

# LES MERAVELLES DELS SISTEMES COMPLEXOS



Giorgio  
Parisi

PREMI NOBEL DE FÍSICA

# **LES MERAVELLES DELS SYSTEMES COMPLEXOS**

Títol original:  
*In un volo di storni.*  
*Le meraviglie dei sistemi complessi*

© 2021 Mondadori Libri S.p.A.

© 2023 Joan Casas Fuster, per la traducció

© 9 Grup Editorial, per l'edició  
Angle Editorial  
c. Mallorca, 314, 1r 2a B  
08037 Barcelona  
T. 93 363 08 23  
[www.angleeditorial.com](http://www.angleeditorial.com)  
[angle@angleeditorial.com](mailto:angle@angleeditorial.com)

Disseny de cobertes: J. Mauricio Restrepo

Primera edició: febrer de 2023  
ISBN: 978-84-19017-50-5  
DL B 1620-2023  
Imprès a Romanyà Valls, SA

No és permesa la reproducció total o parcial d'aquest llibre,  
ni la incorporació a un sistema informàtic,  
ni la transmissió en cap forma ni per cap mitjà,  
sigui electrònic, mecànic, per fotocòpia, per gravació o altres mètodes,  
sense el permís previ i per escrit dels titulars del copyright.

Giorgio Parisi

# LES MERAVELLES DELS SISTEMES COMPLEXOS

*Amb la col·laboració d'Anna Parisi*

Traducció de Joan Casas

*A la meua esposa Daniella Ambrosino,  
que ha estat sempre al meu costat*

## TAULA

<b>En un vol d'estornells</b>	11
<b>La física a Roma cinquanta anys enrere</b>	29
<b>Transicions de fase, és a dir els fenòmens col·lectius</b>	47
<b>Vidres d'espín: la introducció del desordre</b>	63
<b>Intercanvi de metàfores entre física i biologia</b>	87
<b>Com neixen les idees</b>	103
<b>El sentit de la ciència</b>	119
<b>Je ne regrette rien</b>	129
<b>Nota</b>	139

## Com neixen les idees

*En la recerca les preguntes noves que van apareixent  
són més importants que les respostes que arribem  
a obtenir.*

D'on venen les idees? Com es formen, en el cap d'un físic teòric com jo? Quina mena de procediments lògics fem servir? No pretenc parlar exclusivament de les grans idees, aquelles que modifiquen la història de la humanitat, la història del pensament; vull parlar d'aquella que ha estat anomenada la «microcreativitat», és a dir, de les petites idees de cada dia que en l'àmbit científic són crucials per fer progressos. Per a mi una idea és un pensament inesperat, sorprenent, absolutament no banal.

Voldria partir d'Henri Poincaré i de Jacques Hadamard. Els dos matemàtics, que van viure a cavall entre el segle dinou i el vint, van descriure repetidament la manera com naixien les seves idees matemàtiques i tenen un punt de vista semblant. Tots dos afirmen que en la demostració d'un teorema de matemàtiques es poden identificar diverses fases:

- Hi ha una primera fase de preparació en la qual s'estudia el problema, es llegeix la literatura científica, es fan les primeres temptatives infructuoses de solució. Després d'un període que pot durar d'una setmana a un mes, aquesta fase s'exhaureix en tant que no es fan progressos.
- Ve després un període d'incubació en el qual el problema és abandonat (si més no conscientment).
- La incubació s'acaba de cop amb un moment d'*il·luminació*: aquesta es produeix sovint en una situació no relacionada amb el problema que es vol resoldre, per exemple enraonant amb un amic de temes que no hi tenen res a veure.
- Finalment, després de la il·luminació que indica les línies generals amb les quals s'ha d'afrontar el problema, cal fer, efectivament, la demostració. Aquest pot ser un període molt llarg: s'ha de verificar si la il·luminació era correcta, si el camí es pot recórrer realment, i completar totes les etapes matemàtiques que calen per explicitar la prova.

Òbviament, hi ha casos en els quals la il·luminació es revela equivocada: pressuposa la validesa d'etapes que no es poden demostrar. I aleshores s'ha de tornar a començar.

La descripció és molt interessant i suggereix un paper prominent del pensament inconscient. El mateix Einstein estava d'acord amb aquest paper: de fet, en diverses ocasions va subratllar la importància que per a ell tenia el raonament inconscient. No hi ha cap dubte que és molt comú el procediment de deixar de banda un problema difícil, fer *seditmentar* les idees, afrontar-lo amb la ment fresca i resoldre'l.



El proverbi «La nit porta consell» existeix en moltíssimes llengües: *Consiliis nox apta*; *Night is the mother of counsel*; *Die Nacht bringt Rat*; *Il est utile de consulter l'oreiller*; *Antes de hacer nada, consúltalo con la almohada*, *La note xe la mare d'i pensieri*.

Passant dels grans problemes a problemes més banals, us voldria contar una experiència personal. Molt sovint, per a les meves recerques de física teòrica, he d'escriure programes d'ordinador, activitat que trobo divertida i relaxant. L'ordinador és una màquina completament privada de sentit comú i, per tant, fa exactament allò que li diem que faci i s'até amb una precisió exasperant al significat literal. Si parlem amb un ésser humà i li diem que agafi un camí i que continuï sempre recte, per fortuna no sortirà de la carretera al primer revolt; en canvi, aquest comportament seria natural per a un ordinador, si no és que hem estat extremadament precisos en indicar què volíem dir amb «continuar recte».

Per més esforços que fem, molt sovint la primera vegada allò que demanem a l'ordinador que faci és subtilment diferent d'allò que veritablement volíem demanar. Un programa nou, escrit en un dels molts llenguatges de programació, tot sovint no funciona: si fem tests senzills, ens dona resultats completament diferents dels esperats (almenys aquesta és la meva experiència: òbviament, si el programador és molt bo, fa diana al primer tret).

Innombrables vegades m'he passat batallant tot el matí per provar de comprendre quin error havia fet: llegia acuradament el programa, reflexionava sobre totes les instruc-

cions, l'una darrere l'altra, em preguntava si les comes eren correctes, si faltava un punt i coma, si hi havia un signe igual de més o un de menys, sense aconseguir treure'n l'entrellat. Després, mentre tornava cap a casa en cotxe, a mig camí em venia a la ment: «Vet aquí on era l'error!», i en arribar a casa comprovava que efectivament l'havia trobat.

Aquest és un cas molt comú. Una altra vegada —per desgràcia només una vegada en la meua vida— hi va haver un episodi de la mateixa naturalesa, però més espectacular. Juntament amb altres col·legues m'havia plantejat un problema molt difícil; havíem provat de saber quina era l'estratègia per resoldre'l, però sense èxit. Durant un llarg període (deu o quinze anys) van ser proposades diverses aproximacions: jo personalment havia treballat sobre el problema, però l'havia deixat córrer perquè em semblava massa difícil. I vet aquí que dinant, durant un congrés, un amic em diu: «Saps, el problema sobre el qual has treballat és molt interessant, perquè la seva solució tindria tot d'aplicacions més enllà d'aquelles que es van pensar en el passat». Jo li vaig respondre: «Si és així s'ha de fer un esforç per resoldre'l. Potser es podria provar de...», i li vaig exposar, pas per pas, l'estratègia per resoldre el problema, una estratègia que, després, es va revelar que era la correcta.

### *Pensaments i paraules*

És fàcil reconèixer en aquests episodis exemples del procés d'incubació. Estic convençut que tots nosaltres podríem explicar anècdotes semblants. Però si la incubació, tant per a les coses petites com per a les grans, és un procés no cons-

cient, ens hem de preguntar quina mena de lògica segueix i com és possible que es produeixi. Molt sovint donem per descomptat que el pensament és verbal i que el raonament inconscient no és pensament pròpiament dit. Einstein no hi hauria estat d'acord, de fet, sostenia que ser completament conscients és un cas límit, que no passa mai: en el pensament hi ha sempre una part inconscient.

Tot i que no soc un expert en aquest camp, permetin-me que presenti algunes consideracions meves sobre el pensament conscient i inconscient. Nosaltres tenim la impressió que pensem fent servir paraules, formulant frases. Això és veritat no tan sols quan parlem amb altres persones, sinó també quan reflexionem en silenci. Si algú ens demanés que reflexionéssim sobre un problema sense fer servir les paraules, ens sentiríem completament impotents: no som capaços de resoldre el problema en la nostra ment sense formalitzar el pensament en paraules; poden ser paraules en una llengua qualsevol, però han de ser paraules.

La forma verbal, però, no pot exhaurir la manera com pensem; de fet, quan comencem a pensar o a dir una frase, ja hem de saber on anirem a parar. Hi ha regles de la gramàtica que hem de seguir. No comencem una frase amb la paraula «no» i després ens aturem sense saber què dir, perquè en el moment que se'ns acut la paraula «no» ja sabem el verb que segueix i, probablement, tota la frase. Però, si és així, tota la frase ha d'estar present a la nostra ment en forma no verbal abans de ser expressada en paraules.

Formalitzar els pensaments a través de les paraules és extremadament important; les paraules són poderoses, s'en-

cadena les unes amb les altres i s'atrauen entre elles. Tenen, en el fons, la mateixa funció que l'algoritme en matemàtiques. Així com l'algoritme tira endavant gairebé tot sol el pensament matemàtic, igualment les paraules tenen una vida pròpia, evoquen altres paraules, ens permeten de fer abstraccions, deduccions, fer servir la lògica formal. Potser la formulació conscient en paraules del pensament conscient és útil també per recordar allò que hem pensat: si no formalitzem els nostres pensaments a través de les paraules, podria ser més difícil recordar. De totes maneres, el pensament verbal ha d'estar precedit per un pensament no verbal. Aquesta afirmació no és tan estranya si considerem que el pensament és històricament molt més antic que el llenguatge. El llenguatge humà deu tenir unes quantes desenes de milers d'anys, però és difícil de creure que els homes, abans del llenguatge, no pensessin (i que els animals o els nens petits, que encara no parlen, no tinguin alguna mena de forma de pensament).

Desafortunadament, és molt difícil comprendre quina mena de lògica segueix el pensament no verbal, en primer lloc perquè la lògica fa referència al llenguatge i és gairebé impossible estudiar un pensament no verbal utilitzant els instruments del llenguatge. En qualsevol cas, el pensament inconscient és crucial per formular idees noves: no tan sols el fem servir durant el llarg període d'incubació del qual parlaven Poincaré i Hadamard, sinó que és a la base del fenomen més general de la intuïció matemàtica. De fet, la intuïció matemàtica a primera vista presenta unes característiques sorprenents.

Habitualment, la demostració d'un teorema està composta per molts passos successius i finalment s'arriba a la solució, deducció rere deducció. Fora de molt pocs casos, però, no és aquest el mètode com ha estat demostrat el teorema la primera vegada. Normalment, per començar, es formula l'enunciat: aleshores, sabent d'on es parteix i on es vol arribar, s'estableixen els passos intermedis que després es connecten els uns amb els altres amb les necessàries demostracions, fins a arribar a la demostració completa. És com quan es construeix un pont: per començar es decideix d'on a on es vol anar, després es posen els fonaments dels pilars intermedis i, finalment, es fa el tauler, la calçada. No és assenyat construir un pont partint del primer tram, i no posar-se a projectar el segon fins a haver acabat la construcció del primer, amb el perill de descobrir només en aquell moment que no és possible fer els fonaments del segon pilar.

En un cert sentit, igual com una frase ha de trobar-se present tota ella abans de ser formalitzada en paraules, una demostració ha d'estar present a la ment del matemàtic abans de passar a la fase deductiva.

Aquesta forma de procedir explica com és que hi ha tants teoremes vàlids la primera demostració presentada dels quals estava equivocada. Sovint, el matemàtic, després d'haver formulat correctament el teorema i d'haver identificat un camí possible, s'equivoca en la demostració d'un pas intermedi. Si la intuïció era més o menys justa, o hi ha una altra manera d'executar el pas difícil o bé hi ha un altre camí, més o menys diferent, per arribar al mateix resultat. Tot sovint els matemàtics parlen del «significat» d'un teore-

ma, un significat que és enunciat en un llenguatge informal, que es basa generalment en analogies, semblances, metàfores, intuïcions. Però d'aquest significat sovint no en queda rastre en els textos matemàtics que fan servir un llenguatge diferent: el significat justifica d'alguna manera la intuïció originària, però com que no és formalitzable és sentit com una cosa imprecisa, que va bé per parlar-ne entre amics, però que no pot quedar inscrit en un text que ha de ser rigorós.

### *La intuïció*

Però també hi ha la intuïció física, que és diferent de la matemàtica i que ha evolucionat amb el temps. Galileu, com fa notar l'historiador de la ciència Paolo Rossi, va tenir la gran intuïció que el món terrestre i el món celeste eren semblants i que es podien fer servir les mateixes lleis per a tots dos. Aquesta afirmació era el punt de partida de molts descobriments de Galileu, però no era gens fàcil de demostrar perquè tot sovint el raonament es mossegava la cua, com ha subratllat l'irreverent filòsof de la ciència Paul Feyerabend: les taques solars demostraven que el món celeste era corruptible només si no eren un artefacte del telescopi. Donat que no era possible verificar que el telescopi no creés falses imatges del món celeste, les observacions de Galileu implicaven o bé que les taques solars existien, i, per tant, que el món celeste era corruptible com el terrestre, o bé que el telescopi produïa imatges falses i interactuava de manera diferent amb la llum provinent d'objectes terrestres o d'objectes celestes. És evident que la segona hipòtesi era molt

difícil de sostenir en tant que les taques solars giraven amb velocitat constant (per efecte de la rotació del Sol). En qualsevol cas, la hipòtesi de lleis úniques per a tot l'univers era en aquella època trasbalsadora i molts, que no acceptaven la intuïció galileana, fins que no va ser demostrada van negar les conseqüències que se'n seguien.

La intuïció física va tenir un paper fonamental també després, i va ser particularment important durant el naixement de la mecànica quàntica, a principi del segle vint. Aquesta va ser una de les aventures més grans de la física, i entre 1910 i 1930 va implicar científics eminents com Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Dirac, Pauli, Fermi... Va ser un procés en aparença molt estrany, en alguns aspectes contradictori. Havien estat observats un cert nombre de fenòmens (per exemple la radiació de cos negre) que els físics de l'època no estaven en condicions d'explicar: no es tractava d'incapacitat, ja que podien ser explicats només gràcies a la mecànica quàntica, la qual encara no havia estat descoberta.

Quin hauria estat el procediment lògic? Inventar la mecànica quàntica i presentar l'explicació correcta! La història va seguir un camí completament diferent; es van fer diverses provatures d'explicar els fenòmens quàntics en models clàssics explícits admetent la hipòtesi que alguns dels components menys coneguts del model es comportarien de manera estranya (incompatible, de fet, amb la mecànica clàssica), segons el típic «hi ha coses que encara no he entès, però ja les entendré en el proper treball». A partir de l'article de Planck de 1900 hi va haver un gran nombre de contribucions contradictòries, algunes de les quals francament erra-

des; d'altra banda, no podien ser correctes perquè aquells treballs provaven de fer una cosa impossible: justificar a l'interior de la mecànica clàssica fenòmens quàntics. Per exemple Planck, qui per explicar la radiació de cos negre suposava que la llum interactuava amb oscil·ladors que tenien les correctes propietats quàntiques, absolutament incompatibles amb els principis generals de la física clàssica. Fos com fos, Planck no s'havia adonat que la suposada compatibilitat amb la física clàssica no existia i anava tirant pel seu camí.

És impressionant adonar-se de fins a quin punt les explicacions parcials presentades eren exactes: la intuïció física era tan forta que, pensant-se que no sortien dels límits de la mecànica clàssica, s'explicaven els fenòmens quàntics forçant cada vegada més la contradicció entre la mecànica clàssica i els fenòmens observats. Al final, quan les contradiccions ja eren excessives, molts aspectes de la nova mecànica quàntica ja havien quedat prefigurats. Per posar-ne un exemple, en la teoria de Bohr de 1913, suposant que l'únic electró que gira al voltant de l'àtom d'hidrogen podia estar només en determinades òrbites que satisfien una certa condició, es podien calcular de manera simple les ratlles espectrals de la llum emesa per l'hidrogen. La hipòtesi no era sostenible en mecànica clàssica, però va ser fonamental per proporcionar els indicis necessaris per construir la mecànica quàntica quan, al cap de deu anys, va emergir la consciència de la urgència d'una mecànica nova.

Les últimes barreres van caure els anys 1924 i 1925. Els que van seguir van veure progressos a un ritme impressionant i a la darrereria de 1927 la nova mecànica quàntica pràc-



ticament havia arribat a la seva formulació definitiva. El treball preparatori (que va durar vint-i-cinc anys, de 1900 a 1925) havia estat possible justament perquè hi havia hagut una forta intuïció de com estava organitzat el sistema físic. Era una intuïció molt diferent de la dels matemàtics, que portava a treballs que han fet progressar la física malgrat les argumentacions sovint equivocades.

I parlant encara de la intuïció, un amic meu, físic experimental de les baixes temperatures, em deia: «Tu has d'arribar finalment a conèixer tan bé el teu aparell experimental, el sistema que estàs mesurant, els fenòmens que estàs contemplant, que estiguis en condicions de donar la resposta justa sense haver de pensar. Si et fan (o et fas) una pregunta has de donar de seguida la resposta exacta, i després, reflexionant, has de ser capaç de dir per què era la resposta correcta». Giovanni Gallavotti, en el prefaci del seu bonic llibre de mecànica, diu que un bon estudiant ha de reflexionar sobre les demostracions d'un teorema fins que el teorema li sembli evident i la demostració, en conseqüència, innecessària.

La intuïció depèn molt del camp; per exemple, en altres casos hi ha una intuïció que es basa en el formalisme matemàtic. El formalisme és un instrument extremadament potent, però encara ho és més si l'inconscient mateix comença a habituar-se a fer servir els procediments algorítmics. Com hem vist, quan feia les meves primeres recerques sobre els vidres d'espín, feia servir el mètode de les rèpliques, un formalisme pseudomatemàtic (en el sentit que la validesa matemàtica d'allò que estava fent no es demostraria fins uns quants anys més tard) que em permetia d'arribar

al resultat final sense entendre allò que estava fent, i després es van necessitar anys per comprendre el significat físic dels meus resultats. M'havia construït, inconscientment, una sèrie de regles que utilitzava per saber en quina direcció havia d'avançar en els càlculs; regles que mai hauria sabut com formalitzar.

Avançar de manera inconscient no és només un procediment típic dels problemes científics. Una gran escriptora del segle vint, Luce d'Eramo, deia que quan escrivia una novel·la, en general, procedia d'aquesta manera: rellegia tot allò que havia escrit fins a aquell moment i decidia com començaria l'escena següent. Aleshores agafava mentalment els personatges, els posava en acció en l'escena i els observava: «No ho decideixo jo, què han de fer, sinó que me'ls imagino i els observo mentre parlen, mentre actuen: jo transcribo allò que fan». Són evidents les similituds amb el procediment descrit per Poincaré i Hadamard.

### *Conèixer la conclusió*

Ara voldria presentar un últim argument que suggereix que la nostra manera de pensar és més complexa del que creiem. Sempre m'ha cridat l'atenció la dificultat d'arribar a demostrar la veritat o la falsedat d'una afirmació quan no tenim indicis sobre el resultat final. Si hi ha arguments heurístics forts que impliquen que una afirmació és veritable (o falsa), sovint (però no sempre) és molt més *fàcil* trobar la demostració. En el cas contrari, que manquin indicacions sobre el resultat, podríem esperar que fos possible arribar al resultat final com a màxim fent servir un temps doble: durant

la meitat del temps raonem com si sabéssim que el resultat és veritable i l'altra meitat com si sabéssim que el resultat és fals. És fàcil de dir, però no de fer; a la pràctica, la persona mira de trobar arguments per demostrar la veritat de l'afirmació, si no se'n surt, prova de demostrar-ne la falsedat, i oscil·la entre els dos posicionaments sense fer gaires progressos. Potser podem conscientment passar d'una hipòtesi a la hipòtesi oposada, però l'inconscient es queda confús.

El paper rellevant d'una petita informació suplementària pot ser subratllat per un episodi al qual vaig assistir i que em va deixar de pedra. Una propietat molt interessant (l'anomenaré «X» per simplicitat) havia estat verificada en l'àmbit de models extremadament simplificats, i era crucial per al desenvolupament de la teoria saber si la propietat es podia demostrar en el cas de sistemes realistes. Els meus amics i jo feia anys que en parlàvem: ningú tenia idea de com es podia encarar la demostració, i fins i tot dubtàvem que la propietat fos demostrable, suposant que fos veritable.

Un dia el meu amic Silvio Franz em va dir que ell i en Luca Peliti havien demostrat la propietat X desenvolupant una idea molt senzilla, magistralment astuta. Em va alegrar molt; vaig anar a París i durant una conferència vaig declarar que estava força segur que la propietat X era demostrable. No vaig anunciar el resultat perquè volia esperar que el meu amic escrivís la demostració. Després de la conferència un altre amic, Marc Mézard, mentre érem a les escales de l'École Normale, em va dir: «Perdona, Giorgio, per què has dit que estaves força segur que la propietat X era demostrable? Saps perfectament que no tenim cap manera de demos-

trar-la.» Jo li vaig respondre: «Marc, la propietat X acaba de ser demostrada per Silvio Franz i Luca Peliti: m'han explicat la demostració i és correcta». Per a la meua gran sorpresa, Mézard va dir-me immediatament: «Ah, sí, ja la veig la demostració» i, a grans trets, allà mateix, em va exposar la demostració correcta. La simple informació que la propietat X era demostrable, partint del bagatge de coneixements comú, havia estat suficient per arribar a la demostració llargament buscada, en menys de deu segons.

És impressionant com de vegades n'hi ha prou amb una informació mínima per fer progressos substancials en un camp sobre el qual s'ha reflexionat intensament. Per exemple, Einstein explica que l'any 1907 rumiava molt sobre la gravetat, i un dia va tenir «la intuïció més feliç de la meua vida»: quan ens precipitem en caiguda lliure ja no sentim la força de la gravetat, la gravetat s'anul·la al voltant nostre; la força de gravetat depèn del sistema de referència i, escollint un sistema de referència adequat, és possible anul·lar-la, si més no localment. Partint d'aquesta observació va construir la teoria de la relativitat general, que és potser la seva contribució més profunda i més avançada respecte del seu temps.

Es diu que Einstein va tenir la intuïció després d'un curiós episodi (no estic segur que sigui veritat, però mereixeria ser-ho). Un pintor pintava l'edifici on vivia Einstein i treballava al tercer pis, assegut en una cadira damunt d'una bastida. Un dia el pintor es va acostar massa a la vora, va perdre l'equilibri i va caure sense deixar d'estar assegut a la cadira, trencant-se només, per fortuna, uns quants ossos. Dies després, parlant amb un veí, Einstein es va preguntar: «Qui sap

què devia pensar el pobre pintor mentre queia», i el veí li va respondre: «He parlat amb ell i m'ha dit que mentre queia no se sentia reposant sobre la cadira, com si la força de gravetat no existís». Einstein aleshores va caçar al vol l'observació del pintor i va partir d'allà per formular la relativitat general. I és notable com l'origen de les teories de la gravitació estigui sempre connectat amb alguna cosa que cau, per a Newton una poma i per a Einstein un pintor.