

MONOGRAFIES DE LES SECCIONS DE CIÈNCIES, XXIV

# Una vida en deu equacions

DAVID JOU I MIRABENT



Institut  
d'Estudis  
Catalans

SECCIÓ  
DE CIÈNCIES  
I TECNOLOGIA



Una vida en deu equacions



MONOGRAFIES DE LES SECCIONS DE CIÈNCIES, XXIV

# Una vida en deu equacions

DAVID JOU I MIRABENT

Barcelona, 2024



Institut  
d'Estudis  
Catalans

SECCIÓ  
DE CIÈNCIES  
I TECNOLOGIA

**Jou i Mirabent, David, 1953- autor**

Una Vida en deu equacions. — Primera edició. — (Monografies de les seccions de ciències ; 24)

Bibliografia

ISBN 9788499657622

I. Institut d'Estudis Catalans. Secció de Ciències i Tecnologia. II. Títol

III. Col·lecció: Monografies de les seccions de ciències ; 24

1. Jou i Mirabent, David, 1953-

2. Físics — Catalunya — Biografia.

3. Intel·lectuals — Catalunya — Biografia.

4. Termodinàmica.

929Jou i Mirabent, David

536

© David Jou i Mirabent

© 2024, Institut d'Estudis Catalans, per a aquesta edició

Carrer del Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: desembre de 2024

Text revisat lingüísticament per la Unitat d'Edició del Servei Editorial de l'IEC

Disseny de la coberta: Azcunze | Ventura

Imatge de la coberta: *Cipreses*. La física és un diàleg matemàtic amb la naturalesa, i la poesia, un diàleg emocional i intel·lectual amb el món. Contemplar la realitat des de perspectives diverses ajuda a veure'n la complexitat i la riquesa. (Fotografia de Sor Isaura de Pedralbes)

Compost per Fotoletra, SL

Imprès a ARTEOS DIGITAL

ISBN: 978-84-9965-762-2

Dipòsit Legal: B 19525-2024

DOI: 10.2436/10.2000.82.1



Aquesta obra és d'ús lliure, però està sotmesa a les condicions de la llicència pública de Creative Commons. Es pot reproduir, distribuir i comunicar l'obra sempre que se'n reconegui l'autoria i l'entitat que la publica i no se'n faci un ús comercial ni cap obra derivada. Es pot trobar una còpia completa dels termes d'aquesta llicència a l'adreça: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/deed.ca>.

# Taula

PRÒLEG	7
LA FÍSICA, LA POESIA I EL MÓN	9
1. Física, poesia i coneixement del món	11
2. Una visió de la física	17
2.1. L'estudi de la física	17
2.2. Docència, recerca, divulgació i assaig	27
3. Una aproximació a la termodinàmica clàssica	33
3.1. Els atractius de la termodinàmica	34
3.2. Les grans lleis de la termodinàmica	38
4. Una introducció a la termodinàmica fora de l'equilibri	47
4.1. La dinàmica dels sistemes i les equacions de transport	48
4.2. Estats estacionaris de no-equilibri i estructures dissipatives	55
4.3. Els orígens del nostre grup de termodinàmica irreversible	58
DEU EQUACIONS	63
5. Fronteres de la segona llei, lluny de l'equilibri	65
6. Subtiletes del principi zero: els significats de la temperatura	73
7. Les dinàmiques dels fluxos de transport	79
8. Difusió i transicions de fase	85
9. Nanosistemes: del règim difusiu al règim balístic	91
10. Hidrodinàmica de fonons en nanosistemes	95
11. Viscositat del buit i expansió còsmica	101
12. Superfluïdesa i turbulència quàntica	107
13. Longitud de Planck, dualitat i fronteres de la física quàntica	113
14. Dualitat termodinàmica i forats negres microscòpics	117

CLOENDA	121
15. Algunes reflexions finals	123
15.1. Les equacions i la vida	124
15.2. Raó i emoció, ciència i poesia	126
15.3. Les equacions i el temps: ciència i context temporal	128
15.4. Comiat. Comentaris sobre ciència i fe	130
RECU LL BIBLIOGRÀFIC	133



## Pròleg

L'any 1984, l'Institut d'Estudis Catalans (IEC) em va publicar la monografia *Equacions de Gibbs generalitzades i extensió de la termodinàmica de processos irreversibles*, que havia guanyat el Premi Eduard Fontserè dos anys abans. Aquella monografia ampliava de forma didàctica i ambiciosa una part de la meua tesi doctoral, defensada el 1978, dedicada a l'extensió de la termodinàmica de no-equilibri a processos ràpids.

Aquell llibret va ser la primera publicació de conjunt sobre aquesta nova branca de la termodinàmica de processos irreversibles, que posteriorment ha tingut i continua tenint un nombre considerable d'investigadors, i s'ha anat obrint camí com una de les avingudes en termodinàmica fora de l'equilibri. La monografia en qüestió va servir de base a l'article de revisió «Extended irreversible thermodynamics», publicat el 1988 a *Reports on Progress in Physics*, en col·laboració amb els professors José Casas-Vázquez i Georgy Lebon, article que, al seu torn, va ser la base del llibre del mateix títol i dels mateixos autors, publicat per Springer el 1993, i que ha tingut quatre edicions, moltes reimpressions i alguns milers de citacions. El conjunt de contribucions del nostre Grup de Física Estadística de la Universitat Autònoma de Barcelona ha tingut prou visibilitat i influència perquè s'hagi pogut parlar d'una escola catalana de termodinàmica.

Quaranta anys després de la publicació d'aquella monografia, m'ha semblat d'interès pedagògic publicar aquest llibre sobre les deu equacions en què més he treballat al llarg de la meua recerca en aquesta línia. No són les deu equacions més importants i conegudes de la física, sobre les quals hi ha una bibliografia considerable, però es refereixen a temes interessants i, alguns d'ells, fonamentals. Si la monografia de 1984 representava tot un programa de futur en investigació, que m'ha orientat i m'ha resultat molt útil en successives ampliacions i actualitzacions, aquest llibre és una síntesi i un balanç dels aspectes conceptualment més rellevants

de la feina de quaranta anys, que presento aquí a un públic de científics no especialitzats en termodinàmica, però curiosos de la física en general i interessats per com la física es relaciona amb altres branques del saber.

He procurat que els comentaris siguin prou amplis i que les equacions no estiguin reduïdes a un àmbit massa especialitzat, sinó que es refereixin a un univers de preguntes relativament obert. Així, el lector hi podrà aprendre, espero, algunes idees de termodinàmica que potser no coneixia, i tindrà una certa visió de l'evolució de la termodinàmica de no-equilibri al llarg de mig segle, de 1970 a 2020 aproximadament.

Com que la meva activitat s'ha desenvolupat entre física, poesia i religió, aprofito el llibre per a reflexionar sobre els ponts i els conflictes entre aquestes tres vies de coneixement, un tema que es refereix a algunes de les tensions de la cultura del segle xx, entre raó i emoció, entre rigor i intuïció, entre creació i descobriment, entre abstracció i aplicació, entre dispersió i aprofundiment. No em refereixo només a les relacions entre ciència i poesia, sinó a la dinàmica mateixa de la recerca científica, de la creació poètica i de la reflexió religiosa, en què es combinen intuïcions i emocions amb demostracions i rigor.

Tinc una certa experiència en el que són la creativitat i la imaginació en ciència i en poesia. M'hauria agradat que haguessin estat d'ordre més elevat que el que m'ha estat donat, però malgrat això m'han proporcionat molts bons moments, i també estones d'un cert neguit, que han quedat a l'ombra de l'oblit en comparació amb les experiències més lluminoses. Un aspecte de la creativitat i de la imaginació és que no es mouen en l'abstracció pura —ni tan sols en la física més especulativa i allunyada de la quotidianitat—, sinó que estan molt arrelades en l'experiència vital, en una agitació de fons que combina i relliga fragments i ràfegues sensorials, emocionals i racionals, i que et permeten donar resposta a preguntes que no t'havies fet, i et fan plantejar preguntes a respostes que semblava que haguessin de ser un final de viatge i que són començament d'una nova aventura. Aquest aspecte magmàtic no rendeix gaire en brut, sinó que s'ha de polir amb estudi, amb autocrítica, amb rigor i perseverança. Aquest llibre, més que insistir en unes equacions o una vida concretes, invita a reflexionar sobre aquests temes de forma general, tot incitant que el lector hi intervingui amb la seva pròpia experiència.

DAVID JOU I MIRABENT

## **La física, la poesia i el món**



## 1. Física, poesia i coneixement del món

Quan el juliol de 1970 em vaig matricular a la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), fundada feia un parell d'anys, dubtava entre la física i la literatura, ja que des de 1968 em dedicava amb intensitat a la poesia, i hi trobava tot un camí vital. De fet, ja des dels sis anys havia descobert la intensitat del plaer d'escriure. Recordo vivament la tarda en què, havent de fer una redacció sobre un tema bíblic per a la preparació a la primera comunió, en lloc de fer un text de mitja pàgina —com ens havien demanat— vaig escriure amb delit dues pàgines, i vaig aturar-me a desgrat per tal de no abusar de la paciència de la professora. Després d'aquella experiència, vaig començar a escriure petites redaccions i, un parell d'anys després, breus novel·les d'aventures a l'estil de Karl May o d'Emilio Salgari, que m'interessaven molt.

La poesia va venir una mica més tard. A casa coneixien i admiraven l'obra de Maragall, Verdaguer, Carner i Sagarra, especialment, que constituïren els meus primers referents. El meu interès s'intensificà quan a quart de batxillerat vaig cursar l'assignatura de literatura, que em va descobrir la gran varietat de possibilitats de la mètrica i em va eixamplar els referents. Aquest interès es va convertir en passió quan vaig descobrir l'obra poètica de Salvador Espriu a través de les musicacions que en Raimon havia fet de poemes de les *Cançons de la roda del temps*, que, tal com la posterior «Veles e vents» amb lletra d'Ausiàs Marc, em van influir profundament.

La primavera de 1969 em van atorgar una menció honorífica en els Jocs Florals de l'Alguer per quatre sonets sobre esglésies romàniques. L'escriptor sitgetà Ramon Planes, assidu de la biblioteca, se'n va assabentar per la meua mare i a finals de juny va publicar els meus quatre poemes al setmanari *L'Eco de Sitges* —fundat el 1886, i que només ha interromput la seva publicació en els anys de la Guerra Civil espanyola. Ramon Planes acompanyà els poemes amb un gran elogi i un article molt esperançador. En efecte, després de trenta anys de dictadura franquista amb el català prohibit a l'escola i als mitjans de comunicació, veure que malgrat

aquella voluntat de genocidi cultural hi havia gent jove que reprenia el llegat poètic, el va esperarçar molt. Ramon Planes m'encoratjà en moltes ocasions i, cap al 1973, m'insistí que publicués amb regularitat a *L'Eco*, i no tan sols esporàdicament. Des de llavors, fa més de cinquanta anys de col·laboració poètica setmanal amb *L'Eco*, amb uns mil vuit-cents poemes publicats. El que més recordo d'aquella primera publicació va ser la vergonya i la tímidesa que vaig sentir en veure els meus poemes exhibits a la mirada pública.

La física —sempre una mica misteriosa per al públic— tenia un cert prestigi social com a element estratègic decisiu en la cursa dels armaments nuclears i de l'exploració espacial i l'arribada a la Lluna, temes a l'ordre del dia en aquells anys —recordem que l'arribada de l'*Apollo 11* a la Lluna es va produir el juliol de 1969. També podria alludir al paper de la física en l'electrònica, que anava modificant la vida quotidiana, però mai no he estat gaire sensible a la vida pràctica. Pel poc que en sabia pel batxillerat i el curs preuniversitari, la física em semblava un diàleg matemàtic amb la naturalesa, tal com la poesia —que començava a conèixer— la considerava un diàleg emocional i intel·lectual amb el món, i la religió —que des de petit m'havia fascinat— la concebia com un diàleg sentimental, moral i ontològic entre el món visible i una realitat invisible i eterna que el depassa. Així, la física no l'entenia com una activitat aliena i oposada a la poesia, sinó més aviat un estímul per al tractament de temes poc usuals per als poetes, però temia que m'exigís massa esforços i assequés la deu emocional de la sensibilitat poètica.

Un factor que va incrementar la intensitat dubitativa del meu dilema entre física i literatura va ser que el 3 de juliol de 1970 vam visitar Josep Pla al mas Pla, amb els meus pares i germans. La meva mare, activa bibliotecària de Sitges, li havia escrit cap al mes d'abril demanant-li si podria fer una conferència a la biblioteca de Sitges. Pla va respondre amb una carta breu que ens invitava a anar-lo a veure al mas Pla per parlar del tema, ja que ell no es veia com a conferenciant. Així ho vam fer. Arribats al mas, la masovera li va comunicar la nostra arribada i va baixar tot seguit per dir-nos que Pla ens esperava. Vam entrar a l'espaiosíssima sala del primer pis. Pla estava assegut sota la campana de la xemeneia, tot fumant i escrivint, amb una tassa de cafè i una ampolla de whisky sobre la taula. Donat l'entusiasme de la meva mare i els elogis del meu pare a la precisió amb què en alguns articles havia descrit les sortides de sol al canal de Suez —elogis que van impressionar especialment Pla, ja que el meu pare, com a capità de petrolers que havia passat moltes vegades pel canal, sabia bé de què parlava—, va dir que vindria a Sitges, però que encara no podia dir quan, i ens va recomanar que el passéssim a veure alguna altra vegada. Així ho vam fer, amb molt de gust, no tan sols fins que va venir a Sitges, el febrer de 1973, sinó gairebé fins a 1980, de manera que el vam visitar ben bé unes trenta vegades. Descobrir el seu *Quadern gris* i poder observar, escoltar i tractar un escriptor d'aquella volada immensa, i veure fins a quin punt

havia sintonitzat amb el paisatge, amb la gent, amb la història i amb la llengua, em va fer moltíssima impressió i va accentuar el meu desig de ser escriptor. A l'estiu de 1970 i al llarg del curs següent vaig anar llegint els primers volums de l'obra completa de Pla, que anaven apareixent periòdicament amb gran acollida de la crítica i del públic.

Aquestes circumstàncies van fer especialment difícil la meua tria entre física i literatura, tensió que em va fer passar, fins i tot, estones d'una certa angoixa. Arribat, però, el moment de matricular-me a la UAB, cap al set o el vuit de juliol —a l'edifici del Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC) al carrer de les Egipcíaques, on llavors hi havia la secretaria—, vaig optar provisionalment per la física. Efectivament, em va semblar que, si veia que m'havia equivocat en la tria, em resultaria més fàcil corregir el rumb que no pas si optava per la literatura i volia tornar a la física, ja que la pràctica de càlcul diferencial i integral resulta imprescindible en aquest camp i es perd ràpidament si no es practica.

La meua idea de compromís entre física i literatura era esdevenir professor de física en algun institut d'ensenyament mitjà, i dedicar les hores que pogués a la literatura. Com que el nombre de llicenciats en física era petit en comparació amb el de llicenciats en lletres, això em semblava una possibilitat plausible. Ja des del primer curs a la facultat vaig constatar que les matemàtiques i la física eren molt més riques del que havia imaginat. Les vaig anar seguint, doncs, cada vegada amb més interès i, com que també vaig continuar escrivint poesia, la por que una cosa ofegués l'altra em va anar passant lentament.

El món de les matemàtiques suscita un cert temor, malfiança i inseguretat al públic que no les coneix. D'una banda, no n'acaba de veure la connexió amb la realitat, no en coneix prou bé el significat i n'ignora el funcionament. D'altra banda, sap que a través d'elles la realitat es pot modificar profundament, cosa que fascina però que intimida, perquè revela un poder fora del nostre abast, en mans desconegudes i indiferents a nosaltres.

La connexió entre matemàtiques i realitat i la naturalesa profunda del tipus de realitat que són les matemàtiques són qüestions de reflexió des dels temps de Pitàgores. Són un producte sofisticat de la ment humana? Són una creació de la nostra intel·ligència? Són el descobriment d'un ordre que ens transcendeix i que regeix el món? Què tenen de creació i què de descobriment? Són qüestions que desborden les matemàtiques i que incideixen plenament en la física i, d'una manera no tan central però sí significativa, en la filosofia, l'art i la teologia.

La física, especialment en el seu vessant teòric, és com un lloc de trobada entre el món visible, observable, mesurable, material, i un ordre matemàtic pur i transcendent, intemporal, immaterial. Com tantes altres activitats de la vida, les matemàtiques i la física demanen, a qui les vol conèixer i practicar, una disciplina, un esforç, un entrenament, un eixamplament d'horitzons, en què es combinen una

ascètica exigent i el plaer intens de descobrir i progressar. Són, doncs, un camí humà molt ric.

Les matemàtiques pures també em semblaven atractives —un dels grans luxes de l'esperit humà—, però no m'acabaven de convèncer per al coneixement del món, ja que amb les matemàtiques pures no n'hi ha prou. Cal connectar amb els experiments, no tan sols amb vista a les aplicacions, sinó per a conèixer amb més detall el món que volem comprendre. Teories bellíssimes són desmentides per l'observació. Com més belles, generals i autoconsistents són les equacions desmentides, amb més intensitat t'adones que la física té alguna cosa de revelació, de sorpresa respecte de la raó.

Les relacions entre la poesia i el món també tenen els seus matisos i preguntes. Quina relació tenen les paraules amb les coses? Fins a quin punt anomenar les coses ens les fa més properes i les atansa a la nostra sensibilitat i capacitat d'observació i d'anàlisi? Fins a quin punt un nom encertat fa més atractiva una certa realitat? Quina mena de relacions —d'interès científic o filosòfic— entre les coses ens poden descobrir les paraules? Al llarg de la meva carrera científica he pogut constatar la importància dels noms de les teories. La teoria de la relativitat d'Einstein va atreure molta gent que se sentia afalagada en la seva intuïció i experiència de la relativitat psicològica del temps, però la teoria de la relativitat parteix de la hipòtesi que la velocitat de la llum en el buit és absoluta. La teoria de les catàstrofes de René Thom va atreure molta atenció pública sobre un camp molt especialitzat, els límits d'estabilitat de les solucions d'equacions diferencials en derivades parcials. La teoria de les fractals de Mandelbrot —i la bellesa de les imatges relacionades amb les estructures fractals, així com la seva similitud amb objectes de la naturalesa— va obrir l'interès de la ciència envers una sèrie de formes i de processos que abans, mancats d'un nom que els unifiqués i d'un nombre que els classifiqués, quedaven dispersos en els marges de l'atenció científica.

Una cosa que m'havia preocupat en haver de triar entre física i poesia era que la poesia em semblava més lliure, més creativa, més propera a la diversitat d'aspectes i matisos de les preocupacions humanes, emocionalment més rica. Em semblava, en canvi, que la física i les matemàtiques suposaven un camí més estret i àrid, en què les emocions, la creativitat i la llibertat personals havien de ser sacrificades. De fet, l'esforç i la disciplina no em preocupaven: formaven part del meu esperit, m'havia aplicat sempre en els estudis, que m'interessaven molt, i des dels quinze anys em dedicava a la poesia cada dia, un mínim de dues hores durant el curs i d'unes cinc hores durant les vacances. Sabia, doncs, l'esforç que cada poema demanava. Però cada poema que escrivia anava construint i definint la meua personalitat, i el meu jo hi era més o menys recognoscible. En canvi, en resoldre una equació, tot l'esforç, la disciplina, la intuïció i la preparació que hi havia esmerçat semblaven desaparèixer en un anonimat fred, rígid i sense emocions.



De mica en mica, però, em vaig adonar que les coses són més subtils i complicades del que sembla, i que les dualitats i les disjuntives entre l'activitat científica i la poètica no són tan nítides, taxatives i irreconciliables com m'havia semblat d'entrada. Vaig anar veient que la suma d'esforços per resoldre problemes m'enriquia progressivament en habilitats, agilitat i profunditat. Aquell jo que semblava quedar oblidat i esclafat en la ciència en comparació amb la poesia s'anava envigorint, eixamplant i enriquint, potser d'una manera no tan manifesta cap enfora però sí constatable i satisfactòria cap endintre.

A mesura que creixien l'envergadura i la complexitat dels problemes tractats, també creixien la satisfacció de resoldre'ls i l'aprenentatge que suposaven, i les possibilitats diguem-ne creatives, fins a sentir que algunes satisfaccions començaven a estar properes a un cert sentiment místic, de fusió unitiva amb algunes lleis físiques molt generals i profundes que semblaven desvelar aspectes essencials de la realitat als quals no hauria arribat sense l'esforç i la dedicació prèvia, ni tampoc a través de les intuïcions de la poesia.

Ara bé, encara hi ha molt de camí des d'aquestes satisfaccions de comprensió del que ja se sabia a les satisfaccions, encara més grans, d'avançar en terreny desconegut i de fer alguna aportació més o menys original a un problema concret o a una branca concreta de la física. Però, de mica en mica, el camí es va fent i aquestes satisfaccions comencen a arribar. Ja no estàs tractant un problema que t'han posat com a exercici i la solució del qual ja és coneguda i només té interès per a tu mateix com a aprenentatge, sinó que comences a tractar problemes la solució dels quals no es coneix, de manera que trobar-ne la solució ja suposa haver contribuït —encara que sigui modestament— a un cert progrés col·lectiu. De mica en mica, comences a plantejar problemes que la gent encara no s'havia plantejat, i comences a sentir la ciència com una activitat creativa i com una aportació a la col·lectivitat.

No cal dir que en la majoria dels casos aquestes aportacions són petites, gairebé insignificants. Si no haguessis existit o no t'haguessis dedicat a aquell camp, aquells progressos els hauria fet, indefectiblement, algú altre. Encara que sigui així, però, en alguns casos la teva aportació es multiplica: serveix a més gent, obre més camps, accelera el progrés d'una certa especialitat, contribueix a crear una especialitat nova... Però a aquestes satisfaccions no s'hi arriba de bon començament. Cal conèixer prou bé el problema, saber-ne i tenir sort en la intuïció personal, en el moment en què fas l'aportació i en la receptivitat que puguis trobar.



## 2. Una visió de la física

Per àmplia que sigui la nostra curiositat i plausibles les nostres aptituds, sempre hi ha algunes afinitats, una mica misterioses, amb alguns camps concrets. En el meu cas, tot i apreciar la química, la biologia i la geologia, i tot i atreure'm les matemàtiques, la física em va resultar especialment atractiva. En aquest capítol explicaré com, al llarg dels estudis, van creixent els atractius de la física a mesura que se'n van apreciament les diverses parts, i com van evolucionant des de petits coneixements concrets, però dispersos, fins a tota una visió bastant general i relativament ben travada del món.

### 2.1. L'ESTUDI DE LA FÍSICA

La física que vaig estudiar al batxillerat —batxillerat de ciències, encara que també vaig estudiar pel meu compte el grec i el llatí dels dos cursos del batxillerat de lletres— va començar amb la cinemàtica —la descripció del moviment—, una mica de dinàmica —la ciència de les forces que produeixen els moviments—, la caiguda dels cossos i el període dels pèndols; va continuar amb la conservació de l'energia cinètica més la potencial, el principi d'Arquimedes i la flotació, l'estudi de processos isotèrmics de gasos ideals, i va culminar amb la llei de Coulomb de l'electroestàtica, la llei d'Ohm del corrent elèctric i la llei d'Ampère del magnetisme. Encara que es tracti de situacions senzilles, resulta interessant acostumar-se a un cert rigor en el plantejament, utilitzar per a cada magnitud les unitats corresponents i plantejar-se aspectes quantitius de situacions de la vida quotidiana, com ara el desplaçament dels cotxes, la caiguda d'objectes, les propietats de les imatges als miralls i les deformacions aparents dels objectes submergits a l'aigua.

Al curs preuniversitari vam consolidar aquests punts ampliant-los amb la llei de la gravitació, una mica d'òptica geomètrica (reflexió, difracció, lents i miralls)

i la llei de Faraday dels camps magnètics. A l'Institut Menéndez y Pelayo de Barcelona, a la Via Augusta —davant de l'Institut d'Estudis Nord-americans, on sovint hi havia manifestacions contra la Guerra del Vietnam i intervencions de la policia per impedir-les i dispersar-les—, el meu professor de física va ser el professor Rufo Crespo, que s'explicà amb claredat i seguretat i de forma atractiva i elegant. El professor de matemàtiques, Florencio Caballero Valladares, també va fer un curs atractiu, especialment en geometria esfèrica. També vaig tenir un gran professor d'història, Joan Roig, i de biologia, Mercè Durfort, i em va interessar l'assignatura de literatura, que em va fer descobrir autors que no coneixia i de les obres dels quals em vaig fer una llarga llista per anar-les llegint quan pogués. El curs augmentà els meus coneixements, però encara no em feu decidir per la física.

A l'Institut Menéndez y Pelayo vaig fer per primera vegada alguns experiments de física. Els ajudants del professor Crespo encarregats dels experiments, en llegir la meva descripció de la realització i els resultats d'uns experiments d'òptica, que segurament devia ser massa literària i difusa, em van dir, amb una certa ironia, que seria millor que no em dediqués a la física sinó a la literatura, ja que m'explicava de forma massa divagatòria i poc concreta. Tot i que hauria preferit una apreciació elogiosa del meu treball, en el fons els vaig donar la raó i durant algunes setmanes vaig apartar la física dels meus horitzons de futur, tot i que de mica en mica els seus atractius teòrics m'hi van anar fent entrar altra vegada.

En aquella època, donats els desplaçaments diaris en tren de Sitges a Barcelona, i els retards i les irregularitats freqüents de la circulació ferroviària, tan exasperants, vaig començar a habitar-me a treballar a les estacions i al tren, cosa que em va permetre avançar molt i va anar enfortint la meva capacitat d'abstracció, malgrat que l'entorn fos sorollós i incòmode. Això m'ha anat molt bé, ja que m'ha permès aprofitar moltes hores en estacions, trens, aeroports, desplaçaments, bars i sales d'espera per a treballar, fos en poesia o en física, o bé per a llegir, si no tenia cap urgència per escriure.

Vaig començar el primer curs de la llicenciatura de física el 2 d'octubre de 1970, a la Facultat de Ciències de la nova UAB, instal·lada provisionalment a l'edifici modernista de la Casa de la Convalescència de l'Hospital de la Santa Creu i Sant Pau de Barcelona. Érem la segona promoció de ciències, facultat que havia estat fundada l'any anterior, 1969, un parell d'anys després que la Facultat de Lletres, instal·lada provisionalment al monestir de Sant Cugat del Vallès i en un edifici adjunt. Ens donà la benvinguda a la universitat i a la carrera el professor Vicent Gandia Gomar, aleshores degà de la Facultat de Ciències i posteriorment rector de la UAB.

Per cert, en les seves paraules de benvinguda ens anuncià el projecte que, amb tres anys de carrera, es pogués tenir un títol intermedi que permetés la pràctica de la docència en l'ensenyament mitjà. Comento aquest detall perquè, passats més de cinquanta anys, l'esmentat projecte —discutit de tant en tant a les univer-

sitats i a la premsa— encara no s'ha dut a terme. Molts anys després, ja professor emèrit a la Facultat de Física de la Universitat de València, el professor Gandia donà algunes assignatures de física en català, i publicà un llibre de problemes resolts de termodinàmica en la varietat valenciana de la llengua, del qual m'envià un exemplar, dedicat atentament, que em va fer molta il·lusió.

El primer curs era aleshores comú a les diverses llicenciatures de ciències, i era selectiu, en el sentit que calia aprovar totes les assignatures de primer curs per a poder matricular-se a segon. Al llarg d'aquell curs, la cinemàtica i la dinàmica de translacions i de les oscil·lacions senzilles s'eixamplà amb la cinemàtica i la dinàmica de rotacions, i amb les oscil·lacions amortides, les oscil·lacions forçades i els fenòmens de ressonància. La llei de gravitació, que només havíem aplicat a òrbites circulars, l'aplicàrem també a òrbites el·líptiques i trajectòries parabòliques. La termodinàmica s'enriquí amb el cicle de Carnot i amb la formulació del segon principi de la termodinàmica. L'electroestàtica i el magnetisme s'ampliaren amb les forces i els potencials de distribucions geomètriques de càrregues elèctriques i de corrents elèctrics, amb l'estudi de circuits compostos i de corrent altern, i amb una breu introducció a l'àtom de Bohr —tema usualment tractat a l'assignatura de química, que ens donà amb gran coneixement i agilitat el professor Enric Casassas.

Aquell curs vaig començar a llegir els *Diàlegs* de Plató, que em van impressionar molt i als quals retorno de tant en tant, en les edicions de la col·lecció «Bernat Metge», un dels tresors de casa. La diversitat de temes que hi anaven sortint (l'amor, l'ànima, la justícia, la poesia, el coneixement...) contrapesaven una dedicació molt intensa a la física; però, encara més, em resultava curiós que no tinguessin la pretensió d'arribar a cap demostració ni a cap conclusió definitiva i irrefutable, sinó a pensar millor les bases de la realitat i de la vida. Això era un contrast interessant amb el model de coneixement de la ciència, que cerca conclusions concretes, encara que no necessàriament definitives.

Alguns dissabtes al vespre anava a casa del meu antic professor de matemàtiques, història i art al batxillerat, Pau Servat, junt amb els meus amics Albert Paco, Isidre Junyent i Rafael Nicolás. Hi teníem una petita tertúlia i en Pau Servat, entusiasta i generós, ens parlava de Sartre, Camus, Villon, els darrers discs d'en Raimon, els primers discs d'en Lluís Llach, els llibres d'història de Pierre Vilar, algunes exposicions que havia visitat en algun viatge recent a París... Resultava molt estimulant, i una bona font d'informació. Al final del primer curs, el juliol de 1971, en Pau Servat i la seva muller, Carme Ballester, se m'emportaren a un curs d'estiu de francès a la Universitat de Grenoble, on vaig rebre les notes finals de les assignatures, espectacularment millors del que havia imaginat. Des de Grenoble, els caps de setmana viatjàrem a la Provença, a la Borgonya, a Milà i Aosta, i a Lió. Va ser un juliol ple de descobriments. De tornada a Sitges, a casa de la meua tia Rosa, vaig escoltar per primera vegada la cançó «Veles e vents».

A partir de segon curs, amb alguns elements de càlcul vectorial (gradient, divergència i rotacional) i d'equacions diferencials elementals, i les assignatures ja enfocades en camps especialitzats concrets, l'apreciació de la física s'enriquí molt. Dels cursos segon i tercer recordo especialment les assignatures de termodinàmica i de física estadística (professor José Casas Vázquez), d'electromagnetisme (professor Víctor López), de física quàntica (professors Ramon Pascual i Pedro Miguel Etxenike) i de mecànica analítica (professor Lluís Mas). Etxenike, especialment brillant, fou el primer conseller de Cultura del País Basc, el 1980, i pel seu treball de recerca de primer ordre rebria, el 1998, el Premi Príncep d'Astúries d'Investigació Científica i Tècnica i el Premi Max Planck de Física. Ens hem re-trobat un parell de vegades en activitats culturals al País Basc.

El professor Casas s'explicava de forma especialment clara i pausada, amb un ús molt equilibrat i pulcre de la pissarra i del llenguatge. Va tenir l'encert de presentar la termodinàmica (a la qual ens va introduir mitjançant el llibre de nivell intermedi d'Edward A. Desloge) a l'estil de Herbert B. Callen, una visió axiomatocodeductiva, molt elegant, que completava la introducció més descriptiva i inductiva que el professor Gandia n'havia fet a primer curs, seguint les línies del manual de Sears i Zemansky. El concepte de potencials termodinàmics, funcions que, expressades en les seves variables adients, contenen tota la informació termodinàmica sobre el sistema en equilibri, em semblà lluminós. Tot el coneixement sobre un sistema físic condensat en una sola funció matemàtica! Naturalment, aquest coneixement no queia del cel ni venia de franc: calia conèixer-ne bé l'estructura fisico-matemàtica general per a poder-ne extreure la informació corresponent, i calia (en la seva aplicació a sistemes concrets) una informació experimental o numèrica considerable per a especificar el comportament de cada sistema concret.

Si bé els potencials termodinàmics no són directament observables, a partir de les derivades primeres respecte de les seves variables característiques s'obtenen les equacions d'estat del sistema —per exemple, la pressió, l'energia interna o la polarització elèctrica o magnètica en funció de la temperatura, el volum i el nombre de partícules. A partir de les derivades segones s'obtenen els paràmetres directament observables, com ara les calors específiques, la compressibilitat, el coeficient de dilatació tèrmica, la susceptibilitat magnètica... Així, hi ha, de fet, un camí ascendent des d'un cert nombre mínim de paràmetres observables fins al potencial termodinàmic, i un camí descendent des del potencial termodinàmic fins a tots els possibles paràmetres observables, que estan vinculats matemàticament entre si per les condicions matemàtiques d'existència del potencial. Un cop entès això, i vistes unes poques idees essencials de la física estadística que donen la manera d'obtenir els potencials termodinàmics a partir de les propietats microscòpiques de les partícules constituents del sistema (àtoms, molècules, moments magnètics...), el conjunt de la termodinàmica esdevé fascinant, tal com comentaré després amb més detall.

La mecànica analítica —una altra de les assignatures que més em van sorprendre— corroborava l'elegància formal de la física. En efecte, a partir d'una funció matemàtica —la funció lagrangiana o la funció hamiltoniana, en funció de les posicions i les velocitats o de les posicions i les quantitats de moviment de les partícules del sistema—, i mitjançant les derivades de la funció respecte d'aquestes variables, s'obtenen les equacions d'evolució del sistema, és a dir, l'acceleració en funció de les forces entre les partícules i de les forces exteriors, tenint en compte les seves interaccions internes i els seus vincles interns.

La física quàntica tenia, i continua tenint, un atractiu i un prestigi gairebé mítics, extraordinaris. De fet, la primera vegada que vaig poder assistir a una conferència sobre física quàntica va ser a segon curs, a la UAB, ja al nou campus de Bellaterra, que estrenàrem l'octubre de 1971, en uns dies molt freds i boirosos, sense que encara funcionés la calefacció i amb els edificis tot just inaugurats, amb els murs encara humits. La conferència era un seminari a càrrec d'Heribert Barrera, i va ser la primera conferència en català sobre ciència que vaig sentir, ja que al llarg dels meus estudis l'ús del català estava prohibit en la docència i en la premsa. Em va resultar molt reconfortant veure que, malgrat que totes les classes a què havia assistit havien estat en castellà, també era perfectament possible, raonable i eficaç fer-les en català. Heribert Barrera havia tot just arribat a la Facultat des de París, amb una reputació com a químic competent i amb un prestigi polític de catalanisme i antifranquisme. Poc vaig imaginar, llavors, que aquell científic seria, nou anys després, el primer president del Parlament de Catalunya recuperat després del franquisme.

En el curs de física quàntica va ser tota una experiència conèixer l'equació de Schrödinger i la seva aplicació a l'efecte túnel, l'oscillador harmònic i l'àtom de Bohr. L'efecte túnel em va resultar molt sorprenent: coses impossibles en la física clàssica esdevenien possibles —amb una probabilitat calculable— en la física quàntica. On hi ha les fronteres entre el possible i l'impossible? La mecànica de l'àtom de Bohr, amb la quantització de les òrbites dels electrons al voltant del nucli atòmic, i la seva hipòtesi de la relació entre la radiació emesa o absorbida per l'àtom i els salts dels electrons entre les òrbites, resultava especialment seductora: claredat, elegància, innovació, excellent ajustament amb les observacions de les línies espectrals... Tot es complicava quan l'àtom era exposat a un camp magnètic exterior, en el qual cas algunes de les línies espectrals es desdoblaven —efecte Zeeman. La interpretació d'aquest fenomen, amb les seves condicions de quantització de nous aspectes de les òrbites, va ser elaborada per l'escola de Sommerfeld a Múnic. Esmento aquest detall perquè, a través de l'àtom de Bohr, el mapa d'Europa se'm va començar a enriquir amb una geografia humana de personatges, aportacions i descobriments. Niels Bohr, nascut a Copenhaguen, havia anat a Manchester a estudiar amb Ernest Rutherford, en el moment en què aquest aca-

bava de proposar el model atòmic orbital del nucli pesant al centre i els electrons girant al seu voltant. Aquestes aportacions es completaren, posteriorment, des de Múnic (amb Arnold Sommerfeld i la seva escola) i des de Göttingen (amb Max Born i la seva escola). Els noms de les universitats i les seves aportacions a la ciència em començaven a semblar més i més importants, i lamentava que des d'aquí no s'hagués pogut contribuir a aquesta història científica.

Amb l'equació de Schrödinger —proposada quan Erwin Schrödinger era professor a l'Escola Politècnica Federal de Zúric (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, en alemany), centre de primer nivell que compta amb una història amb més d'una dotzena de premis Nobel i on, entre d'altres, havia estudiat Einstein— els nombres quàntics de l'àtom de Bohr —principal, azimutal i magnètic— apareixen de manera directa, elegant, de la matemàtica pura de l'equació d'evolució de la funció d'ona quàntica de l'àtom d'hidrogen, en lloc d'haver de ser postulats d'un en un, una mica a batzegades. Aquesta evolució conceptual de la visió de l'àtom —Thomson, Rutherford, Bohr, Sommerfeld, Schrödinger— exerceix una gran fascinació sobre l'estudiant de física, per la seva combinació d'intuïcions teòriques, de matemàtiques subtils i avançades i d'observacions afínades. Un simple àtom d'un sol electró, aparentment simplíssim, esdevé tot un camp de treball que obliga la ment a superar-se, a buscar noves bases teòriques que puguin descriure nous descobriments. Un sistema físic aparentment mínim esdevé tot un univers mental d'interès universal —tal com actualment el protó representa tot un repte físic.

El pas de l'àtom de Bohr a la descripció de la taula periòdica —prèvia formulació del principi d'exclusió de Pauli i de les seves propietats químiques— i a les molècules diatòmiques, amb els nombres quàntics moleculars rotacionals i vibracionals i la seva relació amb l'estructura molecular i l'espectre d'emissions i d'absorpcions, també va ser molt interessant. L'anàlisi de les subtileses de l'equació de Schrödinger i de la seva interpretació probabilística per l'escola de Copenhagen, de les implicacions filosòfiques del principi d'indeterminació de Heisenberg, i de la superposició d'estats i la paradoxa del gat de Schrödinger, en canvi, va ser una mica simplista, dintre del positivisme de l'època, que seria superat espectacularment pocs anys després amb els treballs de John Bell sobre l'entrellaçament quàntic entre sistemes allunyats, i que posteriorment durien a les teories sobre computació quàntica.

També va ser molt útil complementar la física quàntica amb la física estadística, tot veient com l'estructura quàntica microscòpica del sistema es reflecteix en el seu comportament macroscòpic —susceptibilitat magnètica, calors específiques de cristalls, propietats de gasos bosònics i fermiònics...— i enunciant la relació entre l'espín i el tipus d'estadística (espín enter, bosons; espín semienter, fermions) que tan important és a baixes temperatures. He dedicat un llibre d'assaig plausi-



blement divulgatiu a tots aquests temes, *Introducción al mundo cuántico. De la danza de las partículas a las semillas de las galaxias*, que em va encarregar amablement l'editor Gonzalo Pontón l'any 2013.

En electromagnetisme, el gran luxe intel·lectual consistí en la formulació de les equacions de Maxwell, que engloben tota la fenomenologia de les lleis de Coulomb, d'Ampère i de Faraday, i que, a més, prediuen l'existència d'ones electromagnètiques. Va ser un moment veritablement màgic —al record del qual he dedicat diversos poemes—, veure com la velocitat d'aquestes ones, donada per la constant dielèctrica i la permitivitat magnètica del material, coincideix amb la velocitat de la llum en el buit, en l'aigua i en altres materials. De cop i volta, l'òptica esdevenia una part de l'electromagnetisme, amb resultats més generals i profunds que els de l'òptica clàssica. En combinació amb la mecànica relativista, l'estudi de les conseqüències físiques de la invariància del valor de la velocitat de la llum  $c$  en el buit per a tots els espectadors en velocitat uniforme, sigui quina sigui, va ser espectacular, amb totes les sorpreses de la teoria especial de la relativitat d'Einstein: la relativitat dels intervals temporals, de les distàncies entre punts i de la massa dels objectes.

Tenir presents les conseqüències conceptuals i pràctiques de les ones electromagnètiques contribueix poderosament a la visió de riquesa de la física. A partir dels treballs experimentals de Heinrich Rudolf Hertz, de Guglielmo Marconi i de molts altres, aquestes ones van esdevenir la base de transmissió d'informació —ones de telegrafia, de ràdio i, posteriorment, de televisió i de telefonia mòbil. Aquesta base física obrí el camí a profundes transformacions culturals, econòmiques i socials. El descobriment dels raigs X, un altre tipus d'ones electromagnètiques, va revolucionar les tècniques d'exploració i de diagnòstic en medicina. Els satèl·lits de telecomunicacions van permetre la transmissió regular intercontinental d'informació. Les microones són la base de forns d'escalfament eficaç, ràpid i net. Així, es veu com una preocupació teòrica aparentment formal —la cerca d'una certa simetria entre les equacions del camp elèctric i del camp magnètic, plantejada per James Clerk Maxwell— porta a la llarga a una transformació conceptual, tecnològica i social immensa.

Del segon cicle de la carrera —quart i cinquè curs— recordo especialment la termodinàmica de processos irreversibles (professor José Casas Vázquez), la física nuclear (professor Rafael Guardiola), la teoria quàntica de camps (professor Manuel García Doncel) i la relativitat general (professor Lluís Mas). Parlaré amb més detall de la termodinàmica en el capítol següent. La física nuclear va ser de nivell elevat, i va resultar interessant complementar la taula periòdica dels elements vista des de la perspectiva atòmica, amb una visió des de la perspectiva nuclear, amb les propietats radioactives dels diferents isòtops. Si hi hagués hagut més temps, hauria estat interessant estudiar amb més profunditat les reaccions nuclears de

fissió i de fusió, i d'algunes de les seves aplicacions, i donar una visió simplificada de l'origen estellar dels nuclis dels diversos elements per successives reaccions de fusió nuclear, però l'estudi aprofundit de l'estructura nuclear es va emportar gairebé tot el temps de l'assignatura.

De fet, la física nuclear era mirada socialment des d'una perspectiva ambivalent, més aviat cautelosa i negativa, sobretot per la por de les armes nuclears i de les proves que encara feien amb certa freqüència els Estats Units i la Unió Soviètica de noves bombes, i que contribuïen a la radioactivitat ambiental. També es mirava amb malfiança les centrals nuclears, pels seus riscos i pels problemes d'emmagatzemament dels residus, temes que, tot i la seva realitat innegable, eren molt amplificats ideològicament. De totes maneres, tant en el camp de l'armament com en el de l'energia atòmica, la física nuclear havia donat a la física un lloc polític i militar absolutament estratègic, que a escala popular es reflectia sovint en la narrativa i les pel·lícules d'espionatge.

Les altres dues assignatures que he esmentat (teoria quàntica de camps i relativitat general i cosmologia) van ser malaguanyades a causa de la moda de la participació activa dels estudiants en la docència, cosa aparentment interessant i positiva, però que també té els seus inconvenients. Ens vam repartir entre els diversos estudiants —érem un grup de tot just una quinzena, molt motivat— la preparació i l'explicació dels diversos temes, sota la supervisió dels professors respectius. Tot i la nostra dedicació, l'esforç i la bona voluntat, les classes resultaren vacillants i confuses, per manca d'experiència i de perspectiva. N'hauríem tret més profit escoltant els professors i treballant activament els problemes. De totes maneres, tenir un primer contacte amb l'equació de Dirac, amb l'antimatèria, amb l'electrodinàmica quàntica, amb els diagrames de Feynman, amb les fluctuacions del buit quàntic i amb les equacions d'Einstein de la relativitat general ens va fer molta impressió. Vaig haver d'anar aprofundint en aquests temes pel meu compte, posteriorment, sota l'estímul de la divulgació i de la participació en seminaris amb humanistes a la UAB, encoratjats per Walter Mayerstein i pel professor de filosofia Josep Montserrat Torrents. El seminari d'història de la física del professor Doncel i la generosa invitació que em va fer d'anar a treballar a la seva biblioteca, al centre Borja dels jesuïtes a Sant Cugat, van complementar la meua visió històrica i humanista de la física i me la van fer més propera a l'aventura creativa i laberíntica de la creació artística i literària.

No em produïren tanta impressió les assignatures de física de l'estat sòlid (professora Teresa Mora), física de fluids (professor Santi Bordas), òptica (professor Manuel Tomàs), partícules elementals (professor Carlos Pajares) i física de l'aire (professor Juan Ignacio Jiménez), no pas perquè els professors no fossin competents, sinó, potser, perquè el ritme de progrés en els continguts es va fer massa lent i la visió de conjunt se'n va ressentir. Tot i això, posteriorment, diversos

aspectes de la física de l'estat sòlid, de la física dels fluids i de les partícules elementals van ser importants i útils en la meua carrera i vaig arribar a apreciar amb més profunditat el seu significat. Pel que fa a les partícules elementals, recordo converses especialment interessants amb el professor Carlos Pajares, en alguns bars de Barcelona; l'aparició del llibre *Física pop*, d'Antoni Lloret, que explicava en català tots aquests temes, i l'excitació que va produir, a finals de 1974, el descobriment que posava en evidència l'existència del quark  $c$ , cosa que desbordava les teories de Murray Gell-Mann basades en tres quarks ( $u$ ,  $d$ ,  $s$ ) i obria el camí a la recerca de més quarks.

Vist amb perspectiva, vaig trobar a faltar en la carrera quatre grans aspectes: una petita introducció a la teoria de l'elasticitat i la seva aplicació a les estructures d'arquitectura i d'enginyeria civil; una mica de física no lineal, com ara les oscil·lacions i les ones no lineals; la física molecular i la química física, i la biofísica. Era massa d'hora, en aquell moment, per a parlar de física computacional i de simulacions, que tot just es començaven a desenvolupar, però que avui formen part rellevant del saber dels físics. Jo mateix, ja com a professor, vaig intentar reduir aquests buits tot donant una assignatura de física no lineal (incorporant el caos determinista, tan estudiat al llarg de les dècades del 1980 i 1990) i una de biofísica, amb atenció especial a la biologia molecular i celular, i a la física del cervell, complementades amb una brevíssima introducció a la física mèdica, amb la riquesa de la ressonància magnètica nuclear, de les ecografies, dels làsers i de la medicina nuclear.

De les assignatures de matemàtiques en recordo especialment l'àlgebra i el càlcul de primer (professora Pilar Bayer i professor Julià Cufí), les equacions diferencials (professors Ramon Pascual i Aleix Vidal-Quadras), la teoria de grups (professor Manuel García Doncel), l'anàlisi de variable complexa (professor Julià Cufí), la geometria diferencial (professor Lluís Mas) i, de la llicenciatura de matemàtiques, les assignatures de teoria de Galois (professora Pilar Bayer) i d'equacions diferencials (professor Julià Cufí).

Aquestes assignatures de caràcter matemàtic em semblaren molt interessants, tot i que l'àlgebra i el càlcul de primer curs, amb la teoria de conjunts, em resultà d'entrada xocant i difícil, de nivell més alt al que estava acostumat, fins al punt que durant el primer mes vaig arribar a pensar que no me'n sortiria i que la carrera era d'un nivell inassolible per a mi. Poc després, quan m'hi vaig introduir, la situació va canviar molt, fins al punt que em va semblar atractiu fer la carrera de matemàtiques a més de la de física. Em va resultar molt interessant, per exemple, poder comparar una matèria, com ara les equacions diferencials, vista des de la física —de manera més aplicada i expeditiva— i des de les matemàtiques pures —amb una visió més abstracta i general, i més oberta a estructures formals de nivell superior. La teoria de Galois em va aportar grans satisfaccions intel·lectuals, incrementades per la presentació elegant i apassionada de la professora Bayer.

Ara bé, l'esforç suplementari que em suposava fer les assignatures de matemàtiques m'impedia la dedicació a la poesia, de la qual no volia prescindir, ja que era molt important per a mi, i a la qual dedicava entre una i dues hores al dia. Per això, vaig deixar córrer la carrera de ciències exactes i em vaig concentrar en la física i en la poesia, sense deixar, per això, l'admiració i el gust per les matemàtiques. El conjunt d'assignatures matemàtiques de la carrera de físiques, encara que estiguessin adreçades a l'aplicació en física, em va produir grans satisfaccions. Recordo especialment, per la impressió que em feren, el teorema egregi de Gauss de la geometria diferencial, els resultats de Riemann en variable complexa, les subtileses de la representació dels grups finits...

Entre els llibres de la carrera, m'impresionaren especialment el de Herbert B. Callen sobre termodinàmica, el de Frederick Reif sobre física estadística, el de Felix Gantmacher sobre mecànica analítica i el de Ruel V. Churchill sobre variable complexa. M'enlluernà, sobretot, la col·lecció de nou volums de Lev Landau i Evgeny Lifshitz (del cèlebre físic soviètic Lev Landau, brillantíssim en tants camps), que donaven una visió de molt alt nivell de la física, sense gaires concessions didàctiques ni aplicacions pràctiques. També em van impressionar els tres volums de les conferències sobre física de Richard Feynman, molt més àgils que els de Landau, ja que anaven adreçats a estudiants avançats de primer o segon curs de la Universitat de Califòrnia, d'alt nivell, més que no pas a investigadors, com els de Landau, tot i que molts investigadors hem trobat en Feynman una gran font d'inspiració. Tant Landau com Feynman invitaven a tenir una visió global de la física, més enllà de la necessària especialització en algun camp concret.

Un aspecte de la física que em va cridar l'atenció va ser la profunda influència de les condicions inicials i de contorn en els resultats dels problemes. Així, la física combina molt bé unes lleis generals i abstractes amb la realitat concreta de les diverses situacions físiques, cosa que connecta la unitat profunda de les lleis amb la diversitat de les realitats concretes. També permet conciliar les lleis generals amb la concreció dels diversos materials del món físic. Un altre aspecte, en certa manera relacionat amb aquest, és la combinació de la visió macroscòpica amb la visió microscòpica. La primera és molt general, i afecta sobretot la termodinàmica i la física de medis continus, mentre que la segona fa intervenir la composició atòmica dels materials. També aquesta combinació suposa una compatibilitat entre la universalitat de la física i les seves concrecions materials diverses.

Al llarg de la carrera vaig continuar escrivint poesia, pràcticament cada dia. L'angoixa que havia sentit a l'hora d'haver de triar entre física i literatura havia estat exagerada. La física, de fet, és un estímul intel·lectual de primer ordre. Estimula a mirar el món amb més atenció, promou una visió organitzada i crítica de la realitat, és la base d'una tecnologia que canvia el món, i limita amb temes

com la filosofia i la teologia. Per això no ofega la possibilitat de la poesia. A primer curs vaig publicar el meu primer llibre de poesia, *Per a no oblidar la llum*, molt espriuà, que havia guanyat el Premi Pare Ramon Castelltort a Igualada. Ramon Planes i Rafael Monzó se'n van fer ressò generosament a *L'Eco*. La relació amb Planes significava entroncar amb el catalanisme culte, tenaç i resistent, i em descobria la riquesa del Modernisme, del Noucentisme i de les avantguardes catalanes, que ens eren escamotejades per la política educativa del franquisme; Monzó, castellano-parlant, em va fer una entrevista i, al llarg de diverses converses, em parlà amb entusiasme contagiós de García Lorca, d'Unamuno, d'Azorín, de la generació del 27, de la revista *Litoral*, d'Ortega y Gasset i de la *Revista de Occidente*.

El juny de 1974 vaig guanyar el premi de poesia del Grup Sictak de Girona —impulsat per Carme Saurina, Teresa Eudaldo i altres joves universitaris de Girona— pel llibre *Elogi del món vist com una fruita*. Això em va dur a publicar, al final de la carrera, el 1975, el meu segon llibre, *Dit de pas*, amb poemes del llibre esmentat i d'altres que em van semblar oportuns. Inspirat per l'assignatura de la relativitat general vaig escriure al llarg del darrer semestre de la carrera, la primavera de 1975, el llibre *Tapís*, que publicaria vuit anys després, un llibre de sonets el nombre de síl·labes dels quals va creixent al llarg de l'obra, i després decreixent, com en els models d'una cosmologia en expansió i contracció, en què la mètrica depèn del contingut, un llibre entre Petrarca i Einstein.

## 2.2. DOCÈNCIA, RECERCA, DIVULGACIÓ I ASSAIG

La meua visió de la física va quedar molt enriquida per l'experiència docent. M'agrada donar classes. Sempre hi vaig anar amb molt de gust. Encara avui, veure una pissarra m'estimula la imaginació. Les primeres assignatures que em van encarregar, el curs 1977/1978, després del servei militar, van ser física de fluids i problemes de geofísica. Després, vaig passar a assignatures com termodinàmica, física estadística, termodinàmica de processos irreversibles, primer com a professor de problemes i de pràctiques i anys després com a responsable de l'assignatura, i assignatures noves, proposades al Departament de Física de la UAB per mi mateix, com ara física no lineal i teoria del caos, i biofísica. Vaig donar diversos cursos de doctorat, com termodinàmica de processos biològics, mecànica estadística i biologia molecular, i física de plasmes.

Les assignatures de física general m'agradaven molt, tant la del primer curs de la llicenciatura de física com en altres llicenciatures. Entre les assignatures introductòries, destacaria la introducció a la geofísica, la introducció a la física per a biòlegs, que he fet molts anys, la introducció a la física per a ciències ambientals, la introducció a la física quàntica i a la física clàssica a la Facultat de Filosofia, la introducció a la física per a ciències de l'alimentació, i una assignatura de campus

sobre introducció a la ciència. En totes aquestes assignatures vaig fer un esforç notable per servir els interessos dels estudiants a qui l'assignatura anava dirigida. Segons que fossin biòlegs, geòlegs, ambientalistes o tecnòlegs de l'alimentació, adaptava el programa als seus interessos, de manera que no hi hagués ni una classe en què no es veiés l'aplicació de la física als seus camps respectius. Això em va fer aprendre molta física, i apreciar-ne la immensa riquesa i la versatilitat. Aquesta actitud contrastava amb la més habitual de voler explicar a tothom la mateixa física, independentment dels interessos dels estudiants, amb una gran pèrdua d'eficàcia didàctica i d'oportunitats d'aprendre coses noves.

D'aquestes assignatures en van sortir els llibres *Física para ciencias de la vida*, en col·laboració amb Josep Enric Llebot i Carlos Pérez, i que ha tingut moltes reimpresions; *Introducció a la termodinàmica de processos biològics*, publicat per l'IEC i que, ampliat en col·laboració amb Josep Enric Llebot, va ser traduït al castellà, al francès i a l'anglès (cosa que ens va produir una gran satisfacció); *Mecànica estadística i biologia molecular*, publicat pel Servei de Publicacions de la UAB, i els llibres d'assaig *Cerebro y Universo. Dos cosmologías*, publicat pel Servei de Publicacions de la UAB, i *Introducción al mundo cuántico. De la danza de las partículas a las semillas de las galaxias*, que em va publicar Gonzalo Pontón a la seva editorial Pasado y Presente.

A més de la carrera, la docència i la recerca, les tres fonts usuals d'aprenentatge de la física, en el meu cas hi ha hagut tres altres factors que han contribuït al meu coneixement de la física: les contribucions al suplement «Ciència i tecnologia» de *La Vanguardia*, estimulades per Vladimir de Semir; els cicles de conferències i les reunions del Patronat de la Fundació Joan Maragall, i la coneixença amb Walter Mayerstein. També hi han contribuït les reunions de la Secció de Ciències i Tecnologia de l'Institut d'Estudis Catalans —i, en especial, les meves tasques de supervisor dels termes de física al *Diccionari* de l'IEC i la participació en el Consell Supervisor del TERMCAT durant uns deu anys—, les sessions de la Reial Acadèmia Europea de Doctors i les trobades anuals de membres corresponents de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid.

La col·laboració amb el suplement «Ciència i tecnologia» de *La Vanguardia*, impulsat per Vladimir de Semir, que ens va acollir molt generosament als qui ens vam atansar com a autors, va ser molt enriquidora. El 1983, tot just iniciat el suplement, li vaig enviar un article sobre el centenari del físic holandès Peter Debye. La resposta de Vladimir fou molt engrescadora i, durant el període d'existència del suplement (de 1983 a 1994), hi vaig publicar ben bé uns cent cinquanta articles. Molts d'ells van ser il·lustrats pel gran Fernando Krahn, dibuixant d'origen xilè que havia vingut a Sitges amb la seva dona, María de la Luz Uribe, i els seus fills després del cop d'estat de Pinochet. El suplement va ser un tresor, potser era el suplement més ben il·lustrat dels diaris europeus i americans, especialment en l'etapa que

va sortir els diumenges, com a quadernet separat, i va assolir un gran nombre de lectors.

Naturalment, si et vols dedicar a la divulgació has d'eixamplar el camp dels teus interessos, estar atent a l'actualitat i buscar maneres didàctiques d'explicar-te. Així ho vaig fer, estudiant molt i posant-hi imaginació, i intentant aplicar a la docència les coses que havia après. Recordo especialment l'emoció i la urgència de quan havíem d'informar dels premis Nobel. Llavors no hi havia pàgines web, tan sols uns tèlexs molt concisos. Era molt atractiu, un cop ens deien des de *La Vanguardia* el nom dels guanyadors, anar a la biblioteca a buscar informació i escriure, aquella mateixa tarda, un article de mitja pàgina del diari. Els meus companys Carlos Pérez García i Josep Enric Llebot també s'apuntaren amb entusiasme a la divulgació i férem un grup molt ben avingut amb Vladimir. En col·laboració amb el company de física teòrica Marià Baig, vam fer una sèrie d'articles sobre física i paisatge que després vam publicar en forma de llibre (*La naturaleza y el paisaje*), en què explicàvem com la física ens ensenya a contemplar detalls subtils dels paisatges i de l'art.

Al començament, la nostra participació en la divulgació causà les reticències d'alguns col·legues, que hi veien un afany de lluïment personal i una superficialització de coses profundes. A poc a poc, però, fins i tot gent inicialment crítica va anar contribuint al suplement de *La Vanguardia*. Vladimir de Semir organitzà també un postgrau de periodisme científic a la Facultat de Ciències de la Informació de la Universitat Pompeu Fabra, un Observatori de la Comunicació Científica i contribuï a la fundació de l'Associació Catalana de Periodisme Científic. Realment, convertí Barcelona en un pol europeu del periodisme científic.

Aquest pol es complementava amb el Museu de la Ciència de l'Obra Social de la Caixa, dirigit amb entusiasme i imaginació per Jorge Wagensberg —investigador en termodinàmica de processos irreversibles, com jo mateix, però més abocat a la divulgació i l'assaig, i amb gran projecció pública—, i amb iniciatives com *Els vespres del Museu*, conferències que portaren a Barcelona els científics més prestigiosos d'Europa i d'Amèrica i estimularen la curiositat per la ciència. Un altre factor que posà Barcelona en un lloc destacat en aquest camp va ser la Comissió per a l'Estímul de la Cultura Científica, creada pel conseller de Cultura Joan Guittart. Hi participava el professor Ramon Parés, que n'era el director, Vladimir de Semir, Jorge Wagensberg, Salvador Reguant, Ricard Guerrero, Jaume Josa, Jordi Martí... i jo mateix. Organitzàrem conferències, enquestes i visites de científics rellevants.

En particular, recordo el privilegi d'haver sopat un dia entre Joan Oró i Stanley Miller, i poder escoltar la seva conversa sobre l'estat actual dels coneixements sobre l'origen de la vida, tema al qual ells havien fet contribucions fundacionals reconegudes mundialment. També vaig poder sopar amb el premi Nobel de Quí-



mica i poeta Roald Hoffman, amb qui m'he pogut veure un parell de vegades més; amb James Lovelock, l'autor de la hipòtesi Gaia de la Terra com a organisme vivent; amb Lynn Margulis, destacada autora de la teoria sobre l'origen simbiòtic dels microorganismes eucariotes i de la rellevància de la simbiosi i de la cooperació en l'evolució biològica, i amb Sheldon Glashow, cunyat de Lynn i amic, com ella, de Ricard Guerrero.

Un altre record intens és el d'una exposició de les il·lustracions que Fernando Krahn havia fet per al suplement «Ciència i tecnologia» de *La Vanguardia*, i que férem dintre del marc de les activitats de la Comissió el 1994. Vladimir de Semir va suggerir que les il·lustracions podrien anar acompanyades per poemes meus. Després d'un dinar de Vladimir, Fernando i jo al Restaurant Peixerot de Vilanova, i amb el tresor d'una capsa amb els originals de les il·lustracions, em vaig posar a treballar en els poemes, deixant-me inspirar pel món original, alegre i sorprenent de Krahn, i en vuit dies vaig tenir els quaranta poemes que ens calien, treballant molt intensament. L'exposició va anar molt bé i la vam poder portar al Centre d'Estudis Catalans de la Sorbona, a París. El catàleg de *El color de la ciència* —nom de l'exposició—, avui intrombable, amb els dibuixos i els poemes, és alegre i lluminós, un tresor bibliogràfic que recomano al lector si algun dia el troba.

Un segon factor per a la meva formació va ser la invitació de mossèn Antoni Matabosch a formar part del Patronat de la Fundació Joan Maragall, dedicada al cristianisme i la cultura. Entre moltes altres iniciatives, organitzàvem congressos sobre temes de ciència i fe, en què van participar un bon nombre de figures conegudes, amb un públic molt interessat i fidel. Vaig contribuir a la Fundació amb dos cicles de conferències de ciència i fe, el primer dels quals va ser *Matèria i materialisme*, el 1994, en ocasió del descobriment del quark t, del qual va sortir el llibre amb el mateix títol, publicat primer per l'Institut d'Estudis Catalans, després per La Magrana, més tard en castellà, per Pasado y Presente, i finalment traduït al xinès. L'altre cicle de conferències va ser *El temps i la memòria en la ciència contemporània*, publicat també per l'Institut d'Estudis Catalans, per l'editorial Viena amb el títol de *El laberint del temps* (en el volum *El laberint del temps, la simfonia de la matèria*, que també aplegava el llibre *Matèria i materialisme*), en castellà per Pasado y Presente, i també en xinès.

Participar en les reunions del Patronat de la Fundació, i especialment escoltar les explicacions acurades i rigoroses de Pere Lluís Font, em va descobrir molts temes culturals, sociològics, filosòfics i teològics que m'han enriquit força i que han estimulat un nombre considerable de poemes meus sobre tema religiós, aplegats després en llibres com ara *Poemes sobre ciència i fe*, *Poemes de Nadal i de Setmana Santa*, *La mística dels dies*, *Cartografies de Déu*, *Cant espiritual* i *Trenta poemes sobre el pàrenostre i els salms*. Fer poesia religiosa, actualment, és un estímul de primer ordre, tant per la desatenció que s'ha donat a aquest tema cultural tan



rellevant, com pel fet que la poesia religiosa clàssica no sempre respon prou bé a les inquietuds i les preguntes del món modern.

Les col·laboracions amb *La Vanguardia* —inclosa la repercussió de la meua entrevista amb Stephen Hawking de 1988— i amb la Fundació Joan Maragall van fer que em demanessin moltes conferències sobre temes molt diversos. He donat més de cinc-cents conferències públiques, en llocs bastant diversos. El contacte amb el públic, les seves preguntes i les converses al final de les conferències han contribuït a afinar la meua presentació i la meua comprensió dels problemes.

El tercer factor d'estímul cap al coneixement de la ciència va ser conèixer Walter Mayerstein i la seva muller, Melissa, amb qui durant molts anys hem mantingut molta relació —fins a la mort d'en Walter el 2018. Mayerstein havia nascut a Berlín a començaments de la dècada de 1930, i va marxar amb els seus pares cap a Xile per fugir de les polítiques nazis antijueves. Allà va fer bones inversions com a enginyer i als quaranta anys es va poder jubilar i va venir a Barcelona. Anava amb freqüència a París, on assistia a cicles de conferències de primeres figures al Collège de France. Ens portava notícies fresques de novetats en cosmologia, en física quàntica, en biologia molecular, en neurociència i en matemàtiques. La seva forma entusiasta i clara d'explicar les coses resultava didàctica i engrescadora, temperada pel seu esperit crític i un xic d'escepticisme. En tinc un gran record. Era una manera dinàmica i amena d'ampliar i actualitzar els estudis. A casa seva, durant uns anys, férem una tertúlia mensual amb Carles Perelló, Enric Verdager, Adolf Tobeña, Àngel Calsina, amb la participació, de vegades, de Xavier Bru de Sala, i amb visites ocasionals de gent com el matemàtic Gregory Chaitin o el filòsof Jesús Mosterín.

Des de 2015, un altre estímul a actualitzar coneixements han estat els butlletins d'informació amb píndoles científiques que ens enviava Jaume Puigbò, de formació matemàtica, àmplia curiositat intel·lectual, intel·ligència sagaç i sintètica i molt posat al dia. A través d'aquests butlletins m'he anat assabentant de nous descobriments en neurociència, de nous avenços en física quàntica, en computació quàntica, en intel·ligència artificial, en cotxes elèctrics i tecnologies energètiques, i en les seves conseqüències socials i polítiques. Molts d'aquests temes ens haurien resultat inimaginables fa tan sols vint anys, i anar seguint els seus missatges i les seves píndoles ha estat com mirar privilegiadament el futur.



### 3. Una aproximació a la termodinàmica clàssica

Ja a segon curs de la carrera de física, la termodinàmica em va cridar especialment l'atenció. Cal dir que en aquells moments la recerca més puntera, més apreciada, divulgada i admirada, era la de partícules elementals i altes energies en el marc de la física quàntica relativista, camp en què s'anaven fent molts descobriments que semblaven tocar els fonaments mateixos de la realitat. La termodinàmica, en canvi, tot i l'entusiasme que havia suscitat en alguns grans físics, com ara Albert Einstein o Enrico Fermi, era considerada un camp clàssic, acabat, en què les úniques novetats es presentaven en el camp de possibles aplicacions concretes, però no en les bases físiques fonamentals.

Certament, el camp de les altes energies, la física quàntica relativista i les partícules elementals em semblava apassionant. Hi confluïen el més gran —l'Univers, especialment en les seves etapes inicials— i el més petit —les partícules elementals—, com ho havia popularitzat Steven Weinberg en *Els tres primers minuts de l'Univers*. Ara bé, per a mi tenia l'inconvenient que deixava en l'oblit tota la realitat intermèdia, donant per suposat que si coneixies les interaccions fonamentals i les partícules elementals ja podries deduir, en potència, tota la resta. Em semblava com una visió de l'arquitectura en què només es parlés dels maons i del ciment, i es deixessin de banda totes les edificacions i tots els estils arquitectònics, amb el pretext que, un cop amb maons i amb ciment —i, avui dia, amb molts altres materials, és clar—, ja podries deduir o imaginar tota la resta, com si aquesta resta fos un simple epifenomen determinista, previsible i secundari.

Això suposava la qüestió complexa del reduccionisme. La idea que a partir dels elements bàsics de la realitat podríem descriure'n els nivells superiors —superiors en complexitat, en nombre de partícules, en estructures— té els seus matisos. Quan ja coneixem una realitat física, pot ser relativament fàcil descompondre-la en els seus components i interaccions i deduir-ne les propietats ja observades. En canvi,

a partir dels elements bàsics, deduir noves realitats encara no observades és molt més difícil. De fet, la realitat és tan rica, i són possibles tantes estructures i tants sistemes que no observem mai, que de vegades el problema és poder dir per què no observem unes estructures que en principi són possibles i sí unes altres. Això passa, per exemple, en biologia i en arquitectura. Per què una espècie i no una altra? Per què un estil en un cert moment i un cert lloc i no un altre? El pas de la biologia molecular, tan central en la segona meitat del segle XX, a la biologia sintètica, en el primer quart del segle XXI, manifesta prou bé el grau superior de complexitat que suposa sintetitzar una cèl·lula viva a partir de les seves macromolècules constituents en comparació amb descompondre una cèl·lula en les seves macromolècules.

### 3.1. ELS ATRACTIUS DE LA TERMODINÀMICA

La termodinàmica, a diferència de les partícules elementals, semblava estar present a tot arreu: en les màquines tèrmiques de la revolució industrial i en els frigorífics de la revolució alimentària, en l'estudi dels materials i en les subtileses de la llum de les estrelles, era essencial en la meteorologia, l'oceanografia, la física planetària i l'astrofísica; estava present en la biofísica i en les ciències de l'alimentació, en la bioenergètica i en l'ecologia, en els volcans i en els núvols, en els ordinadors i en les bateries elèctriques, en les centrals tèrmiques i en les cèl·lules termoelèctriques, en els paisatges nevats i en els deserts més càlids. A més, la termodinàmica és un ingredient essencial de la cosmologia —el més gran— i de les transicions entre nucleons i plasmes de quarks i de gluons —el més petit.

Aquesta presència ubiqua i subtil em semblava molt atractiva des d'una visió de la física com a diàleg matemàtic amb la naturalesa, i no tan sols amb els seus constituents més extrems i invisibles i les seves forces més ocultes i secretes. Així, ja des de segon curs em vaig sentir atret per la termodinàmica, per l'elegància de la seva estructura, la generalitat de les seves lleis, la riquesa dels seus resultats, la varietat de les seves aplicacions. Aquest interès es va afirmar a tercer curs, amb l'aprenentatge de la física estadística, que construeix un pont entre la base microscòpica dels diversos sistemes físics i la visió macroscòpica que en dona la termodinàmica.

El que a ulls de molts era un camp molt clàssic, pràcticament acabat i sense grans novetats en perspectiva —a diferència del que passava amb la física d'altres energies, en què s'anaven succeint nous descobriments que trasbalsaven la visió de la matèria fonamental—, va resultar un camp molt obert. No em refereixo tant a la termodinàmica clàssica de sistemes en equilibri, sinó sobretot a la seva formulació fora de l'equilibri, en què hi havia molts problemes oberts de formulació i de recerca.

Ja a segon curs vaig manifestar al professor Casas aquest interès per la termodinàmica —m'hi acompanyà l'amic Jaume Cerdà, també entusiasmat pel tema. Amb gran sensatesa, el professor Casas ens va dir que abans de decidir res esperéssim al final de quart curs, en què hauríem descobert més perspectives i problemes. Cal tenir en compte que en aquell moment la UAB estava en creixement i consolidació, i que érem la primera promoció que s'interessava per la recerca —la primera promoció, l'anterior a la nostra, no es va quedar a la universitat. Hi havia, doncs, moltes places i els diversos professors i departaments buscaven els estudiants amb millors expedients acadèmics, ja que seria més fàcil que obtinguessin alguna beca que els permetés fer el doctorat. Per això, un nombre considerable dels meus companys de promoció —i no tan sols en física, sinó en altres carreres de ciències— van quedar-se a la UAB i hi han fet la seva carrera. Algun dia serà interessant fer un balanç de la nostra aportació col·lectiva a la UAB i a la ciència, en general, per a aquells de la meua promoció (1970-1975) que ens vam dedicar a la recerca: Xavier Llobet (física de plasmes a l'Escola Politècnica Federal de Lausana —École Polytechnique Fédérale de Lausanne—), Miguel Rubí (física estadística a la UAB i la Universitat de Barcelona), Carlos Pérez (inestabilitats hidrodinàmiques a la UAB i a la Universitat de Navarra), Josep Enric Llebot (física ambiental a la UAB i a la Universitat de Girona), Ignacio Fita (estructura de proteïnes al CSIC), Quim Gabarró (informàtica a la Universitat Politècnica de Catalunya), Francisco del Àguila (altes energies a la UAB i a la Universitat de Granada), Xavier Aymerich (electrònica a la UAB), Teresa Eudaldo (medicina nuclear a l'Hospital de Sant Pau), jo mateix...

Al final del quart curs vaig reiterar al professor Casas la meua atracció per la termodinàmica, i el professor Casas, d'acord amb el seu amic i col·laborador Georgy Lebon —de la Universitat de Lieja, a Bèlgica—, dues persones decisives en el meu inici en la recerca i al llarg de gairebé quaranta anys de col·laboració fructífera i cordial, em va proposar començar la meua tesina —treball de llicenciatura— aquell mateix estiu de 1974. El tema va ser l'aplicació d'un principi variacional per a la hidrodinàmica, proposat feia uns quants mesos per Lebon i Joseph Lambermont, al flux d'un fluid viscos bidimensional contra una placa plana en repòs. Durant l'estiu vaig fer una lectura ràpida dels tres o quatre articles especialitzats que m'havien passat i de les monografies de S. R. de Groot i Peter Mazur, d'István Gyarmati, de Peter Glansdorff i Ilya Prigogine i de Clifford Truesdell, que eren les grans fites en la termodinàmica de processos irreversibles d'aquells moments, i que continuen essent obres de referència clàssiques en el camp.

Començar a obtenir resultats no em va ser fàcil. Al començament em sentia una mica perdut. Ja no era fer un treball de síntesi de coses sabudes, sinó enfrontar-me a coses que no acabava de comprendre i que se m'escapaven. De cop, un vespre vaig tenir una idea que em va obrir l'accés ràpid a la gran majoria dels re-

sultats. Aquest procés discontinu de l'aprenentatge ja el coneixia de la meua vida d'estudiant, però aquí se'm manifestava d'una manera encara més radical. Vaig acostumar-me, doncs, a llegir molts treballs sense entendre'n gran cosa, amb la convicció que, arribat el moment, vindria alguna idea incontrolable, intuïtiva, gairebé màgica, que il·luminaria tot el panorama que anava descobrint a les palpentes. Molta gent, en canvi, se sent més segura si, en lloc de llegir molt sense acabar d'entendre les coses, va estudiant amb detall cada cosa que llegeix. El problema d'això és que moltes de les coses que es llegeixen no són essencials per al problema de fons, de manera que el progrés és lent i, en bona part, implica un esforç que no serveix gaire. En canvi, per als qui no ens sentim tan incòmodes en les intempèries de la perplexitat, en anar-nos omplint de preguntes i més preguntes, de contradiccions i de confusions, la lectura abundant de coses diverses finalment ens va obrint pas, salt a salt, a un progrés més ampli i més ràpid, més versàtil i impredecible.

Vaig acabar la tesina el mes d'abril i en vaig fer la presentació pública el 5 de juliol de 1975, pocs dies després d'haver acabat l'últim examen de l'última assignatura —l'examen de física nuclear, després del qual vaig marxar amb els meus pares, en cotxe, a Alberic, a València, a recollir un premi de poesia. La meua va ser la primera tesina en física llegida a la UAB presentada per algú que hi hagués fet els seus estudis.

El mes de maig va sortir el meu llibre de poemes *Dit de pas*, i gràcies als bons oficis introductoris de Ramon Pinyol i Balasch, llavors en plena efervescència com a editor de la col·lecció «Llibres del Mall», que va canviar el panorama de la nostra poesia, vaig portar-lo a Salvador Espriu. Vaig anar al seu despatx d'Assistència Sanitària, al passeig de Gràcia, entre Aragó i Consell de Cent, baixant a l'esquerra. Em va rebre amb molta cortesia, en un despatx netíssim, amb una taula sense cap paper. Em va preguntar pels meus interessos, em va insistir en la conveniència de llegir l'Eclesiastès i el Llibre de Job, va comentar la visita recent del príncep Joan Carles a Josep Pla, vam comentar la publicació recent d'una antologia de poemes de Konstandinos Kavafis traduïts per Eudald Solà i que, a diferència dels traduïts per Carles Riba, posaven de manifest la seva homosexualitat, i parlarem de la poesia catalana de llavors, amb el sorgiment de l'interès per la poesia de J. V. Foix i de Joan Brossa, que ell contemplava amb cert recel, ja que semblava erosionar el prestigi de referència poètica inqüestionable que la seva obra tenia des de la mort de Carles Riba, el 1960.

En una de les nostres trobades posteriors, en ocasió del meu llibre *Diminuta imatge*, de 1977, Espriu em va mostrar i va justificar els canvis que estava introduint en la correcció de proves d'una nova edició de les narracions d'*Ariadna al laberint grotesc*. Aquells comentaris em resultaren essencials per a aprendre a mirar autocríticament la meua poesia i llançar-me a corregir-la sense por. Per

atzar, poques setmanes després de la nostra conversa vaig veure en una llibreria una edició facsímil de la primera versió de *The waste land*, de T. S. Eliot, amb esmenes i comentaris d'Ezra Pound desacomplexadament crítics. Des de llavors, cap llibre meu —ni poètic ni científic— no m'ha semblat definitiu, sinó atractivament revisable i millorable. He tingut la sort de poder-ho posar en pràctica en les diverses edicions de llibres meus que s'han anat fent.

En aquella època, i també amb ocasió del meu llibre, vaig anar a visitar J. V. Foix, Joan Brossa i Pere Gimferrer. Coneixíem ja Foix pels seus llibres i per les seves anades de Nadal a Sitges, on es trobava amb el seu amic sitgetà Josep Carbonell i Gener, amb qui havien compartit iniciatives brillants cap als anys 1920 i 1930, a les revistes *Terramar*, *Monitor* i *L'Amic de les Arts*. Carbonell i Gener invitava a les postres del dinar el meu germà Lluís, Vinyet Panyella i a mi, i era molt interessant escoltar-los i aprendre d'ells. La trobada amb Joan Brossa al seu estudi en un àtic de Balma cantonada amb Travessera de Gràcia, on em va acompanyar Ramon Pinyol, va ser molt curiosa: el local era atapeït de papers, sobre les cadires i a terra, la seva poesia era juganera, imaginativa i iconoclasta, i el seu vessant visual tenia una frescor i un enginy vivíssims. Gimferrer, molt jove i erudit, em va rebre al seu despatx a Planeta, i em va recomanar llegir atentament Eliot i Octavio Paz, tant per la poesia com per la crítica literària, Rainer Maria Rilke, Giuseppe Ungaretti, Rubén Darío i Vicente Aleixandre. Haver pogut visitar, en el mateix mes, Pla, Espriu, Foix, Brossa i Gimferrer, amb el que significava cadascun d'ells, configurava un mapa cultural ple de vida. Haig d'esmentar també algunes visites a Josep Maria Castellet, que després tindria ocasió de tractar amb alguna freqüència, al seu apartament a Sitges. Les seves recomanacions de fer poesia social anaven quedant enrere i s'estava obrint a una etapa més flexible i variada, amb els *Nueve novísimos poetas españoles* i amb la *Iniciació a la poesia de Salvador Espriu*, que em va impressionar molt.

Ja a començaments de maig de 1975, el professor Casas em va suggerir que podria començar a preparar la tesi doctoral, que, en principi, havia de ser una ampliació de la tesina tot incorporant efectes tèrmics i magnetohidrodinàmics a una generalització del principi variacional de Lebon i Lambermont, amb aplicació a la magnetohidrodinàmica, aleshores molt en voga per l'interès en fusió nuclear. El meu director de tesi em va insinuar que em podria resultar de profit anar a un curs breu sobre termodinàmica al Centre International des Sciences Mécaniques (CISM) a la ciutat d'Udine, al nord d'Itàlia. Va ser la meva primera sortida relacionada amb la ciència. A l'aeroport i durant el vol, vaig estar rellegant el llibre de Truesdell sobre termodinàmica racional. Em va confondre una mica, però em va resultar molt excitant veure les crítiques de fons entre les dues grans línies de pensament en termodinàmica: la basada en les idees d'Onsager i de Prigogine, fonamentada en la hipòtesi de l'equilibri local i interessada en la producció d'entropia i en les estruc-

tures dissipatives, i la de l'escola americana de termodinàmica racional de Coleman, Truesdell i Noll, de caràcter més matemàtic i més atent a analogies amb la mecànica racional i al desenvolupament dels aspectes no lineals de les lleis de transport. Veure que en el nivell fonamental hi havia un debat tan viu, tan intens, va fer que el camp de la termodinàmica de no-equilibri em resultés encara més atractiu.

La breu estada a Udine, d'una setmana, em permeté conèixer nous aspectes d'Itàlia. Allà vaig conèixer l'existència del friülà, llengua que, segons vaig saber, havia utilitzat Pier Paolo Pasolini, el cineasta, assagista, poeta i polemista llavors molt en voga. Vaig comprar un llibre de poesia seu i un altre de Cesare Pavese. Em va sorprendre que Pasolini cités Manuel Bertran i Oriola, l'obra del qual vaig anar descobrint posteriorment, però que coneixia de nom. Passejar per Udine, descobrir la figura de Giambattista Tiepolo, nascut a la ciutat, em va resultar molt interessant. Vaig aprofitar la relativa proximitat de Venècia per fer-hi una estada de sis dies. Va ser una experiència intensíssima, de la qual va sortir el meu llibre de poemes *Diminuta imatge*, que va rebre el Premi de Poesia Martí Dot de Sant Feliu de Llobregat de 1977, i que ha tingut quatre edicions. Descobrir Venècia va ser fascinant i angoixant. No havia tingut la precaució de reservar un hotel, i els hotels que vaig anar trobant només tenien lloc per a una nit, de manera que cada dia havia de buscar hotel. Recordo especialment els vespres al canal de la Giudecca, recapitulant en el pensament les experiències del dia.

A les nits, als hotels diversos on m'allotjava, anava llegint *La nausée*, de Jean-Paul Sartre i, en el viatge de retorn, el llibre *The tragicomedy of classical thermodynamics*, que havia comprat a Udine, en què Truesdell, amb la seva acidesa intel·ligent però iconoclasta i una mica estèril, furgava en les inconsistències matemàtiques de les formulacions clàssiques de la termodinàmica, especialment per part de Rudolf Clausius i William Thomson (posteriorment, Lord Kelvin). El llibre em semblà exagerat en molts punts, però em va descobrir l'atractiu del vessant crític de la història de la ciència, no pas basat en les biografies dels personatges sinó en l'anàlisi profunda i crítica de les seves obres.

### 3.2. LES GRANS LLEIS DE LA TERMODINÀMICA

Després d'aquesta introducció personal, parlaré de les quatre lleis de la termodinàmica i de la seva estructura epistemològica. Les dues grans lleis o principis de la termodinàmica són la primera llei, de la conservació de l'energia, i la segona llei, de la degradació de l'energia o de l'augment de l'entropia. Les magnituds essencials de la termodinàmica són la temperatura absoluta  $T$ , la calor  $Q$ , l'energia interna  $U$  i l'entropia  $S$  dels sistemes. Pot sorprendre, a primera vista, que siguin compatibles les idees de conservació i de degradació d'una mateixa magnitud. De fet, la tensió entre les idees de conservació i de canvi ja venen des dels temps dels



filòsofs presocràtics: Parmènides i la permanència, Heràclit i el canvi. D'aquesta tensió teòrica, i no pas de cap observació experimental, va néixer el concepte d'àtom indivisible i indestructible i la visió corpuscular de la matèria dels filòsofs Demòcrit, Epicur i Lucreci. Aquesta oposició conceptual ha impregnat també la història de l'art —continuar?, innovar?— i de la política —conservar?, canviar?

En el cas de l'energia, el que es conserva és la quantitat i el que varia és la qualitat. Aquesta idea no és exclusiva de l'energia: per exemple, la quantitat de marbre de què va ser compost el Partenó original s'ha conservat, però la seva qualitat ha disminuït, perquè els fragments del Partenó s'han anat dispersant en museus i en pols o perquè ha reaccionat químicament amb l'aire i amb els contaminants i s'ha degradat.

Establir la conservació de l'energia no va ser fàcil. Durant segles —des de la teoria dels quatre elements del segle v aC— es va pensar que la calor és un fluid subtil i imponderable que passa de calent a fred, i que s'acumula en el foc, en les flames, en les estrelles i en els cossos calents en general. Aquest fluid, anomenat calòric al segle XIX, va ser considerat un element material en la revolució química de Lavoisier. Tot i que la teoria del calòric es va demostrar errònia, en el sentit que la calor no és una substància, va permetre tres desenvolupaments especialment importants, la teoria de Carnot de les màquines tèrmiques, la teoria de Fourier del transport de la calor i la teoria de Laplace de la propagació del so, que van obrir grans progressos.

Una de les coses que em van sorprendre quan vaig anar aprenent història de la ciència va ser que durant un cert temps els científics es van estar preguntant si tal com la calor era una suposada substància també ho era el fred, de manera que fred i calor fossin dues substàncies diferents amb dinàmiques pròpies. Finalment, es va arribar a la conclusió que era suficient utilitzar una sola substància per a la calor, i suposar que el fred no existeix. Això em va fer pensar en l'afirmació d'alguns teòlegs que només existeix el bé, mentre que el mal és una absència de bé. A molta gent, aquesta afirmació els sembla una manera precària de sortir del pas davant el gran problema del mal, que patim amb tanta evidència i crueltat, però, certament, l'absència de calor en les situacions molt fredes també produeix dolor i mort. L'absència de bé —tal com l'absència de calor o d'oxigen— pot matar. Que el mal sigui una absència de bé potser no és un joc de paraules, sinó una realitat que no implica que el mal no sigui destructiu, real i terrible.

El 1824, Sadi Carnot va publicar *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, treball que marcà l'origen pròpiament dit de la termodinàmica, ja que fins aleshores bàsicament s'havia limitat a termometria i estudis de calors específiques i latents. La revolució industrial impulsà Carnot a estudiar teòricament les màquines tèrmiques cíclics, màquines que absorbeixen una calor  $Q_1$  a una temperatura elevada  $T_1$ , cedeixen

una calor  $Q_2$  a una temperatura més baixa  $T_2$  i converteixen en treball mecànic o elèctric  $W$  la diferència entre la calor absorbida  $Q_1$  i la calor cedida  $Q_2$ . Carnot imaginà aquest procés com una cascada de calòric entre les temperatures  $T_1$  i  $T_2$ , anàloga a una cascada d'aigua que produeix treball en un molí, i en va calcular el rendiment màxim. El rendiment físic està definit com  $\eta = W/Q_1$ . Observem que per a definir el rendiment econòmic hauríem de multiplicar el numerador pel preu al qual venem la unitat energètica del treball, i el denominador pel preu al qual comprem la unitat energètica de calor; això, sense comptar altres costos econòmics com ara l'amortització de les màquines o la retribució del personal. Em sembla convenient fer aquest advertiment per a fer notar que els resultats sobre el rendiment físic són només una part d'un problema més subtil i complicat, en què els preus de venda del treball, de compra del combustible o de la remuneració dels treballadors ja no són de la incumbència de la física. És una cura d'humilitat per als qui creuen que la física té respostes per a tot.

Carnot va deduir que el rendiment màxim de la màquina cíclica no depèn del material utilitzat en les compressions i dilatacions de la màquina (vapor d'aigua, vapor d'alcohol, aire sec, aire humit o el que sigui), sinó tan sols de les temperatures màxima i mínima, i que el valor del rendiment màxim és

$$\eta_{\max} = 1 - (T_2/T_1). \quad (3.1)$$

Aquesta expressió indica que per a augmentar el rendiment convé emprar temperatures màximes tan elevades com sigui possible, no tan sols en màquines tèrmiques sinó també en motors de combustió interna. Des de les reflexions teològiques, pot resultar interessant la idea que un enginyer perfecte no pot aconseguir el cent per cent de rendiment, sinó com a màxim el rendiment de Carnot. Sense un coneixement de la segona llei, es podria esperar que una màquina perfecta aconseguís un cent per cent de rendiment. Si en saps més, però, t'adones que aquesta perspectiva és errònia i que alguna cosa subtil limita el rendiment. Així, un rendiment limitat no implica necessàriament la inexistència de perfecció, sinó que cal repensar el concepte de perfecció des d'un punt de vista més informat i realista.

Fins a mitjans del segle XIX no es va concloure que la calor no és una substància sinó un bescanvi d'energia interna. A més de les energies cinètica i potencial de la mecànica i de l'electroestàtica, es va introduir el concepte d'una energia interna, o energia tèrmica, relacionada amb la temperatura. L'energia total es conserva, i la variació de l'energia interna d'un sistema és la suma dels treballs fets sobre el sistema —treball mecànic, químic, elèctric, magnètic...— més la calor comunicada al sistema. En termes matemàtics, la llei s'enuncia com

$$dU = d'W + d'Q, \quad (3.2)$$

on  $U$  és l'energia interna del sistema i  $dU$  el seu canvi en un procés infinitesimal,  $d'W$  és el treball fet sobre el sistema i  $d'Q$  la calor subministrada al sistema durant el procés infinitesimal. La diferència entre els símbols  $d$  i  $d'$  és que  $dU$  és la variació d'una magnitud que només depèn dels estats inicial i final. En canvi,  $d'W$  i  $d'Q$  depenen del camí seguit entre l'estat inicial i el final.

El segon principi també fou formulat a la meitat del segle XIX, per Clausius i per Lord Kelvin. Carnot havia obtingut els seus resultats sobre el rendiment màxim de la transformació entre calor i treball en el marc de la teoria del calòric. Quan es va intentar obtenir-los en el marc de la conservació de l'energia, es va veure que calia una segona llei, ja que amb la primera llei no n'hi ha prou per a obtenir el valor màxim del rendiment.

Efectivament, la conservació de l'energia permet que la calor passi de calent a fred o de fred a calent, i que una pedra caigui i quedi a terra o que una pedra del sòl agafi energia del sòl i salti espontàniament cap enlaire. Però el pas espontani de calor des de fred cap a calent no s'observa, ni s'observen salts espontanis de les pedres cap amunt. Així, amb el primer principi no en tenim prou per a descriure el que en realitat s'observa, i cal un segon principi que restringeixi les possibilitats permeses pel primer principi però que mai no són observades.

Rudolf Clausius va formular el segon principi tot afirmant que la calor no passa espontàniament de fred a calent —passa de fred a calent en els refrigeradors i les neveres, però no pas espontàniament sinó gràcies al treball elèctric o mecànic de l'aparell refrigerador. Lord Kelvin va enunciar el principi un parell de mesos després de Clausius, establint que és impossible una màquina tèrmica cíclica que transformi completament calor en treball. Es pot demostrar que aquestes dues formulacions són equivalents, tot i que la primera sigui més directa i intuïtiva.

El 1865, Clausius va aconseguir sintetitzar aquests enunciat aparentment qualitatiu i particulars en un enunciat quantitatiu i abstracte, tot definint una nova funció d'estat  $S$ , l'entropia, relacionada amb la calor rebuda pel sistema dividida per la temperatura absoluta, és a dir,

$$dS = d'Q_{\text{rev}}/T, \quad (3.3)$$

on  $d'Q_{\text{rev}}$  és la calor subministrada reversiblement al sistema durant el procés i  $T$  és la temperatura absoluta de la font que subministra la calor al sistema.

En aquests termes, l'enunciat del segon principi afirma la impossibilitat que en un sistema aïllat l'entropia disminueixi. Només són possibles processos que no suposin variació de l'entropia total del sistema (processos reversibles) o processos que facin augmentar l'entropia total (processos irreversibles), és a dir, només són possibles els processos en què la diferència  $\Delta S$  de l'entropia final menys la inicial satisfaci

$$\Delta S > 0 \text{ (irreversible) o } \Delta S = 0 \text{ (reversible)}. \quad (3.4)$$

En canvi, els processos amb  $\Delta S < 0$  no són possibles en un sistema aïllat. Si es vol realitzar un procés que disminueixi l'entropia cal fer un treball sobre el sistema. El treball mínim és  $W_{\min} = -T\Delta S$ , amb  $\Delta S$  la variació (negativa) d'entropia. Clausius, dut per una certa eufòria globalitzadora, va enunciar les lleis de manera còsmica: l'energia de l'Univers és constant, l'entropia de l'Univers augmenta. En sistemes no aïllats, a temperatura i volum constant, el segon principi es pot formular en funció de la variació de l'energia lliure  $\Delta F$  del sistema, donada per  $\Delta F = \Delta U - T\Delta S$ , que ha de ser negativa o nul·la. Veiem que hi competeixen una tendència a reduir l'energia interna  $U$  i una tendència a augmentar l'entropia  $S$ . Vaig traduir al català els *Escrits fonamentals sobre el segon principi de la termodinàmica* en la col·lecció «Clàssics de la Ciència», amb els treballs esmentats de Carnot, Clausius i Lord Kelvin.

Extrapolada al cosmos, la segona llei ve a dir que tard o d'hora les estrelles s'apagaran i l'Univers es quedarà sense vida, situació coneguda com a mort tèrmica de l'Univers. Amb l'astrofísica que coneixem avui, la situació és una mica més complicada, perquè moltes estrelles no acaben apagant-se lentament, sinó amb una explosió violenta. A més, poden anar formant-se estrelles noves, però la capacitat que les galàxies formin estrelles noves va disminuint amb el temps, a mesura que hi augmenta el contingut en heli, liti i berilli, que tenen dues, tres o quatre càrregues elèctriques i es repelleixen més que els ions d'hidrogen. La realitat, però, és que tard o d'hora la vida s'acabarà a la Terra (dintre d'uns quatre mil milions d'anys) no per apagament del Sol, sinó perquè el Sol s'expandirà i desprendreà tanta calor que farà evaporar els oceans i fondrà les roques. Més endavant, s'acabarà la formació d'estrelles noves i la vida s'acabarà a l'Univers, tal com ho afirmava la teoria de la mort tèrmica, però a una escala temporal molt més llarga, d'uns cinquanta mil milions d'anys, en lloc d'uns cent milions d'anys, com pensaven els físics de finals del segle XIX. La idea de la mort tèrmica de l'Univers va cridar l'atenció de molts intel·lectuals, com ara Oswald Spengler i Miguel de Unamuno —que en parla diverses vegades a *Del sentimiento trágico de la vida*. Charles Darwin, en la seva autobiografia, comenta com el va afectar la idea de la mort tèrmica de l'Univers, que tancava la porta a una evolució biològica indefinida en el temps, que obriria per sempre noves possibilitats de vida.

Tot i que originalment l'entropia va ser definida en termes de calor i de temperatura, el seu paper és molt més ampli. No es refereix tan sols al sentit de la transferència de la calor, sinó també al transport de matèria i d'electricitat, al sentit i a l'abast de les reaccions químiques, a les condicions d'equilibri tèrmic i material... Els estats d'equilibri, en els sistemes aïllats, són els de màxima entropia, ja que, com que no són espontàniament possibles els processos que redueixen

l'entropia, el sistema ja no evoluciona espontàniament un cop assolit l'estat de màxima entropia. Les contribucions de Josiah W. Gibbs, cap a 1890, tot incorporant la composició dels sistemes com a variable termodinàmica i definint els potencials químics dels diversos components, foren molt importants per a l'aplicació de la termodinàmica a la química física.

L'energia interna i l'entropia són dues funcions essencials en la formulació del primer i del segon principi. El concepte d'energia té una correspondència microscòpica clara: per exemple, en un gas, l'energia interna d'un estat pot ser interpretada com el conjunt de les energies cinètiques del moviment desordenat de les partícules i de l'energia potencial d'interacció entre elles. La visió microscòpica de l'entropia, però, resulta més subtil. El primer a fer-ne una proposta general consistent va ser Ludwig Boltzmann, el 1872, en el context de la teoria cinètica dels gasos, iniciada cap a 1850 per Rudolf Clausius, Roger Joseph Boscovich i James Clerk Maxwell. L'entropia pot ser interpretada microscòpicament en termes del grau de «desordre molecular» del sistema. L'entropia  $S$  d'un estat macroscòpic d'un sistema es pot relacionar amb el nombre  $W$  de microestats del sistema compatibles amb el macroestat considerat com

$$S = k_B \ln W, \quad (3.5)$$

on  $k_B$  és la constant de Boltzmann, que és la constant dels gasos ideals dividida pel nombre d'Avogadro. De fet, en els seus estudis de teoria cinètica dels gasos, Boltzmann utilitzà per a l'entropia una expressió relacionada amb la funció de distribució de probabilitat de la velocitat de les partícules, i va demostrar que en la dinàmica de les col·lisions entre les partícules —descrita per l'equació de Boltzmann— aquella funció sempre augmentava. Boltzmann va rebre moltes crítiques per aquella demostració, ja que semblava impossible que d'una mecànica reversible en pogués sorgir una funció amb comportament irreversible. De mica en mica, s'anà comprénent que aquest pas de reversible a irreversible en la teoria es devia al fet que Boltzmann no considerava tan sols la mecànica pura, sinó que suposava que les correlacions entre partícules es perdien després de cada col·lisió.

La relació entre entropia i desordre, i l'afirmació que els sistemes tendeixen cap al desordre molecular, suscità durant molts anys malentesos considerables amb la biologia. En efecte, en els processos de desenvolupament d'un embrió o, a més gran escala temporal, en l'evolució biològica, els sistemes biològics, en lloc de tendir al desordre i l'homogeneïtat, es van diferenciant i es van fent més complexos. Sembla que hi hagi una oposició entre la termodinàmica i la vida, i que la vida no segueixi les lleis de la termodinàmica. De fet, no és així, ja que els sistemes biològics no són sistemes aïllats, de manera que poden reduir la seva entropia i augmentar el seu ordre intern si produeixen un augment d'entropia més gran en

l'ambient. Una manera de fer-ho és mitjançant el metabolisme: les cèl·lules ingereixen aliments formats per molècules llargues i excreten residus formats per molècules curtes. Però una molècula llarga està més ordenada que no pas el conjunt de molècules curtes en què es trenca, cadascuna de les quals passa a moure's independentment de les altres. Aquest argument explica la compatibilitat entre la segona llei i la biologia, però no aclareix quins mecanismes produeixen la diferenciació i l'estructuració. Per a atansar-se a una resposta a aquesta qüestió, calen la termodinàmica fora de l'equilibri i la teoria de les estructures dissipatives.

El 1945, l'enginyer Claude Shannon, el popularitzador del concepte de bit o quàntum d'informació, va relacionar entropia amb informació i, posteriorment, entropia amb complexitat. Podem definir la complexitat d'un estat d'un sistema en funció de la quantitat d'informació (nombre de bits) necessària per a descriure'l. La relació entre entropia i desordre no és immediata, i ha de ser tractada amb subtilesa. Un estat molt desordenat, com ara un gas, no és necessàriament un estat molt complex: tot establint que les posicions i les velocitats de les partícules són triades a l'atzar, no cal donar més informació per a atansar-se a una descripció acurada i significativa —tot i que no pas exacta— del sistema. Tampoc un sistema completament ordenat, com ara un cristall, no és complex: n'hi ha prou a especificar amb quina periodicitat espacial es repeteixen les posicions d'equilibri de les partícules.

La relació entre informació i entropia és important en la termodinàmica dels ordinadors. En efecte, quan s'esborra informació es produeix entropia, que s'elimina del sistema en forma de calor. La capacitat dels superordinadors està actualment limitada per la gran quantitat de calor que produeixen per unitat de volum, a mesura que ha augmentat la miniaturització dels seus constituents i s'han pogut introduir més xips i més ràpids en volums més petits, dels quals és més difícil extreure la calor. En els grans ordinadors, més de la meitat del consum d'energia elèctrica es dedica, no pas a les operacions en si, sinó a la refrigeració de l'ordinador per tal que no es fongui, ja que la calor produïda per unitat de volum és gairebé comparable a la densitat de calor produïda per reaccions nuclears en les zones actives de les estrelles.

He parlat d'estrelles i d'ordinadors, sistemes molt calents, però la termodinàmica també s'interessa per sistemes molt freds. En aquest context, té una gran importància el tercer principi o tercera llei de la termodinàmica, proposat el 1906 a Berlín per Walter Nernst, un prestigiós especialista en química física i química industrial, per tal de millorar l'aplicació de la termodinàmica a les reaccions químiques. El tercer principi es pot enunciar dient que, quan la temperatura absoluta tendeix a zero, l'entropia també tendeix a zero. Una altra manera de formular-lo és dient que el zero absolut és inaccessible. Una de les conseqüències d'aquests enuncisats és que les calors específiques han de tendir a zero quan la temperatura

absoluta tendeix a zero. Això ens porta a un episodi important de la rellevància de la termodinàmica en els orígens de la física quàntica.

Efectivament, segons la teoria estadística clàssica, la calor específica dels cristalls hauria de ser una constant. Ara bé, la calor específica, en lloc de ser constant, disminueix a mesura que disminueix la temperatura, per a temperatures prou baixes. El 1907, Einstein va aplicar la teoria quàntica a aquests sistemes, i va suposar que, així com l'energia de les oscil·lacions electromagnètiques de la radiació estan quantitzades, de manera que la seva energia ha de ser un múltiple de  $hf$ , on  $h$  és la constant de Planck i  $f$  la freqüència de la radiació corresponent, el mateix hauria de passar amb les oscil·lacions mecàniques i, en particular, amb l'energia de les oscil·lacions dels àtoms del cristall a l'entorn de les seves respectives posicions d'equilibri. Combinant aquesta idea amb els procediments de la física estadística, s'obté que la calor específica dels sòlids ha de tendir a zero quan la temperatura tendeix a zero, però que, a temperatures de l'ordre de la temperatura ambient i superior, els efectes quàntics ja no són visibles i es recupera el valor clàssic. Aquesta idea va ser treballada i millorada en diversos detalls per Debye. Aquesta teoria explica per què la calor específica dels sòlids tendeix a zero. Per a poder explicar aquest fenomen en gasos, va caldre esperar fins a la publicació d'un treball d'Einstein de 1917, inspirat per un treball del físic indi Satyendra Nathan Bose.

El treball d'Einstein va fer que la física quàntica deixés de ser una teoria limitada a la radiació electromagnètica, i esdevingués aplicable a la matèria, no tan sols als cristalls sinó a qualsevol mena d'oscil·lació o rotació, com les que hi ha en les molècules diatòmiques o les dels electrons en els àtoms. Això va obrir el camí a l'aplicació de les idees quàntiques a la física atòmica i la física molecular i, posteriorment, a la física nuclear. Un factor que va contribuir a l'expansió molt ràpida d'aquestes idees va ser l'interès de Nernst, que estava buscant arguments per a fonamentar el tercer principi de la termodinàmica i, en particular, el comportament de la calor específica a baixes temperatures. Quan Nernst va descobrir el treball d'Einstein va quedar impressionat i es va adonar que el tercer principi tenia els seus orígens profunds en la física quàntica. Per això va dedicar a la física quàntica el primer Congrés Solvay a Brusselles, de 1911, organitzat per ell i finançat pel magnat Ernest Solvay, al qual van ser invitades una vintena de les principals figures europees de la física i la química.

La física a molt baixes temperatures, diguem que sota els dos kèlvins, és un dels grans camps on es manifesten més espectacularment tota una sèrie d'efectes de la física quàntica, especialment la condensació de Bose-Einstein, la superconductivitat i la superfluïdesa. En parlarem en el capítol 12.





## 4. Una introducció a la termodinàmica fora de l'equilibri

He comentat que, així com la termodinàmica de l'equilibri semblava un camp conceptualment madur, ben definit i ja tancat, en el qual només calia esperar noves aplicacions però no pas noves idees fonamentals, l'aplicació de la termodinàmica a estats de no-equilibri plantejava, cap a 1970, i continua plantejant avui, una sèrie de problemes oberts que afecten els conceptes i les lleis més bàsiques de la termodinàmica.

Les situacions bàsiques que estudia la termodinàmica de fora de l'equilibri són l'evolució temporal dels sistemes termodinàmics fins a un estat d'equilibri i el comportament dels estats estacionaris fora de l'equilibri, les propietats dels quals són independents del temps, però en els quals va entrant una quantitat de calor o de massa per unitat de temps igual a la quantitat de calor o de massa que en va sortint per unitat de temps.

Podríem fer una analogia entre aquestes dues situacions i una barca en un port. Si està en bones condicions, la barca sura: el seu pes és contrarestat per la força d'empenyiment d'Arquimedes i el sistema està en equilibri mecànic. Però si la barca té una via d'aigua, el sistema ja no estarà en equilibri i poden passar dues coses: o bé que l'aigua vagi entrant i la barca es vagi enfonsant —situació dinàmica—, o bé que una bomba vagi traient l'aigua que va entrant i mantingui la barca sense enfonsar-se —situació estacionària. En el primer cas, la pregunta d'interès seria amb quin ritme la barca es va enfonsant, donat el flux d'aigua que hi va entrant. En el segon cas, la pregunta seria quina potència ha de tenir la bomba per tal d'anar extraient la mateixa quantitat d'aigua que hi va entrant. Les dues situacions esmentades, en termodinàmica de no-equilibri, són anàlogues a aquestes dues situacions: en la primera, ens preguntem per l'evolució del sistema en funció del temps; en la segona, quina quantitat d'energia o de matèria hem d'anar subministrant al sistema per tal que el seu estat no variï amb el temps.

Un altre exemple de sistema en estat estacionari és una cèl·lula en repòs. En les cèl·lules, hi va entrant sodi i en va sortint potassi —a més d'altres ions i substàncies diverses, que, per simplificar, no esmentaré. Per tal que la cèl·lula es pugui mantenir en l'estat estacionari cal que expulsi el sodi que hi va entrant i recuperi el potassi que en va sortint, cosa que fa la bomba de sodi i potassi, la qual funciona tot consumint trifosfat d'adenosina (ATP) com a combustible. La vida, doncs, fins i tot la cèl·lula més simple, és fora de l'equilibri, i cal energia per a mantenir-la —energia metabòlica en el cas de la vida. L'equilibri és la mort. El repòs biològic no és un estat d'equilibri, sinó un estat estacionari fora de l'equilibri.

#### 4.1. LA DINÀMICA DELS SISTEMES I LES EQUACIONS DE TRANSPORT

Per a descriure l'evolució temporal d'un sistema termodinàmic calen les equacions de balanç de la massa, la càrrega elèctrica, la quantitat de moviment i l'energia interna, i les seves equacions de transport de calor, massa, electricitat i quantitat de moviment. Per a referir-nos a situacions senzilles, pensem en l'evolució d'un objecte a una certa temperatura dintre d'un medi amb una temperatura diferent. Segons la llei de la conservació de l'energia (3.1), la variació de l'energia interna total del sistema és la suma de la calor que li subministrem a través de la superfície més el treball de compressió o de dilatació que es fa sobre ella.

Suposem que el sistema no es dilati ni es contregui, de manera que sobre ell no es faci treball d'expansió ni de contracció. En aquest cas, la variació d'energia interna del sistema és igual a la calor absorbida o cedida a través de la seva superfície. Si l'energia interna només depèn de la temperatura  $T$ , la variació d'energia interna  $dU$  serà igual a  $CdT$ , on  $C$  és la capacitat calorífica del sistema. La capacitat calorífica és la calor específica per unitat de massa  $c$  del sistema, multiplicada per la seva massa total  $M$ . Així, la variació de l'energia és

$$C dT/dt = cM dT/dt = dQ/dt, \quad (4.1)$$

on  $Q$  és la calor bescanviada a través de la superfície (calor que, si és absorbida pel cos, tindrà signe positiu i farà que la temperatura augmenti, i que, si és cedida, tindrà signe negatiu i farà que  $T$  disminueixi).

Isaac Newton, el 1701, va proposar una expressió matemàtica per al ritme de la calor cedida per unitat de temps, suposant que és proporcional a l'àrea  $A$  de la superfície del cos i a la diferència de temperatures del cos,  $T$ , i de l'ambient  $T'$ . Així, va escriure

$$c\rho V dT/dt = -KA d(T - T')/dt. \quad (4.2)$$

Aquí,  $\rho$  és la densitat de massa del cos,  $V$  el seu volum,  $K$  un coeficient d'intercanvi tèrmic, i el signe menys del terme de la dreta indica que si  $T$  és més gran que  $T'$  el cos perd calor, i que si  $T$  és més petit que  $T'$  el cos absorbeix calor. Si suposem que  $c$ ,  $\rho$ ,  $V$ ,  $K$  i  $A$  són constants, l'expressió (4.2) porta a un decreixement exponencial de  $T - T'$ , de manera que la temperatura  $T$  del cos tendeix al valor de la temperatura de l'ambient, suposant que l'ambient és tan gran que rebre o cedir calor no en modifica la temperatura. Altrament, cal tenir en compte aquest escalfament o refredament, de manera que  $T'$  també varia i la temperatura final d'equilibri no és la  $T'$  inicial sinó un valor entre la  $T$  i la  $T'$  inicials.

El temps característic que triga a arribar-se a l'equilibri és de l'ordre de  $c\rho V/K A$ , de manera que, com més petita sigui la calor específica o més gran sigui el coeficient  $K$  d'intercanvi tèrmic, més ràpidament s'arribarà a l'equilibri. Anàlogament, si considerem dos objectes d'un mateix material però de grandària diferent, el cos més gran tindrà un volum més gran i tardarà més a arribar a l'equilibri. Per exemple, si els cossos tenen forma esfèrica, la seva superfície és proporcional a  $R^2$ , el cub del radi, i la seva àrea és proporcional a  $R^2$ , el quadrat del radi, de manera que el temps per a arribar a l'equilibri és proporcional a  $R$ .

Aquesta equació s'aplica a molts casos: quan traiem un tomàquet o una ampolla de llet de la nevera i els deixem a la cuina en contacte amb l'aire ambient, el tomàquet o la llet arribaran, al cap d'un cert temps, a la temperatura ambient, tot seguint l'evolució dictada per l'equació (4.2). Si traiem un tomàquet i un meló de la nevera, el tomàquet, més petit que el meló, tardarà menys a arribar a la temperatura ambient.

La motivació de Newton per a estudiar fenòmens de refredament estava relacionada amb el seu interès per les propietats físiques dels materials, interès que el va fer aplegar una bona quantitat de llibres d'alquímia —entre els quals alguns d'atribuïts a Ramon Llull—, perquè era en aquests llibres on podia trobar estudis sobre la matèria. Una de les coses que interessaven Newton era el punt de fusió dels diversos metalls i aliatges, però la temperatura a la qual es produeix aquesta fusió és molt superior a la que podien mesurar els termòmetres de la seva època. Així, doncs, tingué la idea d'escalfar fins a fer tornar roent un gran cub de ferro, i de posar damunt seua petites mostres de plom, de plata, de coure, de bronze de diverses composicions... Aquestes mostres petites de seguida s'escalfaven i es fonien. En deixar refredar el cub de ferro, les petites mostres s'anaven solidificant quan la temperatura del cos baixava per sota de la temperatura de fusió dels materials respectius. Com que l'equació (4.2) permet calcular la temperatura  $T$  en funció del temps de refredament, Newton va poder determinar les temperatures de fusió de diversos materials en funció del temps transcorregut entre el moment en què el bloc de ferro havia sortit del forn i el moment en què cada mostra es començava a solidificar. Els valors que va trobar no van resultar gaire acurats perquè (4.2) no té en compte l'intercanvi tèrmic per radiació.

Una altra aplicació interessant d'aquest raonament la va fer el naturalista francès Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon, cap a 1750, per a calcular l'edat de la Terra. Abans d'ell, els càlculs de l'edat de la Terra s'havien fet tot sumant les edats dels patriarques de la Bíblia, i combinant aquesta informació amb l'interval temporal entre esdeveniments d'altres cultures. Entre d'altra gent, Newton havia fet aquests càlculs, que el duïen a concloure que l'Univers havia començat l'any 4004 aC, data més o menys acceptada a l'època, compatible amb les narracions bíbliques de la Creació. Ara bé, hi ha una sèrie de fenòmens geològics —entre els quals la formació de capes de sediments d'un gruix considerable, o la formació de cadenes muntanyoses d'una certa alçària— que demanen unes escales temporals molt més llargues. Buffon tingué la idea d'escalfar una esfera massissa de ferro de, posem, un metre de diàmetre, fins a gairebé el punt de fusió, i va observar quant tardava a refredar-se fins a la temperatura ambient. Com que el temps característic de refredament és proporcional al radi de l'esfera, va fer la correcció corresponent i va obtenir per a la Terra —suposant que hagués començat com una massa de ferro gairebé fos— una edat de l'ordre d'uns cent mil anys. Aquests estudis van ser refinats posteriorment per Lord Kelvin, que vingué a corroborar, amb petites correccions, una edat de la Terra d'aquest ordre. Això suposava una manera nova de calcular l'edat de la Terra, independent de la Bíblia i dels processos geològics. L'edat que s'obtenia era molt més llarga que la de la interpretació literal de la narració bíblica, però molt més curta de la que calia per a certs fenòmens geològics. També era una edat massa petita per a poder admetre la teoria darwiniana de l'evolució biològica, que necessita milions d'anys, de manera que aquesta mena de càlculs termodinàmics suposaren un problema greu per al darwinisme. Molts anys després, ja descobert el fenomen de la radioactivitat i observat que la matèria radioactiva desprèn molta calor, es va comprendre que per a calcular tèrmicament l'edat de la Terra cal incloure en el balanç tèrmic la producció interior de calor dels seus materials radioactius. Mesures basades en radioactivitat van portar cap a 1940 a la conclusió que l'edat de la Terra és d'uns 4.500 milions d'anys.

El fet que el temps de refredament o d'escalfament sigui proporcional al radi d'un objecte també té conseqüències biològiques, ja que indica que en els ambients freds convé que hi hagi animals grans, de manera que no perdin massa ràpidament la calor metabòlica que produeixen.

Si combinem el cicle de Carnot amb la llei de transferència de calor de Newton, apareix una manera més acurada i general de reflexionar sobre el rendiment i la potència de les màquines tèrmiques. El rendiment de Carnot de l'expressió (3.1) val per a processos reversibles, en els quals la calor flueix entre sistemes a la mateixa temperatura, és a dir, amb un ritme lentíssim, de forma que no es produeix entropia. Però en la vida real necessitem fer el treball en un temps donat, abans d'un cert termini temporal. Això vol dir que ens cal que el cicle de Carnot tingui

lloc en un temps finit, i no pas infinit. Per a aconseguir-ho, cal que hi hagi una certa diferència de temperatura entre la font calenta a temperatura  $T_1$  que subministra la calor i la temperatura  $T'_1$  a la qual es troba la substància de treball i, en cedir la calor restant, la temperatura  $T_2$  de la font freda ha de ser més petita que la temperatura  $T'_2$  de la substància de treball. Com més grans siguin les diferències entre les fonts tèrmiques i la substància de treball, més ràpidament fluirà la calor i menys durarà el cicle, però més gran serà la producció d'entropia i menys rendiment tindrà el cicle.

Sorgeix, doncs, una tensió entre potència —que demana un cicle relativament breu— i rendiment —que demana un cicle tan llarg com sigui possible. Quan es calcula la potència i el rendiment en funció de la durada del cicle per a unes temperatures  $T_1$  i  $T_2$  donades, es veu que per a durada infinita el rendiment és el màxim possible —el rendiment de Carnot (3.1)—, però la potència és nul·la, i que si la durada es va reduint la potència va augmentant, fins a un cert màxim, però el rendiment es va reduint (vegeu la figura 1). El rendiment a màxima potència és

$$\eta_{\max P} = 1 - (T_2/T_1)^{1/2}, \quad (4.3)$$

que és inferior al rendiment de Carnot. Per exemple, si  $T_1 = 600$  K i  $T_2 = 300$  K, el rendiment de Carnot és del 50 per cent, mentre que el rendiment a màxima potència és del 29 per cent. Els rendiments donats per (4.3) són més propers als de les màquines tèrmiques o les centrals tèrmiques reals. Una persona que només conegui la termodinàmica de l'equilibri jutjarà el rendiment de la central tot comparant-lo amb el rendiment de Carnot (3.1), i pensarà que la central és molt millorable. En canvi, una persona que conegui la termodinàmica fora de l'equilibri jutjarà la central comparant-ne el rendiment amb l'expressió de màxima potència (4.3) i veurà que la central no funciona tan malament com creia la persona que ignorava el factor temporal.

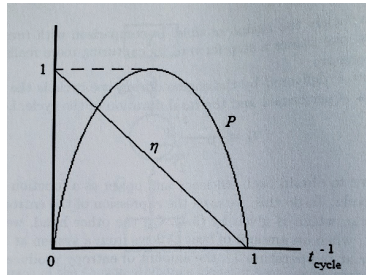


FIGURA 1. Potència  $P$  i rendiment  $\eta$  d'un cicle de Carnot en funció del recíproc de la durada del cicle.

FONT: G. LEBON, D. JOU i J. CASAS-VÁZQUEZ (2008), *Understanding non-equilibrium thermodynamics: Foundations, applications, frontiers*, Berlín, Springer.

Això invita a reflexionar sobre el valor del temps i els inconvenients de la pressa. Si tenim pressa i volem resultats a curt termini, el rendiment és més petit i el malbaratament de combustible és més gran. Per a velocitats superiors a la de la potència màxima, no tan sols es redueix el rendiment sinó fins i tot la potència, de manera que ja no hi ha cap pretext per anar tan ràpid: no s'hi guanya ni en rendiment ni en potència. Això, també ajuda a reflexionar sobre un aspecte de la tensió entre economia i ecologia. En principi, una gestió més ecològica voldria menys residus i més aprofitament del combustible, però això redueix la potència. Una visió molt economicista voldria la màxima potència i guanyar el màxim possible en poc temps. La realitat és més complexa, i cal pensar en situacions intermèdies. Si el combustible és barat i el treball es pot vendre car, es guanyarà més si es treballa a màxima potència. Ara bé, si el combustible és car i el treball s'ha de vendre a preu baix, convindrà treballar a ritme més lent, afavorint l'aprofitament del combustible.

La història de l'estudi de la transferència de calor va fer un gran salt amb el treball de Joseph Fourier, publicat el 1810, en el marc de la teoria del calòric i de les equacions diferencials en derivades parcials. Fourier va imaginar que el transport de calor té lloc com el transport del fluid calòric; com que el ritme de transport d'un fluid és proporcional a la diferència de pressions i inversament proporcional a la distància en què aquestes pressions són aplicades, va proposar que el flux de calor  $q$  (calor transferida per unitat de temps i unitat d'àrea) entre dues zones a temperatures  $T_1$  i  $T_2$  i separades una distància  $L$  és proporcional a  $(T_1 - T_2)/L$ . En forma diferencial, aquesta llei s'expressa com

$$q = -\lambda \text{ grad } T = -\lambda \partial T / \partial x, \quad (4.4)$$

essent  $\lambda$  la conductivitat tèrmica del material i grad el gradient —ritme de variació respecte de la posició en l'espai. Si  $\lambda$  és gran, com ara en els metalls, el material transporta bé la calor; si  $\lambda$  és petita, com en la fusta, el suro o l'aire sec, el material és mal conductor de la calor i pot utilitzar-se com a aïllant.

Quan toquem un metall i una fusta a la mateixa temperatura, el metall ens sembla més fred que no pas la fusta. Aquesta impressió dels sentits és falsa, i es deu al fet que el dit que toca el metall perd calor més ràpidament que no pas el que toca la fusta. El que els sentits ens indiquen, més que la temperatura, és el ritme amb què perdem o rebem calor per unitat de temps, indicació que és essencial per a la supervivència. La conductivitat tèrmica de l'aire és unes cent vegades inferior a la de l'aigua. Per això, si posem la mà dos o tres segons dintre d'un forn a 100 graus per treure'n algun objecte la mà no es crema, però si la posem dos o tres segons en aigua bullent, té cremades greus, perquè la calor que li arriba és cent vegades superior a la que li arribaria a través de l'aire.

Si considerem un volum petit l'energia interna per unitat de volum del qual sigui  $u$ , l'equació de balanç d'energia interna s'escriu —en una dimensió— com

$$\partial u / \partial t = -\operatorname{div} \mathbf{q} = -\partial q_x / \partial x, \quad (4.5)$$

on  $\operatorname{div}$  és la divergència —ritme d'entrada de  $\mathbf{q}$  a través d'una superfície tancada infinitesimal. Si tenim en compte que  $du = \rho c \partial T$  i que  $q_x = -\lambda \partial T / \partial x$ , la combinació de (4.4) i (4.5) duu a

$$\partial T / \partial t = (\lambda / \rho c) \nabla^2 T = (\lambda / \rho c) \partial^2 T / \partial x^2, \quad (4.6)$$

on  $\nabla^2$  és l'operador laplacà —divergència del gradient— i el quocient  $\lambda / \rho c$  és la difusivitat tèrmica. L'equació (4.6) s'anomena equació de difusió de la calor, i és un dels tipus essencials del repertori d'equacions de la física matemàtica. La difusió, en general, és un procés que consisteix a escampar per l'espai la calor o la matèria inicialment concentrada en un punt o en una regió petita, fins a distribuir-la homogèniament per tot l'espai accessible. La base microscòpica d'aquest fenomen és el moviment tèrmic aleatori de les partícules.

Entre 1810 i 1820, Fourier feu innovacions matemàtiques importants per resoldre aquesta mena d'equacions —les anomenades transformades de Fourier—, que des de llavors han estat molt utilitzades en molts dominis de la física i de les matemàtiques. La idea essencial d'aquestes transformacions rau a descompondre una funció qualsevol en una suma o una integral d'ones sinusoidals, el tractament matemàtic de cadascuna de les quals és fàcil. Així, coneixent els coeficients de la descomposició de la funció en suma d'ones, resulta relativament fàcil resoldre l'equació de Fourier. Aquest recurs matemàtic va molt més enllà de l'equació de Fourier i té un camp d'aplicació molt ampli, en acústica, en òptica i en molts altres camps. L'obra de Fourier culminà amb la publicació de la *Théorie analytique de la chaleur* (1820), una de les obres mestres de la física matemàtica.

Aquesta obra pot ser comparada, en alguns aspectes, als *Philosophiae naturalis principia mathematica* de Newton, de 1687. L'obra de Newton va ser el gran monument matemàtic al món reversible de les òrbites planetàries i el Sistema Solar, entre d'altres coses. L'obra de Fourier fou el monument matemàtic al món irreversible dels bescanvis de calor. De fet, seria més adient comparar el llibre de Fourier amb el *Traité de mécanique céleste* de Pierre-Simon Laplace, de 1825, perquè són contemporanis l'un de l'altre. El llibre de Laplace és hereu del de Newton, amb matemàtiques més avançades, i es planteja problemes que van intrigar Newton, però que no va poder resoldre. Un d'aquests problemes era si les òrbites del Sistema Solar són estables, o bé si les interaccions entre els planetes les podrien pertorbar de manera que els planetes s'escapessin del Sol. Laplace va demostrar que el Sistema



Solar és estable si les pertorbacions no són excessives. També va complementar unes idees del filòsof Immanuel Kant —gran admirador de la física newtoniana— sobre la formació del Sistema Solar a partir d'un disc primigeni de gas indiferenciat, de manera que les forces gravitatòries anessin produint l'agregació de la pols en una gran estrella central i en planetes que orbiten al seu voltant. La formació de sistemes estel·lars és un problema molt actual, ja que des de 1996 s'han descobert molts sistemes planetaris, les estructures dels quals pel que fa a grandàries i distàncies dels planetes a l'estrella són molt diferents de la del nostre Sistema Solar.

Un altre problema que havia intrigat Newton i que Laplace, al cap de segle i mig, va poder resoldre, era el de la velocitat del so. Newton l'havia calculat suposant que la temperatura de l'aire era constant, però trobava un valor un vint per cent inferior al valor observat, cosa que no va saber explicar. Laplace i Siméon Denis Poisson, en el marc de la teoria del calòric, van suposar que el calòric es comprimia i s'expandia amb les ones, de manera que la temperatura de l'aire variava, cosa que porta al valor correcte de la velocitat del so. A més, Laplace va enunciar el que després es va anomenar «el dimoni de Laplace», tot afirmant que un ésser hipotètic que conegués les velocitats i els moviments de totes les partícules de l'Univers i que calculés prou ràpid, seria capaç de llegir tot el futur i tot el passat de l'Univers. Cap a la dècada de 1970, la teoria del caos determinista posà matisos i límits a aquesta afirmació. Laplace, Lagrange, Poisson, Fourier i Cauchy! Quina admiració em produïa i quina enveja em feia aquesta constellació de matemàtics brillants, vista des de la nostra pobra història científica!

Continuem, però, amb els processos de transport. Les idees de Fourier serviren de model per a altres lleis posteriors, com ara la llei de Fick de la difusió de la matèria (1855), que en una dimensió té la forma anàloga a (4.6)

$$\partial c/\partial t = D \nabla^2 c = D \partial^2 c/\partial x^2, \quad (4.7)$$

on  $c$  és la concentració del solut,  $D$  el coeficient de difusió de la matèria i  $\nabla^2$  l'operador laplacà. Si  $D$  és gran, el solut —per exemple, tinta en aigua o llet en cafè— s'escampa ràpidament. Si  $D$  és petit —per exemple, mel en aigua— el solut s'escampa lentament. L'equació de Fick té molta importància en enginyeria química i en biologia. Si tant la concentració com la temperatura són inhomogènies, la matèria i la calor s'aniran escampant pel sistema de tal manera que la difusió de la matèria i la de la calor s'acoblen entre si, donant lloc a fenòmens de termo-difusió o de difusió tèrmica, descrits per les lleis de Dufour i de Soret (1897).

Una altra situació en què hi ha acoblaments entre processos físics diferents és en el transport de calor i d'electricitat. Entre 1820 i 1850, es parlà sovint del fluid calòric i del fluid elèctric, i es van estudiar les seves interaccions, cosa que va dur a la llei d'Ohm de la intensitat del corrent elèctric (1827) i a les lleis de la termo-



electricitat de Seebeck (1821), de Peltier (1834) i de Thomson (1851). Essencialment, els fluxos d'electricitat i de calor no són respectivament proporcionals al gradient de potencial elèctric (Llei d'Ohm) i al gradient de temperatura (Llei de Fourier), sinó que tots dos depenen dels dos gradients. La contribució del gradient de temperatura al corrent elèctric és l'efecte Seebeck, i la contribució del gradient de potencial al flux de calor és l'efecte Peltier. Els coeficients que relacionen ambdós efectes tenen una certa simetria, observada i deduïda per primera vegada per Lord Kelvin el 1851 i deduïda en termes més generals per Lars Onsager el 1931. Actualment, la conversió termoeleèctrica de calor en electricitat és molt estudiada per a aprofitar millor les grans quantitats de calor que es desprenen en molts processos, i hi ha un gran interès a cercar materials amb valors elevats del coeficient de Seebeck i de la conductivitat elèctrica i valors baixos de la conductivitat tèrmica, combinació que augmenta el rendiment de la conversió termoeleèctrica.

#### 4.2. ESTATS ESTACIONARIS DE NO-EQUILIBRI I ESTRUCTURES DISSIPATIVES

Fins aquí hem parlat de l'evolució del sistema en funció del temps. Però també hi ha estats estacionaris en què, malgrat que el sistema no està en equilibri, les seves propietats no depenen del temps. Al començament d'aquest capítol he posat com a exemples d'estats estacionaris de no-equilibri una barca amb una via d'aigua, però amb una bomba que va expulsant l'aigua que hi va entrant —de manera que el nivell de la barca respecte de l'aigua no varia amb el temps—, o una cèl·lula en repòs en la qual va entrant sodi i de la qual va sortint potassi, però el sodi és expulsat i el potassi recuperat per l'acció de la bomba de sodi i potassi. Un altre exemple pot ser un llac on entra un riu que aporta un cert cabal i d'on surt un altre riu que s'enduu un altre cabal. Si el cabal que hi entra és igual al que en surt, el nivell de l'aigua en el llac és constant (estat estacionari); si el cabal d'entrada és més gran que el de sortida (o viceversa) el nivell de l'aigua puja (o baixa, respectivament) en funció del temps.

Una cosa semblant passa en economia: podem tenir un cert capital tancat en una caixa forta, que no puja ni baixa amb el temps —tret de la inflació, que en pot fer baixar el valor—, o podem tenir un compte en què ingresem cada mes una certa quantitat i del qual retirem una altra quantitat. Si la suma mensual dels ingressos coincideix amb la de les despeses, el capital a final de cada mes és el mateix; si els ingressos són més grans que les sortides, el capital creix, i disminueix si passa el contrari. Òbviament, la situació d'equilibri (entrades i sortides nul·les) és ben diferent a la d'ingressar i gastar un flux més o menys gran de diners. Un altre exemple pot ser la població d'una ciutat o d'un país: si la població que hi neix és més gran que la que hi arriba és més gran que la que mor o la que en marxa, la població neta augmenta, i a l'inrevés en cas contrari. Observem que, en els casos de l'economia

i de la població, hi pot haver una producció interior (positiva o negativa) de diners o de gent, deguda als interessos bancaris (positius o negatius) o a la taxa reproductiva de la població (positiva o negativa). Hi ha, doncs, una contribució de les arribades i les sortides, i una contribució de la producció.

En els sistemes físics, l'entropia total del sistema varia segons dues contribucions: el flux net d'entropia (balanç d'entrades i de sortides d'entropia a través de les parets del sistema) i la producció neta d'entropia que, segons la segona llei, ha de ser positiva. En fer la descripció d'un sistema físic simple en estat estacionari, la variació neta d'energia que hi entra i en surt ha de ser nul·la, ja que l'energia es conserva; en canvi, l'entropia que en surt menys l'entropia que hi entra ha de ser igual a l'entropia que s'hi produeix. En processos reversibles, aquesta producció és nul·la; en processos irreversibles, és positiva. Aquesta producció d'entropia indica el ritme amb què l'energia es degrada —energia mecànica, química o elèctrica que es degrada en energia tèrmica, l'aprofitament eventual de la qual ja no ens permetrà recuperar tanta energia com la que s'ha degradat. Aquesta energia tèrmica ha de ser eliminada del sistema en forma de calor —per exemple, en els ordinadors o en les màquines tèrmiques cícliques. Altrament, l'ordinador s'anirà escalfant i alguns circuits es poden fondre. Una altra manera de produir entropia és mitjançant reaccions químiques que, per exemple, trenquin molècules llargues en molècules curtes. En aquest cas, s'expulsarà més entropia de la que entra, en forma de calor i de desordre molecular.

En algunes circumstàncies, si els fluxos a través del sistema superen un cert valor, l'estructura espacial o temporal del sistema es pot modificar. És el que Ilya Prigogine va anomenar estructures dissipatives: estructures estacionàries el manteniment de les quals necessita una aportació contínua d'energia. Una casa en ordre, per exemple, és una estructura dissipativa: cal anar-la netejant i reparant per tal que es mantingui en el seu estat. També ho és un camí de bosc, en què cal anar podant els arbustos que contínuament tendeixen a envair-lo.

Un exemple físic més sofisticat i paradigmàtic són les anomenades cel·les de Bénard en un fluid viscos i escalfat per baix. Si la diferència de temperatures entre baix i dalt és petita, la calor puja per conducció a través del fluid immòbil. Si la diferència de temperatures supera un cert valor crític, i el fluid calent es dilata prou, de manera que l'empenyiment d'Arquimedes superi les forces viscoses, el fluid es posa en moviment. El curiós és que el moviment no és desordenat, sinó que forma uns cilindres paral·lels en què el fluid calent puja, es refreda a dalt, baixa, es torna a escalfar i torna a pujar. O, segons la dependència de la tensió superficial amb la temperatura, el fluid calent que puja forma cel·les hexagonals pel centre de les quals baixa el fluid fred. Si el flux vertical de calor augmenta massa, aquestes estructures desapareixen i els moviments convectius del fluid es fan turbulents i erràtics.

Dintre de la Terra, el magma sobre el qual suren els continents i les plaques tectòniques està escalfat per la calor radioactiva del centre i presenta estructures convectives de formes més complicades, ja que la Terra és gairebé esfèrica i està en rotació. En les zones on el magma puja, es produeixen cadenes muntanyoses volcàniques. El magma, en els seus moviments superficials, arrossega les plaques tectòniques les unes cap a les altres, i en el seu xoc lent es produeixen serralades, o les separa, les unes de les altres, tot distanciant els continents.

Un altre tipus d'estructures dissipatives són les estructures de Turing, nom que ve del matemàtic Alan Turing, que feu contribucions tan importants als inicis dels ordinadors i a la lògica matemàtica. Una cosa que intrigava Turing era com es produeixen les diferenciacions cel·lulars al llarg del desenvolupament d'un organisme i, en particular, com es formen les flors. El tema és molt complex, però la base conceptual més senzilla és tenir en compte reaccions químiques i difusió. Suposem que inicialment tenim un òvul fecundat, que es multiplica en dos, quatre, vuit, setze..., dues-centes cinquanta-sis, cinc-centes dotze cèl·lules. En principi, totes les cèl·lules tenen la mateixa informació biològica en el DNA. Com es comencen a diferenciar? Una possibilitat és que les cèl·lules vagin produint lentament una certa substància que, un cop arribada a una concentració determinada, fa que s'expressin gens que, altrament, no serien expressats. Però per tal que hi hagi diferenciació, aquesta concentració hauria de ser superior a un cert valor crític en un conjunt de cèl·lules i inferior al valor crític en un altre conjunt de cèl·lules. Turing suposà que les cèl·lules van produint una substància mitjançant una reacció autocatalítica, i que aquesta substància es difon entre les cèl·lules, de manera que el sistema és, en principi, homogeni. Si el creixement de la concentració en una zona és més gran que en una altra, la concentració tendeix a igualar-se per difusió. Ara bé, si la concentració supera un cert límit, la producció de la substància creix amb un ritme superior al que es pot bescanviar per difusió i la diferència de concentracions va creixent. Estudis matemàtics permeten veure quina mena d'estructures espacials formen aquestes inhomogeneïtats, bases de la diferenciació genètica posterior. En síntesi, prou a prop de l'equilibri, la difusió guanya sobre les diferències ocasionals dels ritmes de producció i el sistema es manté en situació homogènia, tal com en equilibri. En canvi, si es depassa un cert ritme de producció, les inhomogeneïtats en producció superen les tendències homogeneïtzadores de la difusió i les desigualtats creixen. Situacions semblants a aquestes es troben en economia, en política i en la formació de galàxies.

Prigogine va saber aplegar tots aquests fenòmens —que més que ser purament termodinàmics provenen d'instabilitats d'equacions diferencials dels processos subjacents—, en una visió conceptual del que anomenà estructures dissipatives —heus ací un altre exemple de la importància d'un nom ben trobat per a donar una certa unitat entre sistemes i processos molt diversos.

Prigogine va formar a la Universitat Lliure de Brusselles —i després també a la Universitat de Texas a Austin— un gran grup de gent molt valuosa i diversa —químics, matemàtics, físics i biòlegs— i va saber subratllar els aspectes conceptuals més atractius d'aquestes idees per a la filosofia —especialment la filosofia del temps i de la complexitat, en llibres amb Isabelle Stengers o amb Grégoire Nicolis—, i les seves conseqüències en biologia, química, geologia, economia... Els treballs de l'escola de Brusselles empraven la hipòtesi de l'equilibri local, idea ja estudiada els anys 1930 i 1940 per autors com Lars Onsager, Carl Eckart, Ralph J. Tykodi, Sybren R. de Groot, Peter Mazur, Josef Meixner i Istvan Gyarmati, entre d'altres. Prigogine també fou un difusor notable de la teoria de la complexitat i del caos determinista, en els seus intents de donar bases microscòpiques àmplies a la transició entre reversibilitat i irreversibilitat. Amb Prigogine, la termodinàmica fora de l'equilibri va esdevenir un pol de renovació conceptual científica, filosòfica i cultural, que va influir en ciències i també en obres humanístiques com les d'Edgar Morin o de Jorge Wagensberg.

En comparació amb Prigogine i l'escola de Brusselles, l'escola americana de Truesdell, Coleman i Noll resultava molt menys atractiva, molt tancada en els seus desenvolupaments matemàtics, importants, però difícils de comunicar al públic i de compartir amb els filòsofs. Truesdell tenia una talla intel·lectual gran, com a historiador de la ciència i editor de l'obra matemàtica de Leonhard Euler, però el seu caràcter va ser més donat a la polèmica especialitzada que a la persuasió interdisciplinària.

#### **4.3. ELS ORÍGENS DEL NOSTRE GRUP DE TERMODINÀMICA IRREVERSIBLE**

Aquest era, aproximadament, el panorama de la termodinàmica de processos irreversibles o de no-equilibri cap a 1975, quan vaig començar a treballar en la recerca. Nosaltres no vam seguir pròpiament ni l'escola de Prigogine ni la de Truesdell, i vam anar desenvolupant una via intermèdia, sense saber-li donar l'atractiu conceptual que sabia fer Prigogine —Lebon i Casas eren molt reticents a embarcar-se en polèmiques conceptuals, que consumeixen molt de temps i per a les quals s'ha de tenir una preparació molt àmplia. A més, ens va costar anar trobant els elements pròpiament conceptuals que definien la nostra aportació, els quals van anar apareixent al llarg dels anys, a mesura que adquiríem una visió prou general del camp i una visió històrica i filosòfica una mica més gran. Per això, bona part de la meua carrera ha estat dedicada a desenvolupaments formals que només a la llarga han anat tenint aplicabilitat tècnica i interpretació conceptual.

Al voltant del professor Casas, a la UAB, vam formar un petit grup de recerca en termodinàmica de processos irreversibles, l'integràvem quatre estudiants que havíem acabat la carrera el 1975, Josep Enric Llebot, José Miquel Rubí, Carlos

Pérez García i jo mateix, junt amb Diego Pavón, uns cinc anys més gran que nosaltres, que havia vingut, com el mateix professor Casas, des de la Universitat de Sevilla, amb el grup del professor Vicent Gandia, per posar en marxa els estudis de física. Acostumàvem a dinar junts i després de dinar fèiem o bé un seminari o bé una llarga sobretaula al despatx del professor Casas, inundat de llum del sol a aquella hora, tot parlant dels treballs que anàvem fent, de les idees que anàvem tenint i dels canvis polítics de la Transició. Animava les nostres converses alguna copa de grappa, d'armanyac, de vodka o de tequila, segons les disponibilitats i, en ocasions assenyalades com el sant o l'aniversari del professor Casas, les trufes i les rodanxes de taronja cobertes de xocolata que ens preparava la Lola, la seva dona. Ens hi acompanyaven els visitants que anàvem tenint. D'aquelles trobades en van anar sortint, de manera informal i alegre, moltes idees i treballs. El fet que el Premi Nobel de Química de 1968 hagués estat concedit a Lars Onsager, amb menció expressa a la seva deducció de les bases de les relacions de reciprocitat entre els diversos acoblaments de les equacions de transport, atorgava un reconeixement públic al camp de treball a què ens dedicàvem. Anys després, el 1977, Prigogine també va obtenir el Premi Nobel de Química per les seves contribucions a la termodinàmica fora de l'equilibri. Quan molts anys després vaig tenir ocasió de tractar-lo personalment uns quants dies, estava molt interessat en una possible generalització no lineal de la física quàntica.

De mica en mica, els nostres interessos es van anar especialitzant: Josep Enric Llebot es dedicà més a meteorologia i canvi climàtic; Carlos Pérez, amb Lebon, es dedicà més a estudis d'estructures dissipatives en convecció; Miquel Rubí passà a col·laborar amb l'escola holandesa de Mazur i de Bedeaux, en treballs d'hidrodinàmica complexa i de termodinàmica a escala microscòpica; Diego Pavón va anar estudiant problemes de cosmologia i de matèria i energia fosques, i jo, amb Casas i Lebon, vaig continuar treballant en l'extensió de la termodinàmica de processos. Ens han acompanyat investigadors joves que van anar fent el doctorat amb el grup i van passar a formar-ne part, com ara Juan Camacho, Vicenç Méndez, Javier Bafaluy, Xavier Àlvarez i Daniel Campos, o que feren la tesi i marxaren a altres destinacions, com Maria Ferrer Puig, professora d'institut d'ensenyament mitjà; Teresa Careta, que va anar a la indústria; Jordi Faraudo, que passà a l'Institut de Ciència de Materials de Barcelona del CSIC al campus; Albert Compte, que ha fet una llarga carrera en neurociència; Conrado Pérez Vicente, que s'ha dedicat a la física estadística de xarxes neuronals, o Mohamed Zakari i Hassan Bidar, procedents del Marroc, que després de la tesi van treballar fora de la universitat. Elena Roget i Francesc Casamitjana, de la Universitat de Girona, iniciaren amb les seves tesis doctorals, dirigides per mi i per en Josep Enric Llebot, els estudis de limnologia física en l'estany de Banyoles, estudi que ens havia recomanat amb insistència el professor Ricard Guerrero, microbiòleg, i al qual han fet grans aportacions. Els

temes de tesis doctorals van ser molt diversos i ens van anar introduint en processos ecològics, polímers, cosmologia, nanotecnologia, física de fluids...

Tot just després de llegida la meva tesina, vam quedar que l'extensió natural del tema com a tesi doctoral podria ser una generalització del mètode variacional de Lebon i Lambermont a la magnetohidrodinàmica i la seva aplicació a dues o tres situacions d'interès particular. El tema m'interessava doblement. D'una banda, els principis variacionals per a processos dissipatius estaven de moda a l'escola de Brusselles, des que Prigogine va demostrar el teorema de mínima producció d'entropia, de validesa molt restringida però que va cridar molt l'atenció de la comunitat científica, en termodinàmica i en biologia. D'altra banda, la magnetohidrodinàmica —extensió de la hidrodinàmica a fluids de partícules carregades, en presència de camps magnètics exteriors— m'atreia força, ja que té una gran importància en astrofísica i en fusió nuclear, dues grans fronteres del coneixement.

L'octubre de 1975 vaig anar amb el professor Casas a Alacant, a la reunió anual de la Real Sociedad Española de Física y Química. Tothom mirava amb gran atenció els noticiaris de la televisió, encapçalats pel «parte médico sobre la salud del jefe del Estado», en la llarga agonia del dictador i l'incert futur que s'obria, situació que el Marroc havia aprofitat per a envair el Sàhara espanyol. En una parada de llibres relacionats amb els temes del congrés em vaig comprar un gran llibre de física de plasmes, que posteriorment em serviria en una assignatura sobre aquest tema en el programa de doctorat de física.

La marxa al servei militar —que em venia molt costa amunt i m'angoixava força des de feia mesos— va interrompre el desenvolupament de la tesi. Vaig fer el servei militar des del gener de 1976 al març de 1977 al Cuartel de Instrucción de Reclutas (CIR) número 2, d'Alcalá de Henares, on vam arribar una nit de lluna plena. Vaig considerar molt mala notícia que ens diguessin que el capità de la nostra companyia era un legionari acabat d'arribar del Sàhara espanyol. La realitat va ser una sorpresa inesperada. El capità, Pedro Atienza Alexandre, es va presentar amb un discurs en què feia un elogi abrindat de la lectura, de la cultura i de l'exèrcit com a servei a la pàtria, al qual l'exèrcit contribuïa, durant el servei militar, amb la formació professional i el carnet de conduir de molts joves que arribaven de zones allunyades dels centres urbans, i amb el contacte entre gent de diferents procedències geogràfiques i socials. Va fundar una petita biblioteca a la companyia i a cada nou reemplaçament encoratjava a la lectura —el CIR tenia una biblioteca agradable—, en lloc de perdre el temps al bar. Insistia a tenir els locals molt nets i els va fer embellir amb pintures que va encarregar a un caporal de la companyia, Ciro Odúber, molt dotat i agradable i de gran energia. Durant el servei, vaig descobrir el flamenc genuí, ja que dos nois de la companyia eren cantants i el cant els sortia del fons de l'ànima. Em va semblar molt diferent del flamenc una mica adulterat i descontextualitzat —a parer meu— que anunciaven en diver-

sos locals de Sitges i de la Costa Brava. De tant en tant els meus pares em venien a veure i ho aprofitàvem per a visitar La Alcarria, Extremadura i altres llocs d'aquella zona.

Acabat el servei militar em vaig reintegrar immediatament a la Universitat per tirar endavant la tesi que, durant el servei, havia guanyat una dimensió nova, de manera que la generalització del principi variacional a la magnetohidrodinàmica, en lloc de ser el centre de la tesi, va passar a ser-ne tan sols una part, i l'altra part es va dedicar a una branca nova, que després anomenaríem *extended irreversible thermodynamics*, o termodinàmica irreversible estesa, i que centraria la meva carrera posterior. Va ser una època en què s'anaven succeint canvis polítics que em semblaven esperançadors, mentre es redactava la nova Constitució. Recordo amb intensitat especial el restabliment de la Generalitat i l'arribada de Josep Tarradellas, a la qual vaig assistir, a la plaça de Sant Jaume, amb gran emoció i excellent companyia, el dia que feia vint-i-quatre anys.

En els deu capítols següents, intentaré descriure els punts conceptuals de més interès cap a on, de mica en mica, van anar conduint els treballs del nostre grup. Deixaré en segon terme o en silenci molts petits treballs que van contribuir, però, a fer els passos de més envergadura.





## **Deu equacions**



## 5. Fronteres de la segona llei, lluny de l'equilibri

Vaig sentir parlar per primera vegada de l'extensió de la termodinàmica de processos irreversibles a processos ràpids al professor Lebon, un vespre de començaments de setembre de 1976 als jardins d'un palau o convent de Castilleja de Guzmán. Castilleja és un lloc agradable, a una vintena de quilòmetres de Sevilla i a tocar de les antigues ruïnes romanes d'Itàlica, evocades en el famós poema de Rodrigo Caro. Allà, el professor Manuel García Velarde, de la Universitat Complutense de Madrid, havia organitzat un curs avançat de física en què participaven, entre d'altres professors, Pierre-Gilles de Gennes —que el 1991 rebria el Premi Nobel de Física—, Pierre Bergé, Yves Pomeau, Amable Liñán, el mateix García Velarde —que acabava de publicar un article de revisió important sobre inestabilitats convectives— i alguns altres. Hi vaig poder participar, junt amb els professors Casas i Lebon, perquè va coincidir amb el meu permís del servei militar i tenia moltes ganes de sentir coses de física. Els meus pares em van venir a buscar a Castilleja, i des d'allà férem un bell gir per Sevilla i Huelva. Estant a Carmona, en el viatge de tornada, em van comunicar que el meu llibre de poemes *Diminuta imatge*, sobre Venècia, havia guanyat el Premi de Poesia Martí Dot, i que seria publicat, cosa que em va fer molta il·lusió.

L'equació de Fourier per al transport de calor, que hem vist en el capítol anterior, és molt eficaç en la descripció de moltíssimes situacions físiques. L'equació és una, però les condicions de contorn, les condicions inicials i els materials a què s'aplica són molt diversos. Hi ha llibres sencers dedicats a resoldre l'equació de Fourier en diverses situacions. Aquesta equació es compta entre les més útils i respectades de la física matemàtica, de l'enginyeria i de la matemàtica industrial. Té, però, algunes limitacions subtils, d'interès pràctic restringit, però l'anàlisi de les quals obre problemes nous i perspectives noves a la termodinàmica.

En efecte, l'equació de Fourier falla a temps molt curts o a freqüències molt elevades. En concret, prediu que les ones tèrmiques es propaguen amb una velocitat proporcional a l'arrel quadrada de la seva freqüència, de manera que si la freqüència va creixent també ho fa la velocitat, sense límit superior. Un pols breu de calor, doncs, s'hauria de propagar amb velocitats elevadíssimes. En la majoria de casos pràctics, això no té importància, però a mesura que augmenta la freqüència de les pertorbacions —per exemple, en estudiar ultrasons o hipersons, o solidificacions ultraràpides— es comença a notar la discrepància, i es veu que la velocitat de les ones tendeix a una saturació, amb un valor relacionat amb la velocitat quadràtica mitjana de les partícules.

Una equació que millora la de Fourier, en aquest sentit, va ser proposada el 1948 pel físic matemàtic italià Carlo Cattaneo, a les actes de la Universitat de Mòdena —i noranta anys abans d'ell, en versió diferent, per James Maxwell. Sembla que la seva proposta va passar desapercibuda fins que el 1958 Pierre Vernotte en va publicar una de semblant als *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* de París, cosa que va fer que, en el número següent de la revista, aquell mateix any, Cattaneo tornés a publicar la seva proposta de 1948, que a partir de llavors va suscitar atenció considerable en el món de la teoria del transport de calor. L'equació de Cattaneo-Vernotte descriu el comportament del flux de calor  $q$  en funció de les inhomogeneïtats de temperatura, expressades pel gradient de temperatura  $T$ , i té la forma

$$\tau \, dq/dt + q = -\lambda \, \text{grad } T, \quad (5.1)$$

on  $\tau$  és el temps de relaxació del flux de calor  $q$ . Quan  $\tau$  és nul, (5.1) es redueix a l'equació de Fourier (4.3). L'equació (5.1) es pot interpretar en termes d'inèrcia del flux de calor.

Quan s'introdueix aquesta equació en l'equació de conservació de l'energia (4.5) tenim

$$\tau \, \partial^2 T / \partial t^2 + \partial T / \partial t = (\lambda / \rho c) \, \partial^2 T / \partial x^2. \quad (5.2)$$

Quan  $\tau = 0$ , recuperem l'equació de difusió (4.6). Quan la freqüència és molt elevada i el segon terme de l'esquerra és negligible en comparació amb els altres dos termes, obtenim una funció d'ona per a  $T$ , amb velocitat donada per  $(\lambda / \rho c \tau)^{1/2}$ . Quan  $\tau$  tendeix a zero, la velocitat tendeix a infinit. Que la velocitat sigui finita s'ajusta millor a les observacions. L'equació (5.2) descriu ones de temperatura autosostingudes que s'anomenen segon so, en contrast amb les ones de pressió, que s'anomenen primer so.

A diferència de l'equació de difusió, l'equació d'ona —una altra de les equacions essencials de la física matemàtica— relaciona la derivada temporal segona

d'una funció amb la seva derivada espacial segona, mentre que l'equació de difusió relaciona la derivada temporal primera amb la derivada espacial segona. L'equació d'ona no varia si canviem el temps  $t$  per  $-t$ , és a dir, si invertim el temps, cosa que manifesta la seva reversibilitat. L'equació de difusió, en canvi, canvia de signe si canviem  $t$  per  $-t$ , i trenca la simetria temporal, cosa que manifesta la seva irreversibilitat. L'equació (5.2) és intermèdia entre l'equació d'ona i la de difusió, i s'anomena equació del telegrafista, perquè, quan s'aplica a ones electromagnètiques al llarg d'un cable, descriu la seva propagació atenuada per la resistència elèctrica i les pèrdues laterals. Entre els primers que deduïren i treballaren l'equació del telegrafista per a ones electromagnètiques destaca Lord Kelvin, que s'ocupà, entre d'altres coses, dels cables telegràfics submarins per comunicar Anglaterra amb els Estats Units.

Des del punt de vista conceptual, la situació és molt interessant. La llei de Fourier val per a situacions en què hi ha moltes col·lisions entre les partícules del sistema per unitat de temps. Si el temps que considerem —o la inversa de la freqüència— és menor que el temps característic entre col·lisions, el nombre de col·lisions entre partícules serà molt petit. Per això, en termes ideals, és desitjable una equació de transport com la (5.2), que a temps més curts que el temps entre col·lisions es comporta reversiblement, com en la mecànica clàssica, i a partir de temps comparables al de col·lisió passa a ser irreversible. D'aquesta manera, la tensió entre reversibilitat i irreversibilitat, que sembla insuperable en una visió estrictament dualista, queda mitigada, en haver-hi una transició contínua entre les dues situacions, és a dir, entre l'equació d'ona i la de difusió.

Les ones de propagació de temperatura semblen incompatibles amb la segona llei de la termodinàmica, ja que durant la meitat de cada període la calor passa de temperatura elevada a temperatura baixa, però en l'altra meitat del període passa de temperatura baixa a temperatura elevada, en contra de l'afirmació de Clausius que la calor passa espontàniament de temperatures elevades a temperatures baixes. De fet, l'enunciat de Clausius és més subtil, ja que parla de la impossibilitat d'aconseguir màquines tèrmiques que tinguin com a únic efecte transportar calor de temperatures baixes a temperatures elevades.

Si suposem un sistema amb un perfil inicial de temperatura de forma sinusoidal, l'aïllem i deixem que arribi a l'equilibri tot seguint la llei de Fourier, l'entropia total del sistema definida per la hipòtesi de l'equilibri local creix de forma monòtona. En canvi, si l'evolució del sistema és descrita per l'equació de Cattaneo-Vernotte, l'entropia total creix i decreix, en etapes alternes. En les etapes en què la calor passa de  $T$  elevada a  $T$  baixa, l'entropia creix, i quan passa de  $T$  baixa a  $T$  elevada, l'entropia decreix. Però el segon principi afirma que l'entropia total hauria de ser créixer monòtonament. Què passa, doncs, amb el segon principi?

De fet, el segon principi en l'enunciat de Clausius referent a l'entropia afirma que en un sistema aïllat l'entropia de l'estat d'equilibri final ha de ser més gran o igual que l'entropia de l'estat d'equilibri inicial, tal com s'indica a (3.4). Observem, doncs, que l'enunciat no diu com es comporta l'entropia entre l'estat inicial i l'estat final, sinó que només relaciona l'entropia de l'estat d'equilibri final amb la de l'estat d'equilibri inicial. En la termodinàmica clàssica, en efecte, l'entropia només està definida per a estats d'equilibri. Així, per passar de la termodinàmica clàssica a la termodinàmica de no-equilibri cal respondre dues grans preguntes: com es defineix l'entropia en estats fora de l'equilibri?, com es comporta l'entropia en l'evolució entre dos estats d'equilibri?

La teoria de l'equilibri local suposa que encara que el sistema sigui inhomogeni en la temperatura i la pressió, és possible descriure'l tot descomponent-lo en petits elements, cadascun dels quals està en equilibri local, és a dir, cadascun dels quals té una entropia definida pel valor que tindria l'entropia en un sistema en equilibri a la temperatura i la pressió corresponents. A més, suposa que l'entropia, en cada element de volum, ha de tenir una producció positiva, de manera que l'entropia total creixi monòtonament des de l'equilibri inicial a l'equilibri final. Si l'evolució del sistema és descrita per la llei de Fourier, es compleix aquest comportament.

Ara bé, si la transferència de la calor ve descrita per la llei de Cattaneo-Vernotte ja no és així, i l'entropia puja i baixa fins que finalment se satura i arriba a un valor màxim constant. Si és així, què cal fer amb el segon principi? L'equació de Cattaneo-Vernotte descriu acuradament una sèrie de processos físics, però sembla violar el segon principi de la termodinàmica, formulat en termes del creixement monòton de l'entropia d'equilibri local.

El 1977, el professor Lebon s'havia adonat que, si se suposa que l'entropia no és la d'equilibri local, sinó que també depèn del flux de calor, l'evolució del sistema segons Cattaneo i Vernotte esdevé compatible amb la segona llei de la termodinàmica, en el sentit que aquesta entropia generalitzada només augmenta al llarg del procés vers l'equilibri, a diferència de les pujades i baixades de l'entropia clàssica d'equilibri local. Sembla lògic proposar, doncs, una generalització del segon principi, emprant una entropia més general.

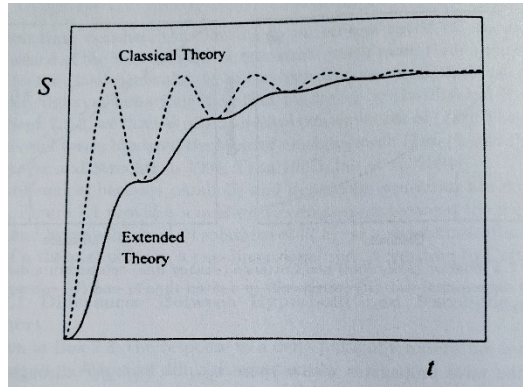


FIGURA 2. Comportament temporal de l'entropia clàssica i de l'entropia estesa en un sistema aïllat durant l'evolució d'una pertorbació tèrmica descrita per l'equació de Cattaneo-Vernotte.

FONT: D. JOU, J. CASAS-VÁZQUEZ i G. LEBON (2010), *Extended irreversible thermodynamics*, 4a ed., Berlín, Springer.

En realitat, ja abans de Lebon i independentment, sense que nosaltres ho sabéssim encara, Richard E. Nettleton, als Estats Units, i Ingo Müller, a Aquisgrà, en la seva tesi doctoral supervisada per Meixner, havien proposat una entropia més general que la de l'equilibri local, des de la teoria cinètica dels gasos, Müller, i des de la teoria cinètica dels líquids, Nettleton. Vam veure que la forma que té aquesta entropia generalitzada dependent de  $u$  i de  $\mathbf{q}$ ,  $s(u, \mathbf{q})$  és

$$s(u, \mathbf{q}) = s_{\text{eq}}(u) - (\tau/2\rho\lambda T^2)\mathbf{q}\cdot\mathbf{q}. \quad (5.3)$$

La primera part del terme de la dreta de (5.3) és l'entropia clàssica d'equilibri local, i la segona part descriu la contribució de  $\mathbf{q}$  a l'entropia. Amb la contribució de no-equilibri, l'entropia total del sistema creix de forma monòtona amb el temps (vegeu la figura 2). Curiosament, tant Nettleton com Müller com Lebon van dedicar més atenció a avaluar el coeficient davant del flux de calor en (5.3) mitjançant la teoria cinètica, que no pas a interpretar-lo en termes físics; això era degut al fet que consideraven el terme relaxacional com una correcció a la llei de Fourier més que no pas com un terme fonamental que canviés dràsticament la descripció del sistema.

Ens vam adonar, però, que l'equació de Cattaneo-Vernotte no és tan sols una correcció a la llei de Fourier, sinó que és, de fet, una equació d'evolució per al flux de calor, que esdevé una autèntica variable independent. El fet de tenir una interpretació física explícita de la contribució de no-equilibri, en lloc d'una avaluació numèrica concreta, ens va permetre avançar en quatre línies.

En primer lloc, ens va suggerir aplicar la teoria de fluctuacions d'Einstein a les fluctuacions del flux de calor a l'entorn de l'equilibri, cosa que ens va posar en contacte amb els teoremes de fluctuació-dissipació, tan importants en les noves formulacions de la física estadística de no-equilibri. En segon lloc, disposar d'una interpretació física de la contribució de no-equilibri ens va estimular a considerar no tan sols la teoria cinètica de gasos diluïts, sinó també la de gasos densos, la de radiació electromagnètica i d'altres sistemes que també tenien contribucions de no-equilibri en l'entropia, amb coeficients numèrics diferents però amb la forma física que havíem identificat.

En tercer lloc, a més d'emprar la teoria cinètica, vam començar a emprar tècniques de màxima entropia aplicades als estats estacionaris de no-equilibri, cosa que ja havien fet alguns autors, però sense tenir una interpretació física dels multiplicadors de Lagrange associats al flux de calor. Finalment, vam poder donar una interpretació física senzilla del terme de no-equilibri en (5.3), com l'entropia produïda en un petit volum del sistema de no-equilibri si de sobte l'aïllem i el deixem arribar a l'equilibri local. En lloc de suposar que la seva entropia inicial era ja exactament la de l'equilibri local, veiem que hi ha una diferència que físicament s'entén bé en termes de l'entropia produïda durant la relaxació del flux de calor des del seu estat inicial a zero. És interessant observar, doncs, la diferència conceptual entre avaluar matemàticament un terme d'una equació i saber-lo interpretar físicament en termes generals. La segona via obre molts més camins que no pas la primera.

Aquests diversos desenvolupaments ens van ocupar un parell d'anys, o més, perquè durant la carrera no havíem estudiat la teoria de fluctuacions, ni els teoremes de fluctuació-dissipació, ni els formalismes de màxima entropia fora d'equilibri, i havíem d'anar descobrint aquestes coses en la bibliografia un xic a les palpenes.

Pel que fa a la meua tesi, els mesos de maig i de juny de 1977 vaig anar a la Universitat de Lieja, a treballar amb el professor Lebon. Vam quedar, en efecte, que complementaríem la primera part de la tesi sobre principis variacionals i magnetohidrodinàmica amb una segona part dedicada a la termodinàmica estesa, aplicada a processos de difusió. En el despatx del professor Lebon, i a la meua habitació de la residència d'estudiants davant el Mosa, el riu que passa per Lieja, vaig passar moltes hores d'entusiasme, aprenent molta teoria cinètica dels gasos a partir del llibre clàssic de Sydney Chapman i T. G. Cowling *The mathematical theory of non-uniform gases*, i del capítol de Harold Grad sobre teoria cinètica a l'*Encyclopedia of physics*, editada a finals de la dècada de 1960 per Springer. Sortit feia poc del servei militar, em produïa autèntica exultació concentrar-me en temes de recerca. Els caps de setmana aprofitava per a fer escapades a Bruges, Gant, Anvers i Brusselles, on la contemplació de l'art i de la vida em produïa grans sa-



tisfaccions. Els meus pares em van venir a buscar a Lieja, i tornàrem cap a Sitges fent un viatge molt agradable per la Borgonya i la Provença, que havia visitat sis anys abans amb Pau Servat.

Només he tornat a Lieja en dues ocasions, ja que el professor Lebon tenia molta tirada a venir a Barcelona. Una d'aquestes ocasions, el 1988, va ser per a participar en el col·loqui *Poésie et espace*, organitzat pel Centre International d'Études Poétiques de la Biblioteca Nacional de Brusselles. Hi vaig poder conèixer l'astronauta Buzz Aldrin —el segon home que va baixar a la Lluna, després de l'hermètic i llegendari Neil Armstrong—, el poeta libanès Adonis i el poeta lleonès Antonio Gamoneda, que el 2006 va rebre el Premi Cervantes.

La concentració en la tesi, titulada *Estudio termodinámico de mezclas fluidas con interacciones electromagnéticas*, em va permetre avançar molt ràpidament, de manera que el 24 de maig de 1978 ja en vaig poder fer la defensa pública, davant d'un tribunal presidit pel brillant enginyer aeronàutic Amable Liñán, gran especialista en teories hidrodinàmiques de la combustió, d'anomenada internacional, i que anys després va ser distingit amb el Premi Príncep d'Astúries d'Investigació Científica i Tècnica. La presentació va anar molt bé i va acabar amb la qualificació de *summa cum laude*, habitual en aquella època.

Havia vist, però, que la tesi era massa limitada, i ja tenia a la ment diverses possibilitats de generalització. Efectivament, llegia molts articles de física de temes diversos i de mica en mica anava relacionant el que fèiem amb camps que no coneixíem, però que semblaven pertinents per a aplicar o ampliar el que anàvem fent. Aquesta flexibilitat ens ha donat avantatges considerables sobre grups més enfocats en un tema molt concret, sense gaire inquietud per relacionar-lo amb altres temes. Així, vaig pensar que seria útil tant per a mi com per a altres una presentació didàctica de la nova teoria termodinàmica tal com llavors la coneixíem. La possibilitat de presentar-la al Premi Eduard Fontserè de l'IEC va ser un gran estímul per a escriure aquesta introducció en català. Quan vaig dur el llibret a l'IEC, però, em van dir que aquell any no es convocava el premi i que ho deixés per a l'any següent. Vaig aprofitar per reescriure'l, cosa que demanava, llavors, tornar-lo a escriure a màquina de començament a final, ja que encara no teníem ordinadors. Així, vaig tornar a posar al dia el llibret, que després em va ser molt útil com a plataforma de llançament cap a nous desenvolupaments. Sempre m'ha fet il·lusió que el primer llibre sobre la teoria hagués estat escrit en català, tot i que molt poca gent ho sap, ja que el ressò internacional va venir després, amb la publicació de l'article de revisió en anglès a *Reports on Progress in Physics* el 1988 i amb el llibre de 1993.



## 6. Subtiletes del principi zero: els significats de la temperatura

El fet de tenir una entropia de no-equilibri que depèn, a més de les variables clàssiques, del flux de calor, com ara (5.3), invita a imaginar una termodinàmica d'estats estacionaris, caracteritzats per un valor no nul del flux de calor a través del sistema. Ara bé, la motivació que ens havia dut a buscar aquella entropia era la compatibilitat de la generalització de Cattaneo-Vernotte (5.2) de la llei de Fourier per a processos ràpids amb el segon principi de la termodinàmica. Quina relació podia tenir això amb els estats estacionaris? A primera vista, semblava una contradicció, com si la nostra entropia, motivada en processos ràpids, no pogués ser aplicada a estats estacionaris. D'altra banda, si fèiem abstracció d'aquesta motivació inicial, no es veia per què no podíem aplicar la nova entropia a estats estacionaris.

Un segon problema conceptual era quin sentit tenien les equacions d'estat per als estats estacionaris, en concret, què vol dir temperatura de no-equilibri. Recordem, en efecte, que la temperatura absoluta està relacionada amb l'entropia; si l'entropia depèn del flux de calor, també en dependrà la temperatura. Però què vol dir que la temperatura depengui del flux de calor? L'equilibri tèrmic implica que el flux de calor és zero, de manera que no quedava clar què feia un flux de calor no nul en l'expressió per a la temperatura. Teníem, doncs, una aparent inconsistència que ens frenava una mica en l'aplicació de la teoria a estats estacionaris. Malgrat això, vam anar tirant endavant, fent propostes formals, sense entendre bé, al començament, el seu significat profund, tot esperant que de mica en mica la boira teòrica s'aniria aclarint i ho comprendríem millor. I així va ser.

Algunes converses inspiradores per a resoldre la consistència entre l'entropia per a processos ràpids i l'entropia per a estats estacionaris van ser amb el professor Roberto Luzzi, de la Universitat de Campinas, de l'estat de São Paulo, al Brasil, que ens visitava cada any unes quantes setmanes de gener i febrer. Luzzi treballava en un formalisme d'un operador de no-equilibri, inspirat en tècniques de la

teoria de la informació, i estava molt interessat en la termodinàmica dels estats estacionaris des d'aquesta perspectiva microscòpica. Vam arribar a entendre que si els fluxos són grans, l'energia que entra no té prou temps per a distribuir-se, abans de sortir, entre els graus de llibertat del sistema segons una funció de distribució d'equilibri, motiu pel qual el sistema no estarà en equilibri local. Nosaltres ens havíem interessat, inicialment, en els efectes explícits dels fenòmens ràpids de la transmissió del flux de calor, però també hi ha efectes implícits, estacionaris, que dificulten l'arribada a l'equilibri i motiven una entropia de no-equilibri.

Un símil sociològic d'això poden ser les migracions. Suposem que en una certa població hi va arribant gent de fora. Si la gent arriba a un ritme lent, la població pot anar adaptant els seus serveis públics —habitatge, escoles, hospitals, economia— als nouvinguts, i aquests es poden anar adaptant a la població. En principi, doncs, la població podrà anar creixent amb un cert equilibri social i cultural. Però si el ritme d'arribada depassa uns certs límits, els serveis públics es veuen saturats, i la gent arribada no té temps d'adaptar-se ni la població no té capacitat d'acollir-los. Es produeix, llavors, una situació fortament allunyada de l'equilibri i que pot dur a problemes socials considerables.

Pel que fa a la temperatura fora de l'equilibri, ja des del principi dels treballs ens va cridar l'atenció que, en aplicar formalment les definicions de temperatura i de pressió a partir de l'entropia generalitzada,  $1/T = \partial S/\partial U$ ,  $p/T = \partial S/\partial V$ , es troba

$$T_{\text{no-eq}} = T - A\mathbf{q}\cdot\mathbf{q}, \quad (6.1)$$

on  $A$  és un coeficient habitualment positiu donat per  $A = (T/2c)(da/dT)$ ,  $c$  la calor específica i  $a = \tau/\rho\lambda T^2$ . Igualment, la pressió té un terme dependent de  $\mathbf{q}$  de l'estil  $p_{\text{no-eq}} = p_{\text{eq}} - B\mathbf{q}\cdot\mathbf{q}$ . Quina significació té que la temperatura i la pressió depenguin del flux de calor?

De fet, el concepte de temperatura és subtil i complicat, encara que a primera vista sembli directe i intuïtiu. La sensació de fred i de calor és una de les primeres que experimentem en néixer, i ja no ens abandona al llarg de la vida, però la sensació de calor resulta enganyosa. Si posem una mà en aigua freda i una altra en aigua calenta durant una estona, i després les posem totes dues en aigua tèbia, la que havia estat calenta indica que l'aigua tèbia està freda, i la que havia estat en contacte amb l'aigua freda indica que l'aigua tèbia està calenta. També, si toquem un metall —bon conductor— o una fusta —mal conductor— a la mateixa temperatura, el metall ens sembla fred i la fusta tèbia. Aquestes discrepàncies són degudes al fet que els nostres sensors tèrmics indiquen el ritme de bescanvi de calor més que no pas el valor real de la temperatura. Això passa, també, amb la temperatura de sensació, que depèn de la velocitat i la humitat de l'aire.

El concepte científic i rigorós de temperatura és molt subtil i està basat en dos grans principis físics: el principi zero i el segon principi. El principi zero estableix la transitivitat de l'equilibri tèrmic. Diem que dos sistemes estan en equilibri tèrmic mutu quan, posats en contacte a través d'una superfície capaç de transmetre calor, no intercanvien calor. El principi zero estableix que si un sistema en un estat  $A$  està en equilibri tèrmic amb un sistema en un estat  $B$ , i el sistema en estat  $B$  està en equilibri tèrmic amb un altre sistema en estat  $C$ , aleshores els sistemes en estat  $A$  i en estat  $C$  estan en equilibri tèrmic entre si. Aquesta transitivitat, més les propietats de reflexivitat ( $A$  està en equilibri tèrmic amb si mateix) i de reciprocitat (si  $A$  està en equilibri tèrmic amb  $B$ ,  $B$  està en equilibri tèrmic amb  $A$ ), estableixen la base matemàtica per a una relació d'equivalència en l'espai d'estats d'equilibri dels sistemes. Les classes d'equivalència respectives són anomenades isoterms i el paràmetre numèric que les caracteritza s'anomena temperatura empírica.

Ara bé, la temperatura empírica no és absoluta, en el sentit que depèn del tipus de termòmetre emprat per a la seva mesura —termòmetre de mercuri, d'alcohol, de gas real, de resistència elèctrica, de termoparell, de radiació... Per a establir una temperatura veritablement absoluta, és a dir, una que es pugui mesurar universalment, independent del material de mesura, cal el segon principi de la termodinàmica. Aquest principi permet, a partir del rendiment del cicle de Carnot, definir una temperatura independent de la substància termomètrica.

Aquesta temperatura va ser definida el 1846 pel jove William Thomson, que després seria conegut com a Lord Kelvin, quan va ser nomenat Lord pels seus mèrits com a científic i enginyer, i va triar el nom del rierol Kelvin que travessa el campus de la Universitat de Glasgow, on havia estudiat i havia ensenyat. Un cop definida aquesta temperatura, es pot procedir a definir l'entropia segons Clausius, com hem dit a (3.3). La segona llei també estableix un ordre numèric en les escales de temperatura, de manera que la calor només pot passar espontàniament de temperatures més elevades a temperatures menys elevades.

L'equilibri tèrmic entre dos sistemes suposa que el flux de calor entre els sistemes és nul. Així, quin sentit tenia que el flux de calor figurés en l'expressió (6.1)? Per a aclarir-ho, vam imaginar la situació física representada en la figura 3.

Això va obrir el camí per a interpretar aquests termes i ens va dur a reflexionar més àmpliament sobre el tema de la temperatura en estats estacionaris fora de l'equilibri. Amb el postdoctorand japonès Takahiro Hatano, vam calcular quina mena de resultats s'obtenen per a la temperatura d'un oscil·lador harmònic forçat —és a dir, excitat des de fora de manera que se li comunica contínuament energia— immers en un bany tèrmic en equilibri a temperatura  $T$ . En un oscil·lador harmònic, amb dos graus de llibertat —posició i velocitat— podem definir microscòpicament una temperatura cinètica a partir del valor mitjà del quadrat de la

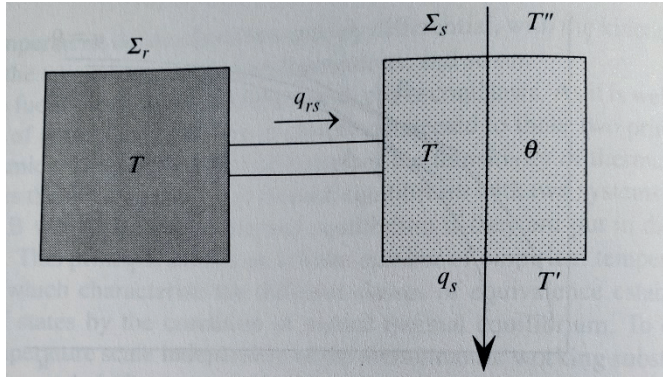


FIGURA 3. Temperatura de no-equilibri en el sistema de la dreta, travessat per un flux de calor  $q$ , en equilibri tèrmic amb el sistema de l'esquerra, sense flux de calor, que fa de termòmetre.

FONT: D. JOU, J. CASAS-VÁZQUEZ i G. LEBON (2010), *Extended irreversible thermodynamics*, 4a ed., Berlín, Springer.

velocitat, i una temperatura configuracional o potencial, relacionada amb el valor mitjà de l'energia potencial elàstica, a partir del quadrat de la deformació extensional de l'oscillador. Quan l'oscillador està en equilibri amb el bany tèrmic, les dues temperatures són iguals, però si l'oscillador rep energia des de fora i la passa al bany tèrmic —és a dir, si el travessa un flux d'energia—, la temperatura cinètica i la configuracional difereixen entre si. Vam veure, doncs, quina lògica hi ha en el fet que la temperatura pugui dependre del flux de calor.

Així, si diferents graus de llibertat tenen temperatures diferents, termòmetres sensibles a graus de llibertat diferents indicaran temperatures diferents. Això fa que el principi zero de la termodinàmica clàssica no sigui extrapolable directament a les situacions enllà de l'equilibri local. En efecte, si el sistema A interacciona amb el sistema B a través d'un cert conjunt de graus de llibertat, i estan en equilibri tèrmic mutu, i el sistema B interacciona amb el sistema C a través d'un altre conjunt de graus de llibertat, i estan en equilibri tèrmic mutu, posar en contacte el sistema A amb el C no garanteix que A i C estiguin en equilibri mutu, si el conjunt de graus de llibertat en què interaccionen A, B i C és diferent.

Un exemple d'aquesta situació és una mescla de radiació i de gas que inicialment tinguin temperatures diferents. Mentre no s'hagin igualat, un termòmetre de parets negres indicarà la temperatura de la radiació i un de parets reflectants serà insensible a la radiació i indicarà la temperatura del gas. Una altra situació amb moltes temperatures diferents és l'entrada de les naus espacials a les atmosferes planetàries. Com que el gas en contacte amb la nau s'escalfa molt, aquest gas s'excita molt, i podem mesurar, espectroscòpicament, a gran distància, les temperatures rotacio-

nals, les vibracionals i les electròniques dels diversos components, que són diferents entre si.

Així, rere una expressió aparentment tan simple i banal com (6.1), que només consisteix a fer la derivada d'una funció ja coneguda, hi ha tot un treball de comprensió conceptual molt delicat. Una pregunta natural, per exemple, és: si hi ha diverses temperatures en el mateix estat del sistema, quina d'aquestes temperatures coincideix amb la temperatura absoluta de (6.1)? Es tracta d'un valor mitjà de les temperatures? Amb Juan Camacho vam deduir que en un gas ideal monoatòmic en presència d'un flux de calor, la temperatura definida per l'energia cinètica mitjana en les dues direccions perpendiculars al flux de calor és més petita que no pas la temperatura cinètica en la direcció del flux de calor, i coincideix amb la temperatura absoluta definida per (6.1). No sabem fins a quin punt aquesta relació és generalitzable, és a dir, si potser la temperatura absoluta donada per (6.1) coincideix amb la temperatura mínima entre les diverses temperatures dels diversos graus de llibertat. Posteriorment, Juan Camacho es va interessar pel tercer principi de la termodinàmica en estats estacionaris i es va adonar que l'entropia de no-equilibri tendeix a zero quan la temperatura de no-equilibri tendeix a zero. Això és interessant, perquè la temperatura de no-equilibri (6.1) pot tendir a zero quan el flux de calor es fa prou gran, encara que la temperatura d'equilibri local estigui allunyada de zero.

Amb el professor Casas vam anar aplegant informació sobre les diverses definicions macroscòpiques, microscòpiques i mesoscòpiques de la temperatura, i les vam anar aplicant a sistemes travessats per un flux de calor —gasos ideals, cristalls, vidres, medis granulars, nuclis atòmics... Quan el flux de calor és nul, els valors donats per les diferents definicions de temperatura —relacionades amb aspectes físics diferents del sistema— coincideixen entre si. En canvi, en un estat estacionari caracteritzat per un flux de calor, les diverses definicions de temperatura difereixen entre si. Tinguem en compte que les diverses definicions estan relacionades amb diferents mètodes de mesurament, de manera que no es tracta d'abstraccions teòriques, sinó de maneres diferents de mesurar la temperatura. Vam publicar un article de revisió sobre aquest tema a *Reports on Progress in Physics*, el 2003, que ha estat citat unes cinc-centes vegades. Posteriorment, amb la professora Liliana Restuccia, de Messina, vam publicar un article sobre la definició calòrica i la definició entròpica de la temperatura. La definició calòrica es refereix al contingut en energia interna i l'entròpica a la capacitat de bescanviar calor amb altres sistemes. La idea distingeix entre el contingut energètic i la capacitat d'intercanviar energia. M'hauria agradat poder aplicar aquestes idees a sistemes econòmics —temperatura del capital— i sociològics —temperatura social. N'havíem parlat amb la professora Marina Dolfin, de la Universitat de Messina, però no vam trobar temps per a aprofundir-hi. Era una idea interessant, perquè la nostra societat està

caracteritzada per valors elevats de fluxos de migracions, de capitals, d'informació i de materials, de manera que les dinàmiques dels fluxos hi tenen un gran protagonisme.

Pel que fa a la pressió, ja abans de tenir clares les idees conceptuals sobre el terme de no-equilibri, amb Carlos Pérez vam estudiar quins efectes tindrien les correccions de no-equilibri sobre la transició de fase d'un gas de Van der Waals. La idea ens va obrir el camí per a estudiar, posteriorment, la influència de les contribucions de no-equilibri en les transicions de fase, tema que vam elaborar amb detall en el cas de dissolucions polimèriques amb el professor Manuel Criado-Sancho, de la Universitat Nacional d'Educació a Distància (UNED), com veurem en el capítol 8.



## 7. Les dinàmiques dels fluxos de transport

Si el flux de calor pot contribuir a l'entropia, és lògic preguntar-se en quin grau ho poden fer altres fluxos, com ara el de quantitat de moviment, el de difusió o el de càrrega elèctrica. De fet, el problema de creixement indefinit de la velocitat de propagació de les ones de temperatura es dona també en la propagació de les ones de pressió que constitueixen el so, més conegudes i estudiades que no pas les ones de calor. La velocitat de les ones de pressió també creix indefinidament a mesura que la freqüència augmenta, mentre que experimentalment, quan s'estudien ultrasons i hipersons, la velocitat observada és molt més petita que no pas la predicció donada per la teoria hidrodinàmica clàssica. Així, resulta lògic preguntar-se com contribueixen a l'entropia, en un fluid simple, el flux de calor i la viscositat, que intervenen en la descripció de la hidrodinàmica del sistema.

Suposem que les equacions clàssiques de Fourier per al flux de calor  $\mathbf{q}$  i de Navier-Stokes per al tensor de pressions  $\mathbf{P}^v$  es generalitzen amb l'addició d'un terme simple de relaxació, tal com en l'equació de Cattaneo-Vernotte (5.1), i amb un acoblament mutu entre el vector  $\mathbf{q}$  i la divergència del tensor  $\mathbf{P}^v$ , i entre el tensor  $\mathbf{P}^v$  i el gradient de  $\mathbf{q}$ , com

$$\tau_1 d\mathbf{q}/dt + \mathbf{q} = -\lambda \text{grad } T + \beta\lambda T^2 \text{div } \mathbf{P}^v \quad (7.1)$$

$$\tau_2 d\mathbf{P}^v/dt + \mathbf{P}^v = -2\eta(\text{grad } \mathbf{v})^s + 2\beta\eta T(\text{grad } \mathbf{q})^s, \quad (7.2)$$

on  $\tau_1$  i  $\tau_2$  són els temps de relaxació respectius,  $\lambda$  és la conductivitat tèrmica,  $\eta$  la viscositat tangencial i  $\beta$  un coeficient que caracteritza els acoblaments mutus, que no es troben en la teoria clàssica.

En aquest cas, per tal de garantir la compatibilitat d'aquestes equacions amb la segona llei, l'entropia ha de contenir contribucions de no-equilibri relacionades amb  $\mathbf{q}$  i amb  $\mathbf{P}^v$ , de la forma

$$ds = T^{-1}du + pT^{-1}dv - (\tau_1/\lambda T^2)\mathbf{q}\cdot d\mathbf{q} - (\tau_2/2\eta T)\mathbf{P}^v:\mathbf{P}^v. \quad (7.3)$$

Aquesta expressió generalitza (5.3). A més, el flux d'entropia ha de contenir una contribució en  $\mathbf{P}^v$  i  $\mathbf{q}$ , de la forma

$$\mathbf{J}^s = T^{-1}\mathbf{q} + \beta\mathbf{P}^v\cdot\mathbf{q}, \quad (7.4)$$

on  $\beta$  és el mateix coeficient que apareix a (7.1) i (7.2). L'acoblament entre diversos fenòmens és interessant, ja que estableix relacions entre ells. Veiem que els acoblaments mutus que apareixen en (7.1) i (7.2) estan relacionats amb el segon terme del flux d'entropia, que no té equivalent clàssic. El fet que  $\mathbf{P}^v$  tingui un temps de relaxació no nul s'anomena viscoelasticitat. Quan les pertorbacions de la velocitat són lentes, el sistema es comporta com un fluid, però quan són ràpides es comporta com un sòlid elàstic, amb mòdul elàstic donat per  $\eta/\tau_2$ . Ho podem experimentar si introduïm la mà en l'aigua lentament, de manera que l'aigua oposa poca resistència, o si la hi volem introduir molt ràpidament, en el qual cas l'aigua es comporta gairebé com un sòlid.

Extensions dinàmiques i termodinàmiques d'aquest tipus havien estat estudiades per Müller i per Lebon, a partir de la teoria cinètica dels gasos ideals. Aquesta teoria confirma, en efecte, que, en segon ordre en la pertorbació fora d'equilibri, tant l'entropia com el flux d'entropia tenen contribucions del flux de calor i de la pressió viscosa. De fet, la teoria cinètica dona alguns altres termes addicionals per a les equacions del flux de calor i de la pressió viscosa.

La identificació explícita en termes físics de les contribucions de no-equilibri en (7.3) ens permeté, tal com en el cas de flux de calor, interpretar-les físicament. També ens va permetre avaluar les fluctuacions de la pressió viscosa, i relacionar-les amb les seves expressions respectives del teorema de fluctuació-dissipació. Va resultar més difícil l'avaluació del coeficient  $\beta$  del terme addicional del flux d'entropia en termes de fluctuacions, però també hi vam reeixir, alguns anys després.

El 1980, vam entrar en contacte amb un altre investigador que s'havia interessat en la termodinàmica estesa, el professor Leopoldo García-Colín, de la Universitat Autònoma Metropolitana de Mèxic, un dels experts hispanoamericans més prestigiosos en teoria cinètica i mecànica estadística fora de l'equilibri, membre de El Colegio Nacional de Mèxic. Ens vam conèixer a Sitges, en el marc de les escoles de mecànica estadística que des de 1968, cada dos anys, hi organitzava el professor Luis Garrido, de la Universitat de Barcelona. Aquestes escoles —com les

escoles de física de Les Houches, als Alps (promoguda per Cécile DeWitt-Morette); de Cargèse, a Còrsega, i d'Erice, a Sicília (impulsada per Antonino Zichichi)—haviem esdevingut llocs de trobada i de formació dels joves investigadors més inquilts i dels professors més brillants en diferents especialitats. L'escola de 1980, en els preparatius de la qual vaig participar activament, va ser dedicada a la mecànica estadística lluny de l'equilibri.

Vam invitar a Bellaterra el professor García-Colín. El seu entusiasme per la teoria era altíssim, i durant ben bé una dotzena d'anys, ell i el seu grup —entre els quals Mariano López de Haro, Rosalío Rodríguez, Rosa María Velasco, Francisco J. Uribe i Luis Felipe del Castillo— van fer moltes contribucions a la fonamentació microscòpica de la termodinàmica estesa, tant en els seus aspectes més termodinàmics com en els més mecànics o dinàmics. El grup va ser conegut com l'escola mexicana de termodinàmica, tal com a nosaltres ens anomenaven l'escola catalana de termodinàmica.

El setembre de 1982 vam organitzar a Bellaterra una escola de termodinàmica, que vam dedicar, en aquella sessió, a la termodinàmica estesa, tot invitant la gent que havia treballat en aquesta línia, com Richard E. Nettleton, Ingo Müller, Georgy Lebon, Angelo Morro, Franco Bampi, Leopoldo García-Colín i els diversos membres del nostre grup que hi havíem fet aportacions. Va ser la primera vegada que tots els investigadors interessats en aquesta línia ens trobàvem, coneixíem els nostres treballs respectius i podíem començar a teixir col·laboracions futures. Les actes de les sessions, publicades per Springer, foren el primer llibre en anglès dedicat a aquesta nova línia.

El 1983 vaig poder visitar el grup del professor García-Colín a Ciutat de Mèxic, en una estada de tres setmanes molt agradable i fructífera. Vaig poder visitar el gran Museu Nacional d'Antropologia de Mèxic, interessantíssima porta a les cultures mesoamericanes precolombines, i les piràmides de Tenochtitlán. També vaig visitar Puebla, i em va sorprendre veure la capella on va morir assassinat el poeta Gutierre de Cetina, autor del cèlebre *Madrigal a unos ojos*, i de qui no coneixia la dramàtica mort. També vaig visitar el filòsof i escriptor català Ramon Xirau, a la seva casa del barri de San Ángel. Em va rebre molt amablement, ja que tenia poques ocasions de trobar-se amb poetes catalans, i vaig descobrir les obres literàries de Juan Rulfo i de Carlos Fuentes.

Durant aquella estada, vam iniciar una línia que resultaria força fructífera: la comparació de la termodinàmica estesa amb les teories d'hidrodinàmica generalitzada que des de feia poc s'havien anat posant en voga per a poder descriure els nous experiments de dispersió de neutrons en líquids i en sòlids. Aquests experiments permeten explorar el comportament de la matèria a freqüències molt més elevades que no pas els ultrasons i els hipersons. La hidrodinàmica generalitzada considerava que els coeficients de les equacions hidrodinàmiques (calor específi-

ca, conductivitat tèrmica i viscositat, bàsicament) no són només funcions de la temperatura, sinó també de la freqüència i de la longitud d'ona, cosa que implica que les lleis de Fourier i de Navier-Stokes han de ser generalitzades amb termes de memòria i no locals, per tal de poder descriure les observacions.

Aquelles comparacions ens van permetre obtenir valors experimentals per als temps de relaxació i per a les longituds de correlació que apareixen en les equacions (7.1) i (7.2) del flux de calor i de la pressió viscosa. Fins aleshores, alguns col·legues havien criticat que la nostra teoria fos purament formal, sense valors experimentals accessibles, tret dels referents a les primeres correccions de la velocitat dels ultrasons. Ara, en canvi, teníem a disposició tot un repertori de resultats experimentals, procedents de diversos laboratoris del món, i a la interpretació dels quals dedicaven l'atenció un nombre considerable de científics. Ho feien d'una manera diferent de la nostra, ja que estudiaven la dependència dels coeficients dissipatius en funció de la freqüència i la longitud d'ona, mentre que nosaltres buscàvem equacions d'evolució per als fluxos. Però és relativament fàcil passar de les equacions d'evolució a les seves transformades en freqüències i longituds d'ona.

Allò que cap a 1975 havíem començat com a exercici purament conceptual de consistència física interna, passava a tenir interès experimental i a poder-se comparar amb desenvolupaments que feien grups avançats de diversos laboratoris. Això, certament, era positiu i ens va ser molt útil. Ara bé, la hidrodinàmica generalitzada no s'interessava per la termodinàmica. Es pensava que, ja que els resultats procedien dels experiments, per força tenien un sentit físic i no calia entretenir-se amb especulacions sobre extensions de la termodinàmica, que segons aquesta visió ja no resultava aplicable en aquelles circumstàncies extremes. Així, va ser una decepció constatar el desinterès total pels aspectes termodinàmics del problema, que a nosaltres ens semblaven molt interessants i que renovaven el nostre camp d'estudi, però que els investigadors deixaven de banda, centrant-se exclusivament en l'anàlisi dinàmica.

Posteriorment, hem anat aplicant aquestes equacions a diversos sistemes físics. Els efectes a temps curts són molt importants, per exemple, en fenòmens de solidificació ràpida que s'utilitzen cada vegada més en l'obtenció de materials sofisticats, tot baixant molt ràpidament la temperatura, de manera que la solidificació té lloc en un temps molt breu. Així, barreges de materials que si se solidifiquessin lentament se separarien en dues o més fases diferents no tenen temps de separar-se si la solidificació és molt ràpida, cosa que eixampla el repertori de tècniques que permeten obtenir materials de composicions que fins ara no s'aconseguien. Amb el professor Peter Galenko, d'origen rus i establert a Alemanya, a la Universitat de Jena, vam publicar a *Physics Reports* un article de revisió sobre els resultats que s'obtenen en aquest camp quan es tenen en compte els termes de relaxació de les equacions de transport, mentre que si aquests termes s'ignoren els resultats teòrics

tenen molt poc a veure amb les observacions experimentals i amb les aplicacions que se'n segueixen.

Una altra de les aplicacions que hem fet ha estat emprar tècniques de l'òptica geomètrica per a estudiar l'enfocament i el control de les ones tèrmiques, de manera semblant a com es fa amb les ones lluminoses. Amb el grup del professor Antonio Sellitto —amb Isabella Carlomagno i Maria di Domenico—, a Salerno, també hem utilitzat analogies amb les equacions de l'òptica no lineal per a estudiar ones tèrmiques no lineals, d'amplitud elevada, i treure'n partit per a multiplicar freqüències o per a controlar millor l'enfocament de les ones des de l'exterior. Amb el professor Michele Sciacca, de Palerm, hem estudiat aspectes no lineals de la propagació de pertorbacions tèrmiques de naturalesa solitònica, combinant efectes de dispersió amb efectes no lineals. El nostre objectiu és estudiar la transmissió de bits d'informació mitjançant senyals tèrmics, amb vista a les computacions tèrmiques que es proposa la fonònica, de què parlaré després. L'estudi dels aspectes energètics de la computació és un dels grans temes actuals, en aquesta societat en què la computació, la simulació, els videojocs i la tramesa i l'emmagatzemament de dades i d'imatges han adquirit tanta rellevància i absorbeixen tanta energia, cosa que entra cada vegada més en conflicte amb la sensibilitat ecològica.

Amb tot això, ens situem cap a 1984 o 1985. El període des de la meua tesi doctoral, el 1978, fins al 1986 havia estat molt ric i intens. Per això, el professor Casas va proposar a la Facultat de Ciències de la UAB que em presentés com a candidat al Premi Nacional Rei Don Joan Carles I a la Investigació Científicotècnica. A mi em va semblar exagerat i quimèric, ja que el premi era obert a tota mena de científics menors de trenta-tres anys, de tota mena d'especialitats. Al final, però, amb gran sorpresa meua, vam rebre el premi Luis Enrique Ibáñez Santiago i jo. Luis Ibáñez, nascut a València i doctorat en física teòrica a la Universitat Autònoma de Madrid el 1978, és un gran investigador en altes energies, teoria de cordes i partícules elementals, i ha tingut una carrera molt brillant.

El gener de 1987, al Palau Reial de Madrid, el rei ens va donar el premi, junt amb dos altres premis nacionals d'humanitats i d'enginyeria. Em va sorprendre que Joan Carles s'atansés a mi amb cara divertida per preguntar-me «¿Cómo va su poesía en catalán?». En veure la meua sorpresa, em va aclarir que el dia anterior havia estat parlant amb l'industrial català Josep Cusí, company seu de navegacions, i que indirectament em coneixia. Del rei Joan Carles prefereixo conservar-ne el bon record d'aquell acte, de la seva visita a Josep Pla el 1975, de la seva utilització del català en els discursos a Catalunya, del fet que no hagués posat dificultats addicionals a les ja molt grans que suposava la transició política, i al fet que el febrer de 1981 acabés oposant-se al cop d'estat. Ens hem vist en dues ocasions més, amb anècdotes agradables que no venen al cas. Vaig lamentar molt que, en l'època de la majoria absoluta d'Aznar passés al «nunca fue la nuestra lengua de imposición»,

quan sabia prou bé tots els esforços fets pels poders espanyols durant més de dos segles per prohibir o arraconar el català. La seva afició desmesurada a les dones i als diners ja no són de la meua incumbència. L'han desacreditat, amb raó, i ho lamento.

Em van comunicar la concessió del premi el maig de 1986, pocs dies abans que marxés a Berlín, a una estada de dos mesos a la Universitat Politècnica, a la qual m'havia invitat el professor Ingo Müller, un dels iniciadors de la termodinàmica estesa. Müller fou un investigador brillant i original, rigorós i intel·ligent, però amb una tendència a menystenir el treball dels altres, fins i tot de gent brillant que treballava en la seva línia. Després de la seva tesi doctoral a Aquisgrà va marxar als Estats Units, a la Universitat de Brown, on va passar un parell d'anys en contacte estret amb la gent de l'escola de la termodinàmica racional. Els caràcters més aviat dogmàtics dels uns i dels altres van fer que tornés a Europa i que desenvolupés, amb el físic matemàtic Tommaso Ruggeri, de la Universitat de Bolonya, agut i simpàtic, una nova versió de la termodinàmica estesa en les línies de la termodinàmica racional, i que té un nombre considerable de seguidors. Així, dintre de la termodinàmica estesa —teoria termodinàmica de no-equilibri que inclou els fluxos entre les seves variables independents— hi ha el que anomenem *extended irreversible thermodynamics* i la *rational extended thermodynamics*. La primera, en la qual hem treballat nosaltres, és més flexible i fenomenològica; la segona té més exigències matemàtiques, que li donen una gran elegància formal, però la restringeixen en la seva aplicació.

En aquella època —maig i juny de 1987— Berlín encara estava envoltada del mur soviètic. La meua estada fou molt profitosa. Com que Müller estava sovint de viatge, vaig aprofitar per a redactar un ampli article de revisió i presentació de la termodinàmica estesa, a partir del meu llibre en català sobre el tema, actualitzant-lo molt, i que va ser publicat el 1988 a *Reports on Progress in Physics*. Conèixer Berlín i els seus museus, les seves avingudes i els seus boscos i llacs, fer un parell de visites al Berlín oriental i visitar el Museu de Pèrgam i les seves colleccions riquíssimes em va resultar molt enriquidor. Els meus pares, que em vingueren a visitar, van quedar entusiasmats en veure, al Museu de Pèrgam, fins a quin punt era ric el llegat grec de les costes turques de l'Egeu, i l'any següent van fer-hi un llarg viatge en cotxe, que un parell d'anys després van ampliar, un viatge que tinc pendent.

## 8. Difusió i transicions de fase

En parlar de les contribucions de no-equilibri a la temperatura i la pressió he comentat que una de les coses que ens vam plantejar com a exploració de la teoria va ser fins a quin punt aquestes contribucions modificarien les transicions de fase dels materials. En particular, més que en el flux de calor, ens vam interessar, amb Carlos Pérez, en fluids amb gradients de velocitat. Per exemple, suposem que l'aigua, en lloc d'estar quieta, flueix lentament sobre una superfície sòlida. La pregunta és si aquest flux —que suposa una diferència de velocitats entre la superfície superior de la làmina d'aigua i la seva superfície inferior, en contacte amb el sòlid, on l'aigua té velocitat nul·la— té alguna repercussió en el valor de la temperatura de congelació, tal com hi influeixen la pressió o la concentració de soluts. Vam obtenir unes expressions purament formals que no ens van aclarir gran cosa, però que ens van obrir l'interès pel problema, que en aquells moments no havia estat gaire estudiat —o no n'havíem sabut trobar les referències. Cal tenir present que, a diferència d'ara, trobar les referències adients, especialment quan eres nou en un cert tema, resultava molt difícil, fet inimaginable avui, en què els cercadors informàtics donen una informació vastíssima sobre qualsevol tema, cosa que eixampla i accelera les possibilitats de la recerca.

Els nostres estudis sobre el paper del gradient de velocitat en transicions de fase van avançar força amb la visita que ens va fer el professor Manuel Criado-Sancho, la tardor de 1990. Des de llavors, i fins a la jubilació, hem tingut una col·laboració molt fructífera sobre diversos aspectes de la termodinàmica de no-equilibri en fluids amb gradients de velocitat. El professor Criado-Sancho, de la UNED de Madrid, persona cordial, divertida i enginyosa, gran coneixedor de la literatura en castellà i en francès, era especialista en química física i s'havia interessat en polímers. En aquells moments, nosaltres estàvem treballant amb la generalització de la termodinàmica estesa a la viscoelasticitat. Havíem après que en el cas dels polímers —ca-

denes moleculars molt llargues i flexibles—, la pressió viscosa té moltes contribucions diferents, cadascuna amb el seu temps de relaxació i la seva viscositat, de manera que érem conscients de la riquesa del tema, que ens resultava ben atractiu, després d'haver estudiat sistemes amb un sol temps de relaxació.

Per tal de relacionar la dinàmica de les dissolucions de polímers amb la termodinàmica, cosa que la viscoelasticitat no fa directament, vam pensar que seria interessant estudiar la difusió de polímers en soluts de fluids simples. En un treball amb el professor Miroslav Grmela i amb Juan Camacho, iniciat durant la meua estada a Montreal de maig a juliol de 1990, vam estudiar la difusió, emprant una equació per al flux de difusió  $\mathbf{J}$  de molècules petites en matrius poroses elàstiques de la forma

$$\tau d\mathbf{J}/dt + \mathbf{J} = -D' \text{grad } \mu + \beta D'' T \text{div } \mathbf{P}^v, \quad (8.1)$$

on  $\tau$  és el temps de relaxació del flux de difusió,  $\mu$  és el potencial químic dels polímers —o del solut, en general—,  $D'$  és un coeficient relacionat amb el coeficient de difusió  $D$  dels polímers i  $\beta$  és un coeficient que acobla la divergència de la pressió viscosa del polímer amb el flux de difusió, i que apareix en el flux d'entropia generalitzat, anàleg al de (7.4). El segon terme del membre de la dreta té un paper important quan les molècules del solut fan que la matriu porosa es vagi dilatant a mesura que hi penetren.

El potencial químic va ser definit per Gibbs a la dècada de 1890, i va ampliar la termodinàmica a l'estudi de les dissolucions, les reaccions químiques i les transicions de fase. En termes simples, el potencial químic és l'energia lliure per molècula. L'energia lliure és l'energia interna més la temperatura absoluta per l'entropia menys la pressió pel volum. A temperatura i volum constants, els sistemes termodinàmics tendeixen a la mínima energia lliure, i això determina, per exemple, les condicions d'equilibri químic o les condicions d'intercanvi de molècules entre sistemes. Així com la calor va de temperatures elevades a temperatures baixes, fins a igualar les temperatures, les molècules van des de potencials químics elevats a potencials químics baixos, fins a igualar els potencials químics. El potencial químic es relaciona amb l'entropia com  $\mu_i/T = -\partial S/\partial N_i$ , on  $N_i$  és el nombre de molècules de l'espècie química  $i$  en el sistema, amb la diferenciació feta a temperatura i pressió constants.

Així, generalitzada l'entropia tal com (7.3), si hi introduïm com a variable addicional la composició del sistema, en podem obtenir potencials químics que, a més de la temperatura, la pressió i el nombre de molècules, depenen de la pressió viscosa, que podem relacionar amb el gradient de velocitats, ja que la pressió viscosa és proporcional al gradient de velocitat. El potencial químic és

$$\mu_{i \text{ no-eq}} = \mu_i(T, p, c_j) + A(T, p, c_j) \mathbf{P}^v : \mathbf{P}^v, \quad (8.2)$$



on  $\mu_i$  és el potencial químic de l'espècie  $i$  en equilibri local i el segon terme dona la contribució de la pressió viscosa al potencial químic, amb  $A$  donat per  $A = Td(\tau/2\eta T)/dc_i$ . De fet, en sistemes polimèrics, en lloc de  $\tau/\eta$  hem de considerar una suma de quocients  $\tau/\eta$  corresponents als diversos graus de llibertat de les cadenes macromoleculares polimèriques, cosa que dona una gran riquesa i diversitat al tema.

He esmentat la meua estada a Montreal, amb el professor Miroslav Grmela. Ell i la seva dona, Viera, havien participat l'agost de 1968 en la Primavera de Praga, estimulada pel primer ministre txec Alexander Dubček per a un «socialisme amb rostre humà», i contra el control soviètic ferri i dogmàtic del país. La revolució va ser esclafada amb l'entrada dels tancs del Pacte de Varsòvia a Praga —una cosa que em va impressionar molt més que el Maig del 68, que em va semblar un xic capriciós. Entre els fugitius, Grmela i la seva dona, i també el professor Miroslav Kranyš —que també havia contribuït als inicis de la termodinàmica estesa, des d'un vessant relativista—, van anar a parar a Montreal, on van refer la seva vida.

La meua estada a Montreal va ser molt rica en el meu aprenentatge sobre polímers, tema en el qual Grmela treballava. Però el que més interessava Grmela era una cosa molt més profunda: l'estructura hamiltoniana de la part reversible de les equacions termodinàmiques d'evolució. Les teories usuals de la termodinàmica de no-equilibri permeten obtenir restriccions sobre la forma i els coeficients dels termes dissipatius, és a dir, que contribueixen a la producció d'entropia, però no tenen res a dir sobre termes convectius i d'altres que no contribueixen a la producció d'entropia. Grmela, des d'una formulació matemàtica avançada de la mecànica analítica a medis continus, proposava que les equacions d'evolució termodinàmiques havien de tenir una part irreversible, però també una part reversible, més rica que la purament convectiva, i que havia de tenir estructura hamiltoniana —estructura simplèctica, claudàtors de Poisson, identitats de Jacobi...—, coses que en estudiar mecànica analítica m'havien admirat i que ara, aplicades a equacions molt més complicades, encara m'admiraven més per la seva elegància formal i la seva riquesa de conclusions. Així s'estableix un nexa molt profund entre una matemàtica avançada i característiques universals de la dinàmica física dels sistemes.

Vaig aprofitar l'estada a Montreal per a conèixer bé la ciutat, per a visitar diversos llocs del Quebec, per a fer algunes excursions per l'estat de Vermont, als Estats Units, amb els Grmela, per a visitar Toronto i les cascades del Niàgara, per a visitar Nova York... Vaig participar en algunes manifestacions de la causa quebequesa pels volts de Sant Joan; em va sorprendre veure jueus ortodoxos, amb els vestits negres i les filactèries, que mai no havia vist en directe. Vaig llegir les memòries d'Andrei Sàkharov, que acabaven de ser publicades en francès, i em va impressionar la seva narració de la primera explosió de la bomba d'hidrogen so-

viètica, a la qual ell havia contribuït, i la seva defensa posterior dels drets humans a la Unió Soviètica. Vaig anar a un cycle de cinema que combinava la música tocada amb orquestra i la pel·lícula, on vaig poder veure dues obres de Serguei M. Eisenstein, *Ivan Grozni* (*Ivan el Terrible*) i *Alexandr Nevski*, musicades per Serguei S. Prokófiev. D'aquelles experiències van començar a sortir-ne poemes que posteriorment formarien part dels meus llibres *Joc d'ombres* i *Els ulls del falcó maltès*. Els dies de cada dia dinava al restaurant del darrer pis de l'Escola Politècnica de Montreal, on l'any anterior un individu havia matat vuit noies disparant amb un rifle. M'impresionava molt entrar en aquell lloc lluminós i plàcid i pensar en aquella tragèdia.

Quan el setembre de 1990 el professor Criado-Sancho ens va visitar a Bellaterra, vam pensar que una possible col·laboració seria aplicar el potencial químic generalitzat (8.2), dependent del gradient de velocitats, a les dissolucions de polímers. Els càlculs eren molt complicats i el professor Criado-Sancho els feia amb molta competència. El problema que ens vam plantejar era el dels efectes del gradient de velocitat sobre la solubilitat dels polímers.

En efecte, si tenim una dissolució de molècules *A* en un fluid *B*, pot ser, segons els tipus d'interaccions entre *A* i *B*, que les molècules *A* es dissolguin en *B* per sobre d'una temperatura, i que el sistema se separi en dues regions, una rica en *B* i l'altra rica en *A*, per sota d'aquella temperatura. La pregunta era com varia el límit de solubilitat quan la dissolució, en lloc d'estar en repòs, està fluint al llarg d'un tub o entre dos cilindres que giren amb velocitats diferents.

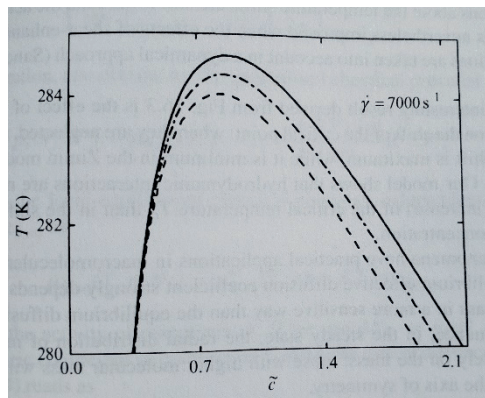


FIGURA 4. Influència del gradient de velocitat en les corbes de solubilitat. La línia contínua superior correspon a l'equilibri, i les altres dues a gradients de velocitat de  $1.500 \text{ segons}^{-1}$  (corba intermèdia) i de  $7.000 \text{ segons}^{-1}$  (corba inferior). La baixada de la corba indica que la solubilitat del polímer augmenta en presència del gradient de velocitat.

FONT: D. JOU, J. CASAS-VÁZQUEZ i M. CRIADO-SANCHO (2011), *Thermodynamics of fluids under flow*, 2a ed., Berlín, Springer.

La física d'aquest fenomen és complicada i els càlculs també. Amb el professor Criado-Sancho, i de vegades en col·laboració amb Luis Felipe del Castillo, de Mèxic, vam estudiar moltes situacions diferents pel que fa a la influència del gradient de velocitat, tant sobre els límits de solubilitat com sobre el ritme de difusió o les condicions d'equilibri químic (vegeu la figura 4). Entre d'altres coses, vam estudiar quantitativament com separar molècules de masses diferents en un flux al llarg d'un tub, ja que les contribucions del flux al potencial químic depenen fortament de la massa molecular, cosa que permet modificar els ritmes de difusió per a diferents masses tot modificant els gradients de velocitat. Vam aplegar els nostres resultats de termodinàmica en fluids en moviment en el llibre *Thermodynamics of fluids under flow*, publicat per Springer.

Una altra aplicació del potencial químic de no-equilibri la vam fer amb el doctorand Hassan Bidar, dedicada a les transicions de fase de matèria nuclear —protons i neutrons— a plasma de quarks i gluons. Aquestes transicions s'estudien a l'Organització Europea per a la Recerca Nuclear (CERN, del francès, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), per exemple, tot fent xocar entre si, a velocitats elevadíssimes, nuclis pesants, de plom o d'or. No resulta del tot clar si s'ha arribat o no a aconseguir el plasma de quarks i gluons. El tema té un gran interès teòric des de la perspectiva de les partícules elementals. En efecte, el protó i el neutró estan compostos cadascun per tres quarks (uud), (udd), respectivament. En situacions normals, els quarks estan confinats en els nucleons. Si l'energia és molt elevada, com en les col·lisions ultrarelativistes, els nucleons es desintegren i passen a formar una mena de brou de quarks i dels gluons que intercanvien entre si com a quàntums de la interacció nuclear forta.

Aquesta situació també té interès en les etapes inicials de l'Univers, de temperatures i densitats molt elevades. En efecte, al començament, la matèria de l'Univers no estava formada per protons ni neutrons, sinó per quarks i leptons a gran densitat. En anar baixant la temperatura, a mesura que l'Univers s'anava expandint, els quarks es van anar agrupant de tres en tres (barions) o de dos en dos (mesons) segons unes certes regles. Tant la situació de les col·lisions nuclears com la de la cosmologia són situacions fora de l'equilibri —en un cas, perquè la col·lisió és molt violenta; en el cas còsmic, perquè l'expansió de l'Univers en les etapes inicials és molt ràpida. Per això, tenir en compte les contribucions dels fluxos pot ser d'interès en aquestes situacions. Ens hauria agradat treballar-hi més, però cada problema és un món i la seva comprensió, el seu coneixement i el seu domini demana moltes hores.

Respecte del terme de relaxació de l'esquerra de l'equació (8.1), Vicenç Méndez i Quim Fort van tenir la idea d'aplicar-lo a estudis sobre la propagació de la cultura neolítica per Europa i Àsia. Estudis previs que feien servir l'equació de difusió clàssica no aconseguien explicar els resultats dels arqueòlegs respecte de l'avenç

temporal de la frontera de la cultura neolítica. Amb el terme de relaxació, Méndez i Fort ho van aconseguir i el seu resultat va sortir en una dotzena llarga de diaris europeus i americans, i en programes de tres televisions. Per la seva banda, Juan Camacho va estudiar a fons la transició entre règims reversibles i irreversibles en la difusió; va ampliar així el marc de la teoria i la va ajustar amb molts resultats experimentals, de manera que va enfortir-ne els fonaments matemàtics i conceptuals.

És agradable esmentar la invitació de la Universitat Nihon, al Japó, a través del professor Yoshishige Katayama, de Kōriyama (Fukushima), per fer-hi una estada d'un mes, el setembre de 1993. Es tractava de donar-hi un cicle de conferències, atendre estudiants de doctorat i conèixer una mica el país —Tòquio, Kōriyama, Kyoto, Nara i Hakone, bàsicament. Vaig tenir ocasió de tenir converses científiques interessants amb els professors Katayama, Masaru Ichiyanagi i Masaru Sugiyama. Amb el professor Katayama vam publicar dos articles sobre moviment brownià en presència de gradients de velocitat, que complementaven des d'una perspectiva microscòpica els nostres treballs macroscòpics sobre la influència de gradients de velocitat en el transport. Incidentalment, just la setmana abans de marxar al Japó, em va arribar el primer exemplar del nostre llibre *Extended irreversible thermodynamics*, amb els professors Casas i Lebon, que des de llavors ha contribuït molt a la difusió de la teoria.

## 9. Nanosistemes: del règim difusiu al règim balístic

M'hauria agradat explorar més a fons les col·lisions nuclears i la transició de fase cosmològica entre l'etapa del plasma de quarks i gluons i l'etapa de protons i neutrons. Però més o menys quan ens disposàvem a estudiar aquests temes, un desenvolupament nou, cap al 2005, va canviar les prioritats de la nostra recerca i la va enfocar cap al transport de calor en nanosistemes i la seva aplicació a nanotecnologia, cosa que ha resultat molt fructífera per a la teoria i li ha obert moltes aplicacions.

És interessant veure com alguns desenvolupaments inicialment teòrics, i que semblen molt allunyats de la vida real i de qualsevol aplicació, de mica en mica s'acosten a la realitat experimental i a l'aplicació. En el capítol 7 he comentat com els experiments de dispersió de neutrons en sòlids i en fluids van fer avançar la hidrodinàmica cap a dominis de precisió insospitada, pel que fa a l'evolució temporal i a les inhomogeneïtats espacials dels sistemes. Això va proporcionar una base experimental a la teoria que havíem anat desenvolupant durant anys guiats tan sols per arguments teòrics. Però la hidrodinàmica generalitzada, malgrat la seva riquesa de resultats, no tenia aplicacions directes. El que sí que n'ha tingut ha estat la ciència a escala de nanòmetres, o nanociència, que ha revolucionat molts aspectes de la tecnologia.

Com que ens havien interessat el comportament del flux de calor a temps curts i a distàncies curtes i la transició del règim reversible al règim irreversible, era lògic que també ens interesséssim per la transició entre el règim de transport difusiu, en què hi ha moltes col·lisions entre les partícules, i el règim balístic, en què pràcticament no hi ha col·lisions entre les partícules, sinó tan sols de les partícules amb les parets del sistema.

L'equació de Fourier funciona bé en el règim amb moltes col·lisions. En el capítol 5 he comentat que ens havíem interessat per la transició des de temps molt

curts, amb poques col·lisions, a temps llargs, amb moltes col·lisions. Era natural plantejar-se el mateix problema des d'una perspectiva espacial. És a dir, si tenim dues plaques planes paral·leles a temperatures diferents, com varia el flux de calor a mesura que reduïm la separació entre les plaques i tenen més rellevància les col·lisions amb les parets?

En teoria cinètica s'anomena recorregut lliure mitjà la distància mitjana que recorren les partícules sense tenir cap col·lisió amb altres partícules. El recorregut lliure mitjà és de l'ordre de la velocitat mitjana multiplicada pel temps de relaxació dels fluxos. Si els temps de relaxació es fan més llargs, els recorreguts mitjans també es fan més llargs. El problema, doncs, és com canvia el flux de calor entre les plaques quan la distància entre les plaques passa de ser més gran que el recorregut lliure mitjà —i tenim el règim difusiu— a ser més petita que el recorregut lliure mitjà —i tenim el règim balístic. Se sap, per la teoria cinètica dels gasos i pels experiments, que en el règim balístic el flux de calor depèn de la diferència de temperatures entre les plaques, però no de la seva separació. Això contrasta amb el règim difusiu, en què el flux de calor depèn de la diferència de temperatures dividida per la separació entre les plaques. És a dir, si mantenim constants les temperatures de les plaques i reduïm a la meitat la separació entre elles, el flux es multiplica per dos en el règim difusiu però no varia en el règim balístic.

A partir d'una jerarquia d'equacions per al flux de calor, i el flux del flux de calor, i els successius fluxos d'ordres superiors, i aplicant tècniques matemàtiques de fraccions contínues que havíem anat treballant en la tesi de Maria Ferrer Puig, vam arribar a una expressió asimptòtica per al mòdul  $q$  del flux de calor entre dues plaques en funció de la separació  $L$ , donada per

$$q = -\lambda(l/L) \text{ grad } T = \lambda(l/L)\Delta T/L \quad (9.1)$$

$$\lambda(l/L) = 2\lambda_0 (l/L)^{-2} \{[1 + (l/L)^2]^{1/2} - 1\}, \quad (9.2)$$

on  $L$  és la separació entre les plaques,  $\Delta T$  la diferència de les seves temperatures i  $l$  el recorregut lliure mitjà de les partícules del sistema. Per a  $L$  més gran que  $l$ , la  $\lambda(l/L)$  donada per (9.2) es redueix a  $\lambda_0$  —la conductivitat tèrmica usual— i (9.1) és l'equació de Fourier. En canvi, quan  $L$  és més petita que  $l$ , (9.2) dona una expressió proporcional a  $\lambda_0 L/l$  que, introduïda a (9.1), fa que  $L$  es cancel·li i el flux de calor només depengui de la diferència de temperatures. Així, en aplicar les tècniques que havíem anat desenvolupant al llarg dels anys, vam poder trobar una expressió per al flux de calor que servia per a separacions  $L$  grans, petites i intermèdies —comparades amb  $l$ . Va ser una satisfacció teòrica, ja que d'aquesta manera complementàvem les nostres anàlisis, motivades pel comportament temporal (transició reversible-irreversible) en passar de temps curts a temps llargs, amb el com-

portament espacial (transició balística-difusiva) en passar de separacions curtes a separacions llargues.

Incidentalment, el tema matemàtic de les fraccions contínues em va semblar molt interessant, i m'hauria agradat molt aprofundir-hi en lloc de limitar-me a utilitzar-ne uns pocs resultats ben sabuts. Una de les coses que vaig aprendre en estudiar aquests temes va ser que Adrien-Marie Legendre havia demostrat que els nombres irracionals que són solució d'una equació algebraica poden ser escrits com a fraccions contínues periòdiques. Aquesta observació em va colpir. En efecte, quan expressem nombres irracionals en representació decimal, tenim una seqüència no periòdica de decimals. Per exemple, l'arrel quadrada de 2 és 1,41421356237... En canvi, si ho expressem en fracció contínua, el desenvolupament de l'arrel quadrada de 2 esdevé periòdic, igual a  $1 + [1/2 + 1/2 + 1/2 + 1/2 + 1/2 + \dots]$ . El nombre d'or  $[1 + 5^{1/2}]/2$ , que en representació decimal és 1,618033988749..., expressat en fracció contínua pren la forma periòdica  $1 + [1/1 + 1/1 + 1/1 + 1/1 + 1/1 + 1/1 + \dots]$ . Fins i tot el nombre  $\pi$ , que no és solució de cap equació algebraica, té una representació no periòdica però senzilla de recordar en termes de funció contínua. Així, allò que en un cert llenguatge no té cap periodicitat ni ordre aparent —com la seqüència de decimals dels nombres irracionals— en un altre llenguatge pot esdevenir repetitiu i ben ordenat, cosa que planteja la qüestió —d'interès formal i d'interès poètic— de quin llenguatge és el més adient per a expressar certs aspectes del món.

L'expressió (9.2) ens agradava des de la perspectiva teòrica, però no sabíem trobar-li aplicacions noves. Òbviament, es pot aplicar al transport de calor entre dues plaques en un gas, a mesura que li anem traient gas. El recorregut lliure mitjà és inversament proporcional a la densitat del gas, de manera que reduir la densitat és com anar augmentant  $l$  a  $L$  constant, o bé com si reduíssim  $L$  a  $l$  constant, pel que fa al quocient  $l/L$ . Per això, temes relacionats amb el problema que ens interessava havien estat estudiats amb detall per l'aeronàutica de grans altures i per l'astronàutica cap als anys de la cursa espacial, entre 1945 i 1975.

L'interès en nanosistemes —sistemes entre 1 nm i 100 nm, on el nanòmetre és una milionèsima de mil·límetre— ens obria, però, una nova frontera que començava a atreure molta atenció, especialment des del desenvolupament del microscopi d'efecte túnel el 1981 (Premi Nobel de Física de 1986) i la seva utilització per a manipular àtoms a partir de 1989, més el descobriment dels fullerens el 1985 (Premi Nobel de Química de 1996), dels nanotubs de carboni el 1991 i del grafè el 2004 (Premi Nobel de Física de 2010).

Pel que fa al transport, sistemes com els nanotubs de carboni o el grafè tenen una conductivitat tèrmica molt gran, amb un recorregut lliure mitjà força gran dels fonons corresponents (en comparació amb el grafit, per exemple). Es planteja tècnicament la qüestió d'explorar l'intercanvi de calor en sistemes de l'ordre dels

centenars o desenes de nanòmetres. Entre les parets del sistema no hi ha un gas de partícules en el buit, sinó un gas de fonons movent-se en el cristall.

Xavier Àlvarez, doctorand molt dinàmic, quan a finals de 2006 li vaig comentar que teníem aquesta expressió, va començar a buscar dades experimentals i va veure que (9.2) descrivia força bé la conductivitat tèrmica efectiva de diversos nanosistemes de diferents grandàries, com ara nanocilindres de silici o de germani i d'altres materials d'interès. Aquesta troballa ens obrí el camp al transport de calor i de l'electricitat en nanosistemes, frontera molt activa i fèrtil, i que des de 2006 hem estat estudiant amb profit notable.

Poder disposar de dades experimentals i estar en contacte amb grups experimentals, com el de Javier Rodríguez Viejo al nostre mateix Departament, estimulà molt la teoria. De seguida es comencen a veure petites discrepàncies entre les prediccions teòriques i les observacions. Part d'aquestes discrepàncies són fluctuacions estadístiques, però d'altres són sistemàtiques i indiquen que la teoria ha de ser millorada. Això hem anat fent, cada vegada amb més precisió, especialment Xavier Àlvarez i els seus doctorands —Carla de Tomás, Pol Torres i Andreu Bear-do—, i col·laboradors de la UAB —Juan Camacho i Javier Bafaluy—, de l'Institut de Ciència de Materials del CSIC —Xavier Cartoixà i Riccardo Rurali— o dels Estats Units —Amir Ziabari i d'altres. Estic molt satisfet d'haver estat reemplaçat tan brillantment en el meu lloc de recerca al Departament de Física des que em vaig jubilar el setembre de 2018, cosa que ha contribuït a rejuvenir la universitat.

L'estudi del transport de calor en nanosistemes i la necessitat d'emprar equacions més generals que la de Fourier han dut a una nova edat d'or de l'estudi de la transferència de calor. De ser considerat un tema clàssic, acabat en els seus fonaments, només obert a aplicacions cada vegada més complicades, ha passat a ser un camp nou amb moltes preguntes noves, fonamentals, amb noves relacions amb la termodinàmica, i amb moltes aplicacions. Ha estat una sorpresa molt agradable haver pogut viure aquest nou impuls d'un camp de la física que semblava saturat i envellit. En aquest camp de treball, amb la professora Liliana Restuccia, de Messina, on vaig fer una bella estada de dos mesos el 2019, vam estudiar el transport de calor en medis anisotròpics i inhomogenis amb defectes, amb aplicacions en rectificació tèrmica, transistors tèrmics, superxarxes, medis amb gradient de composició i metamaterials tèrmics, temes d'estudi molt actius.



## 10. Hidrodinàmica de fonons en nanosistemes

El juny de 2007 em van invitar a un congrés de termodinàmica de no-equilibri a Ráckeve, prop de Budapest, en un antic palauet vora un canal del Danubi. Com que feia poc que havíem publicat amb Xavier Àlvarez el nostre primer article sobre transport de calor en nanosistemes, que estava essent ben rebut, vaig pensar que seria un bon tema per a exposar, ja que obria la termodinàmica de no-equilibri a un camp que fins aleshores no havia estat considerat.

El lloc em va resultar molt agradable. Esmorzàvem d'hora al matí, sota els arbres altíssims del pati del palauet, obert a la vista del canal. Els primers a baixar a esmorzar érem la professora Natalya Kizilova, de la Universitat de Khàrkiv, a Ucraïna, i el professor Antonio Cimmelli, de la Universitat de la Basilicata, a Potenza, a Itàlia. La conferència de la professora Kizilova, el primer dia, em va impressionar: tractava sobre la geometria de les divisions dels vasos portadors de saba en les fulles de diferents tipus d'arbres, tot un exercici que combinava brillantment matemàtiques pures i naturalisme vegetal. Des d'aleshores he seguit el tema amb interès, ja que la biologia està servint com a model de molts desenvolupaments tecnològics, especialment relacionats amb un aprofitament millor de l'energia i amb restriccions ecològiques més exigents. És el camp de la biomimètica.

El professor Cimmelli s'interessava per models de transport de calor que generalitzessin l'equació de Fourier i els seus fonaments termodinàmics respectius. Per això, va quedar molt interessat per la meua conferència, en què havia deduït des d'un formalisme termodinàmic una expressió que permetia passar de sistemes normals a nanosistemes. L'acompanyava un jove doctorand, Antonio Sellitto, que es va sentir molt atret per la meua presentació. Dos o tres dies després de la nostra primera trobada ja havíem acordat que Antonio Sellitto vindria tres mesos a la UAB per a familiaritzar-se amb els nous desenvolupaments que estàvem fent.

Una de les equacions que havíem treballat, independentment, el professor Cimmelli i nosaltres, era l'equació anomenada de Guyer-Krumhansl, que generalitza l'equació purament relaxacional de Cattaneo-Vernotte, tot sumant-li un terme no local amb l'operador laplaciana aplicat al del flux de calor, que apareixia de forma natural en el nostre tractament termodinàmic. De fet, sense conèixer els resultats de Guyer i Krumhansl, havíem obtingut i explorat aquella equació ja cap a 1980. Al capdavant, ens va ser la base de generalitzacions teòriques que ens havien dut, en considerar tota una jerarquia de fluxos d'ordre superior, a l'expressió (9.2) de la conductivitat tèrmica efectiva.

Si en lloc d'incorporar un gran nombre de fluxos ens quedem tan sols amb el flux de calor  $\mathbf{q}$  i el seu flux, obteníem per al flux de calor l'equació

$$\tau d\mathbf{q}/dt + \mathbf{q} = -\lambda \text{grad } T + al^2 \nabla^2 \mathbf{q} + \mu \text{div } \mathbf{q}\mathbf{q}, \quad (10.1)$$

on  $l$  és el recorregut lliure mitjà dels fonons,  $a$  una constant numèrica i  $\mu$  un coeficient. De fet, aquesta equació s'obté en el cas que el temps de relaxació del flux del flux de calor és molt més petit que el temps de relaxació  $\tau$  del flux de calor.

Així doncs, quan l'any 1980 vaig visitar el professor Angelo Morro a la Universitat de Gènova, per recomanació del professor Ingo Müller, tot just havíem començat a treballar en la versió de (10.1) amb  $\mu = 0$ , amb Carlos Pérez, a Bellaterra. La visita a Gènova va anar precedida per una visita breu a Florència, lloc que visitava per primera vegada, i d'on venia el meu nom —per mor del David de Miquel Àngel, que el meu avi escultor admirava molt. Vaig tenir ocasió de reprendre l'interès en la cultura i la història italianes, i descobrir la rica tradició matemàtica italiana que havia tingut tanta influència en la física: Vito Volterra, Tullio Levi-Civita, Gregorio Ricci-Curbastro... A la tornada, al tren, vaig anar llegint un article de Hans Beck, P. H. Meier i Armin Thellung que parlava de com aquesta equació, quan es prescindeix del segon terme del membre de l'esquerra —el terme vinculat a la llei de Fourier— dona per al flux de calor una equació anàloga a les equacions hidrodinàmiques per a la velocitat en un fluid viscos. El paper de la viscositat el representa el quadrat del recorregut lliure mitjà dividit per la conductivitat tèrmica i el paper de la pressió hidrodinàmica el fa la temperatura. Aquest desenvolupament porta a una conductivitat tèrmica efectiva per a cilindres proporcional al quadrat del radi, a diferència de la llei de Fourier, en què la conductivitat no depèn de la grandària de sistema. Llavors, però, encara no havia començat la nanotecnologia, i aquest fenomen s'havia observat tan sols a molt baixes temperatures en un parell de materials.

Com a tema de col·laboració amb Sellitto i Cimmelli, i que no ens desviés de les recerques en nanosistemes que estàvem fent amb Xavier Àlvarez, vam pensar que seria atractiu estudiar la hidrodinàmica de fonons per a la descripció del flux

de calor en nanosistemes. Una cosa que ens intrigava, però, era que la conductivitat tèrmica efectiva, tot i que era proporcional al quadrat del radi per a radis comparables o una mica superiors al recorregut lliure mitjà, passa a ser proporcional al radi per a radis molt més petits que el recorregut lliure mitjà. Poc abans que arribés Sellitto havia estat estudiant un llibre de microfluídica en què utilitzaven com a condició de frontera per a la velocitat d'un fluid en un cilindre fi una expressió habitual en la física de gasos enrarits. És a dir, en lloc de suposar que la velocitat del fluid és nul·la sobre la paret, se suposa que té un valor proporcional al recorregut lliure mitjà  $l$  i a la variació espacial de la velocitat prop de la paret. Nosaltres vam adaptar al flux de calor la proposta de Maxwell per a la velocitat, de manera que vam proposar que el mòdul  $q_w$  del flux de calor al llarg de la paret està relacionat amb la variació del mòdul  $q$  del flux de calor respecte de la normal  $n$  a la superfície com

$$q_w = -Cl(\partial q/\partial n), \quad (10.2)$$

on  $C$  és un coeficient numèric que depèn de les característiques de les col·lisions dels fonons amb les parets. Aquesta idea ja havia estat proposada per Maxwell en teoria cinètica de gasos enrarits cap a 1860, però no havia estat emprada en hidrodinàmica de fonons. Amb Sellitto ens vam posar a la feina, i el segon dia de la seva estada ja teníem com a resultat una expressió explícita per a la conductivitat tèrmica efectiva per a conductes fins, en funció del radi i del recorregut lliure mitjà, que encaixava plausiblement amb les observacions experimentals en nanotubs de silici.

Amb Xavier Àlvarez i Antonio Sellitto vam anar generalitzant aquell resultat tot incorporant altres condicions als límits per al flux de calor i altres formes de la secció transversal dels conductes, i també ho vam aplicar al càlcul de conductivitat tèrmica de medis porosos amb porus molt petits, de forma que actuessin com a petites esferes que dificulten el pas de la calor. Els resultats eren força atractius i alguns d'ells plantejaven qüestions noves. Vam aprendre molta hidrodinàmica clàssica i la seva extensió a hidrodinàmica de gasos enrarits per a aplicar-la al flux de calor. Els resultats anaven seguint amb esforç però amb certa fluïdesa. Des de la perspectiva de les fonamentacions termodinàmiques de les equacions de transport, el professor Cimmelli col·laborava estretament amb nosaltres. Els resultats dels nostres treballs, a més de ser presentats en nombrosos articles, han estat recollits en la monografia *Mesoscopic theories of heat transport in nanosystems*, publicada per Springer el 2016.

Al començament, no es feia gaire cas dels nostres treballs en hidrodinàmica de fonons, perquè havia quedat la idea que era un règim que només s'observa a temperatures molt baixes i en materials molt concrets, i perquè la gent preferia

emprendre l'estudi del transport a partir de models microscòpics molt detallats, i utilitzant una gran força de computació. Xavier Àlvarez, gran lluitador, tornava de vegades un xic desanimat dels congressos, on els resultats basats en hidrodinàmica de fonons eren vistos amb desconfiança i des d'una perspectiva més aviat arrogant. Des de 2015, però, moltes observacions de fenòmens de transport tèrmic típicament hidrodinàmics a temperatura ambient —sobretot en sistemes bidimensionals com el grafè o les làmines fines de silici o germani— han posat de moda aquest camp, en què durant uns deu anys vam ser pràcticament els únics que hi treballàvem.

Els nostres treballs en aquesta línia van cridar especialment l'atenció d'un grup d'investigadors de la Universitat de Tsinghua, de Pequín, a la Xina, on treballaven en el model de la termomassa, inspirat en la idea d'atribuir una massa relativista a les partícules portadores d'energia, cosa que els servia de base per a una formulació hidrodinàmica amb inèrcia del transport de calor. Alguns dels seus estudiants van fer estades de diverses setmanes a Bellaterra —Yuan Dong, Yangyu Guo— i han fet posteriorment treballs molt interessants en aquest camp, alguns dels quals amb el professor Moran Wang.

Quan a començaments de la dècada del 2000 consultava revistes de física americanes, els pocs articles signats per xinesos corresponien a investigadors que havien emigrat als Estats Units o hi feien estades postdoctorals. De mica en mica, però, el nombre d'articles publicats per investigadors xinesos que treballen a la Xina ha crescut moltíssim i molts grups xinesos estan fent grans contribucions a molts camps de la física, i també estan enviant molts estudiants a Europa i a Amèrica. Al campus de la UAB és freqüent veure-hi estudiants xinesos; jo mateix vaig tenir una doctoranda xinesa, Sun Megran, molt espavilada i brillant, i durant un parell d'anys vam estar treballant en un tema relacionat amb el flux del petroli, que a baixes temperatures entra en una fase gelatinosa que en dificulta molt el flux i que convé trencar amb estratègies físiques adients.

L'estada a Pequín, de deu dies, amb un congrés de tres dies, em va resultar molt interessant. Vaig visitar l'antic palau imperial a la gran plaça de Tiananmen, el Museu Nacional de la Xina, a la mateixa plaça, el mausoleu de Mao Zedong —per curiositat per una figura que havia sonat tant en els meus anys d'adolescència i universitat i per les multituds que continuen visitant-lo—, el Palau d'Estiu, el tram de la Gran Muralla proper a Pequín... Incidentalment, vaig descobrir per què quan començava a anar a congressos diverses persones em deien que en veure *Jou* esperaven trobar-se amb un xinès. Jo no ho entenia, fins que em vaig trobar amb xinesos que tenen *Jou* com a cognom —amb la mateixa sonoritat que la catalana—, i que en anglès el transcriuen *Dzou*, *Tzou* o coses per l'estil. Així, el cognom *Jou*, relativament poc freqüent a Catalunya, resulta ser un dels cognoms més freqüents del planeta quan tenim en compte la Xina.

Resulta curiós pensar com trenta-cinc anys després d'haver començat a explorar una equació de la qual no coneixíem gaire bé el significat físic, es pugui haver convertit en un camp de treball molt actiu. Incidentalment, des del punt de vista històric, la hidrodinàmica dels fonons em porta a pensar en les modelitzacions intuïtives de la teoria del calòric —és a dir, la calor com a fluid—, que van inspirar Laplace, Fourier i Carnot. És curiós com aquella visió hidrodinàmica de la calor, que en l'equació de Fourier tenia certes analogies amb el flux de fluid en medis resistents —com ara el flux de l'aigua en un terreny porós, estudiat inicialment per Henry Darcy des d'una perspectiva matemàtica cap a 1856—, pot ser encara útil avui. Cal tenir present, és clar, la limitació fonamental de la teoria del calòric —la calor com a substància i no com a energia—, però resulta interessant com els correlats imaginatius d'aquella teoria, emprats amb precaució, han resultat útils en aquesta nova branca del transport de la calor a començaments del segle XIX i del segle XXI. Amb Michele Sciacca i amb Liliana Restuccia hem fet algunes generalitzacions de la hidrodinàmica de fonons tenint en compte efectes no newtonians diversos que comencen a ser observats en alguns materials, de manera que la descripció física té una potencialitat més gran de la que inicialment es creia.



## 11. Viscositat del buit i expansió còsmica

L'assignatura d'introducció a la relativitat general, que vaig cursar l'últim any de la carrera, va estar dedicada en bona part a la geometria diferencial —branca molt bella de les matemàtiques— com a preparació per a formular les equacions diferencials d'Einstein sobre el tensor mètric de l'espai-temps que defineixen la relativitat general. Com a aplicació de la relativitat general, tan sols ens va quedar temps per a les ones gravitatòries i per al càlcul de la precessió anòmala del periheli de Mercuri. Gairebé només vam tenir tres classes per a parlar de forats negres i de cosmologia, temes que posteriorment m'interessarien molt.

De fet, el meu aprenentatge en cosmologia es va produir a partir d'una invitació del professor Josep Montserrat Torrents, de la Facultat de Filosofia de la UAB, a participar en uns seminaris de cosmologia impulsats per Walter Mayerstein cap a 1985. Em van encarregar la part físicomatemàtica del tema, deixant les consideracions històriques i filosòfiques a altres professors. El conjunt dels seminaris va ser molt reeixit i em va obrir tot un camp d'estudi i reflexió que he continuat des d'aleshores. Com a colofó dels seminaris, vam poder invitar a la Facultat els professors Paul Davies i John Barrow, que en les dècades de 1980 i 1990 van ser els divulgadors més actius i imaginatius de la cosmologia física i de la física d'altres energies. En particular, Barrow seria un dels impulsors de les consideracions relacionades amb el principi antròpic, que han marcat molts aspectes de la reflexió filosòfica recent sobre la cosmologia, tot i que, de fet, seria més exacte anomenar-lo principi carbònic, perquè es refereix, sobretot, a l'abundància de carboni en l'Univers, necessari per a l'existència de vida.

La cosmologia hauria pogut ser per a mi un tema d'interès relativament marginal, si no hagués estat per les col·laboracions amb el professor Diego Pavón, del nostre grup, les trobades amb Walter Mayerstein i el meu contacte editorial i humà amb Stephen Hawking. Amb Diego Pavón havíem treballat, entre 1980 i 1985, en

la formulació relativista de la termodinàmica estesa. La formulació relativista de la termodinàmica clàssica és un tema molt atractiu, que sempre havia interessat Pavón. La formulació relativista de la termodinàmica estesa era una ampliació natural d'aquells interessos, i tenia el valor particular que, en relativitat, la termodinàmica estesa és especialment rellevant, ja que les seves equacions de transport generalitzades eviten la velocitat de propagació infinita dels senyals tèrmics i viscosos. Així, la formulació que estàvem fent a Bellaterra resultava comparable amb l'extensió relativista que n'havien fet Ingo Müller i Tommaso Ruggeri, i amb les de Werner Israel, a Alberta, i Miroslav Kranyš, a Montreal. Tot això ens introduí en els fonaments de la teoria cinètica relativista, molt interessants.

També ens vam interessar en els forats negres, tema que, en rigor, correspon a la relativitat general, però que entre 1972 i 1975 va entrar de ple i per sorpresa en l'àmbit de la termodinàmica, gràcies a les contribucions de Jacob Bekenstein i de Hawking, que introduïen novetats molt interessants que relacionaven termodinàmica, relativitat general i física quàntica. L'estada del professor Peter T. Landsberg en el nostre grup durant un mes i mig ens va fer entrar més profundament en el problema. Landsberg tenia una intel·ligència ràpida i brillant, irònica i joiosa, creativa i juganera, i en vam aprendre molt. El 1981 vaig passar quinze dies amb ell a la Universitat de Southampton, per a estudiar-hi els seus treballs sobre termodinàmica de la radiació i de plaques fotovoltaïques. Durant aquella estada vaig poder llegir, a les nits, diversos llibres de crítica literària de T. S. Eliot, que m'havien estat recomanats per Josep Maria Castellet, Pere Gimferrer i Ricard Salvat i que, efectivament, em van obrir una nova visió de la crítica literària, com posteriorment els d'Octavio Paz i els de Roger Caillois.

La meua participació en els seminaris de Mayerstein a la Facultat de Filosofia ens donà la clau per a introduir la teoria estesa en el marc de la relativitat general i la cosmologia. En efecte, les equacions d'Einstein de la relativitat general relacionen el tensor mètric  $g_{\mu\nu}$  de l'espai-temps amb el tensor  $T_{\mu\nu}$  d'energia-impuls, com

$$R_{\mu\nu} - (1/2)Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4)T_{\mu\nu}, \quad (11.1)$$

on  $R_{\mu\nu}$  i  $R$  són el tensor de curvatura de Ricci i la curvatura escalar de Ricci —combinacions de derivades del tensor mètric—,  $\Lambda$  la constant cosmològica,  $G$  la constant de la gravitació i  $c$  la velocitat de la llum en el buit. Algunes conseqüències de la teoria són la deformació de l'espai per les masses celestes, la dependència dels intervals temporals amb el valor del camp gravitatori —essencial en el funcionament del sistema de posicionament global (GPS)—, l'existència de forats negres amb unes certes peculiaritats mètriques internes, les ones gravitatòries i l'expansió de l'Univers. La separació de les galàxies no s'interpreta com un moviment de les



galàxies en l'espai, sinó com una expansió de l'espai que arrossega les galàxies en el seu flux.

Si l'Univers se suposa isòtrop i homogeni, el model de Friedmann - Lemaitre - Robertson - Walker en absència de constant cosmològica porta, per a l'evolució del factor d'escala espacial  $a(t)$  que descriu el creixement o decreixement de les distàncies en funció del temps, a l'equació

$$(1/a)d^2a/dt^2 = -(4\pi G/3) (\rho + 3p), \quad (11.2)$$

on  $\rho$  és la densitat d'energia per unitat de volum  $\rho = U/V$ , i  $p$  la pressió. En el terme de la dreta hi apareix la combinació  $\rho + 3p$ . Si el seu valor és positiu, dominen els efectes gravitatoris atractius i l'expansió es frena; si és negatiu, l'atracció gravitatòria esdevé una força repulsiva i l'expansió s'accelera. Cap a 1990, la interacció repulsiva no era pràcticament tinguda en compte, tret de les modificacions de les equacions d'Einstein amb el terme de constant cosmològica afegit. La part repulsiva irrompé en cosmologia amb les observacions publicades el 1998 sobre la velocitat d'allunyament de galàxies molt llunyanes, que semblaven indicar que l'expansió de l'Univers, en lloc d'anar-se frenant, es va accelerant o, com a mínim, no es frena.

El 1990, amb Diego Pavón i Javier Bafaluy vam considerar un model cosmològic en què la pressió  $p$  no era la d'equilibri, sinó que també contenia la contribució de la pressió viscosa de volum  $p^v$ , que és negativa en les expansions. Vam introduir aquesta pressió viscosa de volum en la seva versió generalitzada, amb temps de relaxació no nul, que la feia compatible amb la relativitat, és a dir

$$\tau dp^v/dt + p^v = -3\zeta da/dt, \quad (11.3)$$

on  $\tau$  és el temps de relaxació i  $\zeta$  la viscositat de volum de l'Univers, relacionada amb fluctuacions del buit quàntic. Vam obtenir una sèrie de corbes per a les possibles evolucions de l'expansió còsmica en funció de la viscositat de volum i del temps de relaxació. Una cosa que ens va cridar l'atenció va ser que segons quins fossin els valors d'aquests paràmetres la pressió total es podia fer prou negativa i l'expansió, en lloc de frenar-se, s'accelerava. Mai no havíem sentit parlar d'aquest fenomen, de manera que el vam esmentar amb prudència en una nota a peu de pàgina, sense imaginar la importància que aquesta possibilitat tindria a partir de les observacions de 1998.

En efecte, actualment, en lloc de tenir en compte una pressió viscosa —oblit injustificat, per cert— se suposa que la pressió és una funció de  $\rho$  donada per  $p = \gamma\rho$ , en què  $\gamma$  és una constant. Si  $\gamma$  és igual a  $-1/3$ , la suma de  $\rho + 3p$  dona zero i els efectes gravitatoris no frenen ni acceleren l'expansió, la qual tendria a una

velocitat constant en el futur. Si  $\gamma$  és més petita que  $-1/3$ , l'expansió còsmica s'acceleraria i si fos més petita que  $-1$ , l'Univers s'esqueixaria en mil bocins. El nostre article ha estat una de les bases per a comparar les descripcions de l'expansió accelerada amb energia fosca o amb pressió viscosa.

Pavón, en descobrir-se la matèria fosca i l'energia fosca, es dedicà a la modelització matemàtica d'aquests ingredients còsmics, més que no pas a aprofundir en la via de la pressió viscosa, que pocs seguien. Pel que fa a mi, en lloc de dedicar l'atenció a aquest tema la vaig dedicar a l'aplicació de la termodinàmica estesa a superfluids i a turbulència quàntica, temes que, indirectament, també poden tenir incidència en cosmologia. Amb el professor Juan Casado també vam treballar en un model en què l'expansió còsmica tendeix a un ritme d'expansió constant, i que queda relacionat amb algunes observacions teòriques sobre cordes còsmiques que comentaré posteriorment.

Mereix una menció a part la relació amb Stephen Hawking, que va començar de manera fortuïta. Des del començament de la seva carrera, Hawking va ser un científic molt brillant, amb resultats importants sobre l'existència de singularitat inicial en el big-bang. Ocupar-se de singularitats el va dur a estudiar els forats negres, que en relativitat general consisteixen en una singularitat central voltada d'un horitzó d'esdeveniments. El 1972 demostrà un teorema segons el qual la superfície total dels forats negres només pot augmentar —per exemple, en la col·lisió de dos forats negres l'àrea del forat negre final ha de ser més gran o igual que la de la suma de les àrees dels forats negres inicials—, cosa que va portar, a través de Bekenstein, a la termodinàmica de forats negres, ja que aquest comportament de l'àrea li va suggerir que l'àrea dels forats negres podria estar relacionada amb alguna forma d'entropia, de què parlaré en el capítol 14.

A continuació, Hawking s'interessà per les fluctuacions del buit quàntic a prop de l'horitzó d'esdeveniments dels forats negres, i trobà l'efecte —per ara teòric, no observat encara— de la radiació de Hawking, que combinava per primera vegada relativitat general, física quàntica i termodinàmica en una expressió per a la temperatura dels forats negres. Dels efectes quàntics en forats negres va passar a interessar-se per efectes quàntics en les etapes inicials de l'Univers i per la gravitació quàntica. La seva invalidesa i paralització creixents a causa d'una esclerosi lateral amiotròfica i, malgrat això, la seva perseverança a treballar en temes punters amb una gran riquesa de resultats que obrien noves perspectives a la cosmologia quàntica, en van fer una figura icònica i llegendària, de personatge limitat a una cadira de rodes mecanitzada i que parlava a través d'un sintetitzador de veu, però que estava revolucionant les fronteres de la física.

El 1988, Hawking publicà un llibre de divulgació sobre la seva recerca, *Breu història del temps. Del big bang als forats negres*, que va esdevenir immediatament un supervendes mundial, tot i la seva dificultat. L'editor de Crítica, Gonzalo Pon-

tón, que n'havia comprat els drets, va voler que a més de l'edició en castellà n'hi hagués una en català, i va proposar al professor Ramon Pascual que en fes la traducció. Com que llavors Pascual era rector de la UAB va dir que no ho podia fer i va recomanar el meu nom. Així, em vaig trobar fent la traducció al català del llibre, i aprenent moltes coses noves sobre forats negres i sobre cosmologia quàntica. Hawking va venir a Barcelona a presentar el seu llibre, a finals d'octubre de 1988, i jo en vaig fer la presentació al Museu de la Ciència. L'endemà va venir a donar una conferència a la UAB. Havíem previst que la donés a la sala més gran que teníem, la de la nova Facultat de Veterinària, i havíem adaptat quatre aules més amb visió per circuit tancat, però l'assistència massiva de gent superà totes les nostres expectatives: de les cinc-centes persones previstes passàrem a més de dues mil, expectants i enfervorides però incapaces d'entendre'n res, un parell de centenars de les quals ja eren a les portes de la Facultat a les vuit del matí. Jo, assegut al seu costat, vaig anar fent la traducció de la seva conferència sobre forats de cuc i petits universos, amb el cor encongint per aquell desbordament.

El contacte amb Stephen Hawking va ser excepcionalment interessant. Vladimir de Semir em va enviar, amb Lluís Reales i un fotògraf, a fer-li una entrevista a Cambridge per a *La Vanguardia*. Així, el vam poder veure en el seu ambient i vam passar més de tres hores amb ell, al seu despatx, perquè responia molt lentament, confegint les respostes amb el seu sintetitzador. L'estada de Hawking a Barcelona va ser com la de les grans estrelles del cinema o de la cançó: tots els diaris en parlaven, i els dos dies que hi va passar va ser el centre d'atenció. Va ser colpidor sopar amb ell i veure com la infermera, de tant en tant, li havia d'obrir el tap d'un orifici al coll, practicat durant una traqueotomia tres anys abans, per buidar-li la tràquea dels aliments que hi havien anat a parar. Malgrat això, el més sorprenent era veure com, després d'aquestes situacions tan dures i en les quals li anava la vida, demanava a la gent que l'escoltés i posava en marxa el sintetitzador de veu per explicar algun acudit. En lloc de demanar atenció cap als seus patiments, intentava encoratjar la gent cap a temes més divertits i vitals.

La seva humanitat es manifestà de manera molt emotiva quan, després de la conferència a Bellaterra, als corredors de la Facultat de Veterinària, on vam fer un dinar fred, jugués a empaïtar-se amb una dotzena d'adolescents amb problemes cerebrals que havien d'anar en cadira de rodes. Veure'ls empaïtar-se, jugar i riure, mentre la seva dona el cridava a l'ordre per començar a dinar, va ser molt simpàtic i sorprenent, molt humà. Vaig tornar a estar amb Hawking quan el 2005 va tornar a Barcelona, invitat per Enric Verdager i Jaume Garriga, investigadors eminents en temes de relativitat general no-lineal. La seva infermera, ell i jo, després del sopar en un restaurant tailandès, vam baixar per la Rambla i vam atreure l'atenció de molta gent. Ens vam aturar dues vegades a fer-nos fotografies amb uns grups d'estudiants estrangers que el van reconèixer i van demanar fotografiar-se

amb ell. «Només m'aturo per estudiants joves», em va dir, «per tal de fomentar la seva vocació científica».

Com que els diaris havien publicat fotografies en què sortíem Hawking i jo, molta gent i institucions em van demanar conferències sobre cosmologia. Havien de ser més o menys divulgatives, amb un component no tan sols físic sinó també filosòfic i teològic. Això em va fer estudiar més a fons alguns aspectes de la seva obra. Vaig poder seguir al llarg dels anys l'evolució de la cosmologia i dels seus pensaments com a traductor dels seus llibres *L'Univers en una closca de nou*, *Brevíssima història del temps*, *El gran disseny* i *Breus respostes a grans preguntes*, llibre pòstum.

He publicat, com a conseqüència d'aquesta activitat de conferenciant, diversos llibres sobre cosmologia, filosofia i teologia: *Reescribiendo el Génesis. De la gloria de Dios al sabotaje del Universo*, *La poesía de l'infinit. Ciència i mística i Déu, cosmos, caos. Horitzons del diàleg entre ciència i religió*. Potser el llibre més original dels que he publicat en aquest camp és *Cerebro y Universo. Dos cosmologías*. Com a professor de biofísica em van demanar que participés en un curs de doctorat sobre la física del cervell, que havia de ser donat, en la seva major part, per un investigador americà especialista en el tema, després de les meves quatre classes de presentació. L'investigador no va poder venir i em vaig haver de fer càrrec de les trenta classes del curs. Això em va donar una visió molt rica sobre el cervell i en el meu llibre vaig comparar la cosmologia exterior de cent mil milions de galàxies amb la cosmologia interior de cent mil milions de neurones des del punt de vista físic. Resulta molt interessant veure fins a quin punt són diferents els tipus d'interaccions, d'organització, de dinàmica i d'estructures d'aquests dos grans conjunts d'entitats. Crec que, tot i que vagi més enllà de les capacitats dels investigadors usuals, una autèntica cosmologia d'avui hauria de tenir en compte aquests dos tipus de cosmologies, relligats tènueament entre si mitjançant conceptes de la teoria de la informació.

El 1994 vaig publicar el llibre *Pensar la Creació. La sorpresa de la Raó divina* com a diàleg entre cosmologia física i cosmologia teològica, tot tenint en compte el paper de la informació —a més de la matèria i l'energia— com a constituent de la realitat física, i el paper de la relativitat algorítmica del temps i de l'espai, que obren noves perspectives en aquests diàlegs.

## 12. Superfluïdesa i turbulència quàntica

Ja des de l'època en què vaig començar la part de la meua tesi relacionada amb l'extensió de la termodinàmica de processos irreversibles, la primavera de 1977 a la Universitat de Lieja, em va interessar l'heli superfluid. En efecte, un dels temes importants en la termodinàmica estesa són les ones de temperatura, amb els seus problemes conceptuals. Ones de propagació de temperatura havien estat predites per László Tisza i per Lev Landau en els seus models de dos fluids de l'heli superfluid, dels inicis de la dècada de 1940, en què se suposava que l'heli superfluid està constituït per dos components: un de normal, viscos, amb entropia, i un de superfluid, amb viscositat i entropia nulles. El segon so, nom de les ones de temperatura per distingir-les de les del primer so o ones de pressió, va ser observat per Anton Peshkov cap a 1948 i era interpretat com una oscil·lació dels dos components en sentits oposats, de manera que la massa no canviava, però sí la temperatura. El primer so, en canvi, és interpretat com una oscil·lació dels dos components en el mateix sentit. Era natural que intentéssim conèixer quina mena de relacions hi podria haver entre les ones de temperatura associades a la generalització de l'equació de Fourier amb terme de relaxació i les ones de temperatura en l'heli superfluid, així com les seves relacions amb l'entropia generalitzada, ja que el model de dos fluids també generalitza l'entropia, incorporant-hi la velocitat relativa entre els dos components. Amb el professor Lebon vam publicar un breu article sobre el tema l'any 1978, però no el vam continuar explorant.

La superfluïdesa és un fenomen purament quàntic que es manifesta a temperatures molt baixes (2,2 kèlvins per a l'heli 4, mil·lèsimes de grau per a l'heli 3, milionèsimes de grau per a condensats de Bose-Einstein). El nom es deu al fet que la primera observació de la superfluïdesa, cap a 1938, va ser perquè l'heli líquid, que entre 4 i 2 kèlvins es comporta com un líquid viscos relativament normal, per sota de 2,2 kèlvins flueix sense resistència al llarg de petits canals estrets. Fins i tot,

un cop posat en moviment l'heli en una petita canonada tancada sobre si mateixa, el moviment s'hi conserva durant anys, sense cap disminució. Ara bé, si la velocitat supera un cert valor crític, apareix una resistència hidrodinàmica, causada per una turbulència amb característiques quàntiques, que va frenant el fluid.

Un altre fenomen quàntic col·lectiu semblant és la superconductivitat, en què la resistència elèctrica dels conductors es fa nul·la a una certa temperatura molt baixa, que depèn dels materials. Els orígens microscòpics de la superconductivitat són anàlegs als de la superfluïdesa i es refereixen al comportament col·lectiu del fluid d'electrons que transporten el corrent. Aquests fenòmens de coherència col·lectiva fan que la resistència elèctrica s'anulli, tal com s'anulla la resistència hidrodinàmica en la superfluïdesa. La resistència nul·la permetria transportar corrent elèctric a grans distàncies sense pèrdues energètiques per l'efecte Joule. Tal com passa en els superfluids, la superconductivitat es perd si el flux de corrent elèctric o el camp magnètic exterior són massa grans. La superconductivitat és un tema molt explorat a causa de les seves aplicacions pràctiques. Un gran pas endavant va ser el descobriment, el 1987, dels superconductors de temperatura crítica elevada, materials ceràmics en què la temperatura a la qual el sistema esdevé superconductor, en lloc de ser inferior als deu o quinze kèlvins com en els metalls, pot arribar a ser de cent vint kèlvins, o més i tot.

L'aplicabilitat de la termodinàmica estesa a la superfluïdesa de l'heli va començar a ser estudiada amb detall per la professora Maria Stella Mongiovì, a la Universitat de Palerm, a partir de 1990. Tot i que havíem intercanviat alguns articles, no ens vam trobar personalment fins al congrés anual de la Societat Italiana di Matematica Applicata e Industriale (SIMAI) a l'illa d'Ischia, el juny de 2000. Vam parlar del flux d'entropia fora de l'equilibri i de la possibilitat d'incorporar efectes quàntics turbulents en la descripció termodinàmica de la superfluïdesa i ens va invitar, al professor Lebon i a mi, a visitar la Universitat de Palerm el juny de 2001.

Palerm m'impresionà des de bon començament. Feia poc que la màfia havia assassinat els jutges Giovanni Falcone i Paolo Borsellino. A l'Hotel Mediterraneo, en què ens allotjàvem, s'hi allotjaven també diversos oficials dels Carabinieri, que vèiem cada matí a l'esmorzar. La ciutat tenia un prestigi fosc relacionat amb les fetes de la màfia, que contrastava amb el seu llegat artístic riquíssim de les èpoques arabonormanda, catalanoaragonesa i barroca. Per a un català, tenia l'al·licient afegit d'evocar les relacions medievals entre Catalunya i Sicília, no sempre prou agradables per als sicilians. Vam visitar la Cripta dels Caputxins, on hi ha més de quatre mil mògies de persones vestides com si fossin vives, penjades a les parets i agrupades segons els oficis que van tenir. Aquest espectacle estrany, morbós, tètric, contrastava amb la vitalitat de la ciutat, amb els grups de joves reunint-se als cafès i a les geladeries, els vespres de juny, tot just acabats els seus exàmens.

Pel que fa a la superfluïdesa turbulenta, vam tenir sort i vam trobar, en menys d'una setmana, una manera elegant d'introduir els efectes de la turbulència sobre el flux de calor. Eren coses ja conegudes pels experts en turbulència quàntica, però que s'encabien de forma relativament natural en la termodinàmica estesa. Vam quedar que l'any següent continuàrem la nostra col·laboració, i així va ser durant vint-i-dos anys, amb la professora Mongiovì i els seus joves col·laboradors —Rosanna Peruzza, els dos primers anys, Michele Sciacca i Lidia Saluto—, amb qui tantes bones hores de recerca i de visites a la Sicília interior he pogut compartir i que han fet diverses estades a la nostra universitat.

Les meves estades a Sicília van començar, de fet, l'hivern de 1996, amb una invitació del professor Marcello Anile a la Universitat de Catània, on estudiaven mètodícament l'aplicació de la termodinàmica estesa a dispositius electrònics, en contacte amb un grup industrial. Aquests treballs han estat continuats pels seus col·laboradors —els professors Vittorio Romano, Mario Trovato i Antonio Maiorana—, després de la mort prematura d'Anile el 2007 als cinquanta-nou anys. De les meves visites a Catània, entre 1996 i 2002, en recordo especialment la via Etna, amb el seu paviment de lava i la casa natal del llegendari físic Ettore Majorana, col·laborador de Fermi, i desaparegut misteriosament el 1938, i tres excursions a l'Etna.

Les estades a Sicília m'han resultat molt intenses emocionalment, creativament i artísticament, i en el meu llibre *Poemes de Sicília i Venècia* he aplegat una trentena dels poemes que he escrit sobre llocs sicilians o les experiències viscudes. Hi intento expressar, per exemple, la satisfacció de petits descobriments que, en plena matinada, et desvetllen i et fan posar a treballar, amb el balcó obert i l'olor de gessamí del jardí proper envaint de tant en tant l'habitació, o hi celebros llocs de Palerm, Messina, Cefalù, Segesta, Monreale, Piazza Armerina: tot un món.

L'heli superfluid s'utilitza, sobretot, en criogènia —és a dir, per a refredar i mantenir a baixes temperatures els cables superconductors que s'utilitzen per a produir camps magnètics elevats en els grans acceleradors de partícules o en sistemes de ressonància magnètica nuclear— o per a refredar utilitatge instrumental d'observació, a terra o en satèl·lits, o per a mantenir baixes temperatures en sistemes i ordinadors quàntics. La seva utilitat és deguda al fet que té una conductivitat tèrmica i una calor específica molt grans, i a la capacitat de fluir sense resistència per canals molt fins. Per això, l'estudi del transport de calor en heli superfluid té molt d'interès teòric i pràctic.

Essencialment, els temes que hem estudiat, pel que fa a la transmissió de calor en heli superfluid, es poden resumir en dues equacions —que no cobreixen l'àmplia diversitat del que hem fet, però que són prou significatives—: una equació per a la dinàmica del flux de calor  $\mathbf{q}$

$$\tau \, d\mathbf{q}/dt = -\lambda_1 \, \text{grad } T + (\eta\lambda_1/S) \, \nabla^2(\mathbf{q}/ST) - \tau K L \mathbf{q}, \quad (12.1)$$



on  $\tau$  és el temps de relaxació del flux de calor,  $\lambda_1/\tau$  correspon al quadrat de la velocitat del segon so multiplicada per la calor específica per unitat de volum,  $\eta$  és la viscositat del component normal del superfluid,  $K$  el coeficient de fricció entre el superfluid i els vòrtexs quantitzats i  $L$  és la longitud de vòrtexs quantitzats per unitat de volum. Aquesta equació descriu, bàsicament, el transport hidrodinàmic de calor —relacionat amb el segon terme de la dreta—, el segon so —relacionat amb la derivada temporal del flux de calor, al terme de l'esquerra— i la resistència tèrmica afegida per la turbulència quàntica —en el tercer terme de la dreta. Aquestes tres modalitats de propagació de la calor —segon so, comportament hidrodinàmic de la calor i resistència turbulenta— no són compatibles amb la llei de Fourier, però són observades experimentalment, de manera que l'equació (12.1) amplia adequadament la llei de Fourier. En situacions laminars,  $L = 0$  i no hi ha resistència turbulenta al transport de calor.

En situacions turbulentes,  $L$  és una variable independent l'evolució de la qual ve donada per una expressió del tipus

$$dL/dt = \alpha L^{3/2}(q/TS) - \beta \kappa L^2 - \gamma L^{1/2}/d + D \nabla^2 L, \quad (12.2)$$

on  $\alpha$  i  $\beta$  són paràmetres que descriuen el ritme de formació i de destrucció de vòrtexs per unitat de temps i de volum,  $d$  és el radi del conducte,  $\gamma$  descriu la interacció dels vòrtexs amb les parets i  $D$  és el coeficient de difusió dels vòrtexs. L'equació (12.2) és una forma simplificada de descriure alguns aspectes dinàmics de la turbulència quàntica. La turbulència quàntica està caracteritzada pel fet que la circulació de la velocitat al voltant de cada vòrtex no és arbitrària, com en la turbulència clàssica, sinó que ha de ser múltiple d'un quàntum de circulació,  $\kappa = h/m$ , on  $h$  és la constant de Planck i  $m$  la massa atòmica de l'heli. Aquesta condició —que, de fet, té certes analogies amb les condicions de quantització de Bohr de les òrbites electròniques en l'àtom d'hidrogen— se segueix de les condicions que han de satisfer les singularitats rotacionals en la funció d'ona quàntica que descriu el comportament col·lectiu del superfluid.

En estat estacionari, la longitud de vòrtexs quàntics per unitat de volum  $L$  és proporcional al quadrat del flux de calor, segons (12.2). Així doncs, introduint el valor de  $L$  en el darrer terme de (12.1) pren la forma del cub del flux de calor, de manera que el flux de calor és proporcional a l'arrel cúbica del gradient de la temperatura (règim de Gorter-Mellink), en lloc de ser proporcional al gradient de temperatura, com en la llei de Fourier.

L'equació (12.2) generalitza l'equació de Vinen per a la turbulència quàntica i descriu la transició del règim laminar, amb  $L$  nul, al règim turbulent, amb  $L$  diferent de zero. La transició a la turbulència es pot formular en termes d'un nombre de Reynolds quàntic. Recordem que el nombre de Reynolds clàssic de la hidrodin-



nàmica està definit per  $Vd/\nu$ , on  $\nu$  és la viscositat dinàmica del fluid,  $V$  la seva velocitat mitjana i  $d$  el diàmetre del conducte per on circula. Si el nombre de Reynolds supera un cert valor crític, de l'ordre de 3.000, apareix la turbulència clàssica en els fluids viscosos. En el cas quàntic, la transició a la turbulència es pot relacionar amb un nombre de Reynolds quàntic definit per  $qd/(TS\kappa)$ , on  $q/TS$  és la velocitat tèrmica mitjana i  $\kappa$  és el quàntum de circulació de la turbulència, que té les mateixes dimensions que la viscositat dinàmica. El valor crític del nombre de Reynolds quàntic que descriu la transició a la turbulència varia amb la temperatura, val entorn de 100.

Així, un flux de calor prou gran que superi el nombre de Reynolds crític produeix turbulència i dona un cert valor de  $L$ , segons l'equació (12.2). Alhora, aquesta  $L$  oposa resistència al flux de calor, segons (12.1), de manera que les dues equacions estan íntimament acoblades. També hem estudiat l'acoblament entre flux de calor i flux de massa, entre ambdós tipus de fluxos i la turbulència, les analogies i les diferències macroscòpiques i microscòpiques entre la turbulència clàssica i la turbulència quàntica... Una presentació de conjunt d'una part significativa dels nostres resultats es troba a l'article de revisió «Non-equilibrium thermodynamics, heat transport and thermal waves in laminar and turbulent superfluid helium», publicat a *Physics Reports* el 2018 amb Maria Stella Mongiovì i Michele Sciacca.

La superfluïdesa es pot donar en sistemes més exòtics que l'heli 4, l'heli 3 o els gasos monoatòmics molt enrarits (condensats de Bose-Einstein). Es troba, per exemple, en estrelles de neutrons, que són sistemes de densitat elevadíssima, sotmesos a una gran pressió autogravitatòria, en què els electrons més els protons dels àtoms s'han convertit en neutrons, segons les interaccions nuclears febles. Les temperatures a les quals es pot tenir superfluïdesa en aquests sistemes són de l'ordre d'un centenar de kèlvins. Els vòrtexs quantitzats es produeixen no tan sols de forma desordenada, com en la turbulència, sinó també de forma ordenada, com una xarxa de filaments rectilinis paral·lels, en superfluids en rotació. Aquests vòrtexs tenen influència en petites variacions irregulars de la velocitat de rotació d'estrelles de neutrons, ja que una part del moment angular de l'estrella es pot acumular en els vòrtexs del superfluid neutrònic i, de sobte, passar dels vòrtexs ordenats a un conjunt turbulent de vòrtexs desordenats, de manera que es modifica la velocitat amb què gira l'estrella.

Una altra situació poc coneguda és l'aplicació dels superfluids a la cosmologia, en alguns models del buit quàntic còsmic, com una mena de bany superfluid que ompliria el conjunt de l'Univers. El paper de possibles vòrtexs en aquest superfluid podria ser anàleg al paper de les hipotètiques cordes còsmiques en models cosmològics més habituals. En el capítol següent en veurem algunes idees.



### 13. Longitud de Planck, dualitat i fronteres de la física quàntica

A diferència dels vuit capítols precedents (del 5 al 12), que tracten equacions plausiblement corroborades amb experiments, aquest capítol i el següent són altament especulatius. Els seus continguts es refereixen a teories fonamentals i a escales de longitud per ara inaccessibles a l'experimentació, i pot ser molt bé que siguin erronis. En soc ben conscient, però crec que el guany de pensar sobre possibles fronteres del saber actual és superior al risc d'error, sempre que es mantingui una distància prudencial respecte de les idees esmentades. La creativitat té sempre un element de joc, de risc i d'aventura que convé no perdre. Aquí, passarem de les línies de vòrtexs quantitzades a les cordes còsmiques i a les fronteres de la física quàntica, tot emprant conceptes de dualitat.

Un dels grans problemes oberts de la física fonamental és el de la compatibilitat entre física quàntica i relativitat general. Les escales de longitud, de temps i de massa en les quals és inevitable combinar aquestes dues grans teories físiques són les anomenades escales de Planck, amb la longitud de Planck  $l_p = (hG/c^3)^{1/2}$ , temps de Planck  $t_p = (hG/c^5)^{1/2}$  i massa de Planck  $m_p = (hc/G)^{1/2}$ . La longitud de Planck és de l'ordre de  $10^{-35}$  metres i el temps de Planck, de l'ordre de  $10^{-43}$  segons. Bona part d'aquest capítol es refereix a aquestes escales de grandària.

L'energia de les línies de vòrtexs en heli superfluid tractades en el capítol anterior és gairebé proporcional a la seva longitud. Això ens va portar, a la professora Mongiovì, al professor Sciacca i a mi mateix, a estudiar els seus aspectes termodinàmics i vam trobar, per a sorpresa nostra, que tenien una pressió negativa  $p = -(1/3)(U/V)$ . La pressió negativa té, com hem dit en el capítol 9, gran interès en cosmologia, ja que segons la relativitat general la font de gravitació és  $U + 3pV$ , de manera que si  $p = -(1/3)(U/V)$  la gravitació a gran escala es fa nulla. D'altra banda, ens cridava l'atenció que la pressió negativa tingués just el comportament oposat al de la pressió de la radiació electromagnètica —o, en altres paraules, de gasos de fotons—, que és  $p = (1/3)(U/V)$ .

La possible dimensió còsmica de la termodinàmica de sistemes de bucles amb energia proporcional a la seva longitud ens va suggerir passar de l'estudi dels bucles de vòrtexs quàntics en heli superfluid al d'un sistema de bucles de cordes còsmiques —hipotètics defectes topològics de l'espai-temps que podrien haver contribuït a la seva microestructura i a la seva dinàmica—, l'energia  $E(l)$  de les quals ve donada en funció de la velocitat de la llum  $c$ , la constant de la gravitació  $G$ , la constant de Planck  $h$  i la longitud  $l$  per

$$E(l) = (c^4/a^2G)(c^3/a^2hG)^\alpha l^{1+\alpha}, \quad (13.1)$$

on  $\alpha$  és un coeficient numèric, sense dimensions, que podria estar entre  $10^3$  i  $10^5$ , segons els processos de producció de les cordes còsmiques. De fet, les cordes còsmiques corresponen al cas en què  $\alpha = 0$ , però per tal de generalitzar el nostre estudi vam considerar un valor de  $\alpha$  més general. Si  $\alpha = 0$  tenim cordes còsmiques i l'energia és proporcional a  $l$ , mentre que si  $\alpha = -2$  tenim una energia inversament proporcional a  $l$ , donada per  $E(l) = hc/l$ , que és l'energia dels fotons si interpretem  $l$  com la longitud d'ona de la radiació associada. Així, l'expressió (13.1) conté els casos dels fotons i de les cordes còsmiques, i potser d'altres que no hem identificat explícitament.

Vam estudiar la termodinàmica de sistemes amb energia dels seus components donada per (13.1), suposant que la temperatura del sistema és proporcional al valor mitjà de l'energia (13.1), que la longitud  $l$  dels components és variable i que la separació mitjana entre els elements és proporcional al valor mitjà de  $l$ . Així vam obtenir les diverses funcions termodinàmiques dels sistemes corresponents, reals o hipotètics. En concret, vam trobar per a la pressió  $p = -[(1 + \alpha)/3](U/V)$  i vam trobar que l'entropia  $S$  és proporcional a  $T^{-3/(1+\alpha)}V$ . Així, tenim  $p = (1/3)(U/V)$  per a radiació ( $\alpha = -2$ ) i  $p = -(1/3)(U/V)$  per a cordes còsmiques ( $\alpha = 0$ ), i  $S$  proporcional a  $T^3V$  per a la radiació i proporcional a  $T^{-3}V$  per a les cordes còsmiques. Es troba, doncs, una dualitat termodinàmica entre els sistemes amb  $E(l)$  proporcional a  $l$  i els sistemes amb  $E(l)$  inversament proporcional a  $l$ .

Si apliquem aquests resultats a la cosmologia i escrivim el volum còsmic  $V$  com  $R^3$ , on  $R$  és el radi còsmic o factor d'escala còsmic, tenim  $TR$  constant per a radiació i  $T/R$  constant per a cordes còsmiques. Així, sembla haver-hi una certa dualitat entre les etapes inicials d'un Univers dominat per radiació, que es va frenant per atracció gravitatòria i que en l'expansió es refreda amb  $T$  inversament proporcional al radi còsmic  $R$ , i les etapes posteriors, dominades per cordes còsmiques, en què el sistema no es frena, sinó que tendeix a una velocitat constant i s'escalfa amb l'expansió amb  $T$  proporcional a  $R$ . Cal dir que la temperatura que creix amb l'expansió és la de les cordes còsmiques, mentre que la de la radiació disminueix. La densitat d'energia varia com  $T^4$  per a la radiació i com  $T^{-2}$  per a cordes còsmi-

ques, de manera que, quan la temperatura disminueix, l'energia de la radiació disminueix i augmenta la de les cordes còsmiques.

Mongiovì, Sciacca i jo ens vam preguntar, aleshores, què passaria si en lloc de suposar dues entitats diferents, una amb  $E(l)$  proporcional a  $l$  i l'altra amb  $E(l)$  inversament proporcional a  $l$ , tinguéssim una sola entitat física, que per a  $l$  grans (en comparació amb  $al_p$ ) es comportés com la radiació i per a  $l$  petites com les cordes còsmiques. Vam proposar generalitzar la relació de De Broglie —és a dir,  $p = h/l$ , on  $p$  és la quantitat de moviment i  $l$  la longitud d'ona de l'ona associada— com

$$p = (h/al_p) [(l/al_p) + (al_p/l)]^{-1}. \quad (13.2)$$

Aquesta expressió es redueix a la relació de De Broglie quan  $l_p = 0$ , i té una simetria d'autodualitat, és a dir, és invariant si canviem  $l/al_p$  per  $al_p/l$ . Això ens feia pensar en la dualitat  $S$  de les teories de supercordes, que estableix relacions entre els comportaments de les diverses solucions dels models teòrics —de manera que el comportament d'una solució a escala  $R$  és anàleg al comportament d'una altra solució a escala  $1/R$ —, però aplicada al nostre Univers de tres dimensions espacials en lloc dels universos amb nou dimensions espacials considerats per les teories de supercordes.

L'expressió (13.2) és purament hipotètica, i probablement errònia, però té l'atractiu de fer pensar. Per exemple, coneixem experimentalment la física quàntica fins a longituds d'ona de l'ordre de  $10^{-20}$  m, però  $l_p$  és de l'ordre de  $10^{-35}$  m. Això vol dir que si considerem  $p = h/l$  vàlid a escala de Planck estem extrapolant en quinze ordres de magnitud la validesa del que hem aconseguit observar. L'expressió (13.2), encara que fos errònia, ens ajuda a ser conscients que potser estem extrapolant massa la física quàntica usual fins a escales de l'ordre de la longitud de Planck, quan, de fet, podria ser que calguessin modificacions considerables que encara no han estat tingudes en compte.

És necessari considerar que la relativitat especial parteix de la hipòtesi que la velocitat de la llum  $c$  en el buit és una constant universal absoluta, vàlida per a tots els observadors en moviment uniforme. Les transformacions de Lorentz modifiquen la forma de les equacions de Maxwell en funció de la velocitat de l'observador, de manera que  $c$  sigui constant per a tots ells. Això suposa una contracció de les longituds i una dilatació dels temps per a observadors que es mouen respecte d'un observador considerat en repòs. Però la longitud de Planck està definida en funció de constants universals,  $c$ ,  $h$  i  $G$ , de manera que ha de ser la mateixa per a tots els observadors. Així, sembla que caldria una generalització de les transformacions de Lorentz, de manera que a longituds grans respecte de  $al_p$  conservessin la velocitat  $c$ , però que, quan s'atansessin a la longitud de Planck,

en conservessin el valor per a tots els observadors. Es tractaria d'una transformació força més complicada matemàticament. Quines implicacions físiques tindria?

Diversos temes de reflexió suscitats per una expressió com ara (13.2) són els següents: serien més fàcilment compatibles entre si la física quàntica i la relativitat general a escales petites si, en lloc d'emprar la física quàntica coneguda, utilitzéssim una hipotètica física quàntica més general relacionada amb (13.2) o amb alguna altra relació encara desconeguda? Caldria generalitzar també la relativitat especial i la general de manera que les transformacions conservessin  $c$  per a  $l/l_p$  molt grans i conservessin  $l_p$  per a valors de  $l$  petits? La generalització corresponent es combinaria millor amb la generalització de la física quàntica definida per (13.2)?

Observem que (13.2) redueix el valor de l'energia  $pc$  de la radiació per a longituds petites, de manera que també reduiria la densitat d'energia del buit quàntic, ja que l'energia d'entitats amb  $l$  molt petites seria proporcional a  $l$  en lloc de ser proporcional a  $1/l$ , de manera que per a  $l$  tendint a zero l'energia tendiria a zero i no a infinit. De fet, si en lloc de  $l/al_p + al_p/l$  en (13.2), escrivíssim  $l/l_p + (l_p/l)^3$ , el problema de l'alta densitat d'energia del buit quàntic quedaria molt reduït o s'eliminaria, cosa que potser faria que la supersimetria fos innecessària. Això podria tenir interès, ja que la teoria de supercordes té com un dels seus ingredients la supersimetria entre fermions i bosons, la qual prediu l'existència de partícules supersimètriques que no han estat observades.

La relació de Heisenberg esdevindria  $\Delta p \Delta x > h [1 - (al_p p/h)^2]$ , de manera que, a petita escala espacial i gran  $p$ , les fluctuacions no serien tan grans com se suposa, i potser això faria la relativitat general més compatible amb la física quàntica. Potser no hi hauria tanta base física per a hipotètics multiversos, iniciats, segons se suposa, en fluctuacions del buit quàntic. Tampoc no sabem fins a quin punt una relació com (13.2) podria contribuir al trencament de la simetria entre matèria i antimatèria.

## 14. Dualitat termodinàmica i forats negres microscòpics

En aquest capítol, l'expressió autodual (13.2) de la generalització de l'expressió de De Broglie és aplicada a la termodinàmica quàntica dels forats negres, en què conflueixen gravitació, física quàntica i termodinàmica. En la teoria clàssica, els forats negres són objectes celestes dels quals res, ni tan sols la llum, no pot escapar. Això vol dir que la velocitat d'escapament respecte de la superfície d'aquests cossos —és a dir, la velocitat amb què hauria de ser llençat cap enfora un objecte qualsevol per tal que, venent l'atracció gravitatòria, se'n seguís allunyant indefinidament— és més gran que la velocitat de la llum en el buit i, per tant, físicament inassolible segons la relativitat.

Això es dona si l'objecte, de massa  $M$ , té un radi igual o inferior a  $R_s = 2GM/c^2$ , valor anomenat radi de Schwarzschild. Per tal que un objecte de massa com la de la Terra fos un forat negre, el seu radi hauria de ser inferior a uns tres mil·límetres, cosa que ens dona una idea de la densitat elevadíssima que han de tenir els forats negres.

El 1975, Stephen Hawking va fer un descobriment teòric inesperat. Els seus càlculs van dur a la predicció —encara no corroborada observacionalment— que, en tenir en compte efectes quàntics en la zona propera al radi  $R_s$  de l'horitzó d'esdeveniments del forat negre, el forat negre pot emetre radiació i partícules. De fet, aquesta radiació no procedeix de l'interior del forat negre, sinó de la regió propera al seu horitzó o superfície teòrica, on es combinen els efectes d'una atracció gravitatòria intensíssima amb la producció i l'anihilació de parells de partícules i d'antipartícules característiques del buit quàntic.

Els efectes de gravitació, en algunes ocasions, poden fer que el forat negre s'empassi la partícula o l'antipartícula del parell, de manera que el parell no es pugui anihilar mútuament, com passaria en absència de gravitació. D'aquesta manera, l'antipartícula o la partícula complementària queda lliure i es pot escapar

de les proximitats del forat negre, tot fent l'efecte, a un observador exterior, que ha estat emesa pel forat negre.

Hawking va demostrar que aquesta radiació ha de tenir les característiques de radiació tèrmica associada a una temperatura  $T_H = \alpha/R_S$ , amb  $\alpha = hc/(8\pi^2 k_B)$ , essent  $k_B$  la constant de Boltzmann. Com que el radi de Schwarzschild  $R_S$  és proporcional a la massa  $M$ , la relació també es pot escriure com  $T_H = \alpha'/M$ , essent  $\alpha' = hc^3/(16\pi^2 Gk_B)$ . Aquest resultat és molt important perquè va ser el primer resultat quantitatiu en què es combinen la relativitat general i la física quàntica. Per això, i perquè trencava la visió clàssica dels forats negres, va suscitar una gran atenció científica, especialitzada i mediàtica. Observem que si  $h = 0$ , és a dir, en absència d'efectes quàntics, la temperatura del forat negre seria nul·la i no emetria res, tal com s'espera en la teoria clàssica.

De fet, el resultat que un forat negre pogués tenir associada aquesta temperatura absoluta —tret del factor numèric— havia estat predit el 1973 per Jacob Bekenstein, que havia proposat —a partir d'un resultat del mateix Hawking sobre el creixement de l'àrea total dels forats negres— que els forats negres tenen una entropia proporcional a la seva àrea, en concret  $S = k_B 4\pi(R/l_p)^2$ , on  $l_p$  és la longitud de Planck  $l_p = (hG/c^3)^{1/2}$ . Com que l'energia del forat negre és  $Mc^2$ , es pot aplicar la relació termodinàmica  $1/T = dS/dU$  i es troba el resultat de Hawking. Tot i que el resultat de Bekenstein era sorprenent i va obrir el camp de la termodinàmica dels forats negres, era especulatiu i semblava dur a una contradicció conceptual. En efecte, si un objecte té una temperatura no nul·la, ha d'emetre radiació, però això era impossible en la visió clàssica dels forats negres. El resultat quàntic de Hawking va eliminar aquesta inconsistència i va convertir la confluència de termodinàmica, gravitació i física quàntica en una de les fronteres més actives de la física teòrica en la dècada de 1970 i 1980.

Segons el resultat de Hawking, la temperatura de la radiació del forat negre és inversament proporcional a la massa del forat negre (o al radi  $R_S$  de l'horitzó del forat negre). Això té com a conseqüència que no hi podria haver forats negres petits, ja que, com més petita fos la massa, més gran seria la temperatura i, per tant, més gran el ritme d'evaporació del forat negre. En altres paraules, un forat negre petit hauria d'acabar en molt poc temps, explosivament.

Ara bé, la nostra proposta de dualitat entre  $l/al_p$  i  $al_p/l$  en l'expressió de De Broglie (13.2) ens va dur a preguntar-nos què passaria si també l'aplicàvem a l'expressió de la temperatura en funció de  $R_S/l_p$ . Així, amb Mongiovi i Sciacca, vam proposar la relació autodual

$$T = (\alpha/al_p) [(R_S/al_p) + (al_p/R_S)]^{-1}, \quad (14.1)$$

essent  $\alpha = hc/(8\pi^2 k_B)$ . Aquesta relació és anàloga a (13.2); la temperatura  $T$  és



proporcional al moment mitjà de la radiació. En termes de la massa  $M$ , (14.1) duu a

$$T^{-1} = \alpha' M + \alpha'' M^{-1}, \quad (14.2)$$

essent  $\alpha' = hc^3/(16\pi^2 Gk_B)$  i  $\alpha'' = c^2/(2\pi k_B)$ . El primer terme correspon al valor de la temperatura de Hawking i el segon correspon al segon terme del parèntesi de (14.1).

L'expressió (14.1) descriu una dualitat termodinàmica entre forats negres grans i petits. Si realment aquesta relació té sentit físic, això voldria dir que, quan  $R_S/l_p$  es comença a fer petit, la temperatura, en lloc d'augmentar indefinidament, tendiria a ser proporcional a  $R_S$  (o a  $M$ ) i, per tant, a disminuir. Això implicaria que els forats negres petits serien freds i s'evaporarien molt lentament. Això podria tenir conseqüències cosmològiques interessants, de manera que els forats negres microscòpics primordials poguessin ser un ingredient de la matèria fosca, en lloc de les hipotètiques partícules supersimètriques que no han estat trobades, malgrat més de quinze anys de recerca experimental al CERN en la regió de valors de masses en què se les esperaria. En canvi, en la teoria de Hawking, els forats negres petits són molt calents, ja que  $T$  és inversament proporcional a  $M$ , i s'evaporen molt ràpidament, donat que el flux d'evaporació varia com  $T^4$ .

També hem considerat l'equilibri entre un forat negre gran i la radiació de Hawking essent  $E(l) = h/l$ , i l'equilibri entre un forat negre petit i la radiació de tipus cordes còsmiques, essent  $E(l) = (c^4/a^2 G)l$ . Els dos equilibris resulten duals entre si, cosa que indica l'autoconsistència interna de la dualitat termodinàmica de les adiabàtiques entre les  $TR$  dels fotons i les  $T/R$  de les cordes còsmiques, que la forma autodual suggeriria.



**Cloenda**



## 15. Algunes reflexions finals

En aquest darrer capítol faig algunes consideracions de conjunt sobre les equacions i la vida i les equacions i el temps, també sobre ciència i poesia, ciència i religió i, finalment, sobre creativitat, imaginació i rigor.

Les deu equacions a què em refereixo en el títol són les expressions (5.1) per a l'entropia, (6.1) per a la temperatura, (7.1)-(7.2) per a l'entropia i el flux d'entropia i (8.2) per al potencial químic. En nanosistemes, l'expressió (9.2) per a la conductivitat tèrmica en els règims difusiu, balístic i intermedi i les equacions (10.1)-(10.2) per a la hidrodinàmica de fonons. En cosmologia, l'aplicació de (11.1) a efectes viscosos en el dinamisme de l'expansió còsmica. En superfluids, les equacions (12.1)-(12.2) per als acoblaments entre transport de calor i turbulència quàntica. En física quàntica i en termodinàmica de forats negres, les equacions (13.1) i (14.1), respectivament. Això no vol dir que, en formes més limitades, algunes d'aquestes equacions no haguessin estat proposades, sinó que hi hem pogut fer aportacions que les han enriquit amb noves interpretacions, les han obert a més aplicacions i n'han subratllat millor els fonaments.

Destacaria el caràcter fonamental i la diversitat temàtica d'aquestes equacions. El seu caràcter fonamental es relaciona amb la formulació de la segona llei de la termodinàmica fora de l'equilibri, en situacions en què l'entropia clàssica no està definida, amb les subtileses del principi zero lluny de l'equilibri local i d'una termodinàmica d'estats estacionaris allunyats de l'equilibri, amb el significat físic de l'entropia i de la temperatura lluny de l'equilibri. A escala més especulativa, ens hem preguntat per formulacions autoduals de la física quàntica i de la termodinàmica de forats negres. Ens hem situat en terrenys de frontera, entre el macroscòpic i el microscòpic, entre la reversibilitat i la irreversibilitat, entre les situacions balístiques i les situacions difusives, entre la turbulència clàssica i la turbulència quàntica. Si haguéssim de fer una analogia humanística, diríem que ens hem situat

entre el curt termini de les notícies dels diaris i el llarg termini dels llibres d'història: en el curt termini intervenen molts factors, la majoria dels quals queden oblidats a llarg termini. També passa una cosa semblant amb la descripció dels sistemes físics entre la descripció microscòpica, mecànica, reversible, amb moltes variables, i la descripció macroscòpica, termodinàmica, irreversible, amb poques variables. Pel que fa a les aplicacions de la teoria, són molt diverses i van des del transport de calor en nanosistemes al paper de la viscositat del buit en l'expansió còsmica, des del flux de dissolucions de polímers a la superfluïdesa, des de les ones tèrmiques a la solidificació ràpida, des de la teoria cinètica dels gasos a la termodinàmica macroscòpica, des dels diagrames de fase fora de l'equilibri a la separació de macromolècules.

### 15.1. LES EQUACIONS I LA VIDA

He titulat el llibre *Una vida en deu equacions*, i no tan sols *Deu equacions*. En parlar de vida em refereixo a tres aspectes: el context biogràfic de la recerca —que és anecdòtic—, el fet que les equacions semblen tenir una vida pròpia, i no ser tan sols una taquigrafia simbòlica que resumeix i organitza una sèrie de coneixements, i la profunda implicació de la vida i la creativitat de l'investigador en les equacions, com si fossin edificis que l'investigador ajuda a construir i on, amb altres col·laboradors i col·legues, habita. A diferència del primer aspecte, particular i biogràfic, el segon pot resultar didàctic per a comprendre millor unes equacions concretes, i el tercer aspecte és general i metodològic, i té a veure amb mecanismes de fer ciència i és, per tant, l'aspecte que més atractiu pot tenir per al lector interessat en el mètode científic.

Pot fer la impressió que al darrere d'aquesta recerca hi ha una lògica i un programa, cosa que és veritat només en part. En realitat, les diverses línies de recerca s'han desenvolupat sovint en paral·lel, més que no pas una darrere l'altra. Quan buscàvem una cosa, de sobte una idea nova, una analogia impensada, la casualitat d'una lectura inesperada en obrir un llibre just en la pàgina on hi havia l'equació o el comentari que ens calia, franquejava de cop i volta una línia nova d'exploració, que de vegades feia abandonar parcialment la que estàvem fent.

Les reflexions metodològiques de Paul Feyerabend, properes a un cert caos psicològic creatiu i magmàtic, em van resultar més properes que les de Karl Popper sobre la falsabilitat de les teories, que deixa de banda aquests elements psicològics i els vincles gairebé passionals entre els investigadors i les seves teories, que fan que abans d'abandonar-les intentin tota mena de modificacions per salvar-les. Les idees de Thomas Kuhn sobre les revolucions científiques i els canvis de paradigma, amb la relectura i la reinterpretació noves de conceptes i teories anteriors, em van semblar molt suggeridores i encertades. En certa manera, interpretar els

termes de relaxació de les equacions de transport com una correcció a les equacions clàssiques o interpretar-los com una peça fonamental de la teoria que fa que el fluxos siguin variables independents, va suposar un canvi de paradigma en la termodinàmica lluny de l'equilibri.

Alguns dels elements que vinculen les equacions amb la vida de l'investigador es refereixen a les circumstàncies en què hi va treballar. Alguns dels records més intensos de les recerques explicades en aquest llibre estan relacionats amb passejades solitàries per Berlín i per Palerm, tot pensant en les equacions i en el seu context respectiu. Passejar i pensar tenen una connexió curiosa, que ha estat comentada per molts autors. Cal dir que una cosa és passejar, més o menys atent i identificat amb els llocs que t'envolten, i una altra és passejar profundament absorbit per alguna idea en què vas treballant, en el qual cas el context espacial de la passejada és com un teló de fons relativament distant però, alhora, indirectament inspirador.

Les passejades a què em refereixo van tenir lloc al voltant de juny, en vespres llargs, plàcids, de molta llum. A Berlín, el 1986 —un Berlín encara envoltat del mur soviètic—, acostumava a sopar d'hora al meu apartament proper a Rüdeshimer Platz, i cap a quarts de set del vespre sortia a passejar per les amples avingudes enjardinades i els camps i bosquets de la zona de Dahlem o al voltant de l'estany de Krumme Lanke, estació final de la línia de metro que passava prop de casa. En aquella època estava treballant en la redacció inicial del que després seria el nostre article de revisió «Extended irreversible thermodynamics», a partir del meu llibre *Equacions de Gibbs generalitzades i extensió de la termodinàmica de processos irreversibles*, que he esmentat en el pròleg. Aquí, l'element d'excitació principal era, sobretot, constatar quin gran progrés havíem fet entre 1982 i 1986, en el sentit que la teoria semblava més clara, més elegant, més àmplia, més ben fonamentada, relacionada amb més aplicacions.

Les passejades dels vespres de juny per Palerm s'estenen entre 2001 i 2024, anant des de la Facultat d'Enginyeria del campus del Viale delle Scienze, enllà del Palau Reial, fins a la meua residència, fos l'Hotel Mediterraneo de la Via Rosolino Pilo, prop del Teatro Massimo, fos a l'antic Hotel de France de Piazza Marina. Arribat a l'hotel cap a les cinc, hi treballava fins a quarts de set i després sortia pel barri antic, en la zona dels voltants de Piazza Marina i de la façana marítima, del mercat de la Vucciria i el dèdal de carrerons, de la Piazza Pretoria amb la Fontana della Vergogna i del Jardí Botànic. Passejava entre temples i palaus, i sentia com palaus les equacions en què treballàvem, i que anàvem ampliant, reinterpretant, posant al dia i aplicant. A diferència de les passejades per Berlín, on ja treballava amb una visió de conjunt, les successives estades de deu o dotze dies a Palerm m'anaven obrint petites zones noves que posteriorment anirien fent tot un conjunt.

Les nits a l'Hotel de France, sovint a l'habitació que havia ocupat Sigmund Freud durant la seva visita a Palerm cap 1910, resulten especialment curioses en relació amb el paper dels somnis en la recerca —amb el retrat de Freud, autor de la interpretació dels somnis, just al davant de la meua taula de treball! L'habitació té dos balcons, un dels quals dona a la plaça i l'altre al Vicolo del Sant'Uffizio, on hi ha uns grans gessamins, la flaire dels quals irrompia ocasionalment a l'habitació. El desordre creatiu d'aquelles nits era esplèndid i extenuant: de vegades treballava fins tard, de vegades anava a dormir d'hora, em despertaven somnis d'equacions i em llevava, fos l'hora que fos, a escriure'ls, de les equacions passava a poemes, de poemes a equacions, em llevava a treballar, m'adormia, em despertava quatre o cinc vegades, amb equacions o poemes, que venien ja gairebé fets i només havia de transcriure, a gran velocitat. De vegades pujava al gran terrat de l'edifici i contemplava la ciutat il·luminada i els perfils de les muntanyes. L'activitat d'aquestes nits complementava bé les hores de trobada amb els companys, amb l'estímul de diàlegs i suggeriments de nous problemes.

## 15.2. RAÓ I EMOCIÓ, CIÈNCIA I POESIA

La dinàmica de l'exploració científica té certes analogies amb la de la creació poètica: una barreja de programa i de sorpresa, de continuïtat i de ruptura, de metàfora i de rigor. El paper de la imaginació, de la intuïció, de la casualitat i fins i tot dels somnis és crucial en la recerca científica, però ha de ser complementat pel rigor, per l'autocrítica, per l'esforç d'argumentar i de demostrar, per la modèstia de comparar què han dit els altres sobre aquests temes, per la voluntat d'intentar un diàleg amb els especialistes en els camps respectius i per una presentació tan clara i didàctica com sigui possible per al lector. En diverses ocasions m'he despertat amb el resultat d'una equació complicada amb la qual havia estat lluitant dies i dies, resultat que, un cop intuït, no ha estat fàcil de demostrar. Per quins camins neuronals deuen produir-se aquestes dreceres aparentment oníriques i aleatòries? Probablement, en un camp que no hagués estat la termodinàmica, la llibertat d'acció hauria estat menor, més restringida per la complexitat matemàtica dels models o per la definició pròpia del camp, mentre que la termodinàmica té l'atractiu de ser arreu, de relacionar camps molt diversos.

Haver escrit poesia al llarg d'aquest temps —i no només ocasionalment, sinó sostingudament— no ha estat obstacle per a una obra de recerca prou àmplia. Per això, em va fer una il·lusió especial que la Universitat de Girona em nomenés doctor *honoris causa* per la combinació de ciència i humanitats del conjunt de la meua obra en física, poesia i assaig, per iniciativa d'Elena Roget i de Xavier Casamitjana. Tenir pràctica de concentrar l'atenció en un text curt, com és un poema, per a expressar o explorar diversos camps, m'ha resultat molt útil en física per a enfocar



l'atenció en problemes concrets i presentar-los de manera prou motivada, intentant buscar conclusions provisionals que poguessin resultar inspiradores per a altres investigadors. He sentit plaers comparablement intensos quan escrivia poemes o articles científics, quan escrivia en català, en castellà o en anglès. Això m'ha fet preguntar-me per quins mecanismes es deuen relacionar les àrees cerebrals del plaer i les de l'escriptura, i quin grau mínim d'habitució a una llengua cal per a sentir plaer en el seu ús escrit.

Al llarg de la meua recerca he combinat articles breus, articles més llargs, articles de revisió i llibres. Són graons diferents de l'escriptura científica, que permeten anar des de resultats molt concrets a visions molt generals. En poesia, sempre m'ha interessat l'arquitectura del llibre. Ho vaig aprendre de Salvador Espriu, i he procurat que els meus llibres tinguessin una bona construcció, amb simetries internes i diversos nivells de lectura, cosa que em resultava compatible amb la ciència que anava fent. Aquest esforç arquitectònic del llibre m'ha estat molt útil en els articles de revisió i en els llibres de física. He procurat que el llibre fos com un gran edifici i que els diversos capítols fossin com espais que anaven succeint-se o superposant-se orgànicament, relacionant-se amb els anteriors de forma lògica i amb continguts nous, progressius. El fet d'haver donat tantes classes m'ha ajudat a tenir una vocació didàctica que ha contribuït a l'estructura dels llibres de física, encara que fossin monografies especialitzades. Per això, crec que la combinació de recerca i docència és òptima, i pot ser a diversos nivells: des de doctorat fins a primer curs de la carrera. Saber explicar un cert problema amb diversos graus de profunditat i de recursos em sembla molt atractiu. A més, crec que la combinació del detall i del conjunt afavoreix la creativitat. Intentar traçar una panoràmica del conjunt, en física o en poesia, et fa veure àrees buides que convindria omplir i explorar, parallelismes entre temes o capítols diferents, ressonàncies entre temes diversos que convindria enfortir i subratllar. Això resulta un gran ajut a la inspiració, ja que es troben molts estímuls quan es treballa en el conjunt.

També m'ha interessat el paper de l'emoció en l'investigador. En els articles de ciència no es parla de Déu ni de l'investigador. Les seves anècdotes, les seves emocions, queden en secret, fora de la presentació científica. Estic d'acord amb aquest exercici de sobrietat intel·lectual, que he aplicat fins i tot a la poesia, intentant no abusar de la subjectivitat i l'emotivitat, sinó buscant una expressió més abstracta, més continguda, més col·lectiva. Al llarg de la carrera científica m'ha sorprès, en canvi, la gran intensitat d'emocions de la recerca: l'angoixa de no saber resoldre una equació, de no saber trobar explicació a una situació o l'eufòria d'haver-ho aconseguit. Un dels problemes dels investigadors és enamorar-se dels seus models matemàtics, de les seves equacions, i resistir-se a canviar-los, a deixar-los per models més encertats i més rics. Hi ha com un lligam passional molt més intens del que sembla. Com més gran la tensió i l'angoixa més gran la satisfacció final.

Però de vegades la satisfacció arriba sense haver passat per l'angoixa, com un do, com una sorpresa. En els meus poemes sobre ciència n'he parlat, així com també de les emocions de la docència.

### 15.3. LES EQUACIONS I EL TEMPS: CIÈNCIA I CONTEXT TEMPORAL

La feina dels investigadors se situa en un context temporal concret, tant en línies generals com en les circumstàncies personals. En aquest darrer aspecte he estat molt afortunat amb el temps que m'ha tocat: pel fet d'haver-hi moltes places a la universitat; per haver tingut un tema de recerca que renovava els fonaments de la teoria i l'obria a noves aplicacions, amb una gran simplicitat matemàtica; per haver trobat col·laboradors competents i il·lusionats, que han estat amics cordials i han contribuït al bon ambient de treball; per haver tingut la possibilitat de donar classes de branques ben diferents, cosa que m'ha servit per a aprendre i relacionar nous camps; per la sort intrínseca d'obrir llibres o articles i anar a parar just a l'equació o la frase que necessitava; per haver viscut una època en què els pressupostos dedicats a la recerca creixien, en què viatjar o comunicar-se es feia més fàcil, en què hi havia més projectes i més investigadors. La crisi econòmica de 2008 i la crisi demogràfica han canviat el panorama: les universitats tenen menys estudiants, els ajuts van a la baixa i els projectes són cada vegada més competitius i demanen més esforç burocràtic.

En canvi, ha augmentat molt l'accés a les fonts bibliogràfiques, mitjançant els cercadors d'Internet, que en pocs minuts proporcionen bibliografies molt àmplies. Per contra, hi ha un èmfasi massa automàtic pel que fa a les exigències sobre l'impacte dels articles i de les revistes segons el nombre de citacions. La pressió sobre els investigadors ha augmentat molt en aquest sentit. A començaments de la dècada de 1980, em resultava molt interessant llegir cada setmana les articles d'Eugene Garfield —iniciador del Science Citation Index— a la revista bibliogràfica *Current Contents*: a partir de l'anàlisi de citacions, anava revelant idees noves, camps emergents i influències històriques. Li vaig escriure en dues ocasions sobre temes relacionats amb recerca i llengua catalana —i altres llengües que no fossin l'anglès— i em va respondre amablement i amb coneixement. Els seus escrits van eixamplar molt la meua visió interdisciplinària sobre la ciència. Em va resultar molt atractiu anar veient quins articles ens citaven, qui n'eren els autors, quins temes tractaven i quina visió tenien del nostre camp, cosa que ens ha obert sovint a col·laboracions i idees.

M'interessa el paper de l'error en la recerca. Crec que l'error pot ser fèrtil. De fet, el meu ideal de coneixement seria saber no tan sols les teories que han tingut èxit i han resultat ser correctes i acceptades, sinó haver examinat amb esperit crític teories que finalment no han tingut èxit, potser perquè han resultat incompatibles

amb alguna troballa, però que eren riques en contingut, elegància i lògica. Un exemple és la teoria gravitomagnètica formulada cap a 1870, seguint l'exemple de les equacions de Maxwell, amb un potencial escalar per al camp elèctric i un potencial vectorial per al camp magnètic. La descripció matemàtica de la gravitació newtoniana es basa en un potencial escalar per al camp gravitatori. Però, tal com dues càrregues en moviment s'atreuen de maneres noves en què no s'atreien en repòs —és a dir, interaccionen amb forces magnètiques que no es manifesten en repòs—, no seria possible que en gravitació masses en moviment presentessin una atracció gravitatòria diferent que en repòs? Podria ser que una esfera massissa girant sobre el seu eix fes sobre una massa puntual propera no tan sols una força cap al centre de l'esfera, com en la gravitació newtoniana, sinó també una força tangencial? L'aplicació d'aquestes analogies cap al 1870 va permetre explicacions hipotètiques per al moviment anòmal del periheli de Mercuri, en un model en què la gravitació es desplaçava amb velocitat finita, i va permetre parlar d'ones gravitatòries. Tot això no ens ho han dit, i costa molt arribar-ho a saber, perquè aquestes qüestions van quedar subsumides en la relativitat general d'Einstein de 1915. La teoria gravitomagnètica coincideix amb la d'Einstein fins a segon ordre en l'invers de la velocitat de la llum. No es tracta d'una simple anècdota històrica, sinó de saber apreciar millor el paper de la imaginació en la recerca científica, tema que han abordat investigadors com Gaston Bachelard, Gilbert Durand o Jorge Wagensberg.

M'interessa la relació entre les teories i les idees generals de l'època. Boltzmann es va suïcidar per la tensió que les seves teories microscòpiques sobre la matèria no fossin acceptades en una època positivista en què s'acceptava tan sols allò que es podia mesurar, que en aquell moment era macroscòpic. Al llarg dels nostres estudis, hem viscut una tensió oposada, tot i que força menys dramàtica: la tensió entre els interessos mesoscòpics de la nostra termodinàmica i els progressos de la simulació per ordinador ha estat una constant. Els investigadors han cregut que la termodinàmica es redueix a la termodinàmica clàssica i, com a extensió, a la termodinàmica d'equilibri local, i han cregut que més enllà d'això no calien desenvolupaments termodinàmics. En efecte, a l'hora de fer interpretacions teòriques, passaven directament a les teories microscòpiques i a les simulacions per ordinador. Com que la capacitat de càlcul ha anat guanyant tanta potència, sembla lògic fer simulacions per a comprendre els resultats experimentals situats més enllà del marc de l'equilibri local. Aquestes simulacions, a la vegada, indiquen noves situacions per simular, i enriqueixen les tècniques de simulació i els programes per a fer-ho. En part, nosaltres quedàvem fora d'aquesta cursa. Encara avui, els estudis basats en simulacions allunyades de l'equilibri estan suplantant les preguntes termodinàmiques. Ara bé, el món mesoscòpic ens planteja també les seves preguntes, i tenir teories que facin de pont entre el microscòpic i el macroscòpic té interès epistemològic i utilitat pràctica, ja que permet models simplificats eficaços

per a fer una primera exploració i seleccionar, entre moltes possibilitats de materials i de geometries del sistema, quines són les més prometedores per a un cert objectiu donat. Un cop identificades, aquestes poden ser tractades amb tots els detalls microscòpics que calgui per a acabar d'afinar l'estudi, amb gran estalvi de temps.

Naturalment, no es tracta de pensar que les generalitzacions de la termodinàmica ho hagin de respondre tot, però fan ponts entre nivells d'observació i de complexitat de la realitat i fonamenten models simplificats que permeten avançar en l'anàlisi de situacions complicades, tot imaginant quines de les variables del problema poden tenir un paper més rellevant en aquell cas. Fer models matemàtics d'un sistema físic demana imaginació, intuïció, ull clínic, agilitat mental, penetració i identificació del més rellevant. Un cop establertes les primeres equacions aproximades, vindran d'altres investigadors que les milloraran, les resoldran, les criticaran i les ampliaran. Cada idea és com un llegat per als altres. Moltes d'elles no són prou adients i han de ser abandonades abans que esdevinguin un llast. D'altres són com graons d'una escala espiral que permet pujar més amunt i contemplar horitzons més amplis.

#### 15.4. COMIAT. COMENTARIS SOBRE CIÈNCIA I FE

Diria que, quan vaig acabar la carrera, en què vaig estudiar molt i ben de gust, potser sabia un deu per cent de la física que es coneixia aleshores. Quaranta anys després, després d'una vida dedicada a la recerca, l'ensenyament i la divulgació, diria que tan sols conec un dos o un tres per cent de la física actual, de tant com la física ha avançat, s'ha ampliat i s'ha diversificat. El seu ritme de creixement és superior al ritme en què puguem avançar i aprendre. L'especialització en un camp concret ofereix un petit oasi en què és més o menys possible estar a l'aguait dels horitzons que es van obrint. Posar tota la nostra fe en el saber és una mica frustrant: en lloc d'avançar es va retrocedint, vas veient que allò que creies que comprenies era en el fons més subtil del que imaginaves. Tot i això, haver pogut aportar-hi alguna cosa fa una gran il·lusió, encara que probablement quedarà oblidada entre molts altres treballs o superada per treballs futurs.

Em vaig jubilar de la docència universitària l'any 2018, en fer seixanta-cinc anys. Hauria pogut continuar cinc anys més i jubilar-me als setanta, i seguir encara un parell d'anys més com a professor emèrit. Això no vol dir que estigués cansat ni de la docència ni de la recerca, sinó simplement que m'atreia fer altres coses i, en especial, desenvolupar temes relacionats amb ciència i religió, tema que he estat tractant durant molt anys, i temes literaris i filosòfics. A més, jo ja havia tingut la sort de poder dedicar quaranta-un anys a docència i recerca en física, i tenia col·laboradors meus joves i brillants als quals la meva jubilació donaria més

possibilitats d'aconseguir una plaça fixa i dur a terme la seva recerca, i rejuvenir així la universitat.

La frontera entre ciència i religió em sembla un camp conceptualment molt ric i molt estimulant. Demana sortir de la pròpia especialització i tractar de tenir una visió àmplia d'un cert ventall de temes científics —física clàssica, quàntica i relativista, cosmologia, biologia molecular, evolució biològica, origen de la vida, desenvolupament, neurociència, robòtica, intel·ligència artificial, ciències planetàries, medicina i enginyeria genètica— en què se centren moltes preguntes sobre el que som i el que és la realitat. A més, demana tenir una visió sociològica, cultural, històrica, política i filosòfica. I demana conèixer teologia, filosofia de la religió, la Bíblia i altres textos sagrats, literatura religiosa, i tenir una certa sensibilitat per les seves dimensions estètiques, emocionals, ètiques, psicològiques i metafísiques. Conèixer una mica aquests temes i sentir-se prou motivat per a intervenir-hi no és fàcil ni immediat. No es tracta de fer tan sols divulgació, sinó d'anar a fons en la comprensió de les preguntes i els interessos dels altres, i ajudar a buscar camins possibles i amables en uns moments culturals complicats per especialitzacions, dispersions, polaritzacions i dogmatismes.

La meua vida intel·lectual ha girat al voltant de la física, la poesia i la religió. M'ha donat moltes satisfaccions i crec que he fet algun servei en aquests camps. Què hauria passat si m'hagués centrat només en la recerca, si hagués dedicat a la física els milers d'hores que he dedicat a la poesia i a les conferències de divulgació, a les lectures teològiques i filosòfiques? No ho sé pas. Malgrat que haguem viscut bastants anys, no ens coneixem del tot. Veiem que hauríem pogut ser moltes altres coses, bastant diferents del que hem estat. En tot cas, en un món molt marcat per l'especialització en ciència, per l'acceleració dels canvis i la dispersió en la vida col·lectiva, per l'interès en el curt termini, crec que, comptat i debatut, no ha estat una mala opció combinar la concentració en un camp de recerca científica, en un camp de producció literària i en un àmbit de reflexió religiosa i espiritual.



## **Recull bibliogràfic**





**LLIBRES SOBRE L'EXTENSIÓ DE LA TERMODINÀMICA DE PROCESSOS IRREVERSIBLES**  
**(EXTENDED THERMODYNAMICS)**

S'han escrit un nombre considerable de llibres sobre l'extensió de la termodinàmica de processos irreversibles consistent a incorporar els fluxos entre les variables bàsiques de la teoria. Com que la idea és molt general i té aplicacions i fonamentacions molt diverses, els títols de les obres són molt diversos i sovint no fan al·lusió explícita a l'extensió esmentada, tot i que en el seu contingut dediquin una part important a aquesta teoria. Els llibres que tracten l'extensió esmentada i dels quals tinc notícia fins ara són els següents:

- CASAS-VÁZQUEZ, J.; JOU, D.; LEBON, G. (ed.) (1984). *Recent developments in nonequilibrium thermodynamics*. Berlín: Springer. (Lecture Notes in Physics; 199)
- JOU, D. (1984). *Equacions de Gibbs generalitzades i extensió de la termodinàmica de processos irreversibles*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans.
- MÜLLER, I.; RUGGERI, T. (ed.) (1987). *ISIMM symposium on kinetic theory and extended thermodynamics*. Bolonya: Pitagora Editrice.
- EU, B. C. (1992). *Kinetic theory and irreversible thermodynamics*. Nova York: Wiley.
- SIENIUTYCZ, S.; SALAMON, P. (1992). *Extended thermodynamic systems*. Nova York: Taylor and Francis.
- JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J.; LEBON, G. (1993). *Extended irreversible thermodynamics*. Berlín: Springer. [Edicions ampliades de 1996, 2001 i 2010]
- MÜLLER, I.; RUGGERI, T. (1993). *Rational extended thermodynamics*. Nova York: Springer. [Segona edició ampliada de 1998]
- SIENIUTYCZ, S. (1994). *Conservation laws in variational thermo-hydrodynamics*. Dordrecht: Kluwer.
- EU, B. C. (1998). *Nonequilibrium statistical mechanics: Ensemble method*. Dordrecht: Kluwer.
- JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J.; CRIADO-SANCHO, M. (2000). *Thermodynamics of fluids under flow*. Berlín: Springer. [Segona edició ampliada de 2011]

- LUZZI, R.; VASCONCELLOS, A. R.; RAMOS, J. G. (2001). *Statistical foundations of irreversible thermodynamics*. Leipzig: Teubner.
- LUZZI, R.; VASCONCELLOS, A. R.; RAMOS, J. G. (2002). *Predictive statistical mechanics: A non-equilibrium ensemble formalism*. Dordrecht: Springer.
- HUTTER, K.; JÖHNK, K. (2004). *Continuum methods of physical modeling: Continuum mechanics, dimensional analysis, turbulence*. Berlín: Springer.
- STRUCHTRUP, H. (2005). *Macroscopic transport equations for rarefied gas flows: Approximation methods in kinetic theory*. Heidelberg: Springer.
- LEBON, G.; JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J. (2008). *Understanding non-equilibrium thermodynamics: Foundations, applications, frontiers*. Berlín: Springer.
- MÉNDEZ, V.; FEDOTOV, S.; HORSTHEMKE, W. (2010). *Reaction-transport systems: Mesoscopic foundations, fronts, and spatial instabilities*. Berlín: Springer.
- RUGGERI, T.; SUGIYAMA, M. (2015). *Rational extended thermodynamics beyond the monatomic gas*. Berlín: Springer.
- SELLITTO, A.; CIMMELLI, V. A.; JOU, D. (2016). *Mesoscopic theories of heat transport in nanosystems*. Berlín: Springer.
- MACHRAFI, H. (2018). *Extended non-equilibrium thermodynamics: From principles to applications in nanosystems*. Boca Raton: CRC Press.
- DENICOL, G. S.; RISCHKE, D. H. (2021). *Microscopic foundations of relativistic fluid dynamics*. Berlín: Springer.

#### ARTICLES DE REVISIÓ SOBRE LA TEORIA

- JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J.; LEBON, G. (1988). «Extended irreversible thermodynamics». *Rep. Prog. Phys.*, vol. 51, núm. 8, p. 1105-1179. DOI: 10.1088/0034-4885/51/8/002.
- LEBON, G.; JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J. (1992). «Questions and answers about a thermodynamic theory of the third type». *Contemp. Phys.*, vol. 33, núm. 1, p. 41-51. DOI: 10.1080/00107519208219139.
- JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J.; CRIADO-SANCHO, M. (1995). «Thermodynamics of polymer solutions under flow: Phase separation and polymer degradation». *Advances in Polymer Science*, vol. 120, p. 207-266.
- NETTLETON, R. E.; SOBOLEV, S. L. (1995). «Applications of extended thermodynamics to chemical, rheological, and transport processes: A special survey. Part I: Approaches and scalar rate processes». *J. Non-Equilib. Thermodyn.*, vol. 20, p. 205-229.
- NETTLETON, R. E.; SOBOLEV, S. L. (1995). «Applications of extended thermodynamics to chemical, rheological, and transport processes: A special survey. Part II: Vector transport processes, shear relaxation and rheology». *J. Non-Equilib. Thermodyn.*, vol. 20, p. 297-331.
- NETTLETON, R. E.; SOBOLEV, S. L. (1996). «Applications of extended thermodynamics to chemical, rheological, and transport processes: A special survey. Part III: Wave phenomena». *J. Non-Equilib. Thermodyn.*, vol. 21, p. 1-16. DOI: 10.1515/jnet.1996.21.1.1.
- JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J.; LEBON, G. (1999). «Extended irreversible thermodynamics revisited: 1988-1998». *Rep. Prog. Phys.*, vol. 62, p. 1035-1114. DOI: 10.1088/0034-4885/62/7/20.
- ANILE, A. M.; RUSSO, G.; ROMANO, V. (2000). «Extended hydrodynamical model of carrier transport in semiconductors». *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 61, núm. 1, p. 74-101. DOI: 10.1137/S003613999833294X.

- CASAS-VÁZQUEZ, J.; JOU, D. (2003). «Temperature in non-equilibrium states: A review of open problems and current proposals». *Rep. Prog. Phys.*, vol. 66, núm. 11, p. 1937-2023. DOI: 10.1088/0034-4885/66/11/R03.
- CRIADO-SANCHO, M.; JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J. (2003). «Thermodynamics and dynamics of flowing polymer solutions and blends». *Contrib. Sci.*, vol. 5, p. 315-332.
- JOU, D.; RESTUCCIA, L. (2011). «Mesoscopic transport equations and contemporary thermodynamics: An introduction». *Contemp. Phys.*, vol. 52, núm. 5, p. 465-474. DOI: 10.1080/00107514.2011.595596.
- LEBON, G.; JOU, D. (2015). «Early history of extended irreversible thermodynamics (1953-1983): An exploration beyond local equilibrium and classical transport theory». *Eur. Phys. J. H.*, vol. 40, p. 205-240. DOI: 10.1140/epjh/e2014-50033-0.
- JOU, D.; CIMPELLI, V. A. (2016). «Constitutive equations for heat conduction in nanosystems and nonequilibrium processes: An overview». *Commun. Appl. Industr. Math.*, vol. 7, núm. 2, p. 196-226. DOI: 10.1515/caim-2016-0014.
- MASCALI, G.; ROMANO, V. (2017). «Exploitation of the maximum entropy principle in mathematical modeling of charge transport in semiconductors». *Entropy*, vol. 19, núm. 1, art. 36. DOI: 10.3390/e19010036.
- MONGIOVÌ, M. S.; JOU, D.; SCIACCA, M. (2018). «Non-equilibrium thermodynamics, heat transport and thermal waves in laminar and turbulent superfluid helium». *Physics Reports* [en línia], vol. 726, p. 1-71. <<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.10.004>>.
- GALENKO, P. K.; JOU, D. (2019). «Rapid solidification as non-ergodic phenomenon». *Physics Reports* [en línia], vol. 818, p. 1-70. <<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2019.06.002>>.
- JOU, D.; RESTUCCIA, L. (2023). «Non-equilibrium thermodynamics of heat transport in superlattices, graded systems, and thermal metamaterials with defects». *Entropy* [en línia], vol. 25, núm. 7, art. 1091. <<https://doi.org/10.3390/e25071091>>.

## OBRES DE L'AUTOR

### *Física*

- JOU, D. (1984). *Equacions de Gibbs generalitzades i extensió de la termodinàmica de processos irreversibles*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans.
- JOU, D. (1985). *Introducció a la termodinàmica de processos biològics*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans.
- JOU, D.; LLEBOT, J. E.; PÉREZ GARCÍA, C. (1986). *Física para las ciencias de la vida*. Madrid: McGraw Hill. [Diverses edicions i reimpressions]
- JOU, D. (1989). *Mecànica estadística i biologia molecular*. Bellaterra: Universitat Autònoma de Barcelona.
- JOU, D.; LLEBOT, J. E. (1989). *Introducción a la termodinámica de procesos biológicos*. Barcelona: Labor. [Traduccions a l'anglès a Prentice Hall, Nova York, 1990, i al francès a Lavoisier Tec/Doc, París, 1990]
- JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J.; LEBON, G. (1993). *Extended irreversible thermodynamics*. Berlín: Springer. [Premi Ciutat de Barcelona 1993; noves edicions de 1996, 2001, 2010 i diverses reimpressions; traduició al rus a Reguliarnaia Kaoticheskaiia Dinamika, Moscou i Ijevsk 2007]

- JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J.; CRIADO-SANCHO, M. (2000). *Thermodynamics of fluids under flow*. Berlín: Springer. [Segona edició de 2011; diverses reimpressions]
- ROVIRA, L.; SENRA, P.; JOU, D. (2001). *Estudis bibliomètrics sobre la recerca en física a Catalunya*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans. (Arxius de les Seccions de Ciències; 130)
- LEBON, G.; JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J. (2008). *Understanding non-equilibrium thermodynamics: Foundations, applications, frontiers*. Berlín: Springer.
- CRIADO-SANCHO, M.; CASAS-VÁZQUEZ, J.; JOU, D. (2011). *Termodinámica química*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia. [Segona edició de 2019; diverses reimpressions]
- SELLITTO, A.; CIMMELLI, V. A.; JOU, D. (2016). *Mesoscopic theories of heat transport in nanosystems*. Berlín: Springer.

### **Articles de revisió llargs**

- JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J.; LEBON, G. (1988). «Extended irreversible thermodynamics». *Rep. Prog. Phys.*, vol. 51, núm. 8, p. 1105-1179. DOI: 10.1088/0034-4885/51/8/002.
- JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J.; CRIADO-SANCHO, M. (1995). «Thermodynamics of polymer solutions under flow: Phase separation and polymer degradation». *Advances in Polymer Science*, vol. 120, p. 207-266.
- JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J.; LEBON, G. (1999). «Extended irreversible thermodynamics revisited: 1988-1998». *Rep. Prog. Phys.*, vol. 62, p. 1035-1114. DOI: 10.1088/0034-4885/62/7/20.
- CASAS-VÁZQUEZ, J.; JOU, D. (2003). «Temperature in non-equilibrium states: A review of open problems and current proposals». *Rep. Prog. Phys.*, vol. 66, núm. 11, p. 1937-2023. DOI: 10.1088/0034-4885/66/11/R03.
- MONGIOVÌ, M. S.; JOU, D.; SCIACCA, M. (2018). «Non-equilibrium thermodynamics, heat transport and thermal waves in laminar and turbulent superfluid helium». *Physics Reports* [en línia], vol. 726, p. 1-71. <<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.10.004>>.
- GALENKO, P.; JOU, D. (2019). «Rapid solidification as non-ergodic phenomenon». *Physics Reports* [en línia], vol. 818, p. 1-70. <<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2019.06.002>>.
- JOU, D.; RESTUCCIA, L. (2023). «Non-equilibrium thermodynamics of heat transport in superlattices, graded systems, and thermal metamaterials with defects». *Entropy* [en línia], vol. 25, núm. 7, art. 1091. <<https://doi.org/10.3390/e25071091>>.

### **Bibliografia addicional per als capítols 5 a 14**

#### **Capítol 5**

- JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J. (2015). «Heat transfer and thermodynamics: A foundational problem in classical thermodynamics and in contemporary non-equilibrium thermodynamics». *Contributions to Science*, vol. 11, núm. 2, p. 131-136.
- LEBON, G.; JOU, D. (2015). «Early history of extended irreversible thermodynamics (1953-1983): An exploration beyond local equilibrium and classical transport theory». *Eur. Phys. J. H*, vol. 40, p. 205-240.
- JOU, D. (2019). «Relationships between rational extended thermodynamics and extended irreversible thermodynamics», *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 378, art. 20190172.

## Capítol 6

- CASAS-VÁZQUEZ, J.; JOU, D. (2003). «Temperature in nonequilibrium states: A review of open problems and current proposals». *Rep. Prog. Phys.*, vol. 66, p. 1937-2023.
- JOU, D.; RESTUCCIA, L. (2016). «Caloric and entropic temperatures in non-equilibrium steady states». *Physica A*, vol. 460, p. 246-253.

## Capítol 7

- GALENKO, P.; JOU, D. (2019). «Rapid solidification as non-ergodic phenomenon». *Physics Reports*, vol. 818, p. 1-70.
- JOU, D.; RESTUCCIA, L. (2023). «Non-equilibrium thermodynamics of heat transport in superlattices, graded systems, and thermal metamaterials with defects». *Entropy*, vol. 25, art. 1091.

## Capítol 8

- COMPTE, A.; JOU, D. (1996). «Non-equilibrium thermodynamics and anomalous diffusion». *J. Phys. A: Math. Gen.*, vol. 29, núm. 15, p. 4321-4432.
- JOU, D.; CASAS-VÁZQUEZ, J.; CRIADO-SANCHO, M. (2003). «Thermodynamics and dynamics of flowing polymer solutions and blends». *Contributions to Science*, vol. 2, núm. 3, p. 315-332.

## Capítol 9

- ÁLVAREZ, F. X.; JOU, D. (2007). «Memory and nonlocal effects in heat transport. From diffusive to ballistic regimes». *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, art. 083109.
- JOU, D.; CIMMELLI, V. A. (2016). «Constitutive equations for heat conduction in nanosystems and non-equilibrium processes: An overview». *Commun. Appl. Ind. Math.*, vol. 7, núm. 2, p. 196-226.

## Capítol 10

- ÁLVAREZ, F. X.; JOU, D.; SELITTO, A. (2009). «Phonon hydrodynamics and phonon-boundary scattering in nanosystems». *J. Appl. Phys.*, vol. 105, art. 014317.
- CIMMELLI, V. A.; SELITTO, A.; JOU, D. (2010). «Nonlinear evolution and stability of the heat flow in nanosystems: Beyond linear phonon hydrodynamics». *Phys. Rev. B*, vol. 82, art. 184302.
- JOU, D.; RESTUCCIA, L. (2011). «Mesoscopic transport equations and contemporary thermodynamics: An introduction». *Contemp. Phys.*, vol. 52, núm. 5, p. 465-474.

## Capítol 11

- PAVÓN, D.; BAFALUY, J.; JOU, D. (1991). «Causal Friedmann-Robertson-Walker cosmology». *Class. Quantum Grav.*, vol. 8, p. 347-360.
- CASADO, J.; JOU, D. (2013). «Steady flow cosmological model». *Astrophys. Space Sci.*, vol. 344, núm. 2, p. 513-520.

## Capítol 12

- MONGIOVÌ, M. S.; JOU, D.; SCIACCA, M. (2018). «Non-equilibrium thermodynamics, heat transport and thermal waves in laminar and turbulent superfluid helium». *Physics Reports*, vol. 726, p. 1-71.
- JOU, D.; SCIACCA, M. (2023). «A mathematical analysis of the intermediate behaviour of the energy cascades of quantum turbulence». *Acta Applicandae Mathematicae*, vol. 184, art. 14.

## Capítol 13

- JOU, D.; MONGIOVÌ, M. S.; SCIACCA, M. (2011). «Duality relation between radiation thermodynamics and cosmic string loops thermodynamics». *Phys. Rev. D*, vol. 83, art. 103526.
- JOU, D.; MONGIOVÌ, M. S. (2011). «Duality-invariant Einstein-Planck relation and the speed of light at very short wavelengths». *Phys. Rev. D*, vol. 84, art. 107303.

## Capítol 14

- JOU, D.; MONGIOVÌ, M. S.; SCIACCA, M. (2011). «Energy of string loops and thermodynamics of dark energy». *Phys. Rev. D*, vol. 83, art. 043519.
- JOU, D.; MONGIOVÌ, M. S.; SCIACCA, M. (2014). «A duality-invariant Einstein-Planck relation and its consequences on micro black holes». *Int. J. Modern Phys. D*, vol. 23, núm. 2, art. 1450018.

## Obra poètica

- Per a no oblidar la llum* (1971). Igualada: Lluís Marimón. [Premi Pare Ramon Castellort, 1971]
- Dit de pas* (1975). Barcelona: Edicions 62.
- Diminuta imatge* (1977). Sant Feliu de Llobregat: Jaume Solà. [Premi de Poesia Martí Dot, 1976; segona edició a Basilisc, 1997]
- Mirall de vellut negre* (1981). Barcelona: Edicions 62. (Els Llibres de l'Escorpí. Poesia; 67)
- Tapís* (1982). Barcelona: Edicions 62. (Els Llibres de l'Escorpí. Poesia; 76)
- Arbre* (1983). Vilassar de Mar; Barcelona: Oikos-Tau. (Quaderns de la Font del Cargol; 19) [Premi Marià Manent, 1981; segona edició a Basilisc, 1997]
- Teoria* (1987). Barcelona: Edicions 62. (Els Llibres de l'Escorpí. Poesia; 108) [Premi Ciutat de Martorell, 1987]
- Joc d'ombres* (1988). Barcelona: Columna. [Segona edició, ampliada, 1999]
- Transfiguracions* (1988). Palma: Moll. [Premi Ribas i Carrera 1976 i Premi Jaume Ferran 1986; segona edició, ampliada, 1998]
- El color de la ciència* (1991). Il·lustracions de Fernando Krahn. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament de Cultura.
- Urpes de fumera* (1992). Barcelona: Edicions 62. (Els Llibres de l'Escorpí. Poesia; 147)
- A la deriva blava: poemes de Sitges* (1995). Barcelona: Columna.
- Basilisc* (1997). Barcelona: Columna.
- Passeig marítim i altres poemes de Sitges* (2000). Barcelona: Columna.
- Els ulls del falcó maltès: Poemes sobre cinema* (2000). Palma: Moll.
- L'èxtasi i el càlcul: Obra poètica I* (2002). Barcelona: Columna.

- L'huracà sobre els mapes: Obra poètica, i II* (2004). Barcelona: Columna.
- Llum de Sitges* (2004). Fotografies de Joan Iriarte. Sitges: Ajuntament de Sitges.
- Sitges en blau* (2006). Fotografies de Joan Iriarte. Sitges: Ajuntament de Sitges.
- L'avinguda i el laberint: Poemes sobre Catalunya i Espanya* (2013). Barcelona: Viena.
- Poemes sobre ciència i fe* (2013). Barcelona: Viena. [Publicat per primer cop l'any 2011 a Barcelona, Claret, col·lecció «Quaderns de la Fundació Joan Maragall»]
- Poemes de Nadal i de Setmana Santa* (2014). Barcelona: Viena.
- La mística dels dies* (2015). Barcelona: Viena.
- Cartografies de Déu* (2016). Barcelona: Viena.
- Cant espiritual* (2017). Barcelona: Viena.
- Poemes de la revolta catalana* (2018). Terrassa: Fundació Torre del Palau. + 1 CD. ISBN: 978-84-948437-6-1. [Recital de Rosa Aguado, Anna Massallé i Maria Miralda, amb l'acompanyament al piano de Joan Grimalt]
- Trenta poemes sobre el Parenostre i els salms* (2020). Barcelona: Quaderns de la Fundació Joan Maragall.
- Poemes de Sicília i Venècia = Poesia dalla Sicilia e da Venezia* (2021). Barcelona: Viena.
- En la teva llum = En tu luz* (2021). Fotografies de Sor Isaura. Barcelona: Viena.
- Celebració del Vinyet* (2023). Barcelona: Viena.

### Assaig

- El laberint del temps, la simfonia de la matèria* (2006). Barcelona: Viena.
- Déu, cosmos, caos: Horitzons del diàleg entre ciència i religió* (2008). Barcelona: Viena. [Segona edició de 2011, col·lecció «Portàtil»; traducció al castellà de 2015, Salamanca, Sígueme]
- Reescribiendo el Génesis: De la gloria de Dios al sabotaje del Universo* (2008). Barcelona: Destino.
- Cerebro y Universo: Dos cosmologías* (2011). Bellaterra: Servei de Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona. (El Espejo y la Lámpara; 1)
- Introducción al mundo cuántico: De la danza de las partículas a las semillas de las galaxias* (2012). Barcelona: Pasado y Presente.
- La poesia de l'infinit: Ciència i mística* (2012). Barcelona: Viena.
- El laberinto del tiempo: Tiempo y memoria en la vida y el Universo* (2013). Barcelona: Pasado y Presente. [Traducció al xinès de 2018. Traducció de Mi Tian. Barcelona: China Social Sciences Press. ISBN: 978-7520323918]
- Materia y materialismo* (2015). Barcelona: Pasado y Presente. [Traducció al xinès de 2019. Traducció de Mi Tian. Barcelona: China Social Sciences Press. ISBN: 978-7520348591]
- Creació: Pregàries, himnes, poemes* (2018). Barcelona: Viena. [Coautoria amb Pere Carreras]
- Pensar la Creació. La sorpresa de la Raó divina* (2024). Barcelona: Albada.





## MONOGRAFIES DE LES SECCIONS DE CIÈNCIES

### Títols publicats

- 1 Antoni MALET (cur.), *Obra d'Évariste Galois* (1984)
- 2 David JOU, *Introducció a la termodinàmica dels processos biològics* (1985)
- 3 Lluís GARCIA I SEVILLA, *Anàlisi de la psicoanàlisi* (1985)
- 4 UNIÓ INTERNACIONAL DE QUÍMICA PURA I APLICADA, *Compendi de nomenclatura de química analítica. Regles definitives de 1977* (1987)
- 5 Eduard PARÉS, *Vocabulari forestal* (1990; 2a ed., 1998)
- 6 Enric CASASSAS i Salvador ALEGRET (cur.), *Plasmes i focs* (1991)
- 7 Josep M. COSTA i Pere Lluís CABOT (cur.), *Glossari de corrosió* (1991)
- 8 Enric CASASSAS i Salvador ALEGRET (cur.), *Gasos i atmosferes* (1992)
- 9 Enric CASASSAS i Salvador ALEGRET (cur.), *Terra i sòl* (1993)
- 10 Enric CASASSAS i Salvador ALEGRET (cur.), *Líquids i biofluids* (1993)
- 11 Juli G. PERETÓ i Salvador ALEGRET (cur.), *Els orígens* (1994)
- 12 Enric CASASSAS i Miquel ESTEBAN (cur.), *Modelització macroscòpia en ciències experimentals* (1996)
- 13 Enric CASASSAS i Romà TAULER (cur.), *Del plaer dels sentits al plaer de les xifres* (1997)
- 14 Salvador ALEGRET i Juli G. PERETÓ (cur.), *Fronteres de la ciència* (1997)
- 15 Juli G. PERETÓ i Salvador ALEGRET (cur.), *Llum i color* (2001)
- 16 David JOU, *El temps i la memòria en la ciència contemporània* (2001)
- 17 Jordi SANS, *L'evolució de l'ús del català en medicina a Catalunya durant el segle xx. El llarg camí d'una bella i expressiva història* (2002; 1a reimpr., 2004)
- 18 Mercè DURFORT, *Iniciació a les tècniques histològiques vegetals i animals i nota sobre les tècniques de transparentat* (2006)
- 19 Josep M. ROCA, *Tribut al mestre. Elogi a Santiago Ramón y Cajal = Tributo al maestro. Elogio a Santiago Ramón y Cajal* (2007)
- 20 Xavier CASAMITJANA, Jaume COLOMER, Elena ROGET, Xavier SÁNCHEZ, Teresa SERA i Marianna SOLER, *La física de l'estany de Banyoles* (2009)
- 21 Ramon VIADER, *Vi, cos i cervell* (2011)
- 22 Alexandre RIBÓ, *Els bastiments menors catalans de construcció artesanal del segle xx* (2012)
- 23 Josep AMAT (dir.) i Josep Maria ESQUIROL (coord.), *Per una ètica pública a Catalunya. Implicacions ètiques i socials de la ciència i la tecnologia* (2016)
- 24 David JOU, *Una vida en deu equacions* (2024)





## Una vida en deu equacions

L'autor (físic, poeta i assagista) esbossa en aquest llibre una breu autobiografia científica. No se centra en records purament personals (òbviament presents en un llibre d'evocacions) sinó que dedica una atenció preferent a qüestions de tipus més general, com ara les següents: què és la física (i la termodinàmica, en particular) i quins al·licients té?, com es combinen raó i emoció, rigor i intuïció, teoria i experimentació, recerca i docència, en una vida dedicada a la ciència?, què representa la creativitat científica i com es pot relacionar amb la creativitat poètica?, quins vincles humans crea la col·laboració científica?, quines qüestions religioses o filosòfiques ens suggereix la física? Les deu equacions físiques esmentades són aquelles en què l'autor més ha treballat. No són tractades en els seus aspectes matemàtics sinó divulgatius i conceptuals. Entropia i temperatura fora de l'equilibri, segona llei de la termodinàmica lluny de l'equilibri, equacions de transport generalitzades a processos ràpids, pertorbacions intenses i sistemes petits, estudis de nanosistemes i de materials, paper de la termodinàmica en la cosmologia i en la física quàntica, estudis de superfluïdesa i de turbulència quàntica, i generalització de la termodinàmica de forats negres són les principals qüestions abordades en un ampli ventall de contribucions.

