

RR-858

UNIVERSITAT DE BARCELONA
DISCURS INAUGURAL DEL CURS ACADÈMIC 1978-79



LA CIÈNCIA DE LA CALOR

PER

JOSEP M.^a VIDAL I LLENAS

CATEDRÀTIC DE LA FACULTAT DE FÍSICA

BARCELONA

1978

RR-858

0307

BIBLIOTECA DE LA UNIVERSITAT DE BARCELONA



0701461942



LA CIÈNCIA DE LA CALOR

0307

UNIVERSITAT DE BARCELONA
DISCURS INAUGURAL DEL CURS ACADÈMIC 1978-79



LA CIÈNCIA DE LA CALOR

PER

JOSEP M.^a VIDAL I LLENAS

CATEDRÀTIC DE LA FACULTAT DE FÍSICA

BARCELONA

1978

R-319853

Quan a finals de juny el Sr. Rector em va comunicar que havia estat designat per a pronunciar la lliçó inaugural del curs que avui comença, el meu primer impuls va ser de refusar l'encàrrec. Tenia diverses raons, totes elles de pes, per a adoptar aquesta actitud. No les exposaré, per tal com m'he proposat de fer un discurs breu. Només en citaré una: la meva disconformitat amb l'orientació que ha presidit des de fa uns anys el govern de la Universitat i que, al meu entendre, ha contribuït a augmentar el crònic desgavell universitari. A pesar de tot, no sóc dels que pensen que la cosa ja no té remei. Tinc fe en la Universitat i crec que la seva pròpia essència li infon recursos per a remuntar les situacions difícils. Penso que, a la llarga, res no pot contra l'ajuntament de mestres i deixebles en l'afany d'aprendre i de perfeccionar-se. Per altra banda el país té necessitat d'una Universitat eficient. Aquesta meva fe, juntament amb la constatació que, entre tots els numeraris de les Facultats nascudes de la de Ciències, sóc el més antic, si descomptem un company que ja ha fet aquest discurs, em decantaren a obeir al Sr. Rector i a emprendre la tasca d'adreçar-vos la paraula en el present acte.

Us parlaré de la Ciència de la calor. Avui dia, sabem bé que la calor es una forma de l'energia, lligada al moviment molecular, que sols es manifesta quan passa des d'un cos cap a un altre, sota l'acció d'una diferència de temperatura. La seva importància resideix en el fet que afecta els sers vius i que la societat la necessita, ja que és una de les formes de l'energia que intervé més sovint en els processos industrials.

Com sol succeir en l'estudi de tot fenomen físic, en la Ciència de la calor tenen importància primordial dues magnituds físiques: una d'elles dóna compte d'un factor de quantitat, que és el que avui anomenem la «calor» pròpiament dita, i l'altre factor ho és de qualitat i queda expressat per la «temperatura». A la humanitat li ha costat molt d'arribar a aclarir aquests dos factors bàsics. Breument, tractaré de donar una idea dels tempteigs que ha fet l'home en el decurs de la història, i que han portat el coneixement a la situació actual.

ELS TEMPS ANTICS

Per a l'home primitiu les idees de calor i de foc devien anar ben lligades. Les proves de l'ús més antic del foc per part de l'home daten de fa uns 500.000 anys i es refereixen a la Xina. El foc serví ja llavors per a dues finalitats: per una part, per a escalfar-se i coure els aliments i, per altra, per a donar llum en les hores de fosca. No se sap ben bé si al començament l'home només aprofitava el foc sense saber encendre'l. El següent pas referent a l'ús del foc ja va tenir un cert caire industrial, atès que el foc serví per a fondre els metalls i per a fabricar el vidre.

En el món de les idees, per als filòsofs grecs, el foc, juntament amb l'aire, l'aigua i la terra, era un dels quatre elements integrants essencials del món material. Més endavant Philon de Bizanci estudia els moviments dels líquids i gasos i descriu un instrument que demostra l'expansió de l'aire i que, com a termòmetre rudimentari, pot servir per a apreciar la temperatura. No molt després, Heron construeix una mena de joguina que funciona d'una manera semblant a una turbina de vapor. La naturalesa de la calor resta desconeguda i encara no pren realitat l'ús de la calor per a produir treball.

Passen molts anys i vénen els alquimistes amb la dèria de convertir-ho tot en or. Per això fan sovint ús de la calor fonent metalls, destil·lant substàncies i obtenint-ne de noves. Poc a poc l'Alquímia es converteix en Química, ja en el segle XVII. Es van depurant els conceptes de l'antiguitat i així el químic anglès Boyle, l'any 1661 rebutja el concepte aristotèlic dels quatre elements. Per a Boyle, un element ja és una substància que no pot ésser descomposta en dues o més parts diferents. Hem d'esperar el segle XIX perquè Dalton formuli les bases essencials que constitueixen un avenç de la moderna teoria atòmica. Per altra banda, Boyle estudia els gasos i formula la llei que porta el seu nom.

La idea de la temperatura, tal com s'expressa en dir que un cos és calent o fred, deu ésser molt antiga, però en temps de Boyle mancava encara un mètode precís per a mesurar-la. Hom creu que va ser en temps de Galileu, i entre els que el voltaven, que fou construït, cap a l'any 1612, quelcom que mereixés el nom

de termòmetre. El termoscopi de Galileu estava format per un globus de vidre ple d'aire, unit a un tub de vidre, de petit diàmetre, submergit en un líquid de color. En refredar-se l'aire, el líquid pujava pel tub, que estava graduat. L'inconvenient principal de l'instrument residia en el fet que les variacions de pressió l'afectaven i, per altra banda, que no perfeccionava gaire el que ja construï, segons que sembla, Philon de Bizanci poc abans del començament de la nostra era. Cap a l'any 1641 el gran duc de Toscana Ferran II ja va construir el primer termòmetre pròpiament dit, a base d'alcohol tancat hermèticament dintre de vidre. De totes maneres, la idea d'avaluar la calor i el fred segons una escala era ja molt antiga, ja que els metges, des dels grecs fins als àrabs, empraren escales, encara que de manera ben arbitrària i limitant-se a uns pocs graus (0 a 4, per exemple). En els temps de Galileu el termoscopi s'aplicà fonamentalment al cos humà. De seguida es va fer sentir la necessitat de disposar de punts fixos de referència, i un dels primers va ser precisament la temperatura normal del cos humà. Newton suggerí una escala de 12 graus que anava des del zero per al gel, fins al dotze per al cos humà. L'any 1714 l'alemany Fahrenheit va proposar com a zero la de la barreja de gel i sal, i donà el valor 96 a la temperatura del cos humà; però l'any 1724 canvià la proposta, prenent com a referències el gel en fondre's i l'aigua en bullir, per tal com havia trobat que així les coses anaven millor. L'escala centígrada, o de Celsius, com ara s'ha de dir segons conveni internacional, va ser proposada per l'astrònom suec Celsius l'any 1742. Així començava a establir-se d'una manera operacional a base de mesures, la temperatura com a magnitud física, encara que no s'aclariria gens el seu significat íntim.

LA CALOR COM A SUBSTÀNCIA

Mentrestant, i amb entrebancs, la Química anava progressant. L'any 1697 l'alemany Stahl proposà la teoria del «flogist» considerant un hipotètic element, sense pes de cap mena, que era present en tots els materials combustibles. Les substàncies combustibles eren riques en flogist mentres aquest mancava, o era escàs a la composició dels materials incombustibles. Els metalls que s'oxiden fàcilment eren rics en flogist el qual en el moment de l'oxidació s'escapava, i el seu lloc era ocupat per l'aire.

Poc després naixia la teoria del calòric. L'escocès Black, l'any 1760, considera el calòric com un fluid indestructible. Black creu que quan un cos s'escalfa acumula calòric, mentre el perd quan es refreda. Introdueix els importants conceptes de capacitat calorífica i de calor latent. Black, per tant, és el pare de la calorimetria i la seva interpretació va estimar-se com a correcta fins prop de l'any 1830.

Ultra el principi de conservació del calòric establert per Black, es formularen a la vegada altres principis fonamentals. Així, l'any 1783, Lavoisier, tot rebutjant la teoria del flogist, en aclarir els mecanismes de l'oxidació i de la respiració, estableix el principi de conservació de la massa en les reaccions químiques. El plantejament de la conservació de l'energia venia desenrotllant-se de lluny, molt lentament. Històricament els seus inicis pertanyen a la Mecànica. Ja Galileu va fer notar que en la caiguda lliure d'un cos la velocitat és la mateixa sempre que el cos passa per la mateixa alçària. Huygens generalitza aquest fet. Leibnitz, l'any 1695, expressa que la «força viva» és el pro-

ducte de la força pel camí. Bernoulli i Euler van aclarir coses. El nom d'«energia» procedeix de Young i el de «treball» es deu a Poncelet. L'Acadèmia de Ciències de París, ja l'any 1775, acorda de no considerar els pretesos invents del moviment continu que vagin sorgint, basats en dispositius mecànics.

Després del descobriment de la pressió atmosfèrica, i de la seva mesura per part de Torricelli, s'obre el camí per a l'aprofitament de la «força» de la calor. El francès Papin, l'any 1690, fa servir la condensació del vapor d'aigua per a obtenir el buit. A l'Anglaterra, Savery, l'any 1698, es basa en aquest fet per a fabricar una bomba que intenta de treure l'aigua que inunda les galeries de les mines. Newcomen en construeix una, l'any 1712, que es mostra molt útil. L'any 1788, Watt introdueix el condensador separat i poc després construeix la màquina de vapor rotatòria, que dona lloc a la primera revolució industrial, en oferir la possibilitat d'ampliar i de traslladar a les ciutats els centres fabrils, la majoria dels quals fins aleshores quedaven confinats a les proximitats dels salts d'aigua.

LA CALOR NO ÉS UNA SUBSTANCIA

A la vegada que la Tècnica descobria la possibilitat d'aconseguir treball per mitjà de la calor, en el món de les idees s'anava avançant pel camí que portava a l'aclariment de la naturalesa íntima de la calor. L'aventurer americà Benjamin Thomson, més tard comte de Rumford, posà de manifest no sols les

seves aptituds d'empresa sinó també les seves condicions de destacat investigador de la Física. Estigué al seu càrrec la intendència de l'exèrcit de Baviera i observà que els encenalls metàlics que sortien en taladrar els canons estaven tan calents que podien fer bullir l'aigua. Això no era nou, ja que era conegut, des de temps molt antics, un procediment semblant per a aconseguir foc. Però Rumford dissenyà i construí un aparell per a precisar la quantitat de calor despresa en el procés i amb tal motiu, l'any 1798, envià una comunicació a la Royal Society de Londres en la qual posa de manifest la impossibilitat que el calòric sigui una substància, considerant que pot subministrar-se d'una manera indefinida a base del fregament en un cos. Dedueix així un fet important: la calor ha d'ésser una forma de moviment. Rumford va ser ja capaç de calcular rudimentàriament l'equivalència entre la calor engendrada i l'energia mecànica desapareguda. De totes maneres és l'anglès Joule qui va refinar molt aquests importants experiments, tot arribant, entre els anys 1840 i 1849, a resultats decisius.

En essència, el principi general de conservació de l'energia va ser formulat pel metge alemany Mayer l'any 1842. L'establí per consideracions en certa manera metafísiques però, a més, va calcular el valor del treball necessari per a augmentar en un grau la temperatura de la unitat de massa de l'aigua, basant-se en unes mesures fetes per Gay Lussac sobre calors específiques dels gasos. El metge i físic alemany von Helmholtz, l'any 1847, publicà un important treball en el qual inclou en el principi de conservació totes les formes de l'energia.

LA TERMODINAMICA

L'any 1824, l'enginyer francès Carnot publicà el seu famós treball titulat «Reflexions sobre la potència motriu del foc i sobre les màquines apropiades per a aprofitar aquesta potència». L'autor s'hi fixava com a objectiu d'esbrinar quines eren les condicions per a les quals el rendiment era màxim. Carnot va deduir que la màquina reversible era la més eficient; i que totes les màquines cícliques reversibles que actuessin entre dues fonts tèrmiques donades tenien el mateix rendiment. Encara que en els seus raonaments segueix aplicant el principi de conservació del calòric, els seus papers publicats després de morir (víctima del còlera, l'any 1832) proven que conegué la convertibilitat de calor en treball. L'any 1848 a Escòcia W. Thomson, més tard Lord Kelvin, estimulat pel treball de Carnot, va tenir la gran idea d'aprofitar el principi establert per Carnot per a donar una definició més ferma de la temperatura. Es curiós que W. Thomson encara mantenia l'opinió que la conversió del calòric en efectes mecànics era probablement impossible. Deia: «Aquesta és la creença universalment acceptada, encara que Joule, de Manchester, opini altrament, basant-se en alguns enginyosos experiments que fan referència a la producció de calor per mitjà del fregament de líquids en moviment. Però no aporta cap experiment en el qual es realitzi el pas oposat». Sembla estrany que això fos dit quan Mayer ja havia aclarit la qüestió i quan estaven ja funcionant les màquines de vapor. Això prova com estava d'arrelada la idea que el calòric era indestructible.

L'any 1850 va ésser decisiu en la història d'allò que avui anomenem Termodinàmica. El físic alemany Clausius, en la seva Teoria mecànica de la calor, va mostrar la manera de conciliar el principi establert per Carnot amb les conclusions de Joule. Kelvin immediatament s'adonà de la importància del treball de Clausius i va modificar les seves primitives proposicions, establint ja l'escala de temperatures en la forma que avui coneixem (escala absoluta o Kelvin). Clausius va fer veure la independència que hi ha entre tots dos principis de la Termodinàmica. Va considerar com a «primer principi» l'equivalència entre calor i treball. Donà el nom de «segon principi» a l'axioma de Carnot i van enunciar-lo indicant que la relació entre la calor transformada en treball i la calor transportada desde la font calenta cap a la freda està només determinada per les temperatures de les dues fonts, qualsevol que sigui la substància transmissora, si les transformacions són reversibles. Enuncià clarament que la calor no és una funció que depengui tan sols de l'estat del sistema. Va establir el concepte d'energia interna i, més endavant, el d'entropia, que permet una formulació més esquemàtica i pràctica del segon principi. Establí que en un sistema tancat (és a dir, en un sistema en el qual no hi hagi intercanvi de calor ni treball amb l'ambient que el volta), 1er.: L'energia interna del sistema es conserva. 2on.: L'entropia del sistema augmenta fins a arribar a un valor màxim en virtut de les transformacions que en la realitat tenen lloc en el sistema en evolucionar cap a l'estat d'equilibri.

Sobre aquests dos principis de conservació i de degradació de l'energia queda edificada la Termodinàmica clàssica. Els èxits que aquesta ha assolit cons-



titueixen la millor comprovació dels principis de la Termodinàmica, i fan que aquesta constitueixi un punt de suport per al desenrotllament de la Física. De totes maneres, la Termodinàmica és pobre en contingut i ella sola poc ens pot donar, de manera que en aplicar-la és imprescindible de fer hipòtesis referents a la naturalesa de les substàncies que considerem. Així guanya en contingut però perd en generalitat i llavors les expressions que en resulten sols serveixen per a la substància que en aquell moment estem tractant.

L'escocès Maxwell va fer notar que és important el fet que dos cossos que estan en equilibri tèrmic amb un tercer ho estan a la vegada entre sí. Aquesta afirmació és la que avui s'anuncia com a «principi zero» de la Termodinàmica, per tal com és la que permet la introducció del concepte de temperatura. Maxwell també va deduir importants expressions que són conseqüència dels principis. L'americà Gibbs formulà les condicions generals de l'equilibri; Kelvin i Planck enunciarren el segon principi a base de la impossibilitat del moviment perpetu de segona classe; és a dir, la impossibilitat de construir una màquina que transformi íntegrament calor en treball tenint totes les seves parts a la mateixa temperatura. La formulació més moderna del grec Caracthéodory defuig l'ús del concepte de calor.

L'any 1918, el químic alemany Nernst establí el postulat, que es coneix amb el seu nom, o també com a «tercer principi», que ofereix un origen comú per al càlcul de les entropies dels sòlids i que està lligat al fet que la temperatura del zero absolut és inaccessible.

TEORIA CINÈTICA I MECÀNICA ESTADÍSTICA

El desenrotllament de la Termodinàmica, en contrast amb el d'altres branques de la Física, va realitzar-se sense considerar els detalls de les estructures microscòpiques dels sistemes materials. En oposició amb aquest punt de vista, molts físics han cregut que les lleis de la Termodinàmica han de ser justificades i aclarides per mitjà de consideracions microscòpiques, a base d'aplicar les lleis de la Mecànica. L'estudi en aquest sentit constitueix una part de la Ciència de la calor coneguda com a «Mecànica Estadística». Encara que ha assolit èxits grans en l'avaluació de les propietats dels cossos materials, no ha arribat d'una manera plena a l'últim objectiu dels seus fundadors, que és la demostració, lliure de matisos, dels principis de la Termodinàmica a partir de les lleis de la Mecànica. En particular, en el segon principi hi ha quelcom que obliga a pensar que és una llei de la Natura, independent de la Mecànica.

Els intents per interpretar la calor o energia tèrmica, en termes del moviment molecular, comencen l'any 1738, quan el matemàtic suís Daniel Bernoulli explica la llei de Boyle suposant que, a temperatura constant, la velocitat mitjana de les partícules d'un gas és constant. Maxwell, l'any 1859, amplia la interpretació de Bernoulli i dedueix la llei de distribució de velocitats entre les molècules d'un gas. De més a més troba una expressió cinètica per a la viscositat dels gasos, a base del recorregut lliure mitjà.

Boltzmann va ser el físic més destacat en el moviment que, durant el segle XIX, tractà de reconduir els fenòmens físics a imatges basades en considerar matèria en moviment desordenat, és a dir, a donar models atòmics basats en la Mecànica de Newton. La contribució més important de Boltzmann va ser de mostrar com la Mecànica, que estava considerada com a determinística i reversible en el temps, podia utilitzar-se per a descriure els fenòmens irreversibles que tenen lloc en el món real, si es completava amb l'Estadística. Els seus treballs originals es refereixen al teorema H (eta), la teoria del transport, l'equilibri tèrmic, l'equació d'estat dels gasos.

La formulació macroscòpica o termodinàmica de l'entropia, establerta per Clausius, ens diu que l'augment d'entropia que experimenta un cos és igual a la quantitat de calor que rep, dividida per la seva temperatura absoluta. Parallelament tenim la interpretació deduïda de l'estadística de Boltzmann, segons la qual l'entropia és una mesura del grau de desordre que mostren els elements corpusculars que integren el cos. Així un sòlid a la temperatura del zero absolut presenta una estructura cristal·lina que mostra un ordre perfecte (entropia zero). A mesura que li anem donant calor, els corpuscles que el formen vibren cada vegada d'una manera més intensa, és a dir, es desordenen. Arriba un moment que, per un fenomen de naturalesa cooperativa, bruscament augmenta molt el grau de desordre: el sòlid és fon. Si hi seguim aportant calor, segueix augmentant el desordre i, a la fi, vençudes les forces de superfície típiques del líquid, aquest es transforma en un gas on el desordre encara es més gran: els moviments s'hi realitzen completament a l'atzar. Llavors, la temperatura absoluta és proporcional a l'energia cinètica que per terme mitjà tenen les molècules.

En la interpretació mecànica de la calor apareixen dos aspectes que donen lloc als anomenats mètodes cinètic i estadístic. En la teoria cinètica són fixades les magnituds característiques dels diferents corpuscles (coordenades, velocitats, etc.) i hom segueix els moviments aplicant les lleis de la Mecànica. A la fi es pren globalment un gran nombre de corpuscles i s'apliquen les lleis de probabilitat. Així hom hi arriba a conclusions referents a la distribució de les magnituds mecàniques. En la Mecànica Estadística mai no es considera què passa a un corpuscle isolat, sinó que sempre es pren simultàniament gran nombre de corpuscles, tot evitant així les hipòtesis a base de models. Des del començament s'hi apliquen les lleis de probabilitat.

En iniciar-se el segle XX, el punt de vista molecular semblava destinat a ser abandonat pels físics, malgrat la valerosa defensa que en feu Boltzmann. Encara que, en el fons, la majoria dels físics creien en l'existència d'una realitat molecular, s'inclinaven més aviat cap a una interpretació fenomenològica positivista. Ultra Boltzmann, que restà gairebé com l'únic adepte a la Física estadística dintre els països germànics, constituïen excepcions al corrent dominant Lord Kelvin a Anglaterra, van der Waals i Lorentz a Holanda. Des d'Amèrica Gibbs, amb la seva Mecànica Estadística publicada l'any 1901, aportava una superació dels treballs de Boltzmann en una forma més adequada al segle XX.

Però molt aviat les teories cinètico-estadístiques van ser restablertes a una posició pre-eminent dintre la investigació física. Això s'inicià l'any 1905, a conseqüència de fets una mica allunyats dels centres d'atracció fins aleshores dominants: la teoria del moviment brownià, establerta per Einstein i a la vegada per Smo-

luchowski, i la seva espectacular confirmació experimental per Perrin. Boltzmann no tingué temps d'adonar-se que les coses anaven canviant d'acord amb els seus punts de vista, i acabà tràgicament l'any 1906 després de fortes depressions nervioses.

El canvi va ser ràpid. L'any 1910 l'opinió hostil al punt de vista estadístico-molecular havia desaparegut. Adhuc Ostwald, el campió de l'energetisme, va admetre públicament que els àtoms existien d'una manera real. Planck, també un dels escèptics entre 1880 i 1890, quan creia en una significació absoluta del segon principi, va ser qui va aplicar la teoria estadística a l'estudi de la radiació del cos negre, afegint-hi la hipòtesi quàntica amb l'èxit de tots conegut. Enumerem d'altres triomfs: la teoria Einstein-Debye de les calors específiques, la interpretació del postulat de Nernst, l'estudi del comportament dels electrons en els metalls.

Ja hem dit que l'exposició clàssica culminant de l'Estadística és la de l'americà Gibbs. La Mecànica Estadística ha rebut la seva millor fonamentació a partir de la Mecànica quàntica i és precisament l'Estadística de Gibbs la més adequada, ja que en alguns aspectes representa una anticipació de les idees quàntiques. Al principi, Gibbs potser no va ser ben comprès, de manera que obtingué una millor difusió l'exposició de Boltzmann. Però, després de la segona guerra, la predilecció pels mètodes de Gibbs és palesa. Segons els tipus de partícules que es considerin, hi ha dues modalitats. Per exemple, hom aplica als fotons l'Estadística de Bose-Einstein, i, als electrons, la de Fermi-Dirac. L'Estadística ha permès d'interpretar molts fenòmens, entre els quals podem citar: el comportament singular de l'heli a molt baixes temperatures, la superconductivitat d'alguns metalls, el para- i el ferromagnetisme, les transicions de fase, l'estat líquid.

ELS ESTATS MANCATS D'EQUILIBRI

En Mecànica Estadística, com en Termodinàmica, en principi sols es consideren estats d'equilibri. Per això resulta molt interessant l'aplicació de la teoria cinètica als estats de no equilibri. Són estats típics estacionaris de no equilibri els que donen lloc als fenòmens del transport en els gasos (viscositat, conductivitat, difusió). La formulació més general d'aquests fenòmens la devem a Hilbert, Enskog i Chapman.

Sovint es presenten interaccions entre sistemes que, en tot o en part, passen per estats de no equilibri. Entre elles, les reaccions químiques i nuclears i els fluxos d'energia i de matèria. L'anàlisi de tals casos és realitzada amb l'anomenada «Termodinàmica dels processos irreversibles.» El tractament d'aquests últims es més difícil que els de la Termodinàmica ordinària, tant des del punt de vista dels conceptes com del del càlcul numèric.

A més, i com a fruit del treball de l'escola belga de Prigogine, ha estat posat de manifest que el no equilibri pot ser una causa d'ordenació i que els processos irreversibles poden portar a un nou tipus d'estats dinàmics de la matèria, que constitueixen les anomenades «estructures dissipatives». Els membres de l'escola abans citada creuen que estem enfront d'un nou desenrotllament de la Química i de la Física teòriques, en el qual els conceptes de la Termodinàmica jugaran un paper cada vegada més predominant. Les estructures dissipatives són també d'interès especial en la

Biologia, per tal com manifesten un caràcter supermolecular coherent, amb manifestacions espectaculars; per exemple, en cicles bioquímics en els quals intervenen enzims oscil·lators.

La bàsica distinció entre els processos reversibles i els irreversibles és marcada per la desigualtat establerta pel segon principi, que motiva que hi hagi una creació d'entropia en tota irreversibilitat. Això estableix la direcció segons la qual s'escola el temps, ja que la direcció positiva és sempre aquella que suposa un augment d'entropia. De totes maneres, cent cinquanta anys després d'haver estat establert el segon principi, ens trobem, segons Prigogine, que aquest és més un programa que una realitat, perquè només expressa el sentit del canvi d'entropia, sense donar-nos cap precisió sobre la magnitud del canvi en si mateix. Aquesta és una de les raons per les quals les aplicacions de la Termodinàmica estricta estan limitades a l'equilibri.

És completament natural de considerar que, almenys prop de l'equilibri, existeixen relacions lineals homogènies entre els fluxos deguts a la falta d'equilibri i les forces que els provoquen. Certament corresponen a aquest esquema lleis empíriques ben conegudes, entre elles la de Fourier que estableix que el flux de calor és proporcional al gradient de temperatura, la de Fick de la difusió que diu que el flux de difusió és proporcional al gradient de concentració. L'any 1931 el noruec Onsager establí l'anomenada relació recíproca que afirma que els coeficients que intervenen en les expressions dels fluxos acoplats són iguals. Es basà en consideracions estadístiques i en el segon principi.

La validesa de la relació d'Onsager posa de manifest que la Termodinàmica del no equilibri porta també a resultats generals independents d'un model específic particular.

Una segona característica important que es presenta és que, en els estats estacionaris prop de l'equilibri, la producció d'entropia es mínima. El teorema de la mínima producció d'entropia expressa una mena de propietat inercial dels sistemes en estats de no equilibri. Durant molt de temps hom ha fet esforços per estendre aquest teorema a situacions més allunyades de l'equilibri, però ha estat sorprenent de trobar que llavors el comportament és ben diferent, fins i tot és l'oposat al que indica la mínima producció d'entropia.

Per exemple, aquest nou tipus de comportament es presenta en situacions típiques que es donen en la Hidrodinàmica. El cas més conegut és el de la inestabilitat de Bénard: una capa horitzontal fluida dins un camp gravitatori constant es troba entre dos plans paral·lels indefinits mantinguts a temperatures diferents. Quan el gradient de temperatura advers és suficient, s'inicia la convecció i llavors augmenta la producció d'entropia, atès que la convecció aporta un nou mitjà de transport. L'estat de flux que apareix després de la inestabilitat és un estat d'organització comparable a l'estat de repòs. Amb això veiem com un estat de no equilibri pot ésser una causa d'ordre. Podem imaginar que, al començament, sempre hi ha fluctuacions, respecte a l'estat mitjà, que motiven petits corrents que s'esmoreeixen, però que, per sobre un cert valor crític del gradient de temperatura, s'amplifiquen i donen lloc a un corrent macroscòpic. Així apareix un nou ordre supermolecular que bàsicament

correspon a una fluctuació gegant estabilitzada pels intercanvis d'energia amb l'exterior. Aquest és l'ordre característic de les «estructures dissipatives». Els estats que corresponen a l'equilibri termodinàmic, o bé els estats estacionaris que mostren una producció mínima d'entropia, són automàticament estables. Si el sistema és pertorbat, augmenta la producció d'entropia i el sistema reacciona per a retornar a l'estat de la mínima producció d'entropia.

Al departament de Termologia de la Facultat de Física d'aquesta Universitat hom està fent estudis microcalorimètrics sobre cultius bacterians. Aquests mostren comportaments que, en alguns aspectes, constitueixen exemples d'allò que Prigogine anomena ordre biològic obtingut a través de fluctuacions.

L'APROFITAMENT DE L'ENERGIA

Acabarem amb algunes reflexions sobre el paper que la calor juga en els canvis de les formes d'energia, tan importants per a la humanitat. La indústria, el comerç, la vida casolana utilitzen quantitats d'energia que van creixent segons una llei exponencial a mesura que el temps va passant. Avui dia, la fam d'energia és sinònima de fam tot simplement. Ja hem dit que, segons estableix el primer principi, l'energia es conserva. Per tant, consumir l'energia no vol pas dir destruir-la sinó tan sols transformar-la, i gairebé sempre succeeix que, en les transformacions d'energia, aquesta passa per la forma de calor. Per exemple, considerem el tipus de centrals elèctriques més important

en l'actualitat: una font d'energia (petroli, carbó, urani) desprèn calor; aquest s'utilitza per a obtenir un corrent de vapor d'aigua rescalfat que, per mitjà d'una turbina i d'un alternador, ens dóna energia elèctrica. Adhuc en les millors instal·lacions existents, molt més de la meitat de l'energia despresada per la font es perd i no arriba a convertir-se en energia elèctrica aprofitable. Queda com a calor que ha de ser eliminada per mitjà de l'aigua de refrigeració, la qual cosa sovint planteja seriosos problemes. En uns casos, aquesta calor escalfa l'aigua d'un riu o del mar o bé es fa passar a l'atmosfera per mitjà de torres de refrigeració.

Que calgui llençar tanta energia procedent de la font utilitzada no és sols una conseqüència de la imperfecció tècnica de les centrals sinó que, com ja Carnot va descobrir, fonamentalment és degut a la llei de la Natura expressada pel segon principi. Només podem evitar una tal degradació de l'energia no fent-la servir, però això és incompatible amb les necessitats que s'ha creat l'home. Avui dia, gairebé, ningú no està disposat a renunciar a la facilitat de viatjar i de fer ús dels innumbrables productes que ens posa a la nostra disposició una tècnica que necessita cada vegada més de l'energia. El problema resideix a aprofitar al màxim les fonts de què disposem i a buscar-ne de noves. Es planteja la qüestió important de si seria possible l'aprofitament de l'energia sense passar per la forma de calor, que veiem que ens és tan onerosa des del punt de vista de l'aprofitament. Tothom fa esforços en tal sentit per aconseguir una conversió directa de l'energia. Som molt lluny d'haver resolt el problema d'una manera tal que la solució sigui aprofitable co-

mercialment. Mai no s'han de confondre els nostres anhels d'aprofitament tècnic amb les possibilitats reals que la tècnica pot oferir-nos. Per exemple, dir que el sol ens envia molta energia i que hem de poder satisfer-hi les nostres necessitats no serveix de res si abans no s'han pogut resoldre els seriosos problemes que planteja la qüestió de l'aprofitament en gran escala de la deu solar.

Per desgràcia, qüestions tals com la conversió directa d'energia o l'aprofitament massiu de l'energia solar constitueixen problemes tan difícils que, en principi, es illusori d'esperar que siguin resolts en les properes dècades. És molt probable que la solució del problema de l'energia vingui per un altre cantó. Allò que sí que és segur és que l'esforç dels científics i tècnics és cada vegada més necessari per assegurar una subsistència digna de la humanitat. Faig vots perquè, en la mesura de les modestes possibilitats universitàries, professors i alumnes, homes de lletres i de ciències, contribuïm tots a aportar, amb una actitud constructiva, el nostre gra de sorra. Que la nostra terra estigui a l'alçària de les exigències actuals.

