

Cien Años de Termodinámica en España

David Jou

En este artículo se presenta una panorámica del desarrollo de la termodinámica a lo largo del siglo XX y de la participación española en este proceso. Delimitar el campo de la termodinámica es tarea ardua, ya que, por su misma naturaleza, se halla profundamente imbricada con otros campos como la física estadística y la teoría cinética, en lo que se refiere a las bases microscópicas, y a la química, la meteorología, la ciencia de materiales, la ingeniería industrial y la astrofísica, entre otras, por lo que respecta a las aplicaciones. Como en este número de la Revista Española de Física hay artículos dedicados a esas ramas, consideramos aquí la termodinámica en un sentido más bien restrictivo.

El artículo consta de tres partes: un esbozo del desarrollo histórico de la termodinámica, una panorámica de la participación española, y una visión del estado de la termodinámica en España a finales del siglo XX.

2. Desarrollo histórico de la termodinámica en el siglo XX

A comienzos del siglo XX, la termodinámica se hallaba en una situación interesante y atractiva. Por un lado, su estructura formal parecía definitiva, después de la decisiva aportación de Gibbs, y se le abrían numerosos campos de aplicación. Por otro, la termodinámica participaba en los orígenes de la mayor revolución de la física en el siglo XX: la teoría cuántica; en efecto, la termodinámica fue instrumento decisivo en los trabajos iniciales de Planck y de Einstein que dieron origen a la física cuántica entre 1900 y 1910. Junto a estos dos aspectos, conviene subrayar el prestigio cultural de que gozaba la termodinámica, en especial el segundo principio, que llegó a suscitar un gran interés entre los pensadores europeos, debido a sus connotaciones de irreversibilidad y de muerte térmica del universo; en España, se refirieron a él Unamuno, en *El sentimiento trágico de la vida*, y Eugeni d'Ors, en un curso sobre el segundo principio y la filosofía impartido hacia 1908 en el recién creado Institut d'Estudis Catalans.

Resumiremos el desarrollo de la termodinámica en el siglo XX en seis grandes líneas: bajas temperaturas, materiales magnéticos, química física, transiciones de fase, procesos irreversibles y sistemas gravitatorios, que trataremos desde una perspectiva básicamente macroscópica, aunque de hecho todas ellas son inseparables de sus contextos microscópicos respectivos, a los cuales haremos mención cuando convenga.

a) Bajas temperaturas

Desde la primera década del siglo XX, la obtención de bajas temperaturas y el descubrimiento de numerosos fenómenos nuevos en este dominio se revela como una de las líneas de investigación más fructíferas. En 1906, Nernst formula el tercer principio de la termodinámica, que establece el valor constante de la entropía cuando la temperatura absoluta tiende a cero, principio que estimulará el estudio experi-



Josiah Willard Gibbs (1839-1903)

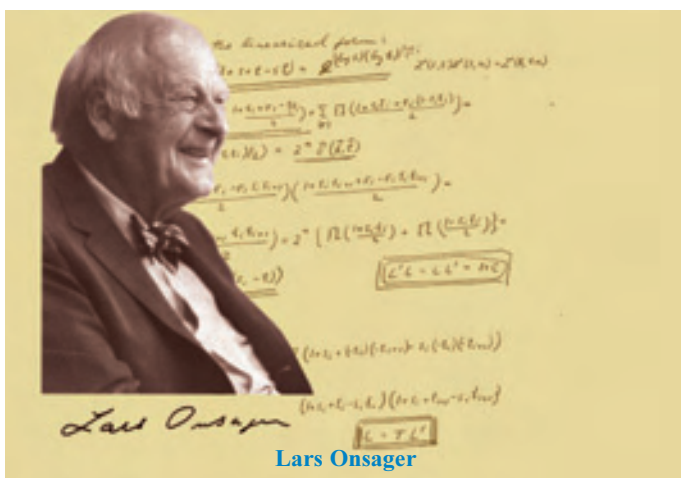
mental de bajas temperaturas. Independientemente, en 1907 Einstein aplica la nueva teoría cuántica para describir el comportamiento del calor específico de sólidos dieléctricos a bajas temperaturas, trabajos ampliados por Debye y otros en 1912. En 1908 Kammerling Onnes consigue licuar el helio, a 4,2 K, el último gas que quedaba por pasar a líquido, y se adentra en un campo lleno de descubrimientos, entre los cuales destaca la superconductividad (1911) y la superfluidez (1915). En 1926, Debye y Giauque proponen, independientemente, el método de enfriamiento por desimantación adiabática, que permitirá pasar de las temperaturas del orden de 1 K a las centésimas y aún las milésimas de Kelvin. El interés tecnológico de los

superconductores ha sido un estímulo permanente para el estudio de propiedades de los materiales a baja temperatura. En 1986, el descubrimiento de nuevos materiales cerámicos de alta temperatura crítica (del orden de los 150 K) incrementó la intensidad de las investigaciones en este campo. El desarrollo del láser a partir de los 1960, abre otros procedimientos de enfriamiento que han permitido, a finales del siglo XX, llegar a los nanokelvin y conseguir, en 1995, la condensación de Bose-Einstein en gases muy diluidos, uno de los hitos en la teoría cuántica de la materia. Asimismo, los comportamientos a bajas temperaturas exigieron nuevos desarrollos de la física cuántica y estadística, como por ejemplo la formulación, hacia 1926, de las estadísticas de Bose-Einstein y de Fermi-Dirac, y estimularon los estudios de fluidos cuánticos superfluidos por parte de Landau, Kapitsa, London y otros autores.

b) Magnetismo

Los materiales magnéticos han constituido uno de los ejemplos más fecundos de interacción entre termodinámica y estado sólido. La tesis de Curie en 1895 inicia el período moderno del magnetismo, con sus leyes sobre el diamagnetismo y paramagnetismo y sus primeros estudios sobre la transición ferromagnética. En 1905, Langevin daba a los

estudios sobre paramagnetismo y diamagnetismo una base microscópica, que en 1907 sería extendida por Weiss al estudio del ferromagnetismo con su teoría del campo molecular, interacciones cooperativas y dominios magnéticos. En 1914 se ponía de manifiesto el fenómeno de saturación paramagnética y el efecto magnetocalórico. Las teorías cuánticas del magnetismo fueron iniciadas en 1927 por Debye y Brillouin (recordemos que el español Blas Cabrera jugó un destacado papel en esta línea de investigación), y seguidas por los trabajos de Heisenberg y de van Vleck en 1928, de Bloch en 1932, y de Néel en los 1950, por mencionar tan sólo los más influyentes. Se descubrían nuevos fenómenos magnéticos como ferrimagnetismo y antiferrimagnetismo y, en 1946 se iniciaban los estudios de magnetismo nuclear, que conducían, incidentalmente, a la idea de la posibilidad de temperaturas absolutas negativas. La resonancia magnética nuclear se ha convertido en una técnica utilísima de exploración industrial y médica.



c) Química física

La introducción del concepto de potencial químico por Gibbs hacia 1875 había franqueado a la termodinámica el paso a las aplicaciones a la química. El estudio termodinámico de las constantes de reacción y de sus variaciones con la temperatura y la presión tuvieron importantes consecuencias industriales para mejorar la producción de muchas sustancias, el amoníaco en primer lugar, y revolucionaron la industria química, con el desarrollo de colorantes y fertilizantes, la industria petroquímica y la industria farmacéutica. La sistematización teórica de estos estudios por parte de Lewis y Randall en su tratado de termodinámica química de 1924 fue muy influyente. Entre los numerosos trabajos que amplían el campo de la química física en la primera mitad de siglo destacan especialmente los estudios de Nernst y Lewis sobre termodinámica de pilas electroquímicas y los de 1926 de Debye y Hückel sobre la teoría de electrolitos. Después de la segunda guerra mundial, el interés renovado por la petroquímica, la fabricación de plásticos y de fibras artificiales estimularon los estudios sobre polímeros, coloides, suspensiones y, más recientemente, de otros estados de la materia, entre los cuales vidrios, cristales líquidos y medios granulares. La necesidad de mejorar el rendimiento de todos los procesos industriales para ahorrar combustible y reducir la contaminación ambiental es uno de los estímulos actuales para la investigación en química física.

d) Transiciones de fase

Las anomalías del calor específico y de la susceptibilidad magnética en la transición ferromagnética fueron exploradas por Weiss ya en 1908 y dieron lugar a la idea de transición de fase de segundo orden. En 1933, Ehrenfest sistematizaba y generalizaba este tipo de estudios en un marco termodinámico de las transiciones de fase de orden superior. En 1944, Onsager conseguía estudiar rigurosamente las características de la transición ferromagnética en un sistema de Ising en dos dimensiones. Ya después de la segunda guerra mundial se advirtió que los exponentes críticos que definían las divergencias de diversas magnitudes físicas en diversas transiciones de fase de segundo orden o en la proximidad de puntos críticos presentaban características ampliamente universales, pero tenían valores diferentes de los que se deducían de las teorías de campo medio de van der Waals, de Weiss, de Hildebrand y de Landau. Ello estimuló, a lo largo de la década de los 1960, el estudio de tales exponentes, y así Widom y otros autores consiguieron, mediante aplicación de la termodinámica, establecer relaciones (igualdades o desigualdades) entre los diversos exponentes críticos. Los estudios de Kadanoff, Fisher y la teoría de renormalización de Wilson, en 1971, consiguieron formar un marco microscópico general muy poderoso para el cálculo de los exponentes críticos, con aplicaciones en el campo, muy diferente, de las partículas elementales.

e) Termodinámica de no equilibrio

En 1931, Onsager formulaba un marco termodinámico fuera de equilibrio, basado en la hipótesis del equilibrio local. Como consecuencia, y utilizando la teoría de fluctuaciones y la idea de reversibilidad temporal microscópica, conseguía demostrar unas relaciones de reciprocidad entre los coeficientes fenomenológicos de transporte que relacionan los flujos de calor, de materia, de corriente eléctrica, de ímpetu, con sus respectivas “fuerzas” conjugadas (gradientes de temperatura, potencial electroquímico, velocidad). Con ello conseguía explicar una serie de relaciones cuyo estudio había sido abordado sin mucho éxito por Lord Kelvin en 1856. La termodinámica de no equilibrio adquirió mucho ímpetu en la segunda mitad de siglo, especialmente por la influencia de Prigogine, que relacionó esta disciplina con la estructuración de sistemas suficientemente alejados del equilibrio, tema que se convirtió en un gran polo de interdisciplinariedad en las décadas de los 1960 y los 1970. La consideración de aspectos de no equilibrio resulta indispensable para alcanzar un compromiso óptimo entre rendimiento y potencia en máquinas térmicas, en la llamada termodinámica de tiempo finito. En las últimas décadas, se advierte la necesidad de ir más allá de las ideas del equilibrio local, tanto desde una perspectiva macroscópica como desde las nuevas perspectivas microscópicas abiertas por las teorías de sistemas dinámicos y caos y por el interés en materiales con memoria, en perturbaciones de frecuencias elevadas, y en sistemas miniaturizados, que requieren nuevas formulaciones de la teoría del transporte.

f) Sistemas gravitatorios

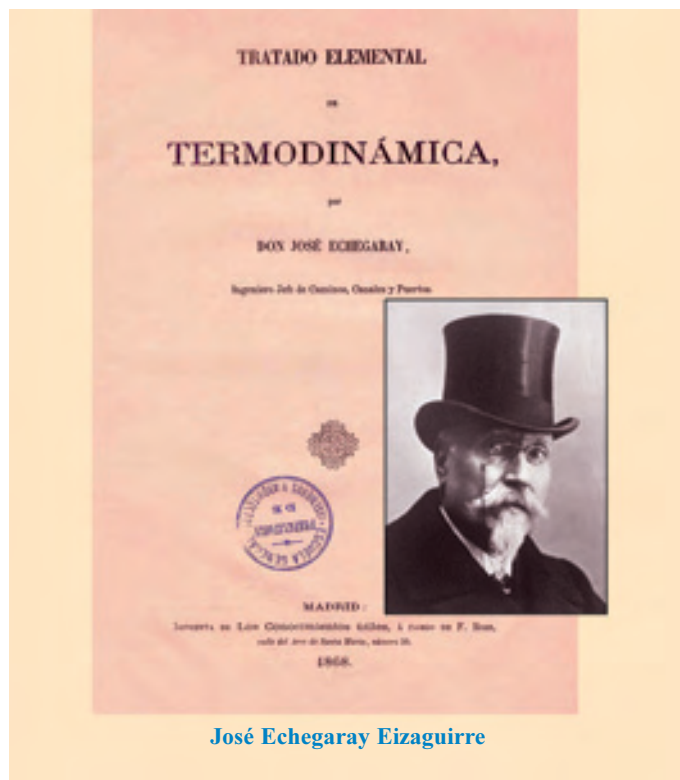
Una de las predicciones más espectaculares de la teoría general de la relatividad es la existencia de agujeros negros. Hacia 1970, Hawking demostró que el área total del horizonte de los agujeros negros no puede disminuir. A partir de este resultado, Bekenstein propuso, poco después, que el área de los agujeros negros podría ser considerada como una medida de la entropía de estos objetos. En 1975, Hawking, en un estudio de teoría cuántica en espacio-tiempos curvos demostró que los agujeros negros debían radiar con un espectro planckiano caracterizado por la temperatura que se deducía de la entropía de Bekenstein. Ello convirtió la termodinámica de los agujeros negros en una línea de investigación muy activa, ya que suponía el primer resultado concreto del intento de unificación entre relatividad general y teoría cuántica, de modo que la termodinámica recuperaba aquel papel revolucionario de principios del siglo XX, en que constituyó la avanzadilla de la revolución cuántica.

Naturalmente, esta breve descripción histórica no ha hecho justicia a muchos otros aspectos de que hubiéramos podido tratar, como por ejemplo el estudio de las propiedades de los sistemas sometidos a altas presiones y a altas temperaturas, tan importantes en dominios como la geofísica o la astrofísica. Asimismo, el estudio de sistemas a temperaturas elevadísimas alcanzó una gran importancia debido a los esfuerzos por desarrollar reactores nucleares de fusión, que sigue siendo uno de los grandes objetivos de la física. En la actualidad, el interés por temas como la computación y la ecología, por los sistemas mesoscópicos (núcleos atómicos, sistemas nanoscópicos diversos, dispositivos microelectrónicos, células biológicas), por sistemas con pocos grados de libertad pero en régimen caótico, por sistemas muy alejados del equilibrio, están llevando a la termodinámica a enfrentarse a situaciones que se hallan en los límites de sus dominios de validez, y que requerirán, quizás, ampliar sus métodos.

3. El desarrollo de la termodinámica en España a lo largo del siglo XX

A finales del siglo XIX en 1868, José Echegaray, el primer premio Nobel español de literatura, fue autor de un tratado de termodinámica que presentaba las ideas de Clausius y que contribuyó a familiarizar a algunos ingenieros españoles con este campo. Sin embargo, Echegaray no destacó como investigador original, sino más bien como un erudito y una personalidad de amplias inquietudes. Entre los años 1920 y 1960, sobresalió la figura de Julio Palacios, buen conocedor de la ciencia de su tiempo, redactor de diversas monografías y libros de texto de excelente nivel, entre los que destacan dos de termodinámica. Aunque no creó escuela, Palacios fue el máximo exponente de la termodinámica en España, muy circunscrita entonces a estudios experimentales de sistemas fisicoquímicos.

Desde el final de la guerra civil hasta mediados de la década de los 1960, los temas predominantes en investigación en termodinámica en España se realizan en calorimetría y en sus aplicaciones fisicoquímicas. En microcalorimetría, destaca el grupo de J.M. Vidal en Barcelona con relaciones con el grupo de Calvet en Marsella, y donde se formarán investigadores que posteriormente se instalarán en otras universidades, como, por ejemplo, M. Zamora en Sevilla. Otro



José Echegaray Eizaguirre

campo a que se dedicarán los especialistas en termodinámica será la meteorología, como por ejemplo V. Gandía, y la física del aire, aunque con vistas a desarrollos prácticos más que a la investigación.

En los años 1950, en la Universidad de Santiago y en Madrid, en el Instituto de Química Física Rocasolano, del CSIC, el grupo de O. R. Foz, J. Morcillo, A. Pérez Masiá y otros estudian la compresibilidad de vapores de mezclas de alcoholes y su ajuste a desarrollos del virial. En los años 1960, estos trabajos dan paso a estudios de equilibrios líquido-vapor en mezclas y de funciones termodinámicas de exceso en mezclas líquidas de series de sustancias orgánicas, con los grupos de J. Ocón y G. Tojo y de M. I. Paz Andrade en Santiago, con relaciones con grupos de Francia e Inglaterra. En el Instituto Rocasolano y en la Universidad Complutense, el grupo de M. Díaz Peña y A. Roig Muntaner lleva a cabo trabajos calorimétricos en mezclas líquidas, que se amplían en los años 1970 con estudios más microscópicos sobre potenciales. Otro grupo desarrollaba, en el mismo instituto Rocasolano, estudios de termoquímica sobre entalpías de formación. Las mezclas líquidas fueron asimismo objeto de investigación en Valladolid (grupo de F. Mato) y el de equilibrio líquido-vapor en Salamanca, mientras en Granada se estudiaban algunos aspectos del transporte en membranas. La mayoría de los trabajos de investigación en estos campos son publicados en los Anales de la Real Sociedad Española de Física y Química.

En Zaragoza, a mitad de los 1960, el grupo de D. González Álvarez, J. M. Savirón, J. C. Yarza, C. M. Santamaría y otros inicia estudios experimentales en columnas de difusión térmica de gases nobles, y de potenciales intermoleculares, que se amplían a comienzos de los 1970 a estudios del factor de difusión térmica de gases nobles a bajas temperaturas, iniciando así el campo de bajas temperaturas en España. Estos investigadores tienen relaciones con grupos de

Leiden e inician la publicación de artículos en revistas de prestigio internacional.

La termodinámica de los procesos irreversibles se inicia, en los aspectos más teóricos, a mediados de los 1970. Son pioneros en este campo J. Casas-Vázquez, en la Universidad Autónoma de Barcelona, y M. García Velarde en la de Madrid. El grupo fundado por el primero trabajará en extensiones de la termodinámica de procesos irreversibles más allá del equilibrio local, en tanto que M. G. Velarde dedica rápidamente su atención al campo de inestabilidades hidrodinámicas. En lo que respecta a las aplicaciones de los procesos irreversibles se amplía en las universidades de Valencia, Valladolid, Madrid y Murcia con estudios de transporte en membranas (Tejerina, Ibáñez, Ibáñez Mengual, Pellicer, Fernández Pineda, ...) y, en Barcelona, Wagensberg realiza aplicaciones de la termodinámica a procesos biológicos.

Hay un número relativamente elevado de libros texto de termodinámica, entre cuyos autores podemos mencionar: J. Aguilar, J. Biel, M Criado-Sancho, J. Casas Vázquez, J. Claret, M. Díaz Peña, D. Jou, J. E. Llebot, J. A. Manzanares, F. Mas, J. Pellicer, F. Sagués, F. Tejerina, que son un buen testimonio no sólo del interés docente sino también de la inquietud por estar al día y representar adecuadamente los progresos de la especialidad. En lo que concierne el estado actual, lo trataremos en la sección siguiente. Naturalmente, el artículo no pretende ser exhaustivo; pedimos excusas por las imprecisiones o los olvidos involuntarios que hayan podido producirse en su redacción.

4. Panorama actual: grupos, publicaciones, líneas de investigación

Trazamos a continuación un panorama aproximado de la situación actual de la termodinámica en España. El lector interesado en más detalles puede consultar nuestro estudio sobre la investigación desarrollada por los miembros del Grupo Especializado de Termodinámica (GET) de las Reales Sociedades Españolas de Física y de Química, que figura en la página web del mismo (<http://www.aiff.usc.es/~faget>). Dado el carácter interdisciplinar de la termodinámica, que le otorga un papel importante no sólo como parte de la Física, sino también como utilísimo instrumento para la Química y la Ingeniería, es natural que definir nítidamente el campo de la termodinámica sea difícil y siempre discutible.

En el siguiente cuadro, resumimos las líneas de investigación, número aproximado de investigadores y número indicativo de artículos publicados en termodinámica en España, entre 1990 y 1997. Entre paréntesis indicamos el número de investigadores inscritos en el GET.

En esta clasificación, se ha asignado, en lo posible, cada investigador a un solo subgrupo, para comodidad de cómputo. En realidad, casi todos los investigadores podrían adscribirse a varios subgrupos, ya que es raro encontrar temas que pertenezcan exclusivamente a una sola de las áreas mencionadas. El grado de aproximación de este cuadro a la realidad investigadora española es tan sólo indicativo, dado el papel que juega la termodinámica en otras áreas de investigación, como la química física, la física del aire, la energía solar, la reología, el magnetismo y la ciencia de materiales, ramas muy pluridisciplinarias, en las cuales la termodinámica es tan sólo un aspecto entre muchos otros. Tampoco hemos inclui-

Tabla 1

Áreas	Investigadores	Artículos
Mezclas líquidas	60 (41)	180
Membranas	40 (14)	150
Materiales	80 (11)	280
Calorimetría y análisis térmico	30 (10)	100
Procesos irreversibles y de transporte	25 (6)	150
Física no lineal	25 (5)	150
Propiedades superficiales y coloides	25 (6)	150

do los numerosos investigadores en física estadística, ya que otros artículos de este número estarán dedicados a este tema, y hemos mencionado tan sólo aquéllos que a nuestro entender se hallan más próximos a la utilización de métodos termodinámicos. La física estadística y no lineal ha conocido un rápido crecimiento en España en los últimos quince años, de modo que las reuniones bienales Física Estadística reúnen a unos 150 investigadores, de los cuales tan sólo una docena forman parte del GET, una separación entre termodinámica y estadística que resulta excesiva, pero que refleja más la realidad asociativa que la realidad científica, donde las relaciones son bastante más intensas.

Analizamos los diversos grupos de trabajo y sus líneas de investigación, para dar una visión más precisa:

- Mezclas líquidas.* Contabilizamos siete grupos, localizados en Santiago de Compostela, Vigo-Ourense, A Coruña, Valladolid, Las Palmas de Gran Canaria y Tarragona. Entre las líneas de investigación podemos mencionar las siguientes: medida, correlación y predicción de propiedades termodinámicas y físicas de mezclas pluricomponentes a diversas temperaturas y presiones, medida de calores específicos, entalpías molares, volúmenes molares de exceso y permitividades dieléctricas relativas en series de hidrocarburos, búsqueda y caracterización de nuevos refrigerantes, absorbentes, refrigerantes y lubricantes para sistemas de climatización y refrigeración.
- Membranas.* Registramos seis grupos: dos en Madrid y uno en Valencia, Castellón, Murcia y Valladolid. Entre las líneas de investigación, mencionamos transporte iónico en disoluciones electrolíticas a través de membranas bipolares, termodinámica de procesos electrocinéticos, biofísica de membranas (efectos de carga en electrodifusión); destilación no isoterma a través de membranas, extracción, depuración y transporte a través de membranas poliméricas y líquidas; desalación por membranas.
- Materiales.* Nueve grupos: Autónoma de Barcelona, Politècnica de Catalunya, Autónoma de Madrid, País Vasco, Illes Balears, A Coruña y Santiago de Compostela. Entre los firmantes de los artículos se cuentan unos 80 investigadores. El número total de investigadores sobre ciencia de materiales en España debe situarse en algo más de un millar, pero es difícil precisar cuántos de ellos están interesados en métodos termodinámicos o en aspectos térmicos de los materiales: no resulta aventurado imaginar que ello supondría una cuarta parte de este total. Entre las líneas de investigación mencionamos: dilatación térmica y propiedades magnéticas de sistemas superconductores, propiedades térmicas y elásticas de vidrios moleculares; transformaciones martensíticas y materiales con memoria; termodinámica y cinética de

transiciones de fase en sólidos amorfos y nanocristalinos, propiedades térmicas y dieléctricas de sólidos ferroeléctricos; fluctuaciones y propiedades de transporte de materiales superconductores granulares y laminares.

- d) *Superficies y coloides*. Cinco grupos: Granada, Almería, Santiago de Compostela, Lugo y Badajoz. Las líneas de investigación son movilidad electroforética, interacción entre suspensiones de poliestireno y polielectrolitos orgánicos de interés biológico, estabilidad y coagulación de coloides y relación con propiedades electrostáticas; adsorción, adhesión y mojado en superficies.
- e) *Procesos irreversibles y fenómenos de transporte*. Cuatro grupos: Autónoma de Barcelona, UNED, País Vasco, Barcelona. Podría añadirse a esta área el conjunto de los trabajos de membranas, la mayoría de los cuales pertenecen típicamente al área de fenómenos de transporte y procesos irreversibles, o los que estudian inestabilidades hidrodinámicas, que hemos incluido en el apartado de física no lineal. Líneas de investigación: extensión de la termodinámica de procesos irreversibles, termodinámica de transiciones de fase en soluciones poliméricas en presencia de flujos, teoría de la información en estados estacionarios de no equilibrio, termodinámica y cosmología, hidrodinámica fluctuante de suspensiones y ferrofluidos.
- f) *Física estadística y no lineal*. Ocho grupos: Salamanca, Badajoz, Barcelona, Santiago de Compostela, Madrid, Granada, Santander y Navarra. En conjunto, según el nivel de asistencia a la reunión de Física Estadística, deben contarse en España unos 150 investigadores en esta disciplina, pero no todos ellos se interesan por los aspectos termodinámicos. Líneas de investigación: sincronización de sistemas caóticos; estructuras convectivas de Bénard-Marangoni: defectos, caos; estructuras espaciotemporales en medios excitables; electrónica no lineal; modelización meteorológica y oceanográfica, máquinas y refrigeradores en tiempo finito; sistema inmunológico y dinámica de poblaciones; sistemas de esferas o discos en volúmenes finitos; simulaciones por ordenador mediante dinámica molecular de ecuaciones de estado de fluidos y equilibrio líquido-vapor; ecuaciones de estado y propiedades de transporte de fluidos de moléculas duras esféricas o alargadas; transiciones de fase en aleaciones amorfas.
- g) *Calorimetría y análisis térmico*. Ocho grupos, en Santiago, El Ferrol, A Coruña, Lugo, Bilbao y Madrid. Esta distribución no refleja directamente la realidad, ya que se podría incluir, además, varios investigadores de mezclas líquidas, de materiales y de termodinámica técnica. Ello no sorprende, si tenemos en cuenta que la calorimetría tanto puede ser una rama de estudio por sí misma, como un instrumento para otros estudios. Líneas de investigación: desarrollo de calorimetría Calvet de alta temperatura, calorimetría de transiciones ferroeléctricas y ferroelásticas, estudio de cinéticas de polimerización y degradación de materiales poliméricos, análisis térmico de aleaciones con memoria de forma, medida de calores específicos y entalpías de exceso de mezclas líquidas, análisis térmico diferencial de relajaciones estructurales y transiciones vítreas, tratamiento térmico de alimentos mediante refrigeración presurizada.

En lo que respecta a la evolución de publicaciones entre 1990 y 1997, queda descrita aproximadamente por la siguiente tabla:

1990	91	92	93	94	95	96	97
110	100	110	130	150	160	140	160

Observamos, en conjunto, un marcado crecimiento del número de publicaciones, en la línea de la tendencia general de la física española, que ha incrementado el número de publicaciones de 920 por año (promedio de 1985 a 1990) a 2150 por año (promedio de 1990 a 1995). El crecimiento en número de publicaciones es menor que la media española, lo cual es atribuible a que el aumento del número de investigadores en termodinámica ha sido mucho menor que en física estadística, ciencia de materiales u óptica, por mencionar sólo algunas otras áreas.



Ilya Prigogine, premio Nobel de Química 1977

Las revistas en que han sido publicados más artículos durante este período son, en orden de número de publicaciones y con indicación del índice de impacto: más de 50 artículos: Phys. Rev. E (2,16); entre 40 y 50 artículos: J. Chem. Thermodyn. (1,09), Phys. Rev. B (2,83); entre 30 y 40 artículos: Fluid Phase Equilib. (1,024), Physica C (1,71), J. Chem. Phys. (3,61), Thermochim. Acta (0,55), entre 20 y 30 artículos: J. Colloid Interf. Sci. (1,56), J. Phys. Chem. (3,34), Anales de Física, Int. J. Bifurc. Chaos, J. Chem. Soc. Faraday Trans., Physica A (1,33), J. Non-Equil. Thermodyn. (0,88); menos de 20 artículos: Europhys. Lett, Phys. Rev. Lett., Ber. Bunsen-Ges. Phys. Chem., J. Chem. Engn. Data, J. Solut.Chem., Phys. Chem. Liquids, J. Membrane Sci, Electrochim. Acta, Separ. Sci. Technol., Mater Science Forum, Mat Sci Engn, J. de Physique, J. Mater. Res., J. Non-Cryst. Solids, Scripta Metall Mater., Mater. Trans., J. Alloy Compd., Ferroelectrics, Ferroelectrics Lett., J Phys C: Condens. Matt., Cryogenics, Phys. Lett. A, J. Phys. A, J. Thermal Anal., Journal of Food Engineering, Int. J. of Refrigeration, Ferroelectrics, Anales de ingeniería mecánica, Revista de ciencia, J. Appl. Polym. Sci, Chem. Phys., J. Mol. Liquids, Progr. Colloid. Polym. Sci., Colloid. Surf., Colloid. Polym. Sci., Langmuir. Se trata, como era de esperar, de revistas pluridisciplinarias, a caballo entre la física y la química, más que de revistas de física pura.

Atención especial merecen los artículos de review (una decena) (sobre cinética de cristalización, electrocinética de interfaces y coloides, adsorción de inmunoglobulinas, ter-

modinámica de polímeros bajo flujo, extensión de la termodinámica de procesos irreversibles, ...) y las letters (unas treinta) publicadas en las revistas como *Phys. Rev. Lett.*, *Europhys. Lett.*, *Appl. Phys. Lett.*, básicamente en los grupos de física estadística y de materiales, ya que se trata de áreas con muchas novedades. Los temas de dichos artículos son, por ejemplo, defectos en estructuras convectivas, estudio experimental del desorden en transiciones vítreas, transporte iónico en membranas, ondas en sistemas excitables caóticos, fragmentación de gotas, relajación al equilibrio en sistemas no conservativos, refrigeradores en tiempo finito, funcional de densidad para sistemas pequeños, propiedades magnéticas de superconductores, inestabilidades en sistemas caóticos sincronizados.

Se realizan también numerosas reuniones, congresos y coloquios, de ámbito español (como las reuniones bienales del GET) o, más a menudo, internacional, como la Escuela de Termodinámica de Bellaterra: *Rheological Modelling: Thermodynamical and Statistical Approaches* (Sant Feliu, 1990), *New Trends in Nonlinear Dynamics: non variational Aspects* (Tudela, 1992); I Congreso Iberoamericano en Ciencia y Tecnología de membranas (Murcia, 1992), *Energy Management by Absorption Cycles* (Tarragona, 1993); IV conferencia de la IUPAP de la enseñanza de la Física Moderna (Badajoz, 1994), *Jornades Mediterrànies de Calorimetria i Anàlisi Tèrmica* (Mallorca, 1997), *Mechanically alloyed, metastable and nanocrystalline materials*, ISMANAM Sant Feliu, 1997). Mencionaremos finalmente que el GET pertenece desde 1996 al EUROSTAR: *European Society for Thermal Analysis, Calorimetry, Thermodynamics and Chemical Reactivity*.

Cabe destacar que experimentación y teoría están bastante equilibradas, casi en proporciones iguales. Las áreas más experimentales son mezclas líquidas, calorimetría, propiedades superficiales y coloides, materiales, y membranas. Las más teóricas son física estadística y no lineal, y procesos irreversibles y de transporte. Es interesante subrayar la colaboración con la industria, que se lleva a cabo, sobre todo, en Facultades de Ingeniería (Tarragona, Badajoz, Valladolid) o el Instituto del Frío del CSIC. Hemos hallado los siguientes temas de aplicación: desarrollo de refrigerantes alternativos a los CFC, y de nuevos fluidos de trabajo en sistemas de conversión de energía, conservación y estabilización de alimentos por tratamiento térmico o por presurización, elaboración de sistemas expertos para caracterización ampelográfica de vides, correlación de propiedades físicas de la atmósfera, bosques y suelos y los incendios forestales, desalación, extracción y depuración por membranas, adsorción de anticuerpos en microesferas con aplicaciones a medicina y bioingeniería, ensayo de polímeros mediante análisis térmico, estudio calorimétrico de cerámicas y vidrios, calibración de equipos, metrología y control de calidad, modelización numérica del tráfico marítimo-terrestre en Galicia. Entre las empresas contratantes se hallan Gas Natural, Bosch, Alfa-Laval, Société Française du Pétrole, y la comunidad europea en acciones del programa JOULE. Sin embargo, sólo tenemos constancia de una patente, anterior al período 1990-1997. El interés por la biología se manifiesta en los grupos de membranas (biofísica de transporte iónico a través de membranas), superficies y coloides (fijación de anticuerpos en suspensiones y coagulación de las mismas, con aplicaciones en inmunología), física estadística (mecánica estadística

del sistema inmunitario, efectos de campos eléctricos sobre el movimiento de las células), física no lineal (estructuras espacio temporales en medios excitables como membranas de nervios o músculo cardíaco) y calorimetría (inactivación de microorganismos por efectos de temperatura y de presión).

En lo que respecta a la docencia, los investigadores no enseñan tan sólo termodinámica o física estadística, sino también otras materias muy diversas, como física general, física de fluidos, física de polímeros, o biofísica. El interés por la docencia se manifiesta también en la organización ocasional de coloquios (como el congreso internacional de la IV conferencia de la IUPAP de la enseñanza de la Física Moderna, Badajoz, 1994) o con publicaciones en revistas dedicadas al tema educacional, a saber: *Revista Española de Física*, *American Journal of Physics*, *European Journal of Physics*, *Journal of Chemical Education*

5. Conclusiones

En su composición actual, los grupos mencionados llevan a cabo una investigación activa, con numerosas colaboraciones internacionales, participación en proyectos, organización de cursos y congresos. En termodinámica puede darse una gran diversidad de enfoques: desde desarrollos muy teóricos en física estadística, hasta problemas de transferencia de tecnología en termodinámica técnica. El inconveniente que ello plantea es el esfuerzo que se requiere para superar las barreras de lenguaje entre las diversas áreas. Si se considera que la relación con la industria y la transferencia tecnológica constituyen uno de los retos más considerables de la física española en el presente, ello conduce a mantenerse muy abierto al sector más técnico, con una cierta ponderación que valore también las patentes.

También es conveniente dar a conocer a la comunidad científica española las actividades de que se llevan a cabo en termodinámica. En efecto, es probable que el juicio apriorístico de tal comunidad no se corresponda con la realidad: el carácter clásico de la termodinámica de equilibrio hace que a menudo se crea que los trabajos llevados a cabo son repeticiones rutinarias o cuestiones académicas poco relevantes. Algunos de los artículos más citados de la física española se han dado en este campo (ya sea en la teoría de transiciones de fase de primer orden, con más de 1800 citas, en energía libre de esferas duras, con unas 400 citas, artículos éstos más estadísticos que propiamente termodinámicos, un libro sobre termodinámica de procesos irreversibles, citado más de 400 veces, y artículos de revisión de inestabilidades hidrodinámicas y termodinámica de procesos irreversibles, citados más de 300 veces, o de transiciones martensíticas, citado más de 150 veces).

En este breve artículos, hemos procurado subrayar las líneas de trabajo, los temas de relación con la industria, y cuantas cuestiones nos ha sido posible para dar una visión de la riqueza de posibilidades que se están explorando actualmente en termodinámica.

Referencias

- [1] Historia general de las ciencias, Orbis, Barcelona, 1988.
- [2] D. JOU, La investigación en el Grupo especializado de termodinámica (GET) (1990-1997).

David Jou

está en el Dpto. de Física. Univ. Autónoma de Barcelona