnetismo de Maxwell".

magnética de Faraday[48], e da lei de Ampère que evoca unha estreita relación entre campos magnéticos e correntes eléctricas. Xa ata aquí hai unha gran beleza expresiva en termos de síntese, pero falta a súa trascendental aportación: a súa propia lei, a lei de Maxwell. Nace sen evidencias experimentais, senón como consecuencia da necesidade de que as outras sexan coherentes. Aquí temos de novo a harmonía, a estética e a simetría como eixes da creación conceptual na Física. Nesa lei, como unha especie de inversa da de Faraday, Mawwell dinos que cando os campos magnéticos cambian no tempo provocan que os campos eléctricos xiren sobre eles. Beleza en forma de simetría.

Imos saír un instante da Física no noso relato, pois no tempo en que Maxwell creaba a súa gran síntese, Dimitri Ivanovich Medeleiev facía o propio na Química. Non foi o químico ruso o primeiro en buscar patróns de comportamento nos elementos químicos e andar na procura dunha orde profunda entre eles. A proposta de Chancourtois[49], co seu sistema helicoidal, ou a de Newlands[50] co seu deseño en octavas, tiñan nos criterios estéticos unha parte importante dos seus fundamentos. Pero na súa proposta, Mendeleiev sabía que os patróns insinuaban algo aínda máis profundo, e que aquel ordenamento non era unha casualidade senón que había unha beleza subxacente que superaba as limitacións da época[51]. En efecto, varios elementos agochábanse entre os coñecidos agardando a seren descubertos, e Mendeleiev fiel a súa convición estética, non dubidou en lles deixar o seu lugar á espera da súa chegada. Cen anos máis tarde, a Física de Partículas "copiaría" esa estratexia cando a metodoloxía baseada na teoría de grupos sinalaba a existencia de novas partículas por seren descubertas.

Rematamos o S.XIX con Ludwig Boltzmann quen, a a partir de 1866, tenta coa física estatística reducir as leis da termodinámica ao comportamento estatístico dunhas partículas microscópicas que están suxeitas ás regras mecánicas coñecidas. Como vemos, detrás desa intención está o criterio de simplicidade, querendo simplificar os conceptos termodinámicos a partir dunha aproximación máis elegante.

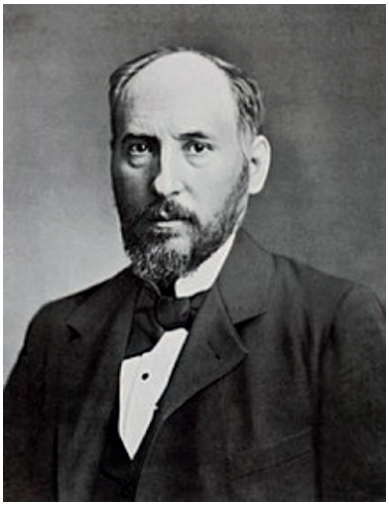
Entramos no S.XX, o século da Física, da man de Einstein. Nese século son moitos os achádegos atopados e as propostas realizadas por científicos e científicas que nos levan unha e outra vez á harmonía, á simetría e á estética. Achegarémonos deseguido a varios deles de xeito breve e nunha descrición outra vez inevitablemente incompleta, pero antes de ir con Einstein é de xustiza traer aquí a Santiago Ramón y Cajal, Premio Nobel en 1906, quen expresa así o seu sometemento á beleza da natureza: "O **x**ardín da neuroloxía brinda ao espectador espectáculos cativadores e emocións artísticas incomparables".

[48] Michael Faraday merecería ser citado de xeito máis amplo, e non só nunha referencia a pé de páxina, pois o seu traballo está tamén cheo de simetría na súa concepción do comportamento do campo magnético a través das liñas de forza que o representan. Porén, a trascendencia de Maxwell neste camo obriga a nos centrar neste último.

[49] Alexandre-Émile Béguyer de Chancourtoi (1820 –1886), xeólogo e mineraloxista francés constrúe en 1862 unha hélice de papel na que se ordenaban por masa atómica os elementos coñecidos, enrolada sobre un cilindro vertical. Os elementos similares estaban practicamente sobre a mesma xeratriz, o que indicaba unha certa periodicidade.

[50] John Alexander Reina Newlands (1837–1898) químico analítico inglés preparou en 1864 unha táboa periódica dos elementos establecida segundo as súas masas atómicas, e presentou a "lei das octavas" –seguindo a idea dunha escala musical– que sinalaba que despois de oito elementos en liña se colocaban debaixo outros tantos elementos con propiedades similares.

[51] Para máis datos sobre esta cuestión ver Ramón Cid (2009). *D. I. Mendeleev: lembranza en tres actos.* Boletín das Ciencias, 67, 37-59.



S. Ramón y Cajal

A dimensión mística que gobernou a vida de Einstein é a certeza de pertencer a unha totalidade que lle otorga sentido ao seu ser individual. No seu libro *Mi visión del mundo*[52] manifesta: "O verdadeiro valor dun home está determinado, en primeiro lugar, polo grao e sentido no que foi quen de se emancipar do seu próprio *eu*". Admira en Niels Bohr a súa "musicalidade sublime no dominio do pensamento", e cre profundamente na "harmonía establecida" de Leibniz. O matemático E. H. Hutten, colaborador de Einstein, indicaba que nel o sentimento viña primeiro e o pensamento e a verbalización despois. Para El as leis teóricas son creacións libres da mente, pero cun marcado criterio lóxico-estético no que debe primar a harmonía e a simplicidade en correspondencia coa unidade e a harmonía da natureza. Para Einstein, segundo sinala Bertrand Russell, a teoría emerxe dunha imprevista intuición imaxinativa, como lle acontece a un poeta ou a un compositor. A función máis alta dun físico será buscar as leis máis elementais, máis xerais, para alcanzar a partir delas a imaxe do mundo[53].

Nesa convición de que o fundamental está na "lóxica das bases" atopamos os principios nos que se fundamenta a Relatividade Especial, primeiro, e a Relatividade Xeral, despois. Non hai sistemas privilexiados e as leis das Física teñen que ser as mesmas independentemente do observador. A proposición do carácter corpuscular da luz está dentro doutra lóxica, neste caso vencellada á simetría: se a materia é corpuscular a radiación tamén. Non se perda de vista que estás dúas enormes contribucións de Einstein -a Relatividade e a cuantización da radiación- nacen de principios estéticos e lóxicos desligados en principio da observación ou da experimentación.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} + \Lambda\, g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

A ecuación de campo de Einstein.

Deixamos a Einstein, pero non á Física dese tempo, pois na gran aportación de Louis de Broglie volve a aparecer a simetría entre radiación-materia. O físico francés xeraliza o comportamento dual da luz e da materia, establecendo a súa famosa ecuación que nos permite estudar o comportamento ondulatorio das partículas. A partir desa xeralización nacerá a mecánica cuántica ondulatoria de Schrödinger, acompañada en paralelo pola mecánica matricial[54], que xunto coa Relatividade de Einstein son, em certo modo, a base de toda a Física actual.

[52] Albert Einstein (1995) *Mi visión del mundo.* Tusquets Editores.

[53] Tomado de Guillermo Boido (1980). *Einstein o la armonía del mundo*. Editorial Adiax. Buenos Aires.

[54] A mecánica matricial é unha formulación da mecánica cuántica creada por Werner Heisenberg, Max Born e Pascual Jordan en 1925. Foi a primeira implementación matemática completa da mecánica cuántica, e interpreta as propiedades físicas das partículas como matrices que evolucionan no tempo.

E xustamente, da unión desas dúas teorías, nace outra das construcións teóricas máis importantes da Física do S.XX, sendo outra vez a simetría e a harmonía a clave do éxito. Estamos a nos referir á ecuación de Dirac, da que acabará emerxendo a explicación e a orixe do espín das partículas elementais e, daquela, a comprensión dunha boa parte dos principios teóricos da Química, e nada máis e nada menos que a antimateria. Esta ecuación nace da mente de Dirac para respostar aos problemas que presentaba a descrición relativista dos fenómenos cuánticos para unha partícula libre como o electrón.

$$\left(\alpha_0 mc^2 + \sum_{j=1}^{3} \alpha_j p_j c\right) \psi(\mathbf{x},t) = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{x},t)$$

A ecuación de Dirac.

Paul A. M. Dirac

Nela aparecen catro parámetros (α_0, α_1, α_2, α_3). Os subindicados cos números 1, 2 e 3, están detrás da necesidade de manter a simetría espazo-tempo da Relatividade Especial na Mecánica Cuántica, e explican por primeira vez as tres compoñentes do espín do electrón[55]. Por se isto non fose abondo, queda por interpretar o primeiro dos parámetros (α_0), que está relacionado coa enerxía en repouso da partícula. Pode tomar valores positivos, como era de esperar para unha partícula libre, pero tamén negativos, o que quedaba fora da física coñecida. Lonxe de obviar esa posibilidade, Dirac propuxo a existencia dunha partícula coas mesmas propiedades ca o electrón pero con carga contraria, e que acabaría por ser chamada positrón. Acababa por aparecer en escena a antimateria. A fe na simetría que emerxía da súa expresión matemática dános un novo exemplo de como a beleza dirixe a evolución da Física. Vén moi ben acaido lembrar unha das sentencias famosas de Dirac: "As leis físicas deben ser matemáticamente fermosas". Esta é a frase que resume toda a súa filosofía.

Estamos nos anos trinta do século pasado, e no campo da Física Teórica en xeral, e da Física de Partículas en concreto, seguirán rexindo os criterios de simetría e harmonía. Todo vai estar sustentado nos principios que emanan da Relatividade e da Mecánica Cuántica, chegándose a mediados dos anos corenta coa Electrodinámica Cuantica de Julian Swinger, Richard Feynman e Sin-Itiro Tomonaga, á teoría máis exitosa da Física, e que sería a base do avance no campo da Física de Partículas.

[55] Son as tres matrices de Pauli para o caso de espin ½ , que se representan habitualmente por σ_1, σ_2 e σ_3

A simetría vai guiar esa Física a través da ferramenta matemática da Teoría de Grupos[56]. Neste escenario aparece a proposta dos quarks de Gell-Mann; a aparición o mecanismo de Robert Brout, François Englert e Peter Higgs que dota de masa ás partículas a través do agora chamado "campo de Higgs"; a unificación das interaccións electromagnética e débil de Steven Weinberg, Abdus Salam e Sheldon Glashow; a aparición da Cromodinámica Cuántica para entender as interaccións forte, entre outros, permitiu construír o impoñente corpo de coñecementos chamado Modelo Estándar[57] da Física de Partículas, e que pode ser considerado como o resultado final, ata o de agora, da aplicación dos criterios de harmonía, simetría e economía no estudo da natureza[58].

Sábese que este impresionante edificio intelectual que supón o Modelo Estándar non pode ser definitivo, pois hai cousas moi importantes por explicar: materia escura, enerxía escura... Con todo, e para reforzar aínda máis a idea central da argumentación que aquí se presenta, hai que suliñar que algunhas das teorías candidatas a dar luz a algunhas destas cuestións son as chamadas de "Supersimetría". É dicir, o concepto de simetría segue a ser quen guía os intentos de explicación do que queda por entender.

Séguese a procura dunha proposta "definitiva", as veces chamadas "Teoría do Todo", pois entroutros asuntos por resolver a gravitación segue a ir "por libre", pero ninguén dubida que o principio de beleza físico-matemática estará presente no seu desenvolvemento e eventual logro[59].

ROMPENDO A SIMETRÍA COMO EIXE DIRECTOR DOS FENÓMENOS.

O universo está construido sobre un plan, a profunda simetría que está dalgún xeito presente na estrutura interna de noso intelecto.

Paul Valéry.

Temos feito ata o de aquí un percorrido –obviamente incompleto- pola evolución da Física ao longo duns dous mil cincocentos anos. Nel temos visto como a beleza foi o principio rector no ánimo das persoas que foron construíndo as explicacións sobre os fenómenos naturais. Dentro desa guía ampla de carácter estético aparece a simetría como unha das protagonistas principais, e, como indicamos ao comezo, se ollamos ao noso arredor vemos simetría por todas partes. É evidente que a natureza utiliza a simetría: na maioría dos seres vivos existe a simetría bilateral esquerda-dereita, os sistemas cristalinos enchen de simetría o mundo mineral, e a simetría serve de factor de calidade en procesos e sistemas.

[56] Unha descrición moi recomendable de como se foi xestando a Física de Partículas ao longo do S.XX, e a súa descrición a través da teoría de grupos pode ser consultada en Harald Fritzsch (1982). *Los quarks, la materia prima de nuestro universo*. Editorial: Alianza Editorial. A pesar de ser un libro escrito hai trinta e cinco anos segue a ser de extraordinaria actualidade.

[57] Frank Wilzcek prefire chamarlle Teoría Central pois cre que Modelo Estándar ten un aire de sabiduría convencional, falta de imaxinación e mesmo de construción feita a medida. Tomado de Frank Wilczck (2016). *El mundo como obra de Arte...* Op. Cit., p 235.

[58] Outro libro divulgativo moi recomendable, aínda que con case corenta anos desde a súa primeira edición, para coñecer toda esta aventura da Física de Partículas ao longo do S.XX é o de Steven Weinberg (1979). *"Los tres primeros minutos del Universo"*. Alianza Editorial, Madrid.

[59] Sobre esta cuestión pode ser de interese o Apéndice titulado *La ecuación subyacente a todos nosotros* do libro de Sean Carrol (2017). *El Gran Cuadro. Los orígenes de la vida, su sentido entero y el universo entero.* Ediciones de Pasado y Presente, S.L. Barcelona.

Porén, se a natureza nos mostra tantas simetrías diferentes –nos seres vivos, nos corpos inanimados, nos fenómenos naturais- tivo que haber e ten que haber outros procesos nos que a simetría se rompa de xeito espontáneo para xerar tanta variedade de novas simetrías[60].

Simetría no xeo

Para comezar, o propio Big Bang pode ser considerado un proceso de rotura espontánea de simetría, e a súa evolución está chea de sucesivas roturas espontáneas de simetría que provocaron a diferenciación de campos e de partículas. De non ser así nada tería sido como o que agora existe, xa que todo sería igual en todas partes.

O que acontece é que a miúdo os sistemas perfectamente simétricos son inestables, bastando unha pequena modificación ou perturbación no contorno para que esa simetría se rompa. Denominamos a este proceso rotura espontánea da simetría, sendo un fenómeno moi habitual na natureza. O exemplo clásico é a transición da auga do estado sólido (moi simétrico) a líquido provocando que aparezan certas propiedades que estaban "silenciadas" (como a tensión superficial ou a viscosidade), e ocorre tamén co cambio do estado magnético dun metal ferromagnético cando se baixa de determinada temperatura (desaparece a simetría total previa en termos da configuración magnética interna) aparecendo de súpeto un comportamento magnético neto. Outro caso moi simple, con máis propósito didáctico que de consistencia conceptual, é o do lápis colocado verticalmente na súa punta. O seu estado presenta simetría rotacional pero é claramente inestable. En calquera momento rómpese esa simetría e pasa a estar noutro estado no que propiedades como lonxitude, largura ou masa, inicialmente sen interese no estado de simetría, xogan un papel protagonista no novo estado.

Por dicilo de xeito moi resumido, podemos considerar que cando nun sistema con certa simetría hai un "cambio de fase" aparecen novas características que xeran un cambio de comportamento.

Tamén no campo da Bioloxía podemos achegarnos a esta cuestión. Así, se nos fixamos nos aparentemente caprichosos debuxos na cortiza das árbores nun bosque observamos como modificacións aleatorias rompen a simetría inicial[61].

Pero, de xeito moito máis fundamental, pensemos en todos os organismos (agás os virus) que comezan como entidades de alta simetría –basicamente esferas– pero que segundo se van desenvolvendo, e a través dunha rotura espontánea da simetría, dan lugar a un conxunto de novas configuracións, máis estables, pero menos simétricas cá inicial. As formas posibles que poden aparecer dependerán de factores internos (ADN) e externos (temperatura, luz, substancias presentes). Explícase así porque a evolución biolóxica ten creado un limitado número de opcións das case infinitas factibles, ou porque se repiten determinados patróns a pesar dos moitos posibles.

[60] Usaremos aquí a palabra *rotura* e non *ruptura*, pois a primeira refírese mellor aos procesos físicos reais, mentras que a segunda semella máis visnculada ao mundo das ideas.

[61] Consultar este e outros exemplos en: http://revolucioncientifica.com/Las leyes fundamentales del universo/cuando la simetria se rompe.asp (consultado 10 de decembro 2017).

Menos coñecido, pero verdadeiramente trascendente é a rotura espontánea de simetría no caso dun campo cuántico. Nel imos atopar puntos nos que o campo é simetrico ao seu arredor pero que son inestables (o potencial non ten o valor mínimo posible). A tendencia, como nos casos antes mencionados, é que tendan de xeito espontáneo a evolucionar cara ese estado máis estable, pero aparecendo, como vimos en casos anteriores novas propiedades. Estos procesos de rotura de simetría de determinados campos cuánticos son os que permiten que as partículas adquiran determinadas propiedades, que no caso do campo de Higgs implica que as partículas adquiran masa.

Outra vez podemos recurrir á analoxía do "cambio de fase". Cando nun campo cuántico, cunha determinada simetría, hai un "cambio de fase" aparecen novos mecanismos que dan lugar a características novas como a masa, a carga eléctrica, a carga de color, etc., que responderán a novas interaccións.

A simetría condiciona a evolución e está detrás do comportamento do universo. Será a simetría, e as súas roturas espontáneas, a verdadeira forza motora do universo? Será a simetría o verdadeiro deus?

FINALIZANDO.

"Simplex sigillum Veri"[62] .
(Auditorio de Física. Universidade de Gotinga.)

Ao longo do S.XIX e XX foron realizadas grandes unificacións na Física en campos moi diversos, sendo a harmonía, a simetría e a estética as bases deses logros monumentais do intelecto humano. Emerxen xigantes científicos da talla de Faraday, Maxwell e Ampère coa síntese entre a electricidade, magnetismo e óptica; Einstein coa unificación espazo-tempo; Planck, Einstein, Heisenberg, Schrodinger, Born… coa conexión cuántica na interacción radiación-materia; Dirac na presentación da relación materia-antimateria; Swinger, Feynmann e Tomonoga na construción da electrodinámica cuántica; Salam, Weinberg e Glashow na unificación das interaccións electromagnética e débil; en fin, Englert, Brout e Higgs dando resposta ao problema da masa das partículas.

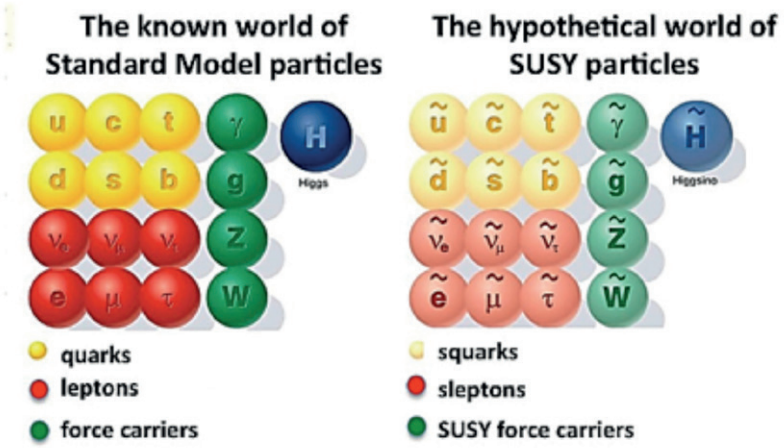
Pero falando de xigantes, hai poucas dúbidas[63] en que a primeira unificación foi obra de Isaac Newton, cando estableceu que só había un universo, establecendo unhas leis matemáticas que explicaban os fenómenos físicos estudados no seu tempo.

Como xa destacamos, é coa linguaxe matemática coa que se foi construindo ese enorme edificio cheo de beleza e imaxinación que é a Física. E aínda máis, porque esa linguaxe parece ter vida propia fluindo, moitas veces, de xeito independente dos seus usuarios, dando lugar a creacións inesperadas e incluso revolucionarias. Quizais sexa na Física Cuántica onde esta situación presenta a súa cara máis sorprendente, ata o punto que Richard Feynmann chegou a manifestar que quen dixese que comprendía esa rama da Física é que non a tería entendido verdadeiramente. E áinda máis, como sinala Hawking, as matemáticas aplicadas á Física lévannos máis lonxe do que a nosa mente pode comprender con suficiencia.

---

[62] *"A simplicidade é o selo do verdadeiro"*. Tomado de Ken Wilber (2017). *Cuestiones cuánticas. Escritos místicos de los físicos más famosos del mundo.* Editorial Kairós, Barcelona.

[63] Ver a este respecto o Prólogo de Carlos Casares en "*Isaac Newton. O sistema do mundo"*... Op. Cit.



A Supersimetría.

Ata tal punto esa linguaxe é en si mesmo autonóma que Roger Penrose sitúa as creacións físicas realizadas con ela por riba mesmo do famoso falsacionismo popperiano[64]. É dicir, se unha teoria física está baseada en principios de harmonía, equilibrio, proporción e economia debe ser correcta, mesmo que non se teña aínda confirmado experimentalmente. Este é o caso, apunta o físico británico da Teoría da Supersimetría.

Pola súa parte, o Premio Nobel, Steven Weinberg sinal que "aínda que as simetrías se nos agochen, podemos sentir que están latentes na natureza. Esta é a idea máis emocionante que coñezo".

De igual xeito que precisamos da emoción para sentir a verdadeira beleza de calquera obra artística, precisaremos dese sentimento diante da Física. Como afirmaba Platón "non veremos a idea de beleza na natureza se non temos ollos para vela".

REFERENCIAS

Preséntanse de seguido todas as referencias que foron obxecto de consulta para este artigo e tamén as que se corresponden con obras de autores citadas no texto.

- Alvarez J.L., Marquina, J.E., Ridaura R. (1993). La esfera y el círculo en la historia. *Revista Ciencias*, Abril, Nº 30: 3-9. Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Badía Serra E. (2008). Roger Penrose. Una aproximación elemental a su filosofía de la ciencia. *Teoría y Praxis*, Julio 2008, No. 13, pp 53-80.
- Boido G. (1980). Einstein o la armonía del mundo. *Editorial Adiax*. Buenos Aires.
- Bretos Linaza, J. (2000). Kepler, el último nexo entre música y astronomía. *Musiker*. 12, 2000, 147-159.

[64] Tomado de Eduardo Badía Serra (2008). *Roger Penrose. Una aproximación elemental...* Op. Cit.

- Chan Stephanie C.Y., Niv Y. & Norman KA (2016). A probability distribution over latent causes in the orbitofrontal cortex . *The Journal of Neuroscience* 30(30):7817-7828.
- Cid R.(2009). D. I. Mendeleev: lembranza en tres actos. *Boletín das Ciencias*, 67, 37-59.
- Colletti L. (2018). Teaching the nature of physics through art: a new art of teaching. *Phys. Educ.* 53,1.
- Einstein A. (1995). Mi visión del mundo. *Tusquets Editores*.
- Fritzsch, H. (1982). Los quarks, la materia prima de nuestro universo. *Alianza Editorial*.
- Glashow S. L. (2010). Como a miña carreira científica dependeu da simplicidade, as simetrías e as matrices sinxelas. *Boletín das Ciencias*, Vol 23, Nº 70, 143-151.
- Guicciardini N. (2007). La época del punto: el legado matemático de Newton en el siglo XVIII. *Estud.filos.* Nº 35, Jan./June, 2007.
- Íñiguez de la Torre Bayo J. I. (2015). Sesquicentenario de las Ecuaciones de Maxwell. *Lección Inaugural del Curso Académico 2015-2016*. Universidad de Salamanca.
- Maxwell J. C. (1865). A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Phil. Trans. R. Soc.* Lond. 155, 459-512.
- Newton I. (2004). O sistema do mundo. *Colección Clásicos do mundo universal*, Nº 5. 2004. Tradución de José Manuel Díaz de Bustamante. USC – Fundación BBVA.
- Newton, I. (1687). Principios matemáticos de la Filosofía natural [Philosophiae Naturalis Principia Mathematica]. *Ediciones Altaya, S.A*. Grandes Obras del Pensamiento, 21. Barcelona, 1993.
- Pais A. (1984). El señor es sútil... La ciencia y la vida de Albert Einstein. *Methodos - Editorial Ariel*, Barcelona.
- Schrödinger E. (1983). ¿Que es la vida?. *Tusquets Editores.* Barcelona.
- Tegmark M. (2015). Nuestro universo matemático: En busca de la naturaleza última de la realidad. *Editorial Antoni Bosch*. Barcelona.
- Wagner López, C. (2009). Luz, arte y física. La física en la pintura. *Rev. Eureka Enseñ. Divul. Cien.,* 6(1), pp. 153-154
- Weinberg S. (1979). *"Los tres primeros minutos del Universo".* Alianza Editorial, Madrid.
- Westfall R. S. (1996). Isaac Newton: una vida. *Cambridge University Press*, pp 346-377.
- Whiteside D. T. (ed.) (1981). The Mathematical Papers of Isaac Newton. Cambridge, *Cambridge University Press*, . 8 vols. 1967-1981, Traducción inglesa del latín Vol. 3, pp. 32-354.
- Wigner E. (1960). The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences. *Communications in Pure and Applied Mathematics*, vol. 13, No. I. John Wiley & Sons, New York Inc.
- Wilber K. (2017). Cuestiones cuánticas. Escritos místicos de los físicos más famosos del mundo. *Editorial Kairós*. Barcelona.
- Wilczck F. (2016). El mundo como obra de Arte. *Critica*, *Editorial Planeta*. Barcelona.