

Mi clásico favorito

William Thomson (Lord Kelvin)

por José A. Manzanares*
y María Amparo Gilabert*

Dedicado al Prof. Julio Pellicer García, quien nos contagió su pasión por la termodinámica.

«I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge about it is of a meagre and unsatisfactory kind.» (W. Thomson 1889, *Popular Lectures and Addresses* 1, p. 73)

Kelvin entró en nuestras vidas en forma de frigorífico Kelvinator, un maravilloso invento de Karl von Linde basado en el experimento de Joule-Kelvin. Nuestro clásico favorito representa el paradigma de físico generalista que contribuyó con teorías, experimentos e instrumentos en muchas áreas, que mostró gran intuición y dominio del uso de analogías, que usó sus excepcionales habilidades matemáticas para comprender mejor los fenómenos físicos y que, con su espíritu emprendedor, sintió el compromiso de lograr avances en la sociedad mediante aplicaciones de la física.

William Thomson (26 jun. 1824-17 dic. 1907) nació en Belfast, Irlanda del Norte, en una familia de “escoceses del Ulster”, descendientes de inmigrantes que mantenían su religión presbiteriana. Huérfano de madre desde los seis años, su vida estuvo muy influenciada por su padre, James Thomson, quien comenzó trabajando en una granja, aprendió aritmética por su cuenta, llegó a ser profesor en Belfast en 1815 y catedrático de matemáticas en la Universidad de Glasgow en 1832. Tal era su apego por esta universidad que, al recibir su título nobiliario en 1892, William Thomson eligió llamarse Baron Kelvin of Largs en honor al río que rodea el campus.

Tras jubilarse de la cátedra que ocupó 53 años y perder las elecciones a Rector en 1899, se matriculó como estudiante para no desvincularse del campus donde había vivido desde los ocho años. De 1901 a 1903 sirvió como Decano y de 1904 hasta su muerte en Largs, Ayrshire (Escocia), como Presidente.

Se casó con Miss Margaret Crum en 1852, poco después de ser rechazado por tercera vez por Sabina Smith, su primer amor. William trasladó su desánimo a sus charlas de 1852 e introdujo la muerte térmica del universo. Tras el fallecimiento de Margaret en 1870, se casó con Miss Frances Anna Blandy en 1874. No tuvo hijos.

William Thomson dominó la ciencia británica en la época Victoriana. Perteneció a más de 100 sociedades científicas, recibió 21 doctorados honoris causa y presidió la Royal Society de Londres (de 1890 a 1895). Fue un destacado profesor y divulgador, que usaba frecuentemente demostraciones experimentales en sus exposiciones públicas. Recibió numerosas distinciones y premios, y acumuló más iniciales tras su nombre que nadie en la Commonwealth. La celebración del cincuentenario de su cátedra en 1896 fue un evento científico y social a escala internacional al que acudieron 2 500 invitados. Su laboratorio de física fue el primero del país en 1850¹. Con Tait, publicó *Trea-*

tise on Natural Philosophy, que centró el estudio de la física en los principios de conservación de la energía y de mínima acción y supuso el nacimiento de una pujante escuela de física matemática. Según algunos historiadores, con este tratado intentó heredar la corona de Newton. Haber sido el primer Lord científico y estar enterrado en la Abadía de Westminster junto a Newton pueden considerarse evidencias de su éxito.

Dos cualidades de Thomson eran su interés por trasladar a la vida cotidiana resultados físicos y matemáticos aparentemente abstractos y su búsqueda de generalizaciones a los teoremas para alcanzar así una comprensión global de los fenómenos. Muy pocas personas hallarían una conexión entre problemas tan dispares como el problema de Dido (la princesa fenicia Elisa de Tiro, que fundó y reinó en Cartago, en el actual Túnez) y la estabilidad de la rotación del agua en un recipiente elipsoidal. Sin embargo, estos fueron el primer y el último ejemplo que Thomson empleó en una de sus charlas semi-populares (frente a la Royal Institution en 1893) sobre problemas isoperimétricos. No es fácil generalizar el trabajo de genios como Maupertius, Lagrange y Hamilton pero, en este memorable discurso,

do este murió en 1879, le ofrecieron la cátedra Cavendish a Thomson, pero la rechazó, como ya había hecho en 1870 cuando la crearon y al igual que hizo en 1884 cuando la dejó Lord Rayleigh.

* Dpto. Física de la Tierra y Termodinámica, Fac. Física, Universitat de València, 46100 Burjassot.

1 En 1874 se creó el laboratorio Cavendish en Cambridge bajo la dirección de Maxwell. Cuan-

No. 1596
 University of Glasgow.—MATRICULATION ALBUM.
 Fee, £1 1s.
 NATIO LOUDONIANA.
 Session 1890-1900.

This Schedule to be filled up by Students born within any of the Scottish Counties of Leith, Glasgow, Edinburgh, Haddington, Dumfries, Peebles, Selkirk, Roxburgh, Wigton, Kirkcaldy, Berwick; or in England, Ireland, or Foreign Countries.

Name in Full, Kelvin
 Age at last Birthday, 75
 Birthplace—(Town or Parish, and County; if not in Scotland, write the Country also), Belfast Co. Antrim
 Father's Christian Name, James
 Father's Occupation, Professor of Mathematics in Belfast & Glasgow
 Is Father Alive? No
 Branch of Study (i.e., Arts, Science, Medicine, Law, or Theology), Physics & Mathematics
 Classes for this Session, etc., Not yet determined
 Number of Sessions previously attended at this University, 5 or 7 as Student, etc., on Classes in the Faculty of Arts
 Present Address, Netherhall Large Ayrshire
 Home Address, _____

DECLARATION to be signed by the Student before entering his Name in the Album.
 I hereby declare that I will faithfully attend the Class or Classes in which I shall enrol during the present session.
 Signature, Kelvin

En la historia de la Universidad de Glasgow W. Thomson es a la vez su estudiante más joven (10 años) y más mayor, pues con 75 años volvió a matricularse en física y matemáticas.

Thomson generalizó el cálculo de variaciones y el teorema de mínima acción, al tiempo que mostró sus dotes como profesor. Comenzado con ejemplos concretos, como el trazado óptimo de una línea de ferrocarril entre dos ciudades separadas por un terreno con relieve, llevó a la audiencia a pensar en problemas similares y sintetizar su formulación, y acabó con una generalización de los principios de mínimo bajo restricciones y su teoría de los focos cinéticos, que describió en la sección 357 del *Treatise on Natural Philosophy*, vol. I.

Thomson trasladó la ciencia y métodos científicos franceses al Reino Unido. Sus referencias fueron los trabajos de Fourier, Green y Carnot. Aplicó la obra de Fourier a la conducción eléctrica, la telegrafía, el enfriamiento de la Tierra y la predicción de mareas. En el concepto de potencial introducido por Green encontró el parangón a sus cualidades: pragmatismo, versatilidad y potencia matemática. Stokes, Helmholtz, Joule y Tait también ejercieron influencias decisivas. Cuando llegó a Cambridge en 1841, entabló amistad con Stokes, quien acababa de graduarse e incorporarse como profesor con 22 años. En la correspondencia que mantuvieron durante más de 50 años, Stokes consiguió moderar a Thomson en sus atrevidas teorías. Aunque sus desacuerdos eran frecuentes, se valoraban mutuamente. Helmholtz encontró en Thomson el reconocimiento que no obtuvo en su país y Thomson vio en él un aliado para el desarrollo de la “ciencia de la energía”. La colaboración entre Joule y Thomson fue intensa a partir de 1852. Para financiar sus experimentos, Joule tuvo que vender en 1854 su cervecería familiar y acabó viviendo de una pensión anual de 200 libras esterlinas que le concedió la reina en 1878. En contraste, Thomson fue posiblemente la primera persona en hacerse rica gracias a sus conocimientos científicos y su patrimonio en la fecha de su muerte era de 169 000 libras esterlinas, una impresionante mansión y un yate de 126 toneladas. Por último, la amistad entre Tait y Thomson comenzó en 1860, cuando Tait ganó con el apoyo de Thomson la cátedra de Edimburgo

go frente a Maxwell. Tait llevó el peso de conseguir que el proyecto inicial de escribir un *Treatise* que cubriese todos los campos de la física acabase al menos con dos volúmenes de mecánica, publicados en 1867 y 1883.

Thomson cambió la relación de la física con la industria y la sociedad. Entre sus inventos destacan el galvanómetro de espejo, el registrador de sifón, la brújula girostática y sus máquinas calculadoras. Publicó 661 trabajos, 25 libros y capítulos de libro y realizó unas 70 patentes. Mención especial requieren sus *Baltimore Lectures*, que recogen los apuntes de sus clases en la Universidad John Hopkins. Hay una versión de 1884 pero la más interesante es la extendida de 1904, que elaboró durante 19 años. Manteniendo la cortesía social, siempre intentaba ahorrar tiempo para sus actividades científicas; la nota necrológica en *The New York Times* recogía su frase “Si el día tuviese treinta horas en lugar de veinticuatro podríamos acabar parte de nuestro trabajo”.

Catedrático de filosofía natural a los 22 años

Con 8 años William asistía, junto a su hermano James, a las clases de su padre en la Universidad de Glasgow. Mostró extraordinarias capacidades y a los 10 años le permitieron matricularse. Las vacaciones familiares a París en verano de 1839 se prolongaron con una estancia para que los hermanos aprendiesen francés. William aprovechó para estudiar el *Traité du Mécanique Céleste* de Laplace y preparar el ensayo “Sobre la forma de la Tierra”, que evidenciaba su dominio de la hidrostática y le valió una medalla de oro.

El catedrático de filosofía natural en Glasgow, W. Meikleham, enfermó en el curso 1838-9 y sus clases pasaron a ser cubiertas por colegas. Durante una de estas sustituciones, el profesor de astronomía J. P. Nichol habló a William de su admiración por la *Théorie Analytique de la Chaleur* de Fourier. Nichol no era matemático y dio a entender que no la había leído completamente. William le preguntó si él podría leerla, a lo que Nichol contestó “Quizás”. El día de la entrega de notas William sacó el libro de la biblioteca y lo leyó esa noche. Esta obra le sirvió de inspiración toda su vida, llegando a afirmar que el teorema de Fourier siempre estaba detrás de los logros de los que se sentía especialmente satisfecho.

Su segundo viaje fue a Frankfurt en verano de 1840 y allí preparó su primer artículo. Unos días antes de partir, William leyó *Theory of Heat* (1837) por Kelland (catedrático de matemáticas en Edimburgo que había sido primero de promoción en Cambridge en 1834), donde se afirmaba que la teoría de Fourier era incorrecta. Esto impactó tanto a William que decidió llevarse el libro de Fourier a escondidas, pues su padre quería que se concentrase en aprender alemán. Demostró que Kelland se había equivocado y, tras convencer a su padre de que se debía hacer justicia con Fourier,

publicó en 1841, con 16 años, un artículo en el que explicaba el uso de las series de Fourier. Su padre decidió entonces que completase su formación en el St. Peter's College (el más antiguo de la Universidad de Cambridge). Para poder entrar como estudiante de grado en octubre de 1841, William no se graduó en Glasgow. Buscando evitar la controversia con Kelland, firmó sus 11 primeros trabajos en el *Cambridge Mathematical Journal* bajo el seudónimo PQR.

La cuidada preparación de la imagen de William como candidato a la cátedra de filosofía natural de Glasgow fue un trabajo de años. A finales de 1842 su padre vio claro que William tenía opciones y contrató como tutor a W. Hopkins por su experiencia en formar primeros de promoción. William publicó 16 artículos mientras estudió en Cambridge y se graduó con fama de matemático brillante. Lo nombraron miembro del equipo de gobierno del St. Peter's en junio de 1845 y editor del *Camb. Math. J.*².

Su padre organizó estancias para completar la formación de William, inicialmente teórica, y le pidió que estableciera contactos útiles. Así, en el verano de 1843 hubo de trabajar en los laboratorios de química de Glasgow, en 1843 y 1844 tomó clases de filosofía natural experimental, astronomía práctica e instrumentos astronómicos, y durante cuatro meses y medio de 1845 realizó una estancia en París, donde acudió a clases de química y física en la Sorbona. A través de académicos escoceses como Brewster llegó a Cauchy y a Biot; y a través de Biot llegó a Regnault, catedrático de filosofía natural del Collège de France, para quien trabajó como ayudante. La eficiencia de William en lograr recomendaciones (de Hamilton, Liouville, Stokes, Boole, etc.) no sólo sorprendió a su padre sino que hizo que nadie más quisiese optar a la cátedra y le fuese concedida por unanimidad el 11 de septiembre de 1846, cuatro meses después del fallecimiento de Meikleham. William y su padre fueron compañeros sólo dos años, pues este murió en enero de 1849 y no llegó a ver cómo su otro hijo, James, también conseguiría cátedras de ingeniería en Belfast (1857) y Glasgow (1873).

La ciencia de la energía

Durante la época Victoriana Glasgow era el centro industrial y la segunda ciudad en importancia. El dinamismo del capitalismo industrial evidenciaba la necesidad de cambios en una universidad dominada por profesores de teología. Gracias a

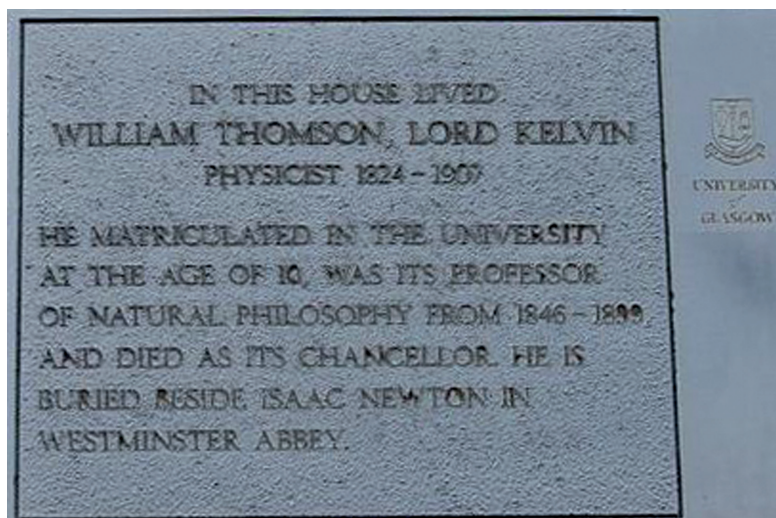
las campañas reformistas emprendidas por James Thomson, que culminaron con la sustitución de profesores de la vieja guardia por otros liberales, su universidad adquirió un compromiso con su entorno social y con el progreso a través de la ciencia y la ingeniería, a niveles regional, nacional e internacional. Allí, donde Watt había desarrollado la máquina de vapor en los años 1760, se creó la primera cátedra británica de ingeniería en 1840. Rankine la ocupó desde 1855.

En las sociedades científicas la reforma había comenzado unos años antes. La cuestionada labor directiva de venerables científicos con aires aristocráticos en la Royal Society hizo que se fundara en 1831 la British Association for the Advancement of Science (BA). William y su hermano ya ayudaron en la organización de la reunión de la BA en Glasgow (1840).

En este contexto, William Thomson emprendió la reforma de la filosofía natural para unificarla en torno a los conceptos de energía y trabajo y construir la “ciencia de la energía”, lo que se ha considerado como el avance más importante en física entre Newton y Einstein. En su nota necrológica, Larmor afirmó que este fue su mayor logro. Thomson no inventó el concepto de energía (pues lo tomó de los apuntes de Young que consiguió en 1845, quien había cambiado en 1807 el término *vis viva* por energía), pero sí fue responsable del papel central que adquirió.

Thomson y Rankine diseñaron una eficaz estrategia para difundir su interpretación de la filosofía natural como el estudio de la energía y sus transformaciones, enfatizando que no era una doctrina completamente nueva. La constancia de la energía mecánica ya había sido propuesta por Leibnitz, pero Rankine se refirió a ella por primera vez como conservación de la energía en 1853, en el mismo trabajo en que introdujo el término energía potencial; el término energía cinética (no el concepto, que ya existía) lo introdujo Thomson en 1862 (Ref. [3], p. 347). La idea de que la energía se conserva, aunque puede sufrir procesos de

Placa de la vivienda en el campus que la Universidad de Glasgow puso a disposición de W. Thomson.



2 En 1884, con motivo del seiscientos aniversario del St. Peter's College, Thomson lo dotó de alumbrado eléctrico; ese mismo año se había instalado en las oficinas de la Cámara de los Lores del Palacio de Westminster. La luz eléctrica fue una de sus inversiones en nuevas tecnologías y su casa de Glasgow fue, en 1881, una de las primeras del mundo (si no la primera) en estar completamente iluminada por electricidad. De hecho, el fabricante Gerard Philips fue su estudiante.

Retrato a lápiz de William Thomson, por Elizabeth King (née Thomson) © National Portrait Gallery, London



transformación y disipativos, pasó a considerarse confirmada experimentalmente y aceptada.

Electromagnetismo y teorías del éter

Haciendo uso frecuente de sus métodos y acordando en 1846 una reimpresión del ensayo de Green para Europa, Thomson recuperó esta enigmática joya de la física. Green fue un molinero de Nottingham que estudió dos años, hasta los nueve, y no produjo ningún escrito científico hasta que en 1828, con 35 años, publicó *An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism*. Para la publicación puso un anuncio en un periódico local y recibió unas cincuenta suscripciones (muchas de personas que difícilmente podrían entenderlo). Green estudió y se graduó en Cambridge entre 1832 y 1838, y murió en 1841. Thomson describió en su tercer trabajo, de 1842, una analogía entre la conducción del calor y de la carga con la que descubrió la ecuación de continuidad de la electricidad. Posteriormente, a través de una cita, supo que sus ideas habían sido anticipadas en el libro de Green, aunque no lo encontró. En enero de 1845, la tarde que abandonó Cambridge hacia París, su tutor Hopkins le facilitó tres copias (una para Liouville).

Tras estudiar a Green, Thomson introdujo en 1845 el método de las imágenes. También en 1845 estudió la fuerza (de Kelvin) en un campo magnético no uniforme y encontró que esta aparece en la dirección del gradiente del campo. La fuerza de Kelvin hace que los líquidos paramagnéticos se sientan atraídos hacia campos magnéticos intensos y que los diamagnéticos se sientan repelidos. En 1847 demostró que es posible la levitación diamagnética. Al año siguiente introdujo la distinción entre la intensidad de campo y la densidad de flujo magnético, y en 1850 la susceptibilidad y la permeabilidad magnética. Thomson usó una analogía con la permeabilidad de un medio poroso al flujo de un fluido. Asimismo, por analogía con su teorema de mínima energía en fluidos, dedujo que las cargas eléctricas se distribuyen en las superficies de un sistema de conductores embebidos en

un dieléctrico de modo que la energía del campo electrostático es mínima (teorema de Thomson).

El cambio de la resistividad eléctrica al aplicar un campo magnético se denomina magnetorresistencia. Los sensores magnetorresistivos se usan, por ejemplo, para leer la banda magnética de una tarjeta de crédito. Este efecto fue descubierto por Thomson al estudiar muestras de hierro en 1856. Observó que su resistividad eléctrica variaba con la intensidad del campo magnético y con el ángulo entre las direcciones de la corriente y del campo (magnetorresistencia anisotrópica).

En electrostática y electromagnetismo se usaban distintas unidades de carga (Franklin y Biot segundo) y urgía determinar su cociente c (es decir, la velocidad de la luz en el vacío). A partir del retardo de las señales de telegrafía, Thomson estimó c en 1855, el año en que Weber y Kohlrausch establecieron que $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$. Para medir c con precisión, diseñó varios electrómetros, destacando la sonda de Kelvin (1860) que esencialmente era un condensador con discos de cobre y zinc sobre un eje aislante; al variar su separación observaba un flujo de carga entre ellos que permitía medir la diferencia de sus funciones trabajo. En 1991, Nonnenmacher y col. desarrollaron el microscopio de sonda Kelvin.

Thomson fue decisivo en el establecimiento del actual sistema de unidades eléctricas. Su interés surgió a raíz del trabajo de Weber "On the measurement of electric resistance according to an absolute standard" (1851). Mientras Weber no usaba ninguna ecuación para el trabajo eléctrico, Thomson consideraba que el producto de carga por diferencia de potencial era un trabajo eléctrico que debía medirse en las mismas unidades que en mecánica. Thomson propuso usar la ley de disipación de Joule para obtener una unidad de resistencia basada en las unidades de corriente, tiempo y energía. Bajo su presidencia, el Comité de Estándares de la Resistencia Eléctrica generó entre 1862 y 1869 seis informes sobre las unidades actuales.

La modelización del éter fue su problema prioritario. Siguiendo a Faraday, a quien conoció en 1845 cuando lo visitó en Londres camino a París, creyó que el espacio está lleno de un medio material elástico (éter) en el que se desarrollan los fenómenos electromagnéticos. En 1847 envió a Faraday un trabajo en que explicaba una conexión entre las propiedades del éter y los fenómenos electromagnéticos. Thomson consideraba que la luz se propagaba como vibraciones del éter, de modo similar al sonido, y que el campo electromagnético se podía representar como un sistema de vórtices en el éter.

Maxwell estuvo muy influenciado por Thomson y en su trabajo de 1861 propuso la existencia de un mar de vórtices del éter que modelaban las líneas de fuerza de Faraday. En 1865 Maxwell propuso que las ondulaciones del éter eran la causa de los fenómenos electromagnéticos y demostró

que los campos se propagan a la velocidad de la luz como ondas. Maxwell unificó leyes aparentemente dispares en un conjunto de veinte ecuaciones y fue abandonando progresivamente los modelos del éter. Thomson consideraba que las ecuaciones de Maxwell eran matemáticamente válidas pero no explicaban los fenómenos y no ayudaban a su comprensión. Heaviside estudió la propagación de señales en telegrafía y reformuló las ecuaciones de Maxwell usando el cálculo vectorial que desarrollaron, alrededor de 1881, él mismo y Gibbs³. Thomson discutió con Gibbs sobre los méritos de la notación vectorial y afirmó que el vector era un superviviente inútil de los cuaterniones de Hamilton que jamás habían sido de utilidad para ninguna criatura. Thomson no aceptó plenamente la teoría de Maxwell, ni siquiera tras la demostración de Hertz de 1888.

Su interés por el éter rozaba la obsesión y Heaviside llegó a decir que Thomson le había dedicado tanta atención que este había cristalizado en su cerebro. La indestructibilidad de los filamentos de vórtice en el flujo ideal, similar a la estabilidad del ojo de un huracán, sugirió a Thomson una especie de “teoría de cuerdas” para unificar las teorías de la luz, el electromagnetismo y la materia. Su teoría de los átomos vórtice apareció en 1867 y con ella llegó a estimar tamaños de átomos. Aunque nunca tuvo aceptación, se trata de un *beautiful loser*, como la califica el Premio Nobel Frank Wilczek.

Su estudio del éter comportó avances en elasticidad. Thomson demostró que era incorrecto considerar al éter como medio elástico simple y propuso modelos cuasielásticos, como una espuma con celdillas unidad poliédricas que llenasen completamente el espacio. Como solución al problema de encontrar la estructura con área superficial mínima, en 1887 postuló (constituyendo la conjetura de Kelvin) que el espacio se debería llenar con octaedros truncados (o sólidos de Kelvin). En 1994 Weaire y Phelan encontraron que la estructura del agua cuando rodea a moléculas hidrofóbicas tiene menor área superficial que la propuesta por Thomson. No obstante, aún no hay solución para el problema de Kelvin pues podría existir otra estructura con área menor que la de Weaire-Phelan.

El cable atlántico y los estándares industriales

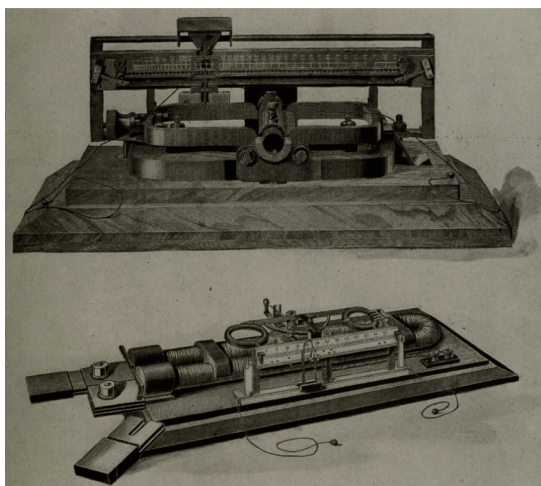
El mantenimiento de la preeminencia militar y comercial de un imperio británico que se extendía por los cinco continentes requería un sistema de comunicaciones a escala global. Thomson fue el artífice de la nueva era de comunicaciones entre el viejo y el nuevo mundo gracias al éxito del proyecto del cable Atlántico.

La telegrafía fue inventada en 1837. Thomson dedujo en 1854 la ecuación de la transmisión de sus señales eléctricas y demostró que el retraso en

la señal es proporcional al cuadrado de la longitud del cable (ley de los cuadrados). Kirchhoff contribuyó añadiendo el efecto de la inductancia en 1857. La compañía del cable Atlántico se fundó en 1856. Entre sus 17 directores estaba Thomson, que viajó en uno de los barcos monitorizando el estado del cable conforme se lanzaba. El cable se completó entre los veranos de 1857 y 1858, pero el proyecto fracasó. Whitehouse, cirujano retirado, era el director técnico que debía ponerlo en funcionamiento, pero su falta de conocimientos y de instrumentos sensibles hizo que aplicase hasta 2000 V y estropease el cable.

El segundo cable comenzó a lanzarse en julio de 1865. Haciendo una impresionante demostración de sus conocimientos, Thomson logró el éxito del proyecto en 1866 y por ello fue nombrado caballero ese mismo año. Artículos en *The Times* aumentaron su reconocimiento social y lo convirtieron en figura nacional, al tiempo que se incrementó su riqueza pues, con visión de negocio, se adelantó a patentar instrumentos útiles en el proyecto.

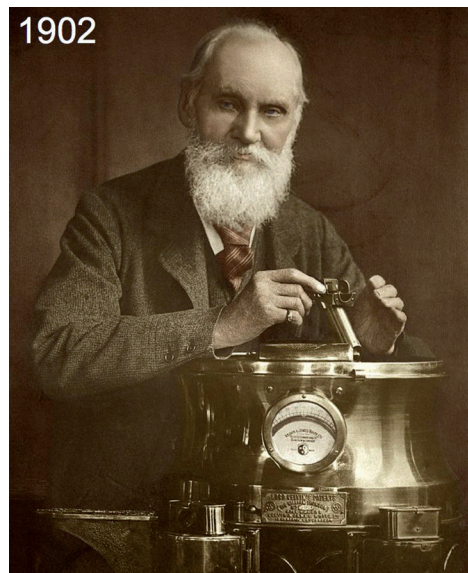
En el barco, Thomson se aseguró de que el cable funcionase correctamente manteniendo contacto continuo con Irlanda. Su teoría de la propagación de señales en cables con enorme capacidad y el uso de un galvanómetro de espejo extremadamente sensible que había inventado y patentado en 1858 (antes de la primera expedición) fueron claves para el éxito. Consistía en un haz de luz que iluminaba un espejo minúsculo con un imán en su parte posterior. La corriente pasaba por una espira y creaba un campo magnético que, al interactuar con el imán, desviaba el haz de luz. La constante de torsión del hilo que sostenía el espejo era tan pequeña que permitía detectar corrientes minúsculas en el cable. La desventaja del galvanómetro es que requería dos operadores, uno para leer y cancelar la señal y el otro para anotar los caracteres recibidos. En 1867 Thomson inventó una especie de impresora de chorro de tinta. La tinta era succionada por un tubo gracias al efecto sifón, cargada electrostáticamente y lanzada como spray sobre una cinta de papel. Se obtenía así un



Algunas de las balanzas introducidas por Thomson para los estándares de corriente y potencia eléctrica. *Cassier's magazine*, v. 16 May-Oct. 1899, p. 145.

3 L. Navarro Veguillas, “Mi clásico favorito: Josiah Williard Gibbs”, REF 27(4), 63-70 (2013).

W. Thomson con su brújula en 1902.



registro gráfico de las señales recibidas sin necesidad de operarios.

El proyecto del cable abrió la era de los estándares industriales que dio al imperio británico una posición privilegiada frente a otros países. Los cables del primer proyecto se encargaron a compañías distintas y, al usarlos, se vio que no sólo el sentido de giro de los hilos era distinto, sino que los cobres empleados eran diferentes y de mala calidad. A partir de entonces Thomson y las compañías fijaron bien las especificaciones.

Este proyecto despertó su interés por la navegación y los instrumentos marinos. Adquirió su propio yate y montó un laboratorio flotante, registrando patentes desde 1870 hasta 1907. Entre estas hay una brújula girostática⁴ y mejoras en diversos instrumentos, como el reloj astronómico. En las décadas de 1870 y 1880 publicó 50 trabajos sobre temas marítimos como las mareas, la brújula, las señales de los faros y el eco sondeo.

Mecánica de fluidos

Dada la escasa cobertura de mecánica de fluidos en los textos británicos, Thomson y Stokes publicaron entre 1847 y 1849 tres “Notes on Hydrodynamics” para usar en las clases de Cambridge. En la tercera, “On the *vis viva* of a liquid in motion”, Thomson demostró que el flujo incompresible ideal (es decir, cuando los efectos de su viscosidad son despreciables) tiene menor energía cinética que cualquier otro flujo compatible con las condiciones de contorno (teorema de mínima energía). Entre sus implicaciones podemos mencionar que el flujo irrotacional es imposible en una región delimitada por superficies fijas.

En una carta a Stokes, del 2 de julio de 1850, Thomson presentó el teorema de (Kelvin-)Stokes

$\oint \vec{v} \cdot d\vec{l} = \iint (\vec{\nabla} \times \vec{v}) \cdot d\vec{s}$, donde \vec{v} es un campo vectorial. Aplicado a la velocidad \vec{v} y la vorticidad $\vec{\nabla} \times \vec{v}$ de un fluido, este teorema implica que la circulación a través de un contorno es igual a la suma de las intensidades de los vórtices que encierra.

A raíz de su teoría atómica, volvió a interesarse por la vorticidad en 1867. Desarrolló entonces teoremas para flujo irrotacional, estudió el movimiento de los vórtices y una teoría de flujo turbulento. De ellos concluyó, por ejemplo, que hay que impartir a las balas de los rifles una rápida rotación alrededor de su eje para maximizar su alcance. En 1868 demostró que, en flujo ideal, la ecuación de Euler y el teorema de Kelvin-Stokes implican que la circulación sobre una curva cerrada que se mueve con el fluido es independiente del tiempo. Este teorema de la circulación (de Kelvin) se usa, por ejemplo, en el estudio de tornados e implica que la vorticidad no puede cambiar en flujo ideal.

En 1871 estudió el efecto de pequeños desplazamientos transversales de la interfase que separa dos fluidos de distinta densidad que se mueven uno respecto de otro (es decir, en condiciones de flujo estratificado, ideal e irrotacional) y determinó cuál es la velocidad relativa crítica a la que se desarrolla la inestabilidad (de Kelvin-Helmholtz). En la región donde se juntan las dos capas los esfuerzos de cizalla son grandes porque los fluidos se mueven a distinta velocidad y la vorticidad es aproximadamente uniforme. Se observa así una capa de vórtices en el interior de un flujo irrotacional. Por este mecanismo, una suave corriente de aire estacionaria pueda dar lugar a la formación de ondas en la superficie agua-aire. Con un poco de imaginación, se podría decir que *La nuit étoilée* de van Gogh representa una inestabilidad de Kelvin-Helmholtz en las nubes.

Sus estudios sobre ondas en el agua comenzaron en 1871. Algunos surgieron observando desde su yate las ondas creadas por el hilo mientras pescaba con Helmholtz y su hermano. En 1879 estudió las ondas superficiales de gravedad en presencia de una superficie sólida lateral y teniendo en cuenta la rotación terrestre, para lo que formuló un balance entre las componentes de las fuerzas de Coriolis y gravitatoria. Su solución de las ecuaciones dinámicas son unas ondas (de Kelvin) que pueden observarse a escala oceánica global.

En 1876 William buscaba un montaje mecánico que permitiese obtener los coeficientes de Fourier de una función. Su hermano James había diseñado un integrador del que no había publicado los detalles. La colaboración acabó en una publicación de James y varias de William, y en la fabricación de dispositivos mecánicos capaces de resolver ecuaciones diferenciales, integrar productos y realizar análisis de Fourier. Su analizador de armónicos permitía registrar gráficamente los cambios de presión y temperatura atmosférica y analizar las curvas registradas mediante un sistema de discos rotatorios; en 1878 se instaló en la Oficina Me-

⁴ En una fábrica de la que era copropietario se fabricaron más de 10 000 brújulas entre 1876 y 1907 y ganó una fortuna. Hacia 1878 las comandancias de Alemania, Rusia e Italia ya usaban su brújula, y la británica la adoptó en 1889.

teológica. Asimismo, William grabó los ciclos de las mareas y desarrolló sus máquinas calculadoras capaces de realizar un análisis de Fourier, determinar las componentes principales y predecir las mareas en cada puerto.

Termodinámica

El segundo principio tiene su origen en el libro *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, del que Carnot publicó 600 copias en 1824. Con su muerte, en 1832, el libro podría haber desaparecido pues científicos como Laplace, Fourier, Gay-Lussac, Legendre, Ampère y Poisson no lo citaron ni usaron sus ideas. Afortunadamente, una copia llegó a Clapeyron, quién publicó una reformulación analítica en 1834. Durante su estancia en París de 1845, William localizó el trabajo de Clapeyron a petición de su hermano James, quien tuvo que estudiar la potencia motriz del calor por su trabajo en una compañía de navegación a vapor.

En su primer curso como profesor (1846-7), William desempolvó un motor de aire que Stirling había llevado para las clases de filosofía natural. En abril de 1847 dio una conferencia en Glasgow sobre la aplicación de la teoría de Carnot al motor de Stirling en el caso de que funcionase como máquina frigorífica y sus dos focos térmicos fuesen agua en equilibrio sólido-líquido y, por tanto, estuviesen a la misma temperatura. Pensaba que si la máquina de Stirling recibía energía en forma trabajo, el efecto sería una “pérdida de trabajo útil” y un bombeo de calor de un foco al otro que haría aumentar la cantidad de hielo en uno de ellos. Además, dado que los focos estaban a la misma temperatura, la única irreversibilidad estaría asociada a la viscosidad del agua y el trabajo mecánico necesario para producir el hielo sería ínfimo. Su hermano James le hizo notar que la expansión asociada a la solidificación del agua podría usarse para realizar trabajo útil por lo que debía haber un fallo en el razonamiento, ya que era imposible obtener trabajo útil a partir de una cantidad menor de trabajo necesaria para que la máquina funcionase. Como solución a esa paradoja, James postuló que la temperatura de fusión del agua debería disminuir al aumentar la presión. Cuando William lo comprobó experimentalmente en 1848, ambos reafirmaron su fe en la teoría de Carnot. Sin embargo, no logran entender qué había ocurrido con el trabajo útil que se había “perdido”.

Joule había descubierto el “equivalente mecánico del calor” en 1844 y lo presentó en la reunión de la BA en Oxford (1847). Allí Thomson le mostró su interés por la idea de que “calor y trabajo fuesen mutuamente convertibles” pero seguía creyendo en la teoría de Carnot que Joule rechazaba por sustentarse en la conservación del calórico. Thomson admitió que Joule había explicado la “pérdida de trabajo útil” y demostrado (sólo) la “conversión de trabajo en calor”. Le sugirió mejoras en su experimento, que Joule incorporó en su



trabajo de 1850 (con el que consiguió un puesto en la Royal Society un año antes que Thomson). Sin embargo, Thomson no entendía cómo, si es que es posible, el trabajo que se “transforma en calor” puede ser recuperado de nuevo como trabajo. En 1848 Thomson afirmó “la conversión de calor en trabajo es probablemente imposible, y ciertamente todavía nadie la ha descubierto”. Joule se molestó, pues consideraba que había demostrado ambas conversiones en sus estudios sobre compresión y expansión de gases.

Thomson apreció que la teoría de Carnot permitía definir una escala absoluta de temperaturas (independiente de la sustancia con que se construye el termómetro) basada en la eficiencia de una máquina térmica. En 1848, consideró una máquina reversible que operase entre dos focos de temperaturas T y $T - 1^\circ$ y tuviese una eficiencia independiente de T , definiendo así una escala logarítmica de temperaturas⁵. En 1854, Thomson y Joule volvieron a abordar la definición de la escala absoluta de temperaturas considerando una máquina reversible. Si la energía $|Q_0|$ recibida por o cedida a un foco de referencia a temperatura T_0 es fija (y pequeña para no alterar T), entonces una medida de la energía $|Q|$ cedida (si $T > T_0$) o recibida (si $T < T_0$) por el sistema permite evaluar la temperatura del otro foco como $T = T_0 |Q| / |Q_0|$. Con esta relación y un valor establecido por convenio,

Máquina diseñada por W. Thomson en 1872 para la predicción de mareas. Nº inventario 1876-1129 en science-museum.org.uk.

5 J. Pellicer y J.A. Manzanares, *100 Problemas de Termodinámica* (Alianza Editorial, Madrid, 1996) probl. 3 y 71.

la escala absoluta queda completamente definida. Además, la comparación con la temperatura θ en la escala del gas ideal exige que $T = k\theta$ y se puede tomar $k = 1$ para que coincidan cuando ambas pueden usarse. Finalmente, como $\eta = 1 - T/T_0 \leq 1$ cuando $T < T_0$, resulta que $T \geq 0$ y existe un cero absoluto.

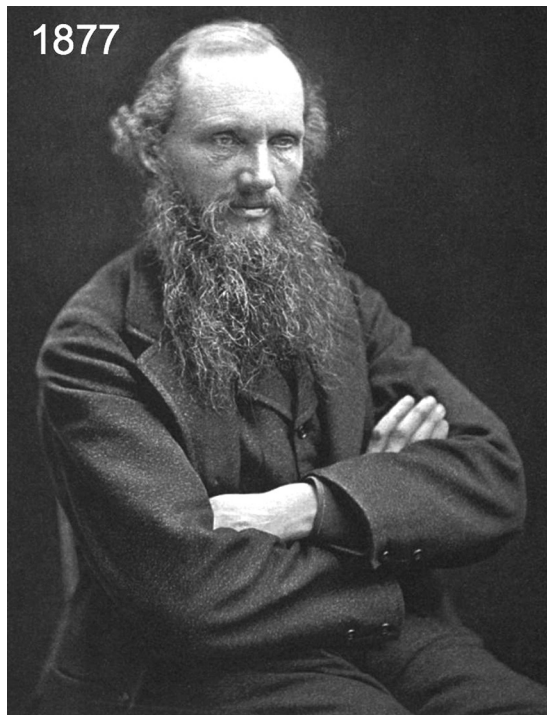
Tal y como se propuso originalmente, la escala era centígrada, pues por convenio se fijaba el valor de la diferencia de temperaturas entre los puntos de vaporización y fusión normal del agua. Pero Joule y Thomson puntualizaron que bastaba con un punto fijo para definir la escala absoluta y sugirieron que, cuando el valor del cero absoluto en la escala Celsius fuese conocido con una precisión de al menos 0.1°C , entonces su escala absoluta debería ser redefinida asignando por convenio el valor de la temperatura al punto de fusión normal del agua. En 1939, W. F. Giaque, quien recibiría el premio Nobel en 1949, relanzó la idea de Joule y Thomson de usar un único punto fijo, y en 1954 la 10.^a Conferencia General de Pesas y Medidas acordó que este fuese el punto triple del agua y tuviese el valor 273.16 K .

En 1848 Thomson consiguió del catedrático de ingeniería de Glasgow una copia del libro de Carnot y dijo que se trataba del libro más importante que jamás había leído. Publicó entonces "An account of Carnot's theory" (1849), donde introdujo por primera vez el término energía, al afirmar que "la energía no puede ser destruida en ningún proceso", y el término termodinámica. Como réplica, Clausius publicó en 1850 una reconciliación de los trabajos de Joule y Carnot eliminando la conservación del calórico que incluía, además, su enunciado del segundo principio: "No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea la transferencia de energía en forma de calor de un

sistema a otro de mayor temperatura". Thomson rechazó entonces la teoría del calórico y aceptó la idea de Joule de que el "calor es convertible en trabajo", si bien no completamente. En 1851 publicó su formulación del segundo principio: "No es posible un proceso cuyo (único) resultado sea la absorción de energía en forma de calor de un solo foco y la cesión de la misma cantidad de energía en forma de trabajo". En "On a universal tendency in Nature for the dissipation of mechanical energy" (1852) presentó los principios de conservación de la energía y disipación de la energía como los pilares básicos de su doctrina de la energía y quedó resuelto, a su juicio, el puzle de la "conversión entre calor y trabajo". Según su doctrina, el trabajo que se "disipaba como calor" ya no podía recuperarse (como trabajo). La tendencia a la disipación de la energía implicaba la muerte térmica del universo. La Tierra se volvería inhabitable dada la imposibilidad de violar esta tendencia universal.

El robot Curiosity que explora Marte usa, como otras misiones de la NASA desde Apollo, generadores termoeléctricos. Thomson elaboró la teoría de la termoelectricidad en 1851, explicó el efecto Seebeck (1823), el efecto Peltier (1834) y la relación entre los coeficientes (Seebeck y Peltier) que los caracterizan. También encontró un nuevo efecto termoeléctrico (efecto Thomson) cuando los flujos de carga y de calor ocurren simultáneamente y demostró que el coeficiente (de Thomson) que caracteriza este efecto está relacionado con la derivada del coeficiente Seebeck respecto a la temperatura. La relación entre los coeficientes Seebeck y Peltier deducida por Thomson es el primer ejemplo de relación de reciprocidad de Onsager, quien recibió el Premio Nobel por sus contribuciones a la termodinámica de los procesos irreversibles (TPI); teoría que describe, entre otros, los fenómenos termoeléctricos. La teoría de Thomson carece del rigor de la TPI y debe calificarse como heurística (o pseudo-termostática). Es por ello criticable, aunque tiene varios aspectos notables. Primero, en una época en que aún no existía el concepto de entropía ni estaba clara la distinción entre procesos reversibles (los que conservan la entropía del universo) e irreversibles (los que la aumentan), Thomson identificó las contribuciones reversibles e irreversibles en los fenómenos termoeléctricos. Segundo, Thomson era consciente de las limitaciones de su teoría y advirtió que, dado que esta separación no era rigurosa, otros argumentos en líneas similares podrían llevar a conclusiones incorrectas. Tercero, las dos relaciones de Thomson y la expresión del efecto Thomson fueron confirmadas por la TPI. Esta teoría confirmó también que en la expresión de la producción de entropía aparecen las conductividades térmica y eléctrica pero no los coeficientes Seebeck y Peltier.

En otro trabajo sobre termoelectricidad de 1854, Thomson introdujo su "expresión matemática del segundo principio", $\oint dQ_{\text{cuas}}/T = 0$, que



W. Thomson en 1877.
J. Larmor, *Proc. R. Soc. London A* 81, p. lxxv (1908).

hoy conocemos como igualdad de Clausius porque Clausius la generalizó ese mismo año a una desigualdad si el proceso cíclico es irreversible.

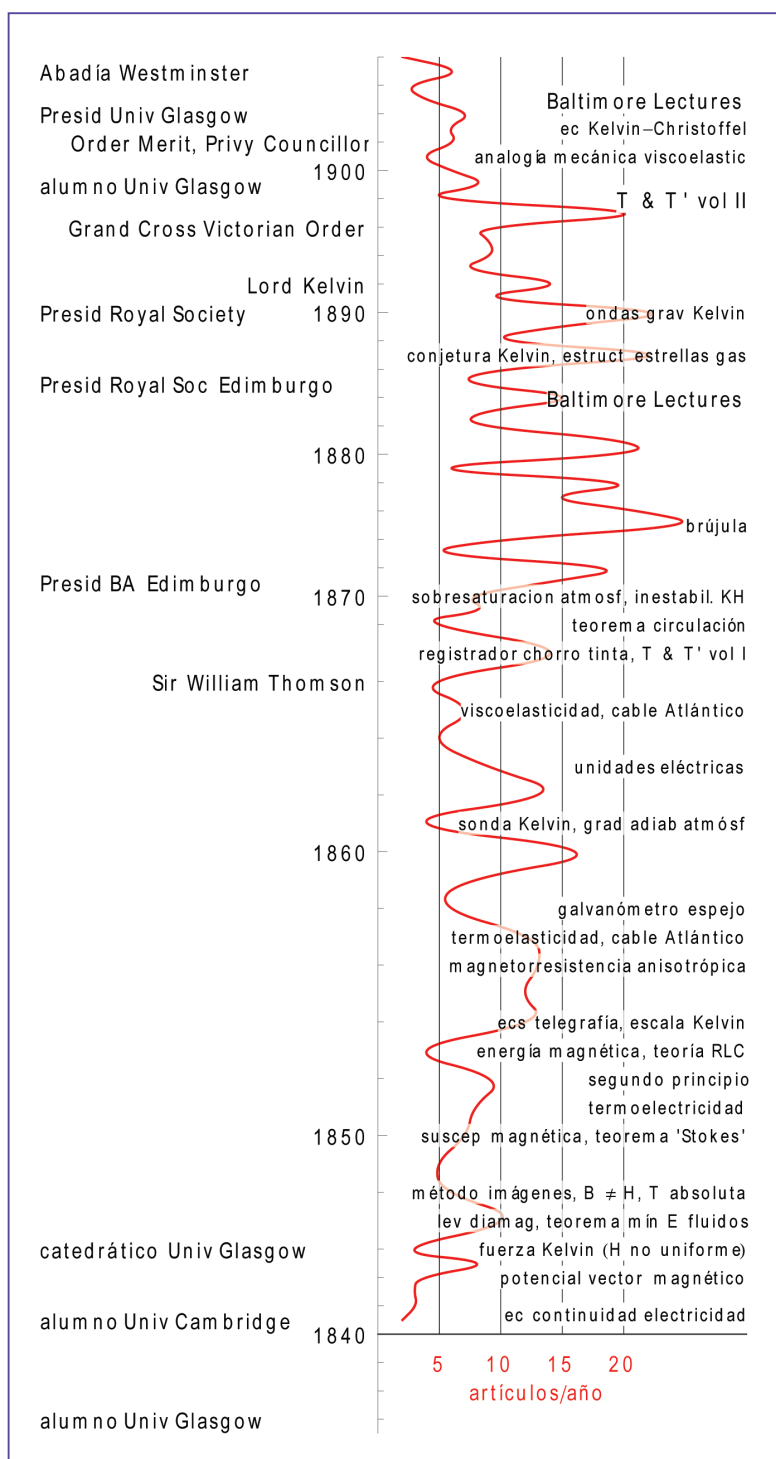
En 1857 desarrolló la teoría de la termoelasticidad, introduciendo las componentes principales (del tensor) de constantes elásticas. Explicó también el efecto Gough-Joule por el que una banda de caucho estirada a tensión constante se contrae al calentarse.

En 1866 un joven Boltzmann⁶ de 22 años publicó la primera teoría para intentar demostrar el segundo principio a partir de teoremas mecánicos. Frente a estos esfuerzos, los británicos del norte optaron por ilustrar su carácter estadístico mostrando cómo se podía violar el enunciado de Clausius. En una carta dirigida a Tait en 1867, Maxwell habló de un “ser” capaz de permitir o restringir el paso de las moléculas de un gas según su velocidad para así provocar, sin realizar trabajo, una diferencia de temperaturas entre dos compartimentos inicialmente a la misma temperatura. Entre 1852 y 1862, los hermanos Thomson buscaban compatibilizar la “voluntad” de los seres vivos y la universalidad de la disipación de la energía. No está claro cómo surgió la idea de Maxwell, pero William introdujo anotaciones en la carta de Maxwell de 1867. Maxwell también quería ilustrar que la “voluntad” de un ser vivo podía alterar la tendencia natural a la disipación de la energía. En “The kinetic theory of the dissipation of energy” de 1874, William lo bautizó como “diablillo de Maxwell”.

Física de la atmósfera y astrofísica

En física de la atmósfera destacan sus estudios sobre la electricidad atmosférica y su descubrimiento del gradiente adiabático del aire seco (1861) utilizando el concepto de equilibrio convectivo que también ideó. Brillante fue su explicación de que las gotitas de las nubes solo pueden estar en equilibrio con una atmósfera sobresaturada de vapor (efecto Kelvin, 1870) y su deducción de la presión de vapor saturante en función del radio. La ecuación de Kelvin permitió deducir la ecuación de Gibbs-Thomson para el aumento del potencial químico con la reducción del radio. Esta ecuación tiene implicaciones sobre la condición de equilibrio entre fases que se manifiestan, por ejemplo, en una reducción de la temperatura de fusión de nanopartículas sólidas y un aumento de su solubilidad. La alteración de las propiedades de los materiales modificando su tamaño en escala nanométrica es la base de la nanociencia y, por ello, Thomson se considera pionero de la nanotermodinámica.

Júpiter, Saturno y algunas estrellas enanas sin fusión nuclear en su interior sufren el mecanismo de Kelvin-Helmholtz por el que el enfriamiento superficial debido a la radiación provoca una dis-



minución de presión, una contracción del astro y un calentamiento de su interior. El mecanismo fue propuesto por Kelvin y Helmholtz para explicar la fuente de energía del Sol. Dividiendo la energía gravitatoria de una esfera de densidad uniforme por la potencia radiada se obtiene la escala temporal de Kelvin-Helmholtz. Para el Sol son diez millones de años, lo que ellos consideraron una estimación de su edad.

A mediados del siglo XIX se conocían la masa y el radio del Sol y, por tanto, su densidad media, 1.45 g/cm³. Las estrellas se consideraban líquidos incompresibles. Entre 1878 y 1883 Ritter propuso que las estrellas, incluido el Sol, son gaseosas y les

Cronograma de las aportaciones de Lord Kelvin. Entre dos marcas consecutivas el intervalo es dos años

6 J. Marro, “Mi clásico favorito: Ludwig E. Boltzmann”, REF 28(1), 61-67 (2014).

aplicó la ley de Stefan (1879). Thomson contribuyó al nacimiento de la teoría de la estructura estelar resolviendo en 1887 el problema de un gas en equilibrio convectivo bajo su propio campo gravitatorio y deduciendo, independientemente, muchos resultados de Ritter.

Una dura etapa final

El estilo industrial y tecnológico que había dominado en la segunda mitad del siglo XIX fue reemplazado por una física matemática mucho más abstracta. En las décadas de 1880 y 1890 Kelvin ya había comenzado a distanciarse de las tendencias en física, y esto le llevó a hablar incluso de fracaso del trabajo que había desarrollado a lo largo de su vida en la charla del cincuentenario de su cátedra. El final de siglo implicó cambios radicales en física y Kelvin, como por otro lado es comprensible en científicos de su edad, no fue capaz de adaptar sus viejas teorías basadas en modelos mecánicos. Roentgen descubrió los rayos X en 1895. La frase de Kelvin de que tarde o temprano se comprobaría que los rayos X son un fraude ha quedado para la posteridad. En junio de 1903 Kelvin escuchó la conferencia que P. Curie impartió en la Royal Institution, en la que habló de la gran y aparentemente perpetua emisión de energía por parte de las sales de radio. Las medidas realizadas por Rutherford sobre la emisión por el radio pronto resolverían las controversias de los trabajos de Kelvin sobre la edad de la Tierra y la fuente de energía del Sol pues, obviamente, Kelvin no había tenido en cuenta la radioactividad. En la reunión de la BA en York (1906), Kelvin todavía consideraba que no había suficientes pruebas y seguía abogando por las teorías de colapso gravitatorio para el Sol. Prácticamente solo, se enfrentó a la oposición de varios miembros de la asociación y la polémica llegó a *The Times*.

Conclusiones

Kelvin no es recordado por una ecuación o por un fenómeno físico concreto. Enaltecemos su labor en termodinámica dando su nombre a la unidad de temperatura absoluta. El fenómeno de El Niño reaviva de vez en cuando las ondas de Kelvin (1879). La conjetura de Kelvin adquirió en 2008 repercusión mediática por el edificio “cubo del agua” de los Juegos Olímpicos de Pekín. Incluso al observar los anillos de Saturno es posible recor-

dar su obra cuando estos muestran la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz (1871). Sin tratarse de una relación exhaustiva, podemos mencionar entre su legado: la ecuación de continuidad de la conducción eléctrica (1841), el uso de la función potencial y el teorema de Green (nombre que introdujo Kelvin) (1845), la demostración de la levitación diamagnética (1847), la distinción entre intensidad de campo y densidad de flujo magnético (1848), el método de las imágenes (1848), el teorema “de Stokes” (1850), los conceptos de susceptibilidad y permeabilidad magnética (1850), la explicación de los fenómenos termoeléctricos (1851), el enunciado de Kelvin del segundo principio (1852), la ecuación de la energía magnética y la teoría del circuito RLC (1853), las ecuaciones de la telegrafía (1854), la magnetorresistencia anisotrópica (1856), la teoría de la termoelasticidad y las componentes principales del tensor de constantes elásticas (1857), el galvanómetro de espejo (1858), la sonda de Kelvin (1860), el gradiente adiabático del aire seco (1861), el dispositivo de cuatro puntas para la medida de resistencias eléctricas (1861), el sistema de unidades eléctricas (1862-1869), el modelo de Kelvin-Voigt de la viscoelasticidad (1865), el teorema de circulación de Kelvin (1868), la presión de vapor saturante de gotas líquidas (1871), la teoría de la estructura de estrellas gaseosas (1887), las analogías mecánicas para materiales viscoelásticos y el modelo de sólido lineal estándar (1902), la ecuación de Kelvin-Christoffel para la propagación de ondas en medios anisótropos (1904), etc.

Biografías

En consistencia con su relevancia, la lista de estudios biográficos es extensa y se han seleccionado aquí las más autoritativas.

- [1] A. GRAY, *Lord Kelvin: An Account of his Scientific Life and Work* (J. M. Dent, Londres, 1908), 316 págs.
- [2] S. P. THOMPSON, *The Life of William Thomson, Baron Kelvin of Largs* (Macmillan, London, 1910), 1297 págs.
- [3] C. SMITH y N. WISE, *Energy and Empire: a Biographical Study of Lord Kelvin* (Cambridge U. P., Cambridge, 1989), 892 págs.
- [4] D. LINDLEY, *Degrees Kelvin: a Tale of Genius, Invention, and Tragedy* (Joseph Henry Press, Washington D. C., 2004), 380 págs.
- [5] R. FLOOD, M. MCCARTNEY y M. A. B. WHITAKER (Eds.), *Kelvin: Life, Labours and Legacy* (Oxford U. P., Oxford, 2008), 358 págs.