

# Química i estètica. La multiplicitat de formes en la natura com a expressió de la seva creativitat\*

Achim Müller

Universitat de Bielefeld, Alemanya

*L'acolorida multiplicitat dels fenòmens es pot comprendre, segons Pitàgores i Plató, sempre que hi hagi uns principis de forma subjacents, que siguin susceptibles d'una representació matemàtica.*

WERNER HEISENBERG<sup>1</sup>

**P**er a centrar el tema tractat en aquest assaig voldria recomanar als interessats en els principis de la naturalesa, les seves formes fascinants i la seva multiplicitat de funcions la consulta de l'obra *Matèria, esperit i creació: troballes cosmològiques i intuïció cosmogònica*, de Hans Jonas,<sup>2</sup> especialment a aquells lectors interessats en l'origen de l'esperit i la subjectivitat. Cito aquí del pròleg: «El present escrit rebé el primer impuls a partir del manuscrit "Esbós sobre el tema cosmos i la segona llei" que em fou tramès amicalment. Com a primer pas per a l'elaboració d'un concepte cosmològic global, en aquest text es proposava, per poder explicar la tendència de la naturalesa a crear un elevat grau d'ordre a partir d'estructures relativament poc ordenades, que en l'instant inicial de l'univers (l'anomenat *big bang*) també hi fou creada, a banda de la totalitat de l'energia del cosmos, tota la informació necessària que va menar de l'explosió caòtica, primer a través de formes energètiques immaterials, a les primeres partícules que es començaren a diferenciar; als protons, que donaren lloc a l'àtom d'hidrogen, i d'aquí a la creació de posteriors sistemes ordenats com la taula periòdica dels elements, els compostos inorgànics, *el món de la bellesa dels cristalls* i també a la forma d'ordenament dels circuits tancats: l'astronòmic a l'univers sencer, l'atmosfèric i el biòtic a la Terra, etc. Segons aquesta concepció, en l'explosió inicial ja hi seria contingut un "logos cosmogònic"...»

La pregunta que es planteja Jonas és si la matèria generada en l'explosió primigènia ja contenia la informació o si només hi havia inclosa una potencialitat. Per al científic és un repte dedicar-se a estudiar aquest problema clau i plantejar-se la qüestió sobre una aptitud de la matèria que hagi donat lloc a la multiplicitat de formes que han aparegut, i segueixen apareixent tant en la matèria animada com en la inanimada. Al químic el fascina especialment el descobriment d'una molècula estèticament bella<sup>3</sup> i per això les connexions amb les preguntes filosòfiques plantejades per Jonas representen, de

ben segur, una influència estimulante en el seu quefer. Se sentirà, doncs, també atret —potser en contradicció amb la idea de Cramers (vegeu la nota 3)— per l'obtenció d'una molècula bella fins i tot quan no tingui cap coneixement dels detalls sobre el seu procés de formació.

En el que segueix, considero allò que és bell estèticament com una propietat del món que ens envolta, això és, sense tenir en compte la crítica de Kant. Per a la matemàtica i les ciències naturals hauria de ser possible, en principi, establir criteris resseguibles del que és estèticament bell, ja que en la naturalesa trobem —probablement seguint Hans Heinrich Holz—<sup>4</sup> característiques intersubjectives comprovables de bellesa.

## Arquitectures i formes estèticament belles del nostre món<sup>5</sup>

*A través de la bellesa l'home sensible es veu conduït a la forma i al pensament; [...] l'home espiritual és retornat a la matèria i restituit al món material.*

FRIEDRICH VON SCHILLER<sup>6</sup>

Les formes regulars han atret l'atenció des de l'antiguitat, especialment dels filòsofs. Plató basà la seva teoria geomètrica de la matèria en els cinc cossos estèticament bells o regulars, és a dir, amb totes les cares iguals. Parmènides va reflexionar fins i tot sobre l'aparença esfèrica de tot el que és i Xenòfanes (aprox. 570-470 aC) va assignar a la divinitat, rebutjant qualsevol tipus d'antropomorfisme, les propietats de l'esfera. Sobre aquest punt tractaren posteriorment Aristòtil i Diògenes Laerci («Déu és un ésser esfèric, sense cap semblança amb els homes»,<sup>7</sup> «La naturalesa de Déu és esfèrica [...]»<sup>8</sup>). Tant l'esfera com el cercle eren percebuts en l'antiguitat com a formes geomètriques perfectes.<sup>9</sup>

Al principi de l'era moderna trobem l'astrònom Johannes Kepler (1571-1630) profundament impressionat per l'harmonia

\* La traducció de l'alemany al català d'aquest article ha estat a càrrec de Pere Alemany.

de les estructures bàsiques, tal com es pot apreciar en una de les seves primeres obres especulatives, el *Mysterium Cosmographicum*, i especialment en la seva rellevant obra tardana *Harmonice Mundi*.<sup>10</sup> Els planetes del primer univers keplererià es mouen en capes esfèriques, sobre les quals es troben inscrits i circumscrits diferents poliedres. A la Terra, per exemple, li correspon una capa amb un icosaedre inscrit.

En el pla de la nostra percepció sensorial es pot descobrir, tant en els éssers vius com en el món inanimat —per exemple, en els cristalls—, una multiplicitat fascinant o, dit d'altra manera, una quantitat malbaratadora de formes belles. Goethe, per a qui el *Deus sive natura* (Déu indistingible de la naturalesa) de Spinoza era un dogma, s'imposà com a científic la tasca de reconèixer en la multiplicitat i la complexitat dels fenòmens la simplicitat com a factor comú, en el sentit d'un fenomen original que es desenvolupa, com, per exemple, en la morfogènesi de les plantes,<sup>11</sup> per a donar lloc a una multitud de formes. Schiller, al contrari de Goethe, sostenia que el fenomen original no era en cap cas una aparença concreta sinó una idea («Busqueu el pol que resta en el canvi de les aparences», segons Schiller/Helmholtz). A la pregunta de Schiller i Helmholtz del que queda en el canvi de les aparences hi ha dues vies de solució, que porten o bé a un fenomen primigeni

energètic-material (Goethe),<sup>12</sup> o bé a una estructura regular (com, per exemple, els principis de simetria basats en la informació de Heisenberg).

La riquesa de formes de la natura —en especial en el món dels organismes— és perceptible per a qualsevol i no deixa mai de sorprendre l'observador sensible. Ernst Haeckel, per exemple, va rebre un fort impacte en trobar una semblança de formes en totes les escales de la natura, i ho va reflectir gràficament en la seva obra àmpliament citada *Kunst-Formen der Natur*<sup>13</sup> (figura 1). En aquesta línia es poden destacar també alguns treballs més recents, com els de D'Arcy Thompson<sup>14</sup> (sobre l'evolució de les formes en biologia), de Hermann Weyl<sup>15</sup> (sobre els canvis de simetria en les formes dels éssers vius) o de René Thom<sup>16</sup> (sobre les relacions entre les formes geomètriques i els processos dinàmics).

L'aparició de les formes macroscòpiques en el sentit de la ciència moderna de la matèria no es pot, però, entendre sense descobrir les semblances que hi ha entre els nivells microscòpics i macroscòpics. Per posar un exemple, es troba que malgrat que els processos epigenètics que condueixen finalment a un organisme siguin d'una gran complexitat, es poden reconèixer certes regularitats lligades al món molecu-



FIGURA 1. Portada de *Kunst-Formen der Natur* (1904), l'obra més citada d'Ernst Haeckel.

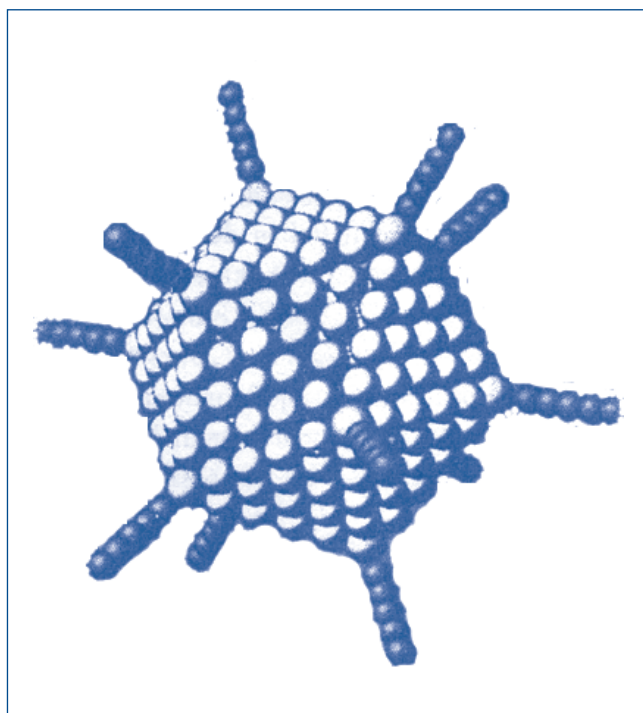


FIGURA 2. Model d'un adenovirus esfèric (icosaèdric).

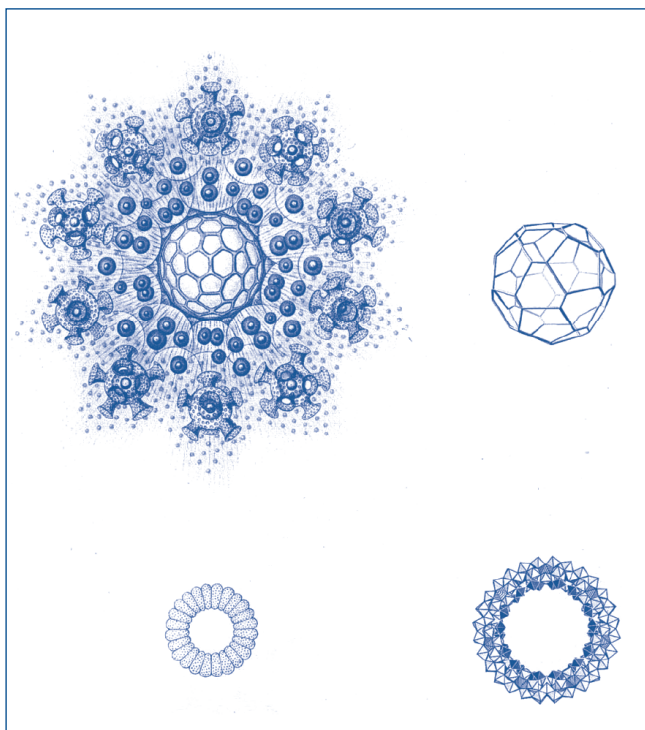


FIGURA 3. Estructures esfèriques i anul·lars: dos radiolaris socials (*Polycyttaria*) del llibre *Kunst-Formen der Natur* d'Ernest Haeckel (taula 51, part esquerra) i models d'algunes de les molècules gegants sintetitzades a Bielefeld i citades en el text.

lar de l'expressió genètica. Una persona aliena a la ciència potser intuirà un *arquitecte genial* en la natura viva, que fa aparèixer a partir d'elements senzills sistemes cada cop més complexos.

Tant a escala molecular com a escala dels fenòmens observables trobem certes formes que s'assemblen. Això és cert per a estructures espirals, helicoidals o dendrítiques, però també per a elements senzills construïts a partir d'hexàgons i pentàgons. En aquest sentit cal destacar els pentàgons,<sup>17</sup> especialment relacionats amb l'estètica, a causa de la seva importància en l'evolució cultural i espiritual relacionada amb la secció àuria (*proportio divina*). Els pentàgons apareixen en el món molecular (per exemple, en les esferes gegants descrites més endavant), en els virus esfèrics, en les cúpules geodèsiques de l'arquitecte americà Richard Buckminster Fuller, així com en organismes senzills (figures 2 i 3). És totalment plausible que la virologia moderna, amb la seva classificació de les estructures dels virus esfèrics formades per unitats morfològiques pentagonals, els anomenats *capsòmers*, s'hagi inspirat, de manera no accidental, en les construccions de Fuller.

## L'aptitud de la matèria

*La química no ens proporciona només una disciplina mental, també resulta en una aventura i una experiència estètica. Els seus practicants busquen el coneixement de les causes ocultes de les transformacions del nostre món canviant: descobrir l'essència del color de les roses, de la fragància de les liles, de la tenacitat del roure i de comprendre els camins secrets pels quals la llum del sol i l'aire creen aquestes meravelles.*

SIR CYRIL N. HINSHELWOOD<sup>18</sup>

*No tinc cap dubte que quan siguem capaços de controlar d'alguna manera la disposició de les coses a petita escala, podrem expandir enormement el rang de possibles propietats que les substàncies poden exhibir.*

RICHARD P. FEYNMAN<sup>19</sup>

La pregunta sobre l'aptitud de la matèria per donar lloc a la multiplicitat de formes en la naturalesa viva i la inanimada es pot plantejar amb relació a aquestes cites de dos científics eminents. Els químics investiguen les transformacions dels sistemes materials que donen lloc a una multiplicitat de formes, ja sigui en un laboratori o en un procés biològic (les propietats dels components elementals són les mateixes en ambdós casos). El cas ideal seria aconseguir que el mètode *top-down* en l'esperit de Hinshelwood —és a dir, explicar els fenòmens biològics complexos en termes de fenòmens senzills— coincidís amb l'aproximació *bottom-up* en el sentit de Feynman. En un cas com aquest s'aconseguiria la creació al laboratori de formes cel·lulars senzilles. La naturalesa i el laboratori no cobreixen, però, de tota manera, camps equiva-

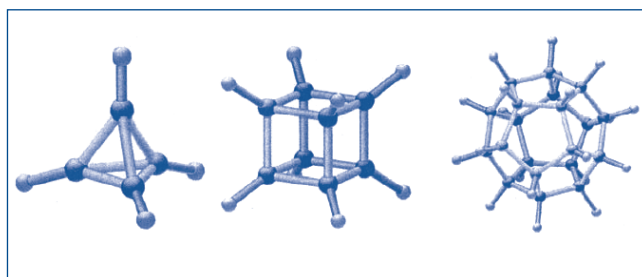


FIGURA 4. Tres compostos de carboni senzills amb estructures corresponents als poliedres platònics (tetraedrà, cubà i dodecaedrà). Segons Plató: «Hem d'explicar quina és la característica d'aquests quatre poliedres (el tetraedre, l'octaedre, el cub i el dodecaedre) que fa que siguin els més bells. Malgrat ser semblants, tenen la possibilitat de dissoldre's i posteriorment interconvertir-se entre ells» (Timeu 53e).

lents. El gran científic i naturalista Helmholtz parla en aquest sentit de les necessitats en els processos naturals i de les possibilitats creatives de l'investigador. Aquest pot —per creació de diferents condicions en el marc de les lleis de la naturalesa, o, equivalentment, dels camps de possibilitats dels sistemes materials— arribar fins i tot a materialitzar algunes possibilitats relativament improbables.

## FONAMENTS DELS PROCESSOS A LA BIOSFERA

*La química ha observat amb precisió el canvi i la composició dels més petits components. La seva activitat i finesa en els darrers temps li ha concedit més que mai el dret a fer valer les seves pretensions de desmascarar la naturalesa de la matèria orgànica.*

JOHANN WOLFGANG GOETHE<sup>20</sup>

Els successos materials en la biosfera, que donen lloc a una multiplicitat i dinàmica de processos sota condicions de contorn dissipatives (és a dir, d'un sistema obert), es caracteritzen per una especificitat extraordinària. Referent a això, per a obtenir una comprensió més ampla de la matèria, és crucial la idea d'una aptitud de la matèria, que hauria possibilitat que els ingredients de la Terra primordial iniciessin el procés de transformació quasiexplosiu que ha donat lloc finalment a la diversitat biològica. La gènesi d'aquesta diversitat es tracta clarament d'un procés amb múltiples facetes, del qual no coneixem la majoria de detalls, però que —adaptant lliurement les idees d'Heràclit— va tenir lloc a través de la dialèctica del

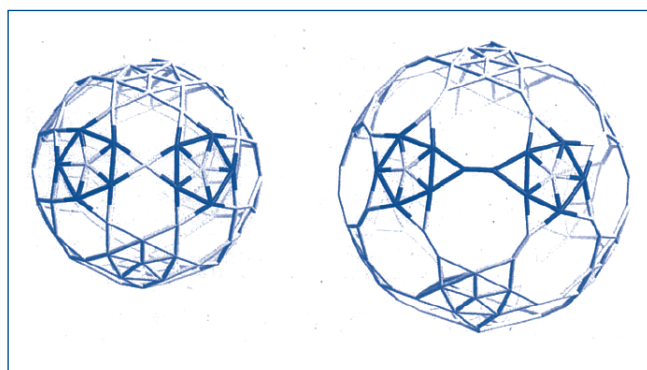


FIGURA 5. La unió d'unitats pentagonals (les peces indispensables segons els pitagòrics i Arquímedes per a la construcció d'estructures esfèriques) mitjançant diferents peces separadores permet, tal com s'ha mostrat en els treballs del grup de Bielefeld, obtenir boles moleculars gegants de diferents grandàries (*sizing*).

resultat de mutacions contingents i d'una selecció directora i que es caracteritzà, sense cap mena de dubte, per una fletxa temporal. Aquí, l'atzar hi jugà un paper central com a factor creatiu desencadenant —també a la Terra primitiva, quan es formaren entitats supramoleculares a partir de biomolècules senzilles preexistents, en el sentit de la química supramolecular moderna.

L'aptitud de la matèria es va manifestar sobretot en l'*optimització* de l'adaptació dels organismes durant l'evolució. Aquesta optimització es fonamenta en darrer terme en unes interaccions coordinades entre els subsistemes materials, és a dir, les macromolècules de l'organisme. El químic, o el bioquímic, intenten, en aquest sentit, no només entendre els detalls, sinó descobrir també els principis generals.

Encara que l'organisme en la seva totalitat es trobi en un equilibri estacionari i els processos bàsics tinguin lloc en condicions dissipatives, també hi ha processos de tipus clàssic en la proximitat de l'equilibri que donen lloc a estructures complexes. Serveixi com a exemple l'autoassemblatge del virus del mosaic del tabac que té lloc de la mateixa manera *in vivo* que *in vitro*. Això posa de relleu que l'estudi dels processos d'autoassemblatge per part dels químics al laboratori és precisament un dels camps que pot aportar més informació sobre l'aptitud de la matèria. En aquest tipus de processos pot aparèixer quelcom nou, també a partir d'una mena d'un acte (espontani) de creació.

## GENERACIÓ DE FORMES ESTÈTICAMENT BELLES AL LABORATORI VIA PROCESSOS D'AUTOASSEMBLATGE: UNA MOLÈCULA ESFÈRICA I UN POLIEDRE PLATÒNIC

*[...] (tot el que és material) té una tendència irresistible a prendre forma.*

JOHANN WOLFGANG GOETHE<sup>21</sup>

El químic pot investigar al laboratori l'aptitud o, dit d'una altra manera, la potencialitat basada en estructures informacionals de la matèria —especialment en l'estudi de la diversitat en processos d'autoassemblatge. En aquest sentit es poden establir relacions amb processos en la biosfera i naturalment també amb processos que donen lloc a formes estèticament belles.

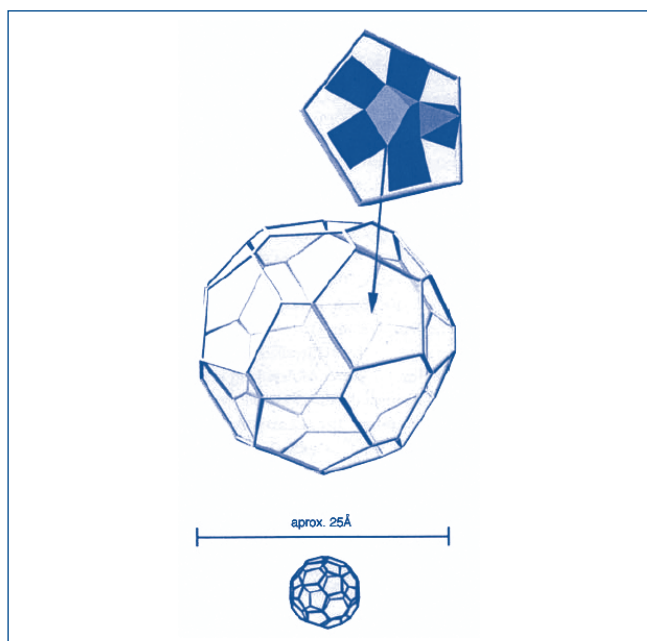


FIGURA 6. Estructures esfèriques (similars a pilotes de futbol): estructura del fragment icosaèdric format per 60 àtoms de molibdè del superful·lerè amb 12 pentàgons regulars i 20 hexàgons trigonals. Es mostra també per separat una representació detallada de l'estructura d'una de les unitats pentagonals. Cada una d'aquestes unitats pentagonals està formada per una bipiràmide pentagonal central, connectada a través de les arestes amb cinc octaedres addicionals. Cadascun d'aquests poliedres està format per un àtom central envoltat de sis o set àtoms d'oxigen. En la part inferior es mostra a la mateixa escala la molècula de ful·lerè,  $C_{60}$ .

Les molècules de carboni i metall (molibdè) de les figures 4, 5 i 6 tenen relació amb els poliedres platònics. Es mostren el tetraedrà pur (encara no sintetitzat), el cubà i el dodecaedrà, així com un fragment icosaèdric, o sigui, esfèric, format per 132 (72 més 60) àtoms de molibdè, que és part d'una superestructura, un superful·lerè inorgànic. Aquest darrer compost, sintetitzat recentment a Bielefeld, és un polioxometal·lat, un compost format per àtoms de metall i d'oxigen.<sup>22</sup> Tant el  $C_{60}$ , la molècula amb forma de pilota de futbol, com el fragment format per 60 àtoms de molibdè que es troba al superful·lerè inorgànic, es corresponen amb un dels 13 cossos arquimedians, l'icosaedre truncat, que presenta la mateixa simetria que l'icosaedre.

El superful·lerè icosaèdric format per 132 àtoms metàl·lics es troba emparentat amb les cobertes esfèriques de proteïna dels virus esfèrics. Aquestes estan compostes a partir de subunitats disposades de tal manera que formen una coberta amb simetria icosaèdrica d'acord amb les regles dels viròlegs

Caspar i Klug, desenvolupades inspirant-se en els dissenys de cúpules geodèsiques de l'arquitecte Buckminster Fuller. És interessant veure com tant en el superful·lerè com en la coberta proteica dels virus esfèrics —per exemple en el senzill virus satèl·lit de la necrosi del tabac (STNV)— són els centres de les unitats estructurals pentagonals els que formen l'icosaedre.

Tampoc es pot passar per alt la semblança estructural del superful·lerè amb el primer model del cosmos de Kepler esmentat anteriorment: en l'estructura esfèrica, la superfície exterior de la qual està formada pels àtoms d'oxigen de la perifèria, hi trobem inscrit un icosaedre format per 12 àtoms de molibdè (figura 7). Per aquesta raó hem anomenat keplerats aquest tipus de compostos.

En la taula 1 es pot veure que hi ha clares relacions entre els anomenats *nombres màgics* per als virus esfèrics i el nombre

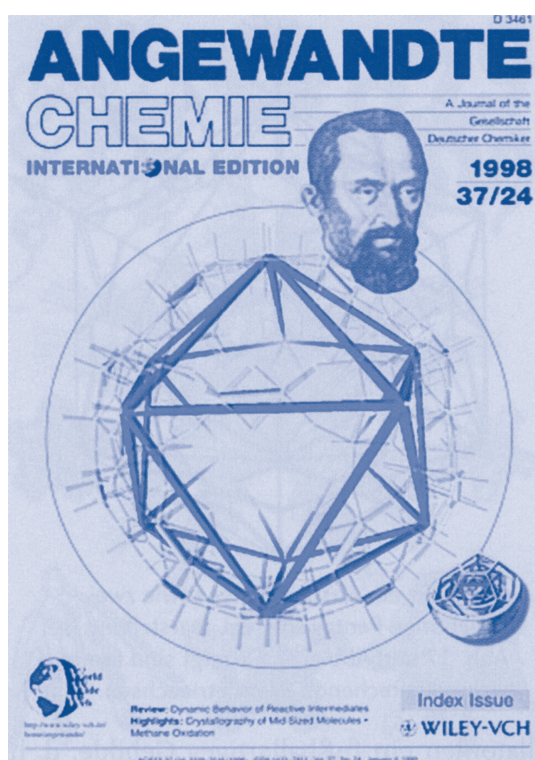


FIGURA 7. Portada del darrer fascicle d'*Angewandte Chemie* de l'any 1998 amb una bola molecular gegant —un dels keplerats— format per àtoms de metall i d'oxigen i un icosaedre inscrit que recorda els primers models cosmològics de Kepler en la seva obra especulativa *Mysterium Cosmographicum*. (El model es refereix, tant pel que fa a les seves capes esfèriques com als poliedres regulars, a les idees tant de Plató com de Copèrnic.)

de diferents unitats estructurals de molècules esfèriques de tipus keplerat. Veient aquesta taula no és difícil recordar la tesi dels pitagòrics que deia que «les propietats i les proporcions de les harmonies estan determinades per nombres» i creure, malgrat els advertiments d'Aristòtil, que «també tota la resta té la seva naturalesa determinada pels nombres i que aquests nombres són el primer de tota la naturalesa, [...] i que els elements dels nombres [...] són els elements de totes les coses i que tot el cel és harmonia i nombre». (Compareu amb Aristòtil, *Metafísica*, llibre 1, capítol 5; compareu també la nota 5.)

El químic es veu normalment forçat a desenvolupar la síntesi de molècules grans seguint procediments complexos, per etapes, realitzant successivament la síntesi, aïllament i purificació de productes intermedis individuals. Aquest és el cas per a la majoria dels fàrmacs tan beneficiosos per a la humanitat. Hi ha, però, també, una altra manera de procedir, segurament també creativa: la recerca sistemàtica de la potencialitat o disposició d'alguns sistemes especials que es caracteritzen per una multiplicitat de diferents processos d'autoassemblatge o creixement molecular. Es tracta essencialment de la unió d'unitats estructurals elementals, que pot ser molt sensible a l'elecció de les condicions en que es realitza, i que dóna lloc principalment a productes de reacció

amb un elevat contingut de simetria, i, per tant, estèticament bells.

En l'estadi actual de la ciència, encara no som capaços de predir les estructures de tots els productes de reacció que es poden obtenir a partir de la unió d'unes determinades unitats estructurals en un sistema de reacció complex. Amb un coneixement detallat del sistema es poden prendre, de manera intuïtiva, camins que condueixen a fites relatives a partir de les quals es pot obtenir quelcom nou, quelcom amb un augment de la complexitat molecular, però alhora també amb un increment de la multifuncionalitat dels productes de reacció. En aquest cas el químic és capaç de *despertar* en certa manera potencialitats, en el sentit de propietats disposicionals, mantenint determinades condicions de contorn o de reacció. S'ha d'esperar obtenir l'èxit en aquells casos en els quals existeixin fites relatives, com ara l'obtenció de molècules cada cop més grans. Això no deixa de ser cert en el cas en el qual no es pot predir d'antuvi l'estructura exacta dels productes que s'obtidran. El que és essencial per al progrés és que el científic sigui capaç d'aprofitar el resultat obtingut per a posteriors desenvolupaments fonamentals. Dit d'altra manera, l'èxit pressuposa trobar una oportunitat en el camí i estar preparat per a aquesta. Com a exemple es poden citar en el camp dels polioxometal·lats les anomenades *rodes gegants* de Bielefeld (figura 8) obtingudes al nostre laboratori<sup>23</sup> per un procés d'autoassemblatge l'any 1995, a les quals es pot segurament concedir els atributs d'armòniques i seductores.<sup>24</sup>

TAULA 1. Relacions (vegeu la nota 17) entre els nombres màgics  $10T+2$  (vegeu, per exemple, Ian Stewart, *Life's Other Secret* [...], nota 5) i les unitats estructurals en molècules esfèriques, formulades en un llenguatge químic (nombre de triangulació  $T = [h,k] = h^2 + hk + k^2$ ).

Nombre màgic	Química i nombres màgics Clúster / molècula		Nombre de triangulació
$10T + 2$	$\{Mo_{132}\}$ (20 hexàgons)	$\{Fe_{30}Mo_{72}\}$ (20 triangles)	$T = [h,k]$
12	12 unitats (Mo)Mo <sub>5</sub> (estructura icosaèdrica)	12 unitats (Mo)Mo <sub>5</sub> (estructura icosaèdrica)	1 [1,0]
32	32 cares de l'icosaedre truncat (Mo <sub>2</sub> ) <sub>30</sub>	32 cares de l'icosidodecaedre (Fe <sub>30</sub> )	3 [1,1]
42	42 (12 + 30) unitats estructurals <sup>a</sup> (càrrega del clúster)	42 (12 + 30) unitats estructurals <sup>a</sup>	4 [2,0]
72	72 centres Mo <sup>VI</sup> (càrrega dels 12 pentàgons)	72 centres Mo <sup>VI</sup>	7 [2,1]
132	132 àtoms de Mo		13 [3,1]

a. 12 unitats (Mo)Mo<sub>5</sub> + 30 separadors de Fe o alternativament + 30 separadors {Mo<sup>V</sup>}<sub>2</sub>.

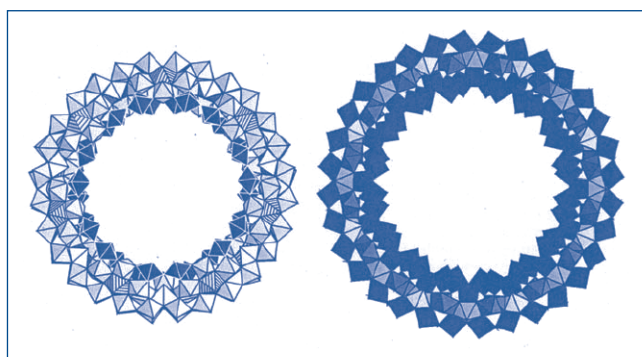


FIGURA 8. La roda gegant de Bielefeld, amb més de set-cents àtoms (esquerra), formada bàsicament per la unió d'octaedres (cadascun amb un àtom de metall central i sis oxígens envoltant-lo). La bellesa i l'ordre, principis d'igualtat, condueixen en aquest cas a la matèria d'una manera que hauria fet segurament feliç Plató. Un punt remarcable és que canviant les condicions de reacció és possible obtenir una roda molecular encara més gran, amb set unitats estructurals diferents (dreta).

Una característica dels sistemes materials (químics) del tipus esmentat és que pot aparèixer tota una paleta de productes de reacció amb una diversitat extrema de formes. Aquesta possibilitat (*dynamis*) es basa en les peculiaritats del sistema, on la realització (*energeia*) —en el sentit de la física aristotèlica— només té lloc quan es compleixen totes les condicions necessàries. En el cas dels polioxometal·lats s'investiguen especialment les solucions que contenen unitats estructurals elementals que es puguin connectar entre si. Aquestes unitats presenten diverses formes simètriques, entre d'altres les dels cossos platònics, formades per àtoms d'oxigen i un àtom metàl·lic. Sota canvis específics del sistema, és a dir, de la solució de reactius, les diferents «peces» es connecten de maneres diverses. En aquest procés poden aparèixer una gran quantitat de molècules amb noves estructures, la majoria d'alta simetria. La potencialitat del sistema material es refereix a quelcom fonamentalment possible: amb una mirada posada en Aristòtil, la matèria (*hyle*), seguint les lleis de la química i de la física, només pot prendre, però, aquelles formes (*morphe*) que siguin compatibles amb les «seves possibilitats».

## FORCES GENERADORES DE FORMES ESTÈTICAMENT BELLES

*S'ha mostrat [...] la impossibilitat d'arribar a l'origen del sentit d'aquests signes. [...] S'escapen al nostre enteniment i, dolorosament, això continuarà probablement d'aquesta manera. Ara bé, quan dic «s'escapen», és només el contrari de revelar-se i ningú em convencerà que la natura ha dibuixat aquests missatges xifrats, per als quals ens manca la clau, sobre la closca d'aquestes criatures simplement com a motiu decoratiu. Decoració i significat sempre han anat junts; també els escrits antics unien decoració i comunicació. Que ningú em digui que aquí no hi ha un missatge! També és un plaer deixar-se enfonsar en la contradicció que es tracti d'un missatge indesxifrabable.*

THOMAS MANN<sup>25</sup>

Per què apareixen només algunes formes estables determinades, especialment amb estructures regulars, com, per exemple, els bonics virus altament simètrics, els cargols de mar, els ful·lerens<sup>26</sup> o fins i tot els superful·lerens? Els coneixements de la física i de la química ens ensenyen que per a resoldre aquesta qüestió cal partir de reflexions relacionades amb la to-

pologia (estructura), la cinètica i l'energia, en què les consideracions seran diferents per a estructures conservatives i dissipatives. D'Arcy Wentworth Thompson explicava en la seva època l'aparició d'una forma biològica a partir de la tendència d'un sistema a assolir una espècie d'equilibri (energètic).

Un argument que es pot trobar en llibres de bioquímica per a justificar l'estabilitat de les estèticament atractives formes esfèriques dels virus diu que «la construcció d'una càpsida a partir d'un gran nombre de subunitats idèntiques té lloc de manera que es garanteixi un efecte òptim (per exemple, la protecció de l'ADN/ARN) amb una despesa mínima d'informació genètica. L'estabilització es dona formant un nombre màxim d'enllaços, i l'ús múltiple de contactes idèntics té com a conseqüència l'elevada simetria de l'estructura final. La formació d'estructures tancades (anells, esferes) implica un augment de l'estabilitat per l'increment en el nombre d'enllaços entre unitats de proteïna». En part es troben representacions amb ressonàncies antropomòrfiques: «Els virus supleixen la seva pobresa genètica formant les seves cobertes a partir d'un elevat nombre de còpies d'una mateixa o d'unes quantes unitats bàsiques de proteïna»<sup>27</sup> que dona lloc finalment a l'elevada simetria.

La formació de virus va sorgir en el procés de l'evolució probablement a l'atzar a partir de proteïnes i ADN/ARN, és a dir, a partir dels productes bacterians corresponents. D'aquestes estructures víriques van sobreviure possiblement les que presentaven una major estabilitat cinètica, especialment aquelles amb una estructura icosaèdrica, això és, d'alta simetria. Aquestes resistiren el procés de *survival of the fittest* ja que eren les menys *atacables*.

El mateix s'aplica al model de virus inorgànic topològic descrit anteriorment, format també sota condicions conservatives. De tots els productes de reacció de la mescla, el de més alta simetria és el menys reactiu. Això es pot explicar aplicant les regles de conservació de la simetria per a les quals reberen el premi Nobel Robert B. Woodward i Roald Hoffmann. En tots dos casos, el virus i el seu model inorgànic-topològic, val el mateix principi de selecció.

Les formes dels organismes apareixen, en canvi, a través de la combinació complexa de processos dissipatius i conservatius, una combinació que ha estat descrita per Norbert Bischof de la manera següent:<sup>28</sup> «[...] ambdós tipus de creació de formes

són necessaris per a poder lligar d'alguna manera homeòstasi amb selecció i la fixació d'assolir un objectiu amb la utilitat, de manera que donin un resultat que es pot descriure com a teleonòmic.»<sup>29</sup> Com a exemples d'aquest tipus de generació de formes es poden considerar el dibuix alternat de les ratlles de la zebra o les closques d'animals marins com el *Nautilus pompilius* que apareixen a causa de l'amplificació de la no-linealitat i la inhibició. Referent a això, la no-linealitat és imprescindible per a un procés que porta el sistema lluny de l'equilibri (conservatiu). La forma dels organismes biològics es pot entendre només amb l'ajuda de la dinàmica no lineal.

## Hans Jonas versus Alfred North Whitehead i un epíleg

*El nou no es pot desenvolupar a partir de l'antic sense que l'antic hagi assolit, a través d'una certa acumulació d'aliments externs, una espècie de perfecció.*

JOHANN WOLFGANG GOETHE<sup>30</sup>

Com queda, doncs, la resposta a la pregunta fonamental sobre el *logos cosmogònic*<sup>31</sup> que planteja Hans Jonas en el text citat en la introducció: la matèria desenvolupada a partir de l'explosió primordial contenia ja d'origen una certa informació? És útil aquest concepte en el context de la construcció d'estructures complexes a partir d'unitats estructurals elementals, també referint-se a la representació d'una evolució en què la informació dirigeixi la formació d'ordenacions superiors? O pot ser que el *logos cosmogònic* s'hagi desenvolupat simplement com una aptitud de la matèria?<sup>32</sup> En el darrer cas, aquesta aptitud seria, en el sentit de Jonas, una disposició, que possibilita quelcom des del punt de vista fonamental, però que no estaria implicada en la direcció del procés de creació. Sobre això es pot plantejar també la pregunta de si els fragments elementals bàsics de la matèria, per exemple, els àtoms, ja contenen la informació (en el sentit esmentat anteriorment) per a la construcció de determinats edificis moleculars i en concret les formes especialment belles tractades en aquest assaig. El que és segur és que, després de la «formació de sistemes ordenats rellevants com el sistema periòdic dels elements» (vegeu la introducció), la formació, és a dir, actualització, de les formes esmentades pressuposa condicions de contorn i de reacció adequades.

En aquest context Jonas critica Whitehead, segons el qual la realitat és desenvolupament estable. Segons Whitehead, els fragments atòmics constitutius de la matèria són elements de creixement orgànic, i per tant també de l'evolució de l'univers.<sup>33</sup> Es pot considerar, en aquest sentit, la creativitat de la matèria, a partir de la qual es genera continuament quelcom nou i sota certes condicions quelcom nou inesperat per nosaltres. En aquest cas, evidentment en l'esperit de Whitehead, no és important si allò nou es crea en un procés natural o en un laboratori químic; en ambdós casos és conseqüència de la inesgotabilitat de la matèria. Whitehead associa a la matèria relativament poc estructurada una informació que la guia en la creativitat.

Jonas ens adverteix, però, de l'ús poc crític del concepte informació: «La informació necessita per a ella mateixa, com a substrat físic, un sistema diferenciat i estable, com ara el genoma dels éssers vius, completament articulat i persistent a nivell molecular, o la programació basada en un alfabet magnètic (*software*) dels nostres ordinadors. La informació no és, doncs, només la causa, sinó ella mateixa resultat de l'organització, reflexió i expressió del construït amb anterioritat, que amb això es perpetua, però no és mai superat.»<sup>34</sup> (Compareu amb la cita de Goethe que encapçala aquesta secció.) Segons Jonas la informació només augmenta en construccions moleculars resultants d'un procés químic que siguin més fortament estructurades, i possiblement més grans. Això es tradueix en objectes moleculars que poden, per exemple, a causa de la seva forma especial i, amb això, a causa del seu creixement, incidir de manera selectiva i específica en un procés, o que són capaces d'induir un procés previsible. Per posar un exemple, en una mescla de reacció complexa amb múltiples espècies pot haver-hi una molècula especial, amb una superfície receptora adequada per a reconèixer una altra molècula amb una forma complementària, que sigui capaç de seleccionar-la i formar una estructura supramolecular. La informació en la molècula receptora amb una determinada qualitat és ja, segons Jonas, el resultat i l'expressió de la seva existència.

Es pot parlar d'informació potencial quan existeixen estructures complementàries i interaccionants capaces d'induir un procés, en el sentit més ampli.<sup>35</sup> La tasca del científic és desxifrar tota aquesta informació per a intentar reconèixer principis d'ordre en la diversitat de formes. Es pot intentar comprendre la realitat de manera racional o bé intuir-la de manera pictòrica (compareu aquí la teoria del color de



Goethe, especialment la part on descriu l'acció sensible-convencional del color sobre la vivència rellevant donant una visió de la realitat alternativa a la de Newton).<sup>36</sup> Potser la cooperació estimula la creativitat de l'investigador. En qualsevol cas, això està lligat a la relació encara problemàtica però interessantíssima entre l'estètica i les ciències naturals. «A través del portal de la bellesa vas entrar en la terra del coneixement.»<sup>37</sup>

Aquest assaig està dedicat al professor Roald Hoffmann.

Vull expressar el meu sincer agraïment als professors Gerd Fleischmann, Herbert Hörz, Bruno Redeker i Rainer Zimmermann per les valuoses discussions mantingudes i també al senyor Paul Körerler per la revisió crítica del manuscrit i al senyor Björn Hauptfleisch per la seva ajuda en la preparació de les figures. Voldria agrair també al Fonds der Chemischen Industrie i a la Deutsche Forschungsgemeinschaft el seu suport econòmic.

## Autor

*El professor Achim Müller, nascut a Detmold, va estudiar química a la Universitat de Göttingen, es va doctorar el 1965 i va obtenir l'habilitació el 1967. Des de 1977, un cop finalitzada una etapa docent com a professor a la Universitat de Dortmund, ocupa la Càtedra de Química Inorgànica a la Universitat de Bielefeld. És membre de diverses acadèmies científiques, entre les quals la Akademie der Naturforscher Leopoldina i l'Acadèmia Polonesa de Ciències. Els seus àmbits de treball se centren en els camps de la física molecular, l'espectroscòpia vibracional, la catàlisi heterogènia, la química bioinorgànica i la química dels complexos i clústers de metalls amb elements del grup 16. Segons un estudi recent de l'ISI (Institute for Scientific Information) el professor Müller és un dels vint científics alemanys més citats.*

## Notes i referències

- 1) HEISENBERG, Werner. «Die Bedeutung des Schönen in der exakten Naturwissenschaft». A: DÜRR, Hans-Dieter; RECHENBERG, Helmut [ed.]. *Gesammelte Werke*, part C, vol. III, *Physik und Erkenntnis*, 1969-1976. Munic: Piper, 1985, p. 369.
- 2) JONAS, Hans. «Materie, Geist und Schöpfung: Kosmologi-

scher Befund und kosmogonische Vermutung». A: *Philosophische Untersuchungen und metaphysische Vermutungen*. Frankfurt del Main: Insel, 1992, p. 209.

3) En aquest assaig no considerarem el treball sobre «Teoria estètica» de Friedrich Cramer (vegeu més endavant), segons el qual la transició natural entre caos i ordre és capaç de generar bellesa i segons la qual els fenòmens estètics es desenvolupen temporalment. («Involuntàriament ens fixem en l'origen d'una estructura bella i [...] l'observador naïf es veu captivat, no tant per l'estructura que té davant dels ulls, com pel procés que hi intueix i que hi és *visible*») Cramer posa com a exemples en aquest context el creixement espiral de mol·luscs i cargols en el qual en cadascuna de les voltes es manté la proporció àuria, i esmenta també les regularitats recognoscibles en determinades flors que segueixen la successió de Fibonacci ..., 5, 8, 13, 21, ... (segons Cramer: «Aquests fets ens evidencien claríssimament el procés de creixement»).

Tampoc considerarem la diversitat de definicions de gust, basades en els fonaments de la teoria del coneixement. En un capítol sobre estètica es pot llegir, per exemple: «No hi ha cap altra disciplina filosòfica fonamentada en unes premisses tan poc segures com l'estètica. Com un penell es veu sacsejada per qualsevol cop de vent filosòfic, cultural o científic. Tan aviat es basa en criteris metafísics com empírics, tant normatiu com descriptiu, a vegades definida per l'artista i d'altres per l'observador. Tan aviat es suposa que el centre de l'estètica es troba en l'art, segons el qual la bellesa de la natura és només un primer pas, com canvia l'opinió i la bellesa artística passa a ser simplement una còpia de segona mà de la bellesa natural» (vegeu la nota 6). Com a exemple es pot adduir aquí la crítica de Plotí a la concepció de la simetria de la *stoá*, negant que la bellesa s'hagi d'entendre com a simetria, és a dir, relació harmònica entre les parts d'un objecte.

La paraula estètica (del grec *aisthesis*, percepció) va ser introduïda per Alexander Gottlieb Baumgarten (1714-1762). En l'obra *Aesthetica* (1750) la definí com a *scientia cognitio-nis sensitivae*, situant el *felix aestheticus* en el centre. Baumgarten també desenvolupà, per cert, en les seves «Cartes filosòfiques» un pla per a «una empírica estètica» basant-se en Bacon i Boyle, en la qual s'analitzava el paper de les «armes dels sentits» i els seus instruments com ara microscopis, telescopis i oïdes artificials. Aquesta discussió és especialment interessant per a la ciència moderna, i en particular per al químic involucrat en la síntesi de molècules estèticament belles.

La percepció estètica és la percepció de la bellesa. En aquest

assaig s'ha d'entendre en el sentit del llenguatge col·loquial de l'antiguitat, és a dir, com a allò que trobem harmònic i, per tant, atractiu. L'harmonia és, segons l'estètica de les formes, juntament amb la proporció i la simetria, un dels ingredients bàsics a partir dels quals es manifesta la bellesa com a unitat en la multiplicitat. En aquest sentit, simetria es refereix a una relació regular entre la grandària i les formes de les parts d'un tot, mentre que per estructura s'entén el teixit de relacions mitjançant les quals s'uneixen els elements (parts) d'un tot entre si. Sobre aquesta temàtica, el lector interessat pot consultar també Rainer E. ZIMMERMANN (*Ästhetik der Differenz: Strukturbildung im Weltprozeß*), Friedrich CRAMER (*Schönheit als dynamisches Grenzphänomen zwischen Chaos und Ordnung – ein Neuer Laokoon*) i Joachim WILKE («Landscape revisited: Naträsthetik und Selbstorganisation», a Uwe NIEDERSEN i Frank SCHWEITZER (ed.), *Selbstorganisation: Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial-, und Geisteswissenschaften*, vol. 4, *Ästhetik und Selbstorganisation*, Berlin, Duncker & Humboldt, 1993), així com les obres de caràcter general: Alwin DIEMER i Ivo FRENZEL (ed.), *Philosophie (Das Fischer Lexikon)*, Frankfurt del Main, Fischer, 1958, concepte *Ästhetik*; Joachim RITTER et al. (ed.), *Historisches Wörterbuch der Philosophie*, Darmstadt, Wiss. Buchges., 1971/1992, conceptes *Ästhetik* i *Das Schöne*; Wolfhart HENCKMANN i Konrad LOTTER (ed.), *Lexikon der Ästhetik*, Munic, Beck, 1992.

4) HOLZ, Hans Heinz. *Der ästhetische Gegenstand: Philosophische Theorie der bildenden Künste I*. Bielefeld: Aisthesis, 1996.

5) Vegeu Hugh ALDERSEY-WILLIAMS, *The Most Beautiful Molecule: The Discovery of the Buckyball*, Nova York, Wiley, 1995; Andreas DEUTSCH (ed.), *Muster des Lebendigen: Faszination ihrer Entstehung und Simulation*, Braunschweig, Vieweg, 1994 (especialment el capítol «Harmonie der Proportionen», de Peter H. Richter i Holger Dullin, així com «Symmetrie und Topologie», d'Andreas Dress, Daniel Huson i Achim Müller); Hans MEINHARDT, *The Algorithmic beauty of Sea Shells*, Berlin, Springer, 1998; Fritz VÖGTLE, *Reizvolle Moleküle der Organischen Chemie*, Stuttgart, Teubner, 1989; Ian STEWART, *Game, Set and Math. Enigmas and Conundrums*, Oxford, Blackwell, 1989; Ian STEWART, *Life's other Secret: The New Mathematics of the Living World*, Nova York, Wiley, 1998; Johannes KEPLER, *Gesammelte Werke*, vol. VI, *Harmonice Mundi*, Max CASPAR (ed.), Munic, Beck, 1990; Joachim DETTMANN, «Form, Symmetrie, Topologie, Strukturen», a *Fullerene – die Bucky-Balls erobern die Chemie*, Basilea, Birkhäuser, 1994, p. 149; Peter SITTE, *Symmetrien bei Organismen*, a *Biologie in unserer Zeit*, 14 (Heft 6), 1984,

p. 161; Alfred STÜCKELBERGER, *Einführung in die Antiken Naturwissenschaften*, Darmstadt, Wiss. Buchges., 1988 (capítol «Pythagoras und die Pythagoreer»).

6) Citat a Alwin DIEMER i Ivo FRENZEL (ed.), *Philosophie (Das Fischer Lexikon)*, Frankfurt del Main, Fischer, 1958, concepte *Ästhetik*.

7) LAERCI, Diogenes. *Leben und Meinungen berühmter Philosophen*, vol. II, llibre 9, cap. II. Hamburg: Meiner, 1990, p. 168.

8) CAPELLE, Wilhelm [ed.]. *Die Vorsokratiker*. Stuttgart: Kröner, 1968, p. 123. Vegeu també «On Melissus, Xenophanes, and Georgias», a Jonathan BARNES (ed.), *The Complete Works of Aristotle*, vol. II, Princeton, Princeton University Press, 1995.

9) Entre els organismes vius es troben també formes esfèriques (per exemple, en colònies d'animals flagel·lats de l'espècie *Volvox aureus*) o circulars (en l'espècie *Arachnoidiscus*, un organisme que s'assembla a un rosetó gòtic). En la figura 3 es mostren algunes estructures comparables de l'àmbit de les molècules.

10) Vegeu la nota 5.

11) En qualsevol cas el nostre interès primari hauria de ser relacionar les causes de la creació de forces a la naturalesa, tant la viva com la inanimada, amb la simplicitat, és a dir, amb els primers principis.

12) HEISENBERG, Werner. «Das Naturbild Goethes und die technisch-naturwissenschaftliche Welt». A: BLUM, Walter; DÜRR, Hans-Dieter; RECHENBERG, Helmut [ed.]. *Gesammelte Werke*, part G, vol. II, *Physik und Erkenntnis* [1956-1968]. Munic: Piper, 1984, p. 394: «Es pot comparar d'alguna manera l'estructura elemental acabada d'esmentar, la doble hèlix dels àcids nucleics, amb la planta primigènica de Goethe? [...] en ambdós casos es tracta de la comprensió de les forces generadores de les formes en la naturalesa viva, de la reducció a quelcom senzill, comú a tots els organismes vius.»

13) HAECKEL, Ernst. *Kunstformen der Natur* [1904]. Munic: Prestel, 1998.

14) D'ARCY, W. Thompson. *On Growth and Form*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. [Editat per John T. Bonner]

15) WEYL, Hermann. *Symmetry*. Princeton: Princeton University Press, 1989.

16) THOM, René. *Structural Stability and Morphogenesis: An Outline of a General Theory of Models*. Reading (Mass.): Addison-Wesley, 1989.

17) Vegeu les referències a A. MÜLLER et al., *Angew. Chem.*, 111 (1999), així com a diversos capítols de István HARGITAI (ed.), *Quasicrystals, Networks and Molecules of Fivefold Symmetry*, Weinheim, VCH, 1990.

- 18) CYRIL, N. Hinshelwood. «Centenary Address to the Chemical Society». *J. Chem. Soc.* (1947), p. 1271-1277.
- 19) Citat per R. W. Siegel a *Physics Today*, 46 (1993), p. 64-66.
- 20) GOETHE, Johann Wolfgang. «Betrachtung über Morphologie». A: *Werke*. Vol. 13: *Naturwissenschaftliche Schriften I, Hamburger Ausgabe*. dtv. Múnic, 1998, p. 120.
- 21) GOETHE, Johann Wolfgang. «Neigung des Materiellen, sich zu gestalten». A: *Goethe: Die Schriften zur Naturwissenschaft*. Vol. 11. Weimar: Hermann Böhlaus, 1970, p. 203. [Editat per la Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (edició a cura de Dorothea Kuhn i Wolf von Engelhard)]
- 22) MÜLLER, Achim [et al.]. *Angew. Chem.* (1998), p. 3567-3571.
- 23) MÜLLER, Achim [et al.]. *Angew. Chem.* 107 (1995), p. 2293-2295.  
MÜLLER, Achim [et al.]. *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* (1999), p. 1347-1358.  
MÜLLER, Achim; BEUGHOLT, Christian. *Nature*, 383 (1996), p. 296-297.
- 24) L'obtenció d'aquest tipus de molècules ha estat notícia a diferents mitjans de comunicació, tant generals com de divulgació científica.
- 25) MANN, Thomas. *Doktor Faustus*. Cap. III. (En Jonathan Leverkühn observa els dibuixos de la closca d'un cargol marí de Nova Caledònia.)
- 26) KROTO, Harold W. [et al.]. *Nature*, 318 (1985), p. 162-163.
- 27) STRYER, Lubert. *Biochemie*. Heidelberg: Spektrum, 1990, p. 888. [Edició totalment revisada]
- 28) BISCHOF, Norbert. «Ordnung und Organization als heuristische Prinzipien des reduktiven Denkens». A: MEIER, Heinrich [ed.]. *Die Herausforderung der Evolutionsbiologie*. Múnic: Piper, 1992, p. 79.
- 29) Bischof diu també: «Qualsevol forma dissipativa fixada en un lloc hauria, en cas de disposar del material i el temps necessari, de crear un esquelet conservatiu. Mentre durí aquest procés, l'esquelet pot participar en la potència homeostàtica de l'estructura dissipativa, com ara en la reparació dels ossos trencats. Com a contrapartida, però, aquest esquelet anirà canalitzant progressivament els processos dissipatius en el sentit d'un ordenament forçat com la proposada per Köhler. D'aquesta manera l'estructura dissipativa es veu cada cop més arrossegada al remolí de la irreversibilitat temporal i es veu finalment esborrada per aquesta.»
- 30) Vegeu la nota 20.
- 31) Per als presocràtics l'*arché* era la portadora del logos, amb la conseqüència que a partir de la matèria amorfa es pot crear la forma. En general s'intenta descobrir a partir del tipus de forma les lleis que regeixen la matèria.
- 32) Jonas (vegeu la nota 2) discuteix en el context del naixement fascinant de la subjectivitat que: «La matèria és subjectivitat latent des del principi, fins i tot quan [...] es necessita l'atzar més improbable per a l'actualització d'aquest potencial. Tot això de la "teleologia" es pot deduir analitzant simplement el testimoni vital. [...] En conseqüència, s'ha de considerar també que les causes finals —i amb això també els valors i les diferències en els valors— s'han d'incloure en el concepte [...] de la causalitat del món: com una disposició donada, però alhora com l'acceptació de la tolerància a la seva intervenció en el teixit de determinacions en les causes dels efectes finals.»
- 33) Segons el principi ontològic ratificable de Whitehead, la realitat es troba fonamentada en l'autoorganització d'éssers individuals concrets (la diferència entre aquesta filosofia organística i la de Plató es troba en el concepte d'una realització necessària de les idees). En la seva obra *Prozeß und Realität: Entwurf einer Kosmologie* (Alfred North Whitehead, Frankfurt del Main, Suhrkamp, 1987) es pot llegir al capítol segon («L'esquema de les categories»): «"La creativitat" és l'universal dels universals, que caracteritza l'estat de les coses elemental. [...] "la creativitat" és el principi de la novetat. Un succés vertader és un ésser individual nou que es distingeix de cadascun dels altres amb els quals està relacionat. Per això la creativitat és capaç d'introduir quelcom nou en la naturalesa dels molts.» La categoria de Whitehead de l'elemental substitueix aquí la categoria aristotèlica de la primera substància.
- 34) Vegeu la nota 2, p. 211.
- 35) Respecte del concepte rellevant de potencialitat, vegeu Achim MÜLLER, «Die inhärente Potentialität materieller Systeme», *Philosophia naturalis*, 35 (1998), p. 333.
- 36) Vegeu també Herbert HORZ, «Mathematische Ordnung der Wirklichkeit – Philosophische Reflexionen zur Weltansicht von Helmholtz und Heisenberg», a Klaus MAINZER, Achim MÜLLER i Walter G. SALTZER (ed.), *From Simplicity to Complexity II: Information – Interaction – Emergence*, Braunschweig, Vieweg, 1998.
- 37) SCHILLER, Friedrich. *Über das Schöne und die Kunst. Schriften zur Ästhetik*. Múnic, 1984. (Citat per Joachim Dettmann a la referència 5.)