

POSIBILIDAD, NECESIDAD Y TRATAMIENTO DE LA COMPLEJIDAD EN LA FÍSICA: UNA APROXIMACIÓN HISTÓRICA

JESÚS CARRETE MONTAÑA
Universidad de Santiago de Compostela

Recibido: 14 de febrero de 2012

Aceptado: 7 de mayo de 2012

Resumen: En este trabajo se hace un recorrido a lo largo de la historia de la física, partiendo de lo que es posible especular sobre las actitudes protocientíficas de los primeros seres humanos y terminando por las más importantes aportaciones a la disciplina en el s. XX. El objetivo es proporcionar al lector una idea del largo camino recorrido por el pensamiento desde que aparecieron las inquietudes intelectuales sobre la naturaleza hasta que se pudo disponer de un método científico suficientemente próximo a esta y emancipado de la filosofía y la teología. Se destaca la caracterización de este camino como una trayectoria analítica hacia el reduccionismo, que alcanzó su concreción en la idiosincrasia asociada a la mecánica clásica en la época de Isaac Newton. Una buena parte de este conjunto de ideas fue después puesto en tela de juicio debido al propio avance de la física, y requirió de generalizaciones no menos complejas en el plano conceptual. Hoy la física, como otras disciplinas, progresa en el tratamiento de los sistemas complejos, para lo cual le es preciso aplicar un conjunto mucho más variado de aproximaciones y métodos.

Palabras clave: Física / Historia / Complejidad / Reduccionismo.

THE POSSIBILITY, NECESSITY AND TREATMENT OF COMPLEXITY IN PHYSICS: A HISTORICAL APPROXIMATION

Abstract: This work contains a brief outline of the history of physics, starting from the little that can be speculated about the proto-scientific attitudes of prehistoric men and ending with the most important developments experienced by the field in the 20th century. Its goal is to provide the reader with a summary of the long journey of thought from the time when human beings started showing intellectual curiosity about their surroundings until they were able to develop a scientific method close to nature and emancipated from philosophy and theology. Emphasis is put on the description of this journey as the traversing of a path towards reductionism, which reached its pinnacle in the mindset associated to classical mechanics in the times of Isaac Newton. Part of these ideas were later put into question by further advances in physics, which called for conceptually more complex generalizations. Today, physics, just like other branches of knowledge, is making progress towards the treatment of complex systems, a new area whose conquest will require much more diverse approaches and methods.

Keywords: Physics / History / Complexity / Reductionism.

1. INTRODUCCIÓN

Cualquiera que sea el motivo, la maquinaria mental del ser humano no parece particularmente apropiada para alcanzar una comprensión profunda del funcionamiento de los sistemas complejos de forma directa. De hecho, incluso el estudio de conjuntos de elementos independientes o débilmente interrelacionados resulta complicado para una persona cuando su número supera un umbral sumamente modesto—del orden de cuatro— (Buschman *et al.*, 2011).

La ciencia, como actividad humana, no puede escapar fácilmente a esta limitación y, por lo tanto, no es de extrañar que muchos de sus mayores éxitos históricos

hayan venido dados por la descomposición conceptual de un subconjunto de la naturaleza en entes relativamente sencillos, gobernados por leyes homogéneas, y susceptibles de ser estudiados uno a uno o en pequeños conjuntos. En este tipo de marco conceptual, las regularidades que se observan en el universo perceptible tratan de analizarse y explicarse en términos del comportamiento del menor número de entes posible. Que un estudio basado en este tipo de aproximación llegue a buen puerto depende claramente del sistema estudiado. En este sentido, podemos recordar la cita de Albert Einstein: “*Lo enteramente incomprensible del mundo es que sea comprensible*”. En efecto, las nociones de que todos los procesos a los que dedicamos nuestro tiempo y nuestra atención sean analizables en términos de un número reducido de constituyentes más elementales y de que las leyes que gobiernen la evolución de estos sean homogéneas no son más que apriorismos que la naturaleza no tiene por qué obedecer. El hecho de que la ciencia haya sido capaz de realizar grandes progresos con un método basado en estas ideas es una mezcla de buena fortuna y de un sesgo muestral procedente de que, obviamente, son aquellos campos en los que se obtienen mejores resultados los que experimentan un mayor desarrollo.

En cualquier caso, la combinación de nuestra tendencia innata a esta clase de reducción y de lo fértil de sus aplicaciones durante siglos creó un optimismo que hizo que se integrara en sistemas de filosofía formalizados como el cartesiano y, más informalmente, en el pensamiento y en la forma de trabajo de las ciencias hasta tiempos relativamente recientes. Sin embargo, ese sesgo no se podía arrastrar en el tiempo con carácter ilimitado: era inevitable que determinados sistemas de interés teórico y práctico para el ser humano se resistieran a una descomposición analítica de esta índole. Cuando esto comenzó a ocurrir, la inercia generada por la gran inversión en metodología de siglos anteriores se convirtió en una traba para el crecimiento de la ciencia, un hecho que no por esperable resultó menos traumático. La superación de este obstáculo precisa de una especie de revolución dentro de la ciencia que aún está en marcha.

Como el lector, sin duda, habrá advertido ya, la aproximación a la comprensión del mundo que se describe en los párrafos anteriores es la que se denomina, en sentido amplio, reduccionismo. La opción por no haberle dado nombre hasta este punto obedece a dos razones. La primera de ellas es un deseo de diferenciar entre el reduccionismo puramente metodológico y el reduccionismo filosófico. El último de ellos, en su expresión más radical, quedaría expresado por la conocida idea de que “*el todo no es más que la suma de sus partes*” y, por lo menos en esta forma ligeramente caricaturesca, puede ser calificado de falsable y superado. Es más bien el reduccionismo metodológico, es decir, el mero intento de describir el todo mediante la división en partes y el estudio de su comportamiento e interacciones, lo que mejor refleja el estado de la ciencia antes de abordar los sistemas complejos. La diferencia fundamental entre las dos posturas sería que el reduccionismo radical excluiría completamente la posibilidad de aparición de fenómenos emer-

gentes, mientras que el metodológico simplemente intentaría explicarlos recurriendo a las leyes que gobiernan la evolución de los elementos constituyentes del sistema.

Por lo dicho hasta aquí, las limitaciones de la aproximación reduccionista en el campo metodológico no son tanto fundamentales como prácticas: en un plano completamente desconectado de la realidad, aún es posible pensar en la construcción de una ciencia de abajo arriba, que parta de los constituyentes más fundamentales de la materia y explique uno a uno todos los niveles de organización de esta; sin embargo, la realización de los cálculos asociados precisaría de un sistema de computación más complejo que el sistema a estudio, que puede ser el universo completo.

Por supuesto, nuestra propia y limitada capacidad de razonamiento impone cotas mucho más bajas pero, en cualquier caso, lo cierto es que resulta mucho más productivo situarnos en un nivel de abstracción mayor, próximo en cada caso al comportamiento observado. Por ejemplo, cualquier intento de predecir la evolución de un mercado bursátil mediante la simulación de la interacción electromagnética entre los átomos de todos los seres humanos y demás sistemas físicos implicados está fuera de lugar, salvo en las páginas de algún libro de ciencia ficción de escasa calidad.

El segundo motivo para demorar la mención explícita al reduccionismo es la limitación de este artículo a un ámbito concreto: el de la física, donde su práctica ha venido históricamente acompañada de una serie de características que no necesariamente formarían parte de una definición general de reduccionismo, en particular de una adhesión a las ideas de determinismo, objetividad y causalidad.

La ciencia física tiene muchos elementos que la hacen ejemplo ideal para un trabajo como este. El primero de ellos es completamente intrínseco y se deriva de que su objeto de estudio abarca todas las escalas de longitud, tiempo, energía y complejidad: desde las fluctuaciones de los neutrinos hasta la dinámica de las galaxias, desde la evolución del universo desde su origen a su posible final, hasta la efímera vida de algunas partículas. Otros factores pertenecen más bien a su evolución histórica, pues la metodología reduccionista tuvo para la física un grado de éxito sin parangón en el resto de las ciencias, pero ese gran impulso fue, precisamente, lo que la hizo llegar antes que ninguna otra a los límites de esta aproximación y verse obligada a cruzarlos. Ya en el s. XIX los físicos debieron –no sin resistencia– incluir en su visión del mundo la aleatoriedad en el comportamiento de partes de este, preámbulo del cambio de paradigma que tendría lugar en la disciplina a principios del s. XX. Ya que a menudo otras ciencias buscan en la física un modelo, conviene que se divulgue de ella una imagen completa y ajustada a su grado de desarrollo actual, que dista mucho de estar anclado en los prejuicios del periodo barroco.

En este trabajo se presentará una selección comentada de acontecimientos e ideas que fueron marcando cambios en la forma de abordar el estudio del mundo

desde la física, y más concretamente un cambio de actitud hacia la complejidad forzado por el propio desarrollo de la disciplina. La selección es muy subjetiva y no pretende ser exhaustiva ni en extensión ni en profundidad. Se trata de una narración para el lector no especializado del viaje de ida y vuelta al reduccionismo que ha realizado la física, sacrificando precisión –para no entrar en los detalles más intrincados de las teorías–, pero no veracidad.

Por último, se evitará caer en la tentación de lanzar una mirada condenatoria –demasiado corriente en la actualidad– sobre el uso histórico del reduccionismo metodológico; más bien se tendrá en cuenta como el primer paso –necesario y muy rentable– en la aproximación científica a la realidad desde el limitado intelecto humano. Este camino partió de un punto caracterizado más por la confusión que por la duda metodológica, y a través de muchos de estos pasos está avanzando actualmente por terrenos de complejidad.

2. LOS PRIMEROS PASOS DE LA FÍSICA

Los cimientos que permitieron el surgimiento de la ciencia física fueron puestos a lo largo de miles de años en diversas culturas y localizaciones geográficas, lo que hace que no resulte sencillo resumir el proceso. Por suerte, en esta sección nos podremos contentar con hacerlo de una manera parcial, buscando identificar el origen de aquellas ideas predominantes en la disciplina antes de la irrupción de la mecánica newtoniana. Muchas veces estas ideas se pueden entender como provenientes de una falta de identidad propia de la física con respecto a la filosofía, de modo que los pasos decisivos en la evolución de esta rama de la ciencia fueron, en no poca medida, hacia la emancipación.

El proceso evolutivo dotó al ser humano de una notable capacidad para el aprendizaje estadístico. De hecho, estudios recientes (Gopnik, 2010) muestran que niños de muy corta edad son capaces de modificar su comportamiento de manera consistente con lo esperado de una pauta de aprendizaje bayesiana, sugiriendo que esta capacidad es innata y no socialmente adquirida. No es nada arriesgado, pues, suponer que, desde la aparición de la actual especie humana e incluso antes, nuestros antepasados emplearon esta capacidad y afinidad para reconocer patrones con la finalidad de obtener todo tipo de ventajas en la vida cotidiana.

Un tipo de patrón fácilmente reconocible es la conexión causal: por ejemplo, siguiendo determinado procedimiento para tallar el sílex obtendremos una buena punta de lanza, y si añadimos sal a la carne, esta se conservará por más tiempo. Otro es la sucesión temporal periódica de acontecimientos: el paso de los animales migratorios por un punto dado de su ruta, la aparición de un fruto de interés para la alimentación en una zona, la llegada anual del frío y del calor, etcétera. Estos son solo ejemplos sencillos de la mejora en las oportunidades de supervivencia que supone la capacidad para caracterizar regularidades en el comportamiento de la naturaleza, unida a la posibilidad de comunicarlas entre personas de modo que el des-

cubrimiento no tenga que ser repetido, lo cual justifica, sin duda, que tendamos a sentir una inclinación hacia esta actividad.

Desde el punto de vista del individuo consciente, esta característica natural adopta la forma de una curiosidad intelectual que –de modo nada sorprendente– terminó por llevarnos también a buscar patrones y secuencias más allá de nuestra realidad cotidiana. El desarrollo de la actividad científica es, desde esta perspectiva, simplemente una continuación sistematizada de un rasgo esencial de la forma de ser humana.

La ventaja inherente a ser capaz de reconocer patrones lleva asociada la frustrante posibilidad de fracasar. Su manifestación en nuestra sociedad es una plétora de creencias falsas y discursos demagógicos basados en extrapolaciones injustificadas de hechos casuales y en falacias de tipo *post hoc ergo propter hoc*, que no son más que falsas identificaciones de patrones secuenciales y causales, respectivamente. Podemos suponer que estos problemas de la inducción incompleta eran familiares para el ser humano mucho antes de la aparición de la escritura: el patrón migratorio de una especie –que se creía inmutable– puede mudar debido a nuevas circunstancias climatológicas, y la extrapolación de que la madera flota en el agua podría entrar en contradicción con la observación del comportamiento de una rama de boj.

A pesar de ser lo único que realmente tenemos a nuestro alcance, la experiencia y la comunicación no pueden ser fuente de certezas absolutas, y esto puede resultar frustrante para el individuo que confía en el sostenimiento de la situación presente de la cual se está beneficiando, y aún mucho más para el anhelo personal de dominio de la naturaleza.

Una solución psicológica frecuente es la búsqueda –obviamente por métodos bien diferentes a los empíricos– de razones profundas, causas primeras y órdenes omnicomprendivos que puedan llegar donde no llega la experiencia y elevar a categoría de verdad una opinión, un razonamiento o una inducción parcial. Esta búsqueda podría contentarse, ciertamente, con principios particulares y bastante elásticos como el presunto “horror al vacío” de la naturaleza, pero con más frecuencia encontró su objetivo lógico en la asunción de la existencia de una voluntad divina, hipótesis que también satisface otros anhelos humanos como el de la trascendencia.

Es conveniente observar que la aceptación de la intervención de las deidades en la realidad es un modo de razonamiento radicalmente antirreduccionista, pues niega desde el principio la posibilidad de considerar cualquier ente de forma aislada, estando en cambio su comportamiento sometido a las necesidades de un plan global. Por otra parte, si se asume –como ocurre en muchos mitos y religiones– bien la existencia de una “dimensión espiritual” de algún tipo o bien una concepción panteísta de la naturaleza, se están introduciendo presuntas causas de la experiencia sensible más allá de lo que se puede explicar mediante la interacción entre los elementos naturales, esto es, el todo sería más que la suma de las partes. Sin embargo, ese camino de alejamiento del reduccionismo, lejos de enriquecer el conocimiento

humano, le cierra casi todas las puertas al negar la posibilidad de hacer predicciones sin tener en cuenta voluntades superiores, incomprensibles y frecuentemente caprichosas.

Pasando de esta especulación sobre el hombre primitivo al pasado documentado, un buen punto de partida en la historia de la física es la persona que dio nombre a la disciplina en su obra homónima: Aristóteles (s. IV a.C.), un gigante en la historia del pensamiento, con particular huella en la cultura occidental, que en este conjunto de libros introduce términos como naturaleza, vacío, materia, tiempo y lugar.

En el eje de la complejidad hay que situar a Aristóteles lejos del reduccionismo, pues en el libro segundo de su *Física* propone como causa formal de las cosas su naturaleza (Connell, 1995), lo que en términos menos idiosincráticos se podría expresar diciendo que aunque el todo se compone materialmente de las partes, es el todo lo que determina qué son las partes, y no a la inversa.

No es este el único punto en el que Aristóteles se diferencia de las características que posteriormente adquiriría la ciencia, sino que hay al menos otras dos muy destacables: la primera es el peso relativo de la inducción sobre la observación empírica en muchas de sus aseveraciones, que hace que hoy algunas de ellas puedan parecer ridículas; y la segunda es la práctica ausencia de razonamientos cuantitativos en su obra. En estos dos sentidos, se podría sostener que la *Física* aristotélica supuso un cierto retroceso metodológico con respecto a la obra de filósofos presocráticos como Tales, anterior en tres siglos a Aristóteles. Como contraargumento cabría emplear que las observaciones empíricas aristotélicas fueron generalmente cuidadosas y sus resultados valiosos, y que cualquier retroceso en la ciencia es más imputable al sostenimiento dogmático de las posiciones aristotélicas mucho después de su muerte que al trabajo de este pensador en sí.

En la obra de Aristóteles la ciencia física está amalgamada con la filosofía —o más bien se concibe como una rama de esta—, y tampoco aparece completamente diferenciada de otras partes del conocimiento sobre la naturaleza como la biología. No es de extrañar cuando buena parte de los conceptos precisos para establecer esas dicotomías se están definiendo en esa misma obra. Lo mismo se puede aplicar al resto de los autores clásicos, incluyendo al propio Tales quien, a pesar de ser frecuentemente idealizado como un precoz materialista, dedicó buena parte de su esfuerzo al pensamiento sobre el origen y las causas. Sus ideas se citan, precisamente, en la *Metafísica* de Aristóteles, e incluyen la de un dios en la naturaleza como fuerza que provoca el cambio en la materia, motivo por el que algunos pensadores posteriores lo asociarían al concepto de energía.

Dentro de esta primitiva y confusa protociencia alcanzó gran desarrollo una rama que a lo largo de los siglos se afianzaría como campo patrimonial de la física y de las matemáticas: el estudio de los cuerpos celestes. Quizás sea nuestra asimétrica relación con los astros, el contraste entre su imperturbable indiferencia a las acciones humanas frente a su gran relevancia para las mareas, el clima, la medida del tiempo y la navegación, lo que los convierte en un sistema asociado a la divini-

dad. Por otra parte, las regularidades astronómicas más evidentes pueden ser descritas de forma rudimentaria y constituir un punto de partida para observaciones más finas. En cualquier caso, la civilización egipcia contaba con conocimientos astronómicos en la época de la construcción de las pirámides –tercer milenio antes de nuestra era–; igualmente, tenemos la certeza de que la astronomía babilonia existía en el segundo milenio a.C. y, probablemente, se nutría de observaciones sumerias hasta dos mil años más antiguas. También en las culturas orientales se desarrolló un importante trabajo astronómico en el primer milenio a.C.

Los resultados de estos trabajos iniciales, dejando de lado todo aquello que hoy pondríamos bajo el epígrafe de “astrología”, fueron catálogos estelares y predicciones de diversas efemérides: un valioso conjunto de datos a veces muy precisos. Es discutible que, desde una perspectiva moderna, se puedan considerar en sí mismos constitutivos de ciencia física en ausencia de un marco sistematizado. Fueron, sin embargo, los pilares de propuestas tan ambiciosas como el modelo geocéntrico de Ptolomeo, y de razonamientos más particulares como la afirmación de Aristóteles de que el Sol es más grande que la Tierra y que las “estrellas fijas” se encuentran mucho más lejos de nuestro planeta que el Sol.

Las ideas aristotélicas sobre el movimiento se basan en los famosos cuatro elementos –tierra, aire, fuego y agua–: la composición en estos elementos de un objeto determina la tendencia de su movimiento natural, y su peso, unido a la necesidad de desplazar la materia a su paso, limita la velocidad máxima que puede alcanzar. El elemento tierra tiende al centro del universo, mientras que el elemento fuego huye de él. De este principio se deduce que el planeta Tierra se encuentra en el centro del cosmos. Aristóteles defiende, además, un número ajustable de esferas concéntricas alrededor de las que se transportan los astros en perfecto movimiento circular; para cada una de las esferas se postula la existencia de una causa última del movimiento. Para lograr la consistencia se hace necesario introducir el éter como constituyente de los astros para salvar el hecho de que estos no siguen la tendencia al movimiento de los cuatro elementos. De la misma premisa sobre la tendencia del elemento tierra se extrae que la caída libre es un movimiento a velocidad uniforme, y que esta velocidad es, a igualdad de composiciones, proporcional a la masa de los cuerpos. Estas dos conclusiones, fácilmente refutables en la experiencia diaria, tendrían que esperar hasta el s. XVI para ser aceptadas como refutadas –mediante los experimentos de Galileo Galilei y Simon Stevin–, lo cual habla mucho de la autoridad que se llegó a conceder a Aristóteles.

La modesta discusión de las ideas aristotélicas en los párrafos anteriores pretende esbozar la forma de hacer física en el mundo clásico, pero ni mucho menos agota su contenido conceptual. Los pensadores griegos conocían la tridimensionalidad del espacio (Anaximandro, s. VI a.C.), contaban con modelos heliocéntricos (Aristarco, s. III a.C.) –aunque tuviera más éxito el geocéntrico–, especularon con la idea de que la materia estuviera compuesta por átomos (Demócrito, s. V a.C.), fueron capaces de medir aproximadamente la circunferencia de la Tierra y

su distancia a la Luna y al Sol (Eratóstenes, s. III a.C.) y desarrollaron los elementos de la estática de cuerpos sólidos y de fluidos (Arquímedes, s. III a.C.), sin entrar siquiera en sus amplios conocimientos de geometría y teoría de números que, aunque puramente matemáticos, fueron muy útiles a la física contemporánea y posterior.

En el período de dominio sobre Europa del Imperio Romano de Occidente, el ritmo de evolución de lo que hoy se conocería como ciencia básica fue muy inferior al experimentado en la cumbre de la Grecia clásica, quizás por el mayor énfasis en la ingeniería y la arquitectura proveniente de la observación de la ciencia desde una perspectiva económica. Con la caída de este Imperio, la Edad Media trajo a nuestro continente, junto con la pérdida de parte del conocimiento clásico, una visión religiosa de la experiencia humana que resultó terreno fértil para la aceptación de argumentos de autoridad y para prácticamente abandonar la búsqueda de la verdad por métodos empíricos y experimentales.

China, ajena a estos cambios, tuvo un ritmo de desarrollo tecnológico mayor que Europa durante el primer milenio de nuestra era y fue hogar de notables pensadores en los campos de la matemática y la astronomía, pero fue incapaz de construir un *corpus* coherente de conocimiento científico por carecer de un marco metodológico adecuado (Needham, 1986). Igualmente, son muy destacables los avances matemáticos en la India, algunos de los cuales se adelantaron en siglos al desarrollo del cálculo en occidente. Geográficamente situado entre la cultura oriental y Europa, el mundo islámico conoció un progresivo florecimiento cultural durante la Edad Media tras su aparición en el s. VII. A los pensadores islámicos se les debe la conservación de parte de las obras del período clásico, la importación de conocimiento de la India y muchos avances en la física, la química y la medicina en este intervalo temporal.

De todo lo citado en los párrafos anteriores nos limitaremos a extraer una pequeña lista de contribuciones, en el período entre la Grecia clásica y el Renacimiento, que se podrían encuadrar dentro de la física o que le proporcionaron a esta herramientas de estudio. Por ejemplo, Juan de Alejandría –Juan Filópono– fue en el s. VI uno de los más importantes proponentes del empirismo dentro de la era cristiana. En sus comentarios sobre la obra de Aristóteles pone en evidencia mediante la observación los errores de este en lo que se refiere a la caída libre, e introduce una forma primitiva del principio de inercia. Sus ideas fueron retomadas en Francia en los siglos XIII y XIV por Petrus Olivi y Jean Buridan. También en Francia, Juan Escoto Erígena sugirió un modelo heliocéntrico a mediados del s. X.

Por otra parte, se realizaron algunos trabajos teóricos sobre óptica –como los del ya citado Buridan– y se crearon diversos instrumentos basados en lentes de los que podemos tomar como representativa la lupa de Roger Bacon (s. XIII). Estos pequeños avances en óptica en Europa son completamente tributarios de los monumentales trabajos del considerado padre de la disciplina: Ibn Sahl (Persia, s. X), que desarrolló la ley de la refracción y estudió matemáticamente las lentes y sus abe-

rraciones, y de Alhacén (Egipto, siglos X y XI) quien llegó a un modelo de la visión humana y aplicó la óptica a la astrofísica con su tratamiento de la reflexión difusa en la Luna. Alhacén realizó contribuciones a muchos campos dentro y fuera de la física, siendo quizás la primera persona en concebir la gravedad como proveniente de interacciones entre los objetos (Saliba, 2007).

Otros físicos relevantes dentro del mundo islámico de este período fueron Avicena (Persia, s. X) que, aunque más conocido por sus aportaciones a la medicina, trabajó en aspectos teóricos sobre el movimiento, la luz y el calor; y el cordobés Ibn al-Sammak (s. XI), con su cálculo de la altura de la atmósfera. Es imprescindible mencionar también a al-Khwarizmi, padre del álgebra y de los números arábigos, por su contribución metodológica.

Otro capítulo interesante es el de los instrumentos de medida, como la brújula magnética (de origen chino), el reloj de Su Song (China, s. X) y el higrómetro de Nicolás de Cusa (Alemania, s. XV).

La visión predominante del mundo natural durante la Edad Media en Europa y en el mundo islámico no era reduccionista, sino enmarcada en el todo del propósito divino. Algo semejante ocurre en la tradición china, con la idea del Tao o flujo del universo. La evolución hacia el reduccionismo fue de la mano de la marcha hacia el realismo y el empirismo.

Sin olvidar a los precursores, como Juan de Alejandría, destacan dos nombres propios en la renovación epistemológica: Alhacén y Guillermo de Occam. El primero fundó su óptica en trabajos experimentales y fue furibundo en sus abundantes críticas a Ptolomeo por imponer apriorismos como la perfección del movimiento circular y por su uso de conjeturas en lugar de observaciones. Más en general, argumentó explícitamente que, puesto que ningún sabio del pasado se puede considerar libre de error, el argumento de autoridad carece de valor frente al experimento, y ridiculizó a los que creían acríticamente en este tipo de razonamiento. Por lo que respecta a Guillermo de Occam (Inglaterra, siglos XIII y XIV), defendió la existencia exclusivamente de lo individual frente a lo universal (Gilson, 1985), una postura claramente reduccionista. Además, empleó –aunque no inventó– el principio de la parsimonia intelectual, que hoy conocemos como “navaja de Occam”, en contra de la introducción de hipótesis innecesarias. La aplicación conjunta de estas dos ideas favorece las explicaciones próximas a la experiencia.

3. EL RENACIMIENTO

El Renacimiento es el puente entre la Edad Media y la Edad Moderna. En este período una serie de factores políticos se conjugaron para generar en Italia el clima preciso para la aparición del germen de un resurgimiento cultural que, con otro conjunto de causas, que incluyen la invención de la imprenta y el reformismo religioso, permitieron que este movimiento se afanzara, se retroalimentara positivamente y se diseminara de forma acelerada.

La ciencia, como forma de pensamiento humano, no fue ajena al Renacimiento, pero sí se puede identificar un desfase en su desarrollo con respecto al de las artes. De hecho, durante el s. XV se produjo una revalorización de las ideas de Aristóteles frente a otras más avanzadas, de modo que el “renacimiento científico” tendría que esperar hasta el s. XVI, a pesar de que no se puede ignorar la contribución de las ideas del primer humanismo con su rechazo de la autoridad y la valorización del hombre y su experiencia en detrimento de la divinidad.

Un criterio habitual es tomar como fecha de comienzo de la revolución científica el año 1543, con la publicación del *De Revolutionibus Orbium*, de Nicolás Copérnico, donde se propone un modelo en el que el Sol es el centro del universo, pero manteniendo la idea de la existencia de esferas celestes. Hace falta poner en perspectiva el significado de la obra de Copérnico: aunque fue popular en su tiempo (Gingerich, 2004), las pequeñas ventajas que presentaba el modelo copernicano no fueron suficientes para superar la inercia del ptolemaico, y sus contemporáneos no pasaron por alto el ajuste de sus parámetros a la fenomenología y la falta de una explicación subyacente.

En el año 1564 nace Galileo Galilei, probablemente el personaje con el que más se identifica el renacimiento científico en la cultura popular. Las aportaciones a la física de Galileo son innegables, tanto en el campo metodológico –con su defensa de los planteamientos matemáticos– como en el del contenido –con sus experimentos sobre la caída libre y el movimiento pendular, sus cuidadosas observaciones astronómicas y sus teorías de la caída libre y de la relatividad en el movimiento de los cuerpos–. También hay que destacar los instrumentos de observación que diseñó, siendo uno de los pioneros en la construcción de microscopios y telescopios basados en lentes. El gran fracaso de Galileo residió en su exceso de celo en la defensa del modelo heliocéntrico, ya que la prueba que propuso para apoyarla –una teoría de las mareas– era trivialmente demostrable como falsa. Galileo puso sus ideas por delante de la experiencia y esto, unido a una incuestionable falta de tacto en su presentación por escrito, lo condujo a perder a los poderosos amigos que lo habían apoyado hasta el momento y a tener bien conocidos problemas con la Inquisición. Debe tenerse en cuenta que la investigación a Galileo comienza en el año 1611 y que la Iglesia había aceptado ya en el año 1610 el sistema de Tycho Brahe, que admitía que los planetas giraban en torno al Sol, pero seguía considerando que este orbitaba, a su vez, a la Tierra. El sistema de Brahe era capaz de explicar tanto sus propias observaciones como las de Galileo, por lo que era científicamente satisfactorio en el momento.

Curiosamente, fue un discípulo de Tycho Brahe –Johannes Kepler– quien con la publicación en el año 1609 de su *Astronomía Nova* ya había puesto en aquel momento una de las piedras que desbancarían definitivamente el modelo geocéntrico, el modelo de órbitas elípticas para los planetas, con el Sol en uno de los focos, y sus otras dos leyes del movimiento planetario. Kepler fue, además, pionero en la introducción de la física en la astronomía al relacionar este movimiento de los pla-

netas con una fuerza ejercida por el Sol. Esta fuerza tendría origen magnético, de acuerdo con las hipótesis del ya mencionado Simon Stevin.

Igualmente a caballo entre los siglos XVI y XVII se desarrolló la vida del inglés Francis Bacon, pieza clave en el desarrollo del método científico. Bacon puso en palabras, en su *Novum Organum*, un propósito para la ciencia: dominar la naturaleza obedeciéndola. Asimismo, describió en detalle un método esencialmente inductivo para llegar al conocimiento a partir de la acumulación de datos, y empleó su influencia política para difundirlo a través de la educación (Wormald, 1993). La promoción política de la ciencia hace que se considere a Francis Bacon una de las influencias clave detrás de la creación de la Royal Society en el año 1660, a pesar de que su muerte fue muy anterior –en el año 1626–. La influencia de esa organización en el avance científico en siglos posteriores sería inmensa.

La última gran figura sobre la que se hará hincapié en esta sección es la de René Descartes (1596-1650). Su obra es extremadamente reduccionista en todos los aspectos: desde la concepción de las ciencias como derivadas de un número limitado de disciplinas fundamentales hasta su célebre descripción mecanicista de los animales como compuestos por piezas. No obstante, este filósofo no fue capaz de eliminar a Dios de su “prueba” de la existencia de una realidad externa a él mismo. Además de producir estas y muchas otras influyentes ideas filosóficas, Descartes hizo aportaciones concretas en el campo de las matemáticas, destacando sobre todo la conexión entre el álgebra y la geometría. Sus métodos matemáticos y sus incompletas ideas sobre la dinámica de los cuerpos son predecesores directos de la mecánica newtoniana.

Finalmente, es preciso contar que en el s. XVII también renace la teoría atómica, en una forma tibia conocida como “corpuscularismo”, al mismo tiempo que comienza a distinguirse la química científica de la alquimia. Son autores destacados el propio Descartes, Daniel Sennert y Robert Boyle. El análisis de la materia en términos de sus componentes fundamentales, que se irían redefiniendo a lo largo del tiempo, fue otra productiva herramienta de tipo reduccionista.

4. NEWTON Y LA MECÁNICA CLÁSICA

Según diversas encuestas, Isaac Newton (1642-1727) está valorado como el mayor científico de la historia humana. No es una hazaña menor para un hombre que dedicó la mayor parte de su obra a disciplinas tan poco científicas como la alquimia y la exégesis bíblica –aunque es igualmente cierto que la principal ocupación de algunos astrónomos de los que se hablaba en la sección previa solía ser la elaboración de cartas astrológicas– y habla mucho de su brillantez.

En la época de Newton la simplicidad del modelo kepleriano ya había suscitado el interés de muchas personas, y tanto en el continente como en Gran Bretaña había personas interesadas en hallar una relación cuantitativa entre la fuerza de atracción del Sol sobre los planetas –si existía tal fenómeno– y las órbitas de estos.

Una de esas personas era el astrónomo Edmond Halley, que llevó el problema a oídos de Isaac Newton, residente en el Trinity College de Cambridge. Para su sorpresa, la respuesta de Newton fue que ya había resuelto el problema hacía años y que tenía la solución guardada en un cajón. De la elaboración de esa solución surgieron los *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* de Newton, publicados en el año 1687. En ellos introduce el efecto de una fuerza de atracción entre cuerpos inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, y formula sus tres leyes de la mecánica: la ley de inercia, la relación entre fuerza y cantidad de movimiento y la ley de acción y reacción. Además, se tratan muchos otros problemas por los que es menos reconocido, como son el movimiento bajo el efecto de otros tipos de fuerzas centrales, la equivalencia de la atracción gravitatoria de un cuerpo esféricamente simétrico con la de un punto situado en su centro que concentrara toda su masa, el movimiento en medios con rozamiento, la estática de fluidos, las mareas o la precesión de los equinoccios.

Incluso en un análisis contemporáneo a Newton, los *Principia* carecen de rigor en muchos puntos, y el autor fue tachado (Guicciardini, 2011) de “*hombre que ha escrito un libro que no entienden ni él ni ninguna otra persona*”. Parte de los errores y confusiones provienen de la insistencia de Newton en no emplear la forma simbólica del cálculo infinitesimal desarrollada de forma independiente por él mismo y por Leibniz en la Europa continental. Sus motivos eran dos: en primer lugar, era consciente de la falta de una base matemática rigurosa para los procesos de paso al límite, que solo se terminaría en el s. XIX con el trabajo de Weierstrass y Cauchy; y en segundo lugar, Newton sentía una gran admiración por la elegancia de las demostraciones de los pensadores clásicos como Euclides, y aspiraba a recuperar sus métodos, que consideraba perdidos.

Sin embargo, hoy no hay duda de que Newton llegó a muchos resultados por métodos analíticos –que conocía y valoraba por la obra de Descartes, con la que tuvo contacto ya en su juventud– y que solo buscó la prueba geométrica *a posteriori*. El resultado se aprecia incluso en la presentación final contenida en los *Principia*, donde se mezclan nociones de matemática discreta y continua, contribuyendo a la confusión.

Más allá de cuestiones metodológicas, la generalidad de las conclusiones de la obra de Newton era impresionante, comenzando por su unificación de la dinámica de los astros y de los sistemas terrenales bajo un conjunto de leyes sencillas aplicadas con procedimientos matemáticos potentes. El “sistema del mundo” más estrechamente asociado a la divinidad podía quedar contenido en una línea. Las explicaciones de Newton asentaron definitivamente el sistema heliocéntrico y fueron muy bien acogidas por las nuevas generaciones, pero no contentaron a todos. Asumiendo una acción a distancia entre cuerpos, el marco mecánico newtoniano se opone al mecanicismo cartesiano, donde todos los movimientos son imprimidos a los cuerpos por invisibles partículas que se mueven en torno a vórtices igualmente indetectables. Newton ataca esta teoría explícitamente y es atacado, a su vez, por

los cartesianos, que consideran su mecánica incompleta al no dar razón del origen de la fuerza gravitatoria.

En este sentido, la obra de Newton es el último paso filosófico hacia una concepción moderna de la ciencia basada en la experiencia. Como él mismo proclama en un ensayo añadido a la segunda edición de los *Principia*, es suficiente con que la teoría explique las observaciones, quedando cualquier hipótesis adicional como innecesaria y contraproducente, en la línea del pensamiento de Occam y Bacon. Conviene destacar que la aspiración abierta por la mecánica newtoniana de poder explicar todos los fenómenos terrenales y celestiales como resultantes de la interacción por pares entre los cuerpos implicados es prácticamente la cúspide del reduccionismo, superando con mucho, en este sentido, incluso las ideas de Descartes.

Sin que importen los prejuicios de Newton a este respecto, la formulación analítica del cálculo, a pesar de carecer por entonces de rigor, era ya mucho más sencilla de manejar y comunicar que sus métodos geométricos. No es de extrañar, por lo tanto, que en el continente europeo muchos jóvenes científicos, impresionados con la mecánica newtoniana, se esforzaran en traducirla al lenguaje que Leibniz y sus destacados discípulos –como, por ejemplo, Johann Bernouilli– se habían preocupado de difundir todo lo posible. Discípulo de Bernouilli fue, a su vez, el que hoy es considerado el matemático más prolífico de la historia: Leonhard Euler. Un hecho poco conocido es que a él se debe la formulación de las leyes de Newton que se puede encontrar hoy en libros de texto de todos los niveles, identificable por la expresión $\vec{F} = m \vec{a}$.

Debido a las ventajas de estos métodos algebraicos y a las aportaciones de las grandes mentes matemáticas del s. XIX, el cálculo diferencial se sistematizó y generalizó –los pioneros tenían que desarrollar sus propios métodos de integración *ad hoc*– y el estudio de la mecánica resultó un campo fértil para su aplicación, por lo que se desarrolló en extensión y profundidad. El sistema de coordenadas cartesianas había sido crucial para la matematización del pensamiento científico en términos algebraicos, pero resultaba inapropiado para muchos problemas en los que el movimiento está sujeto a ligaduras –como, por ejemplo, cuando el cuerpo objeto de estudio debe moverse sobre una superficie– que por su geometría se adaptan mal al lenguaje de rectas y planos natural en la geometría cartesiana. En estos casos, solo la introducción de una serie de fuerzas de ligadura incómodas, de complicado significado físico y de muy difícil planteamiento *a priori* permite emplear la formulación newtoniana de la mecánica.

Por este motivo se desarrollaron reformulaciones de la mecánica en las que la posición de una partícula puede expresarse en términos de variables elegidas mucho más arbitrariamente, llamadas coordenadas generalizadas. Las más conocidas hoy de entre estas reformulaciones son la de Lagrange y la de Hamilton. La segunda de ellas supone un nuevo grado de abstracción al conceder a las magnitudes físicas denominadas momentos un protagonismo equivalente al de las coordenadas.

Los momentos miden el efecto en la dinámica de una partícula de modificaciones en la ratio de evolución temporal de una de sus coordenadas generalizadas, y suponen una matematización rigurosa y general de la vieja idea de ímpetu de Juan de Alejandría. El ejemplo más inmediato es el momento lineal, proporcional a la velocidad de la partícula.

Estas abstracciones abrieron la puerta a la comprensión de la mecánica en términos de propiedades generales de invariancia o simetría de los problemas, así como a su derivación a partir de un principio de mínima acción de aplicabilidad muy amplia. A la par de estos avances metodológicos y conceptuales, la extensión de la mecánica newtoniana a los más variados sistemas dio lugar a la teoría del sólido rígido, a la dinámica de fluidos y a la teoría de la elasticidad –asociadas con Daniel Bernouilli, hijo de Johann–, y más en general al estudio de la dinámica de campos y medios continuos así como, por supuesto, al perfeccionamiento de la comprensión de los fenómenos astronómicos.

El *corpus* de conocimiento resultante se conoce hoy como mecánica clásica, y en su tiempo recibió también las denominaciones de mecánica racional o mecánica analítica. Quizás sea esta última la que más claramente exprese su componente reduccionista. La investigación en temas de mecánica clásica continuó con intensidad en todo el s. XIX con autores tan destacados como Henri Poincaré (1854-1912) y en una forma más abstracta incluso en el s. XX con resultados como el teorema de Noether (1915), pero sus características definitorias estaban claras al final del s. XVIII. Entre ellas podemos identificar las que se apuntaban en la introducción a este trabajo:

– *Reduccionismo*: la gravitación newtoniana está formulada en términos de interacciones entre pares de cuerpos. Lo mismo ocurre con otras fuerzas introducidas posteriormente, como la fuerza entre cargas eléctricas descrita por Charles-Augustin de Coulomb en el año 1784. En ello están presentes dos grados de descomposición analítica del problema de la evolución temporal de un sistema: en primer lugar, se pueden considerar sus constituyentes uno a uno y calcular el efecto del resto sobre ellos; y en segundo lugar, este efecto se puede descomponer, a su vez, en contribuciones individuales del resto de componentes. Incluso cuando hay que renunciar a este segundo paso por la conveniencia de introducir rozamiento con un medio, sigue siendo cierto que cualquier comportamiento de un sistema mecano-clásico surge de sus componentes individuales.

Para completar la imagen reduccionista, leyes como la de la gravitación contienen también un elemento importante de homogeneidad, al considerar todos los cuerpos del universo compuestos de materia con masa e interactuando mediante la misma ley. La unidad de la materia tenía una larga tradición en el pensamiento occidental desde Tales, y fue una de las ideas filosóficas centrales de Leibniz, para quien todo el universo está formado por un único tipo de componente –la mónada–, en una postura extremadamente reduccionista. Este radicalismo no fue

compartido por sus descendientes intelectuales Johann Bernouilli y Leonhard Euler (Arana, 1991) debido a sus ramificaciones en el campo religioso –Euler se opuso ferozmente al ateísmo–, pero sin consecuencias para la teoría física. Es preciso aclarar, no obstante, que las mónadas de Leibniz son componentes infinitesimales, lo que convierte su postura en antiatomística, es decir, opuesta a la idea de una estructura discreta de la materia. La mecánica clásica en sí misma ni exige ni excluye esa posibilidad.

–*Determinismo*: en cualquiera de sus planteamientos, la mecánica clásica reduce el estudio del movimiento a la solución de un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer o segundo grado. Como consecuencia, el conocimiento de las coordenadas y momentos de un sistema en un instante de tiempo –un conjunto de posiciones y velocidades en el caso cartesiano– permite determinar, si se dispone de una capacidad calculística a la altura del problema, el valor de estas magnitudes en cualquier otro momento. Llevando esta idea al límite, el estado actual del universo determina completamente su futuro y es testigo perfecto de su pasado, sin dejar lugar para la libertad o el azar.

Por la relevancia de estas ideas en el contexto de este trabajo, puede ser oportuno introducir alguna breve matización del aparente determinismo absoluto de la mecánica clásica. En los propios *Principia* se introduce el problema del estudio del movimiento de tres cuerpos en interacción gravitatoria en algunos casos muy particulares. Estudios posteriores, que culminarían en los de Poincaré hacia finales del s. XIX, mostraron que en general este problema presenta una sensibilidad extrema a las condiciones iniciales: algunas de sus trayectorias son inestables en el sentido de que una perturbación arbitrariamente minúscula DX sobre el estado X del sistema es amplificada durante su evolución temporal, de modo que la posición del sistema –partiendo de unas condiciones iniciales $X+DX$ – se aleja exponencialmente con el paso del tiempo de la predecible partiendo de X . En esas circunstancias, cualquier cálculo de la trayectoria tiene una validez temporal sumamente limitada, a menos que se base en un conocimiento perfectamente preciso de las condiciones iniciales, cosa que es impensable en la práctica.

Una segunda excepción al determinismo proviene del tratamiento de las colisiones en el formalismo newtoniano, ya que este no proporciona una solución única al problema cuando hay tres o más cuerpos implicados. Finalmente, el hecho de que en la mecánica clásica no exista una cota superior para las velocidades permite soluciones en las que un cuerpo escapa al infinito en un tiempo finito y, dada la reversibilidad temporal de las ecuaciones implicadas, permite también la aparición de un cuerpo desde el infinito. Se pueden formular ejemplos para un sistema de solo cinco cuerpos interactuando mediante fuerzas gravitatorias (Xia, 1992). En estas construcciones en las que una partícula aparece en el universo en un instante de tiempo dado es, por definición, imposible predecir su aparición a partir de la información sobre el estado del universo antes de ese instante, ya que hasta ese momento partícula y universo eran independientes.

- *Objetividad*: una consecuencia del determinismo que es preciso destacar es la repetibilidad de un experimento o una observación entre diferentes individuos, si las condiciones iniciales son las mismas. En el marco de la mecánica clásica, donde queda excluido el azar, la subjetividad solo puede proceder del error en la inclusión de todos los factores relevantes para el problema. Newton postula espacio y tiempo absolutos en sus *Principia*, una asunción demasiado fuerte que fue intensamente criticada por sus contemporáneos. Esta hipótesis es innecesaria para garantizar la objetividad, pues Galileo ya había discutido las transformaciones de las magnitudes dinámicas entre dos observadores en diferentes sistemas de referencia, *i.e.*, en distinto punto y con movimiento relativo entre ellos.
- *Causalidad*: en un marco en que el cambio en el estado de una parte de un sistema físico se considera inducido por fuerzas ejercidas por otra de sus partes y estas se determinan a partir del estado del propio sistema, todo cambio en el estado de movimiento de un objeto tiene como causa la acción de otro sobre él. Por otra parte, la secuencia temporal de los acontecimientos es independiente del observador, según las transformaciones de Galileo.

5. EL GERMEN DEL CAMBIO EN EL SIGLO XIX

Los trabajos en mecánica clásica no agotan, ni mucho menos, el avance en física ocurrido en el s. XIX. No se puede pasar por este período sin destacar el desarrollo de la electrodinámica clásica, esto es, el estudio de los fenómenos físicos que involucran cargas y corrientes eléctricas. Los más simples de estos fenómenos fueron observados empíricamente en la antigüedad, pero el comienzo de su tratamiento científico está en los trabajos experimentales de Henry Cavendish y de Charles-Augustin de Coulomb en la segunda mitad del s. XVIII. Múltiples contribuciones durante el s. XIX de científicos como Hans Christian Oersted, André-Marie Ampère, Karl Friedrich Gauss y Michael Faraday llevaron, finalmente, a la revolucionaria síntesis por parte de James Clerk Maxwell, en torno al año 1860, de las ecuaciones que llevan su nombre, originalmente en número de veinte, pero reducidas a cuatro en la versión corriente en la actualidad.

Las ecuaciones de Maxwell describen el cambio en el espacio y en el tiempo de dos campos vectoriales –es decir, magnitudes con módulo, dirección y sentido definidas en cada punto y en cada instante– denominados campo eléctrico (\vec{E}) y campo magnético (\vec{B}). Las fuentes de estos campos son las cargas y corrientes eléctricas pero, además, una variación en el tiempo del campo eléctrico en un punto lleva asociado un cambio en la derivada del campo magnético y viceversa, de manera que (\vec{E}) y (\vec{B}) actúan como fuentes uno del otro. El sistema se completa con la expresión de la conocida como fuerza de Lorentz, que permite calcular la fuerza sobre las cargas debida a los campos eléctrico y magnético.

En el plano formal, las ecuaciones de Maxwell están enteramente alineadas con la mecánica clásica: se trata de una descripción completamente cuantitativa en términos de un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales semejantes a las que rigen la dinámica de los fluidos y de otros medios continuos, y que *a priori* se pueden solucionar dadas unas condiciones iniciales y de entorno adecuadas, al menos mientras no se introduzcan complicaciones asociadas a la respuesta de los materiales a los campos. Por otra parte, (\vec{E}) y (\vec{B}) actúan sobre los cuerpos a través de una fuerza como la del formalismo newtoniano y que se relaciona con una propiedad de la materia –la carga eléctrica– análoga a la masa gravitatoria, excepto en el hecho de que se presenta en dos variedades: signos positivo o negativo. En la electrodinámica clásica se conservan las cualidades de causalidad y determinismo.

No obstante, de este formalismo se deriva una pérdida del protagonismo de la materia en el conjunto de la física, un giro conceptual de gran importancia que no se puede pasar por alto. En efecto, el acoplamiento entre los campos eléctrico y magnético en la teoría de Maxwell permite la propagación de estos campos en el espacio y en el tiempo sin necesidad de cargas y corrientes eléctricas, lo que en cierto modo los dota de una independencia de sus fuentes materiales. Estos fenómenos de propagación –las ondas electromagnéticas– fueron predichos por el propio Maxwell y confirmados experimentalmente por Heinrich Rudolph Hertz en el año 1885. La luz se identificó como un caso particular de onda electromagnética, con lo que la teoría conseguía un gran éxito al integrar fenómenos magnéticos, eléctricos y ópticos.

Otro argumento muy fuerte a favor de la realidad de los campos es su capacidad de realizar trabajo sobre las cargas. De hecho, la electrodinámica clásica permite definir una energía proporcional a los cuadrados de los módulos de (\vec{E}) y (\vec{B}) con un muy claro sentido local –es decir, hay una densidad de energía en cada punto– y deducir consecuencias sobre su transporte.

En síntesis, hay energía almacenada en el campo electromagnético, incluso en el vacío, y las ondas electromagnéticas transportan energía a una velocidad finita. La energía, que también figuraba prominentemente en los planteamientos más abstractos de la dinámica como el de Hamilton, toma así protagonismo como poderoso concepto unificador en la física. La acción instantánea a distancia entre cuerpos materiales de la obra de Newton deja paso a campos que llenan el espacio. En este cambio se debe destacar la pionera contribución de Faraday con la invención de las líneas de fuerza.

La aceptación de la nueva noción del vacío no estuvo libre de dificultades, y quizás la mayor de ellas fue la predicción, contenida en las ecuaciones de Maxwell, de que la velocidad de las ondas electromagnéticas –la velocidad de la luz– en el vacío es independiente de la del observador. Esta predicción contradecía la experiencia cotidiana sobre las transformaciones de velocidad, formalizada por Galileo:

ciertamente la velocidad de un tren no es la misma medida por una persona que lo espera en la plataforma que por otra que va montada en otro tren viajando en sentido contrario.

Para rodear este problema y al mismo tiempo evitar la dificultad conceptual de asignar una densidad de energía al vacío, varios científicos especularon con una solución conservadora que consistía en rescatar una idea originaria de teorías ondulatorias de la luz anteriores incluso a Newton. Se trataba del éter lumínico, una suerte de medio fluido o elástico que llenaría el espacio y permitiría la propagación de la luz de manera similar a como los fluidos convencionales permiten la propagación de las ondas mecánicas como el sonido. Bajo la hipótesis de la existencia del éter, las ecuaciones de Maxwell solo serían correctas en un sistema de referencia en reposo con respecto a este. Entonces, y dado que la Tierra rota y se mueve a través del espacio, con un experimento apropiado debería ser posible medir diferencias en la velocidad de la luz que se propaga a lo largo de dos direcciones perpendiculares en la superficie terrestre. Experimentos ópticos muy precisos, refinados a partir del realizado en el año 1887 por Albert Michelson y Edward Morley, fueron incapaces de detectar esa diferencia. Las propiedades que la física conocida exigía del éter –muy baja densidad, muy alta rigidez o un efecto indetectable sobre el movimiento de los cuerpos y de los astros, etc.– lo acercaban incómodamente a la categoría de *deus ex machina* introducido para salvar un agujero en el guión. Aunque se idearon modelos para mantener el éter incluso a la luz de los resultados de Michelson y Morley, la introducción por parte de Albert Einstein de su relatividad especial en los primeros años del s. XX permitió a la física librarse de este lastre.

También en el s. XIX, movida en buena parte por el estudio de las máquinas térmicas de la Revolución Industrial, comienza su andadura la termodinámica, rama de la física que se ocupa de los procesos de conversión de energía. Esta ciencia toma desde el principio un enfoque acorde a su objeto de estudio, y se orienta a la caracterización de los sistemas físicos en términos de variables macroscópicas medibles como la presión, el volumen y la temperatura, y funciones de estado, es decir, aquellas que dependen de esas variables y no de la historia del sistema. En este sentido, un concepto absolutamente central es el de equilibrio termodinámico, un estado en el que las variables de estado de un sistema no cambian con el tiempo y este es, además, espacialmente homogéneo.

De hecho, la termodinámica tradicional trata casi exclusivamente con estados de equilibrio; los procesos termodinámicos de transición entre dos estados se estudian mediante los llamados procesos cuasiestáticos, lo suficientemente lentos para que el sistema se mantenga arbitrariamente próximo a estados de equilibrio. Es el hecho de que el cambio de las variables de estado en un proceso dependa solo de los estados inicial y final, y no del camino seguido en él, lo que permite explicar con este formalismo los efectos de procesos reales. Otras claves son la diferencia entre magnitudes extensivas, que escalan de manera proporcional al tamaño del sistema, e intensivas, que son independientes de él.

En las síntesis modernas, las bases de la termodinámica se expresan como tres leyes (Callen, 1985), de las cuales las dos primeras proceden del s. XIX. La primera ley de la termodinámica –o de conservación de la energía– se puede expresar, prescindiendo de varios matices, como la afirmación de la existencia de una función de estado: la energía interna, de la que el cambio entre dos estados es igual a la suma de la energía intercambiada entre el sistema y su entorno en forma de calor y de trabajo. Su desarrollo requirió del nada despreciable salto conceptual representado por la aceptación de la equivalencia, precisamente, entre calor y trabajo mecánico. Téngase en cuenta que el trabajo –o variación de la energía debida a la modificación de parámetros extensivos– era un concepto fundamentado en la mecánica, mientras que la teoría predominante sostenía que el calor consistía en el tránsito de una sustancia –el calórico– que se encontraba en gran medida en los objetos calientes y menos en los fríos. Los cuidadosos ensayos sobre conversión de energía de James Prescott Joule dieron base experimental a la equivalencia calor/trabajo, y junto con las observaciones sobre el color de la sangre en los trópicos de Julius Robert Mayer terminaron por mandar al calórico al cajón que la historia reserva para las sustancias inexistentes con propiedades mágicas, donde se le uniría unas décadas después el éter lumínico. Convencionalmente, se suele aceptar como primera formulación de la primera ley la de Rudolph Clausius del año 1850 (Truesdell, 1980).

La segunda ley de la termodinámica admite múltiples formulaciones, entre las que no resulta trivial mostrar las equivalencias en un texto generalista como este. De hecho, todas ellas arrastran problemas de mayor o menor gravedad que solo se pueden considerar satisfactoriamente resueltos en la propuesta axiomática y algebraica de Elliott Lieb y Jakob Yngvason, publicada en el año 1999; lo reciente de esta fecha da idea de la complejidad del asunto. En esta formulación y en sus predecesoras, la segunda ley de la termodinámica aparece como una limitación al tránsito entre estados: en cualquier entorno de un estado de equilibrio de un sistema termodinámico –en el espacio de todos sus estados de equilibrio– existen otros que no son accesibles sin intercambio de calor. Una forma menos abstracta es la siguiente: no es posible transferir calor de un foco frío a uno caliente sin aportar trabajo.

En cualquier caso, esta ley permite la construcción de una función de estado extensiva conocida como entropía, y de un principio extremal según el cual el estado de equilibrio de un sistema aislado es aquel que maximiza su entropía. El desarrollo de un principio de este elevadísimo grado de abstracción y generalidad fue continuo a lo largo del s. XIX. La mayor parte del trabajo teórico fue realizado de manera muy progresiva por William Thompson –Lord Kelvin– y Rudolph Clausius, quien definió la entropía en el año 1865, pero es preciso reconocer la labor del pionero Sadi Carnot. En su artículo del año 1824 “Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego”, Carnot presentó la primera versión de la segunda ley, aún inscrita dentro de la teoría del calórico. En este trabajo se introduce el ideal de proceso re-

versible, muy importante para la termodinámica posterior. El impacto del desarrollo decimonónico de la termodinámica es tal que la relación con las máquinas térmicas lastró en cierto modo la presentación y las aplicaciones de esta disciplina en determinados campos hasta tiempos muy recientes.

Como se aprecia en estos párrafos, la termodinámica nació disociada por completo de la mecánica. ¿Cómo relacionar el comportamiento de la materia en volumen, de los sistemas macroscópicos, con las fuerzas conocidas por la física?, ¿cuáles son las causas de los procesos termodinámicos?, ¿cómo pueden existir estados de equilibrio en los que la historia de un sistema físico resulta irrelevante, cuando la evolución temporal de los constituyentes de ese sistema está gobernada por leyes deterministas?, ¿qué conexión con la mecánica pueden tener las nociones de temperatura y calor? Para responder a estos interrogantes es preciso incluir un pequeño resumen de la evolución del conocimiento sobre la estructura de la materia hasta este punto.

Ya en el año 55 a.C. Lucrecio, aplicando las ideas atomísticas de Demócrito y otros, había apuntado la hipótesis de que los átomos, que serían muy pequeños, se encontraban continuamente agitados y colisionando entre ellos, y que de las distancias entre colisiones sucesivas surgen las diferencias, por ejemplo, entre sólidos y gases. En el s. XVII, Pierre Gassendi profundizó en la explicación cualitativa de las transiciones de fase suponiendo átomos rígidos e impenetrables, pero de diferente tamaño. Más adelante, el propio Newton acepta la teoría atómica de los gases en su *Opticks*, diciendo que estas partículas serían “*tan duras como para no deteriorarse ni fraccionarse nunca*”. Su contemporáneo Robert Hooke también intentó una aproximación a la ley de Boyle –proporcionalidad inversa entre volumen y presión de un gas ideal a temperatura constante– desde el punto de vista de las colisiones entre átomos. Esta larguísima etapa de descripciones cualitativas e ideas intuitivas fue superada por Euler, que llegó por razonamientos mecánicos a una ecuación de estado para los gases ideales, y por Daniel Bernouilli, que afirmó que “*el calor no es más que movimiento atómico*”.

Durante el s. XIX la teoría cinética, nombre bajo el que se agrupa este tipo de aproximaciones al comportamiento macroscópico de la materia basadas en la mecánica de un conjunto de muchísimas partículas, sufriría una cierta deceleración debido al avance de la termodinámica que, además, al profundizar en la fenomenología de este comportamiento, subió sustancialmente el listón que la teoría cinética debería –y, finalmente, no podría– alcanzar: era deseable explicar la naturaleza de la temperatura y la equivalencia entre calor y trabajo, y dar una interpretación microscópica de la entropía.

En la segunda mitad del s. XIX se retoma esta empresa de la mano de científicos tan prestigiosos como Maxwell, quien introdujo la noción de movimiento aleatorio en las partículas de un gas, pero quien se enfrentó definitivamente a estos problemas fue Ludwig Boltzmann, con su formulación del segundo principio en términos de la teoría cinética. Boltzmann consideró la función densidad de mo-

léculas f sobre el espacio generalizado generado por todos los valores posibles de las $3N$ coordenadas y los $3N$ momentos de un sistema de N átomos, y a partir de ella definió otra función H como la integral de $f \cdot \log f$ en todo ese espacio. Bajo la denominada hipótesis de caos molecular, formuló su ecuación de transporte para describir la evolución temporal de f , y la aplicó para demostrar que H siempre disminuye con el tiempo a causa de las colisiones moleculares. A partir de esto identificó $-H$ con la entropía –salvo constantes–. A su trabajo se opusieron dos paradojas:

- La *paradoja de Loschmidt*: llama la atención sobre la contradicción entre una dinámica microscópica reversible, descrita por las ecuaciones de Newton, y el comportamiento irreversible resultante de la ecuación de transporte de Boltzmann. Loschmidt apuntó que se puede tomar una trayectoria del sistema que progresa hacia menores valores de H e invertirla en el tiempo con el resultado de otra trayectoria mecánicamente válida que evoluciona hacia mayores valores de H . En consecuencia, la hipótesis de caos molecular no podía ser legítima desde el punto de vista de la mecánica.
- La *paradoja de Zermelo*: un sistema mecánico con una energía acotada necesariamente muestra fenómenos de recurrencia, es decir, al cabo de cierto tiempo pasa de nuevo por un entorno arbitrariamente pequeño del punto de partida. Ya que cuando esto ocurre todas las magnitudes que lo describen son las mismas que en el instante inicial, no es concebible que los valores de H difieran, por lo que H no puede disminuir monótonamente durante la evolución temporal.

Estas paradojas convirtieron la ecuación de transporte de Boltzmann –cima de la teoría cinética– en la prueba de su insuficiencia y del fracaso de su programa, y movieron a este investigador a introducir en la teoría física un elemento revolucionario: la probabilidad, que rompía claramente con el determinismo. Con esto nació una herramienta mucho más potente que constituye hoy el verdadero puente entre lo microscópico y lo macroscópico: la mecánica estadística.

En efecto, la observación de un sistema termodinámico nos lleva a identificar solo unos pocos parámetros –volumen, presión, temperatura– que subdeterminan su estado microscópico, es decir, hay infinidad de estados microscópicos compatibles con las observaciones macroscópicas. No cabe preguntarse por el estado preciso del sistema, sino sobre la probabilidad de que este se halle en un estado microscópico particular. La entropía es una función de la distribución de probabilidad sobre estos estados, y el mismo Boltzmann publicó la fórmula que permite calcularla para un sistema aislado: $S = k_B \log W$, donde k_B es una constante y W el número de estados microscópicos en los que el sistema puede estar. El significado de la entropía como una medida del volumen del espacio fase en el que el sistema puede estar de acuerdo con los observables macroscópicos, satisface la intuición termodinámica del padre del concepto –Clausius–, que la entendía como un “*contenido o poten-*

cial de transformación”, paralelo a la energía que es un “*contenido de trabajo*”. La temperatura se incluye en el formalismo como la derivada de la energía interna con respecto a la entropía.

La física estadística fue generalizada a principios del s. XX por Josiah Gibbs para poder describir sistemas bajo cualquiera de los conjuntos de ligaduras habituales en la termodinámica. Permitted reproducir los resultados de la teoría cinética, conectar la mecánica con la termodinámica e, incluso, dar confirmación experimental de la teoría atómica a través de los celebrados trabajos sobre el movimiento browniano de Albert Einstein en el año 1905. Por lo que respecta a las paradojas de Lochsmidt y Zermello, en este marco se entiende que en su construcción intervienen procesos posibles, pero tan inconcebiblemente improbables en un sistema de muchas partículas que no tienen relevancia para las observaciones macroscópicas.

Un ejemplo muy intuitivo es el de un gas ligero que se suelta desde una bombona en la esquina de un despacho cerrado. Como es bien conocido, el gas tenderá a expandirse hasta ocupar la totalidad del volumen. A pesar de ser cierto que la trayectoria que llevaría a las partículas de gas a volver a su configuración inicial y comprimirse espontáneamente de nuevo en una esquina es mecánicamente posible (Lochsmidt) y que incluso está garantizado que dejando pasar un tiempo astronómico las partículas pasarían por configuraciones próximas a la inicial donde ocupan poco volumen (Zermello), el número de configuraciones donde su distribución en volumen es más o menos homogénea es tan abrumadoramente grande que esos sucesos de ínfima probabilidad se pueden ignorar de cara al resultado de cualquier medida. La estadística de los tiempos de recurrencia fue estudiada a fondo en los siglos XX y XXI confirmando estas ideas (Altmann, 2007).

Además de la incursión de la aleatoriedad de la física, el trabajo de Boltzmann sobre la entropía contiene otro elemento novedoso: la división del espacio de todas las posibles coordenadas y momentos del sistema en unidades discretas, con volumen finito. Esta hipótesis llevó a Boltzmann a sugerir en el año 1877 que la energía de un sistema no puede tomar cualquier valor, sino que está discretizada o cuantizada, siendo este uno de los precedentes más claros de la mecánica cuántica que se tratará en la siguiente sección. Sus contribuciones sitúan a Boltzmann como figura destacada en la transición a la física contemporánea.

La aparición de la física estadística, junto con el desarrollo del electromagnetismo y los avances en la mecánica clásica, permite afirmar que en el s. XIX se pusieron casi todos los pilares necesarios para las revoluciones que llegarían posteriormente.

6. LA FÍSICA HASTA NUESTROS DÍAS

En los inicios del s. XX entran en escena en el mundo de la física la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. La primera denominación engloba en realidad dos partes diferenciadas: la relatividad especial y la relatividad general, publicadas

por Albert Einstein en los años 1905 y 1915, respectivamente. El conjunto de la teoría de la relatividad trata con la forma en que miden o perciben los fenómenos físicos diferentes observadores según su estado de movimiento.

En la relatividad especial se trata únicamente el caso en el que estos observadores se encuentran en movimiento rectilíneo y uniforme –sistemas de referencia inerciales– bajo los postulados de que la física debe ser la misma para todos ellos y de que, de acuerdo con la predicción de las ecuaciones de Maxwell y con los resultados del experimento de Michelson y Morley, todos ellos deben medir la misma velocidad de la luz. Esta parte de la relatividad especial corrige y completa las ideas sobre la relatividad de Galileo, con la que coincide a bajas velocidades, y supone un importante cambio sobre la mecánica newtoniana. En el marco de esta teoría aparece una velocidad límite: la de la luz, que no es posible alcanzar o superar partiendo de una velocidad inferior. El tiempo deja de ser absoluto, y se mezcla con las coordenadas espaciales en las transformaciones entre observadores dando lugar a la idea de espacio-tiempo tetradimensional. De este modo, observadores en movimiento rectilíneo y uniforme relativo pueden medir diferentes intervalos de tiempo entre dos sucesos; sin embargo, la causalidad sigue siendo absoluta, de manera que ninguno de estos observadores medirá un efecto antes que su causa. Las transformaciones de la relatividad especial hacen desaparecer la barrera entre masa y energía, y permiten explicar la conversión entre ambas, dotando a la idea de energía de un poder unificador aún mayor del pensado en el s. XIX.

Por lo que respecta a la relatividad general, tal y como indica su nombre, generaliza la invariancia –o, hablando en un lenguaje más propio, la covariancia– de la física a observadores en movimiento relativo arbitrario y posiblemente acelerado. Además, añade el principio de equivalencia entre el efecto de un campo gravitatorio y la aceleración experimentada por un observador en un sistema de referencia no inercial de cara a cualquier experimento físico que no mire fuera de ese sistema. Einstein ilustró este principio con el célebre ejemplo, o experimento mental, de un individuo en un ascensor cerrado: no es posible para él efectuar ningún experimento físico que le permita determinar si se encuentra sobre la superficie del planeta Tierra, bajo el efecto de la gravedad que experimentamos diariamente, o en las profundidades del espacio interestelar, lejos de cualquier masa y bajo el efecto de un cohete que le proporcionara una aceleración “hacia arriba” equivalente en módulo a la de la gravedad terrestre. La relatividad general es, por consiguiente, una nueva teoría sobre la gravedad, que surge como procedente de la curvatura del espacio-tiempo debida a la masa. No solo los objetos masivos son afectados por la gravedad, también la propia luz.

Con su relatividad, Einstein supera y generaliza las dos aportaciones más importantes de Newton: la mecánica clásica y la teoría de la gravedad, partiendo de postulados sencillos y elegantes, haciendo una teoría compatible con la electrodinámica y permitiendo prescindir del éter. Sus implicaciones son muy profundas y a menudo muy poco intuitivas para seres que formaron su sentido común en un

mundo en el que los desplazamientos relativos ocurren a velocidades mucho menores que la de la luz, pero han sido comprobadas experimentalmente con gran éxito.

La relatividad general se aleja del reduccionismo en varios puntos cruciales, entre los que cabe destacar la matización de la objetividad debida a la mayor complejidad de las transformaciones implicadas, la importancia de la geometría global del espacio-tiempo y la rotura de la causalidad y el determinismo en formas mucho más significativas que los rebuscados ejemplos permitidos por la mecánica newtoniana (Earman, 1995). Las ecuaciones de la relatividad general permiten la construcción de muchos modelos de espacio-tiempo con complicadas propiedades y la existencia de lugares donde el determinismo se rompe completamente. El debate sobre si es razonable imponer condiciones adicionales a la teoría para evitar las roturas más drásticas –justificadas por su no observación hasta el momento– sigue abierto.

Por su parte, la física cuántica nació justo antes del cambio de siglo, en el año 1900, de la mano de Max Planck. Considerando que un cuerpo capaz de absorber cualquier radiación –llamado cuerpo negro– se puede tratar como un sistema material en equilibrio con un campo electromagnético, y que el intercambio de energía entre ambos solo puede tener lugar en forma de paquetes o cuantos de magnitud proporcional a la frecuencia de la radiación, Planck fue capaz de explicar teóricamente algunas características importantes de la radiación térmica de los cuerpos que contradecían la teoría de la radiación derivada de la electrodinámica clásica. En el año 1905 Einstein aplicó la misma idea en un sentido más literal para explicar el efecto fotoeléctrico, es decir, la generación de corriente eléctrica en un metal cuando sobre él incide luz de la frecuencia idónea. La teoría de Einstein llevaba implícita la posibilidad de considerar la luz como realmente compuesta por cuantos o paquetes de energía que mostrarían algunas propiedades como las que clásicamente se esperarían de las partículas.

En este mismo sentido, durante las primeras décadas del s. XX aparecieron una serie de resultados experimentales que detectaban en el mundo atómico comportamientos en las partículas como los que se observaban en los experimentos de óptica con las ondas. Su explicación requería un nuevo planteamiento de la idea de partícula y una teoría específica para la mecánica del mundo microscópico. Esta teoría fue evolucionando desde principios de siglo a partir de hipótesis particulares más o menos *ad hoc* gracias al trabajo de muchos más científicos como Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg o Richard Feynman, y terminó por sintetizarse en lo que hoy conocemos como mecánica cuántica –versión no relativista– y teoría cuántica de campos –que integra la relatividad especial–.

La mecánica cuántica introduce la probabilidad en el mismo núcleo de la física, al postular que el estado de un sistema ya no se describe por un conjunto de coordenadas y momentos, sino por un elemento de un espacio vectorial más abstracto, y

que las magnitudes físicas medibles como las posiciones y los momentos se corresponden con operadores lineales en ese espacio. En el paradigma cuántico existen reglas para calcular la probabilidad de que en una medida se obtenga un valor determinado para un observable, sin que sea físicamente coherente suponer que antes de la medida esa magnitud tenía un valor concreto.

Por otra parte, las varianzas de las distribuciones de probabilidad de algunas magnitudes están relacionadas de forma inversa, de manera que, por ejemplo, cuanto mejor definida esté la posición de una partícula en un estado determinado, peor lo estará su velocidad. Estas relaciones explican el aparente comportamiento ondulatorio de las partículas, a las que se fuerza a un estado espacialmente deslocalizado al medir sus propiedades ondulatorias, y recíprocamente el comportamiento de tipo partícula de las ondas y los campos como el electromagnético. De hecho, los conceptos clásicos de onda y partícula dejan de tener sentido fundamental y quedan como simples aproximaciones útiles a determinados estados particulares de los constituyentes de la realidad.

Aunque la teoría cuántica es determinista en el sentido de que permite calcular la evolución en el tiempo de la distribución de probabilidad de un observable, rompe con el determinismo estricto en el sentido de la física clásica y con la idea de repetibilidad al no permitir, en general, asignarle un solo valor. En muchos sentidos es más rompedora con el lenguaje y con los conceptos de la mecánica newtoniana que la relatividad, y genera múltiples cuestiones interpretativas y filosóficas en las que se sigue progresando en nuestros días. En particular, es aún incierto el significado de la mecánica cuántica en la escala macroscópica y el papel teórico del observador y de los instrumentos de medida en los experimentos en la objetividad y la causalidad, resultando muy problemática, por otra parte, su conciliación con la relatividad general.

La combinación del poder explicativo y predictivo del formalismo cuántico en las escalas espaciales más pequeñas y de un gran desarrollo científico-tecnológico trajo consigo la posibilidad de penetrar en el átomo para describir los constituyentes esenciales de la materia y sus interacciones. La primera partícula subatómica identificada fue el electrón –en el año 1897–, resultado de los experimentos de Joseph John Thompson. El núcleo atómico fue identificado en torno al año 1910 por Ernest Rutherford, que también descubrió su constituyente cargado –el protón– en el año 1917. La partícula neutra que completa la masa del núcleo –el neutrón– fue introducida en la teoría a partir de los experimentos realizados en el año 1932 por James Chadwick.

Por otra parte, en la década de los años treinta del pasado siglo, Enrico Fermi propuso la fuerza nuclear débil, una interacción de muy corto alcance entre determinadas partículas; y en la década de los años setenta del s. XX se desarrolló una teoría para la fuerza nuclear fuerte, que mantiene unido el núcleo superando la repulsión eléctrica entre los protones. En ese momento se sabía ya que protones y neutrones no son partículas elementales, sino que, al igual que una plétora de nue-

vas partículas que se habían descubierto en los rayos cósmicos y en experimentos de alta energía, estaban compuestas por quarks, elementos con carga fraccionaria que interactúan mediante la fuerza nuclear fuerte. La sistematización del conocimiento sobre la materia en los años sesenta y setenta del pasado siglo llevó al surgimiento del modelo estándar de la física de partículas.

El modelo estándar contiene seis sabores de quarks –*up*, *down*, *top*, *bottom*, *charm* y *strange*– y seis leptones, partículas que no interactúan mediante la interacción fuerte –electrón, muón, tauón y sus correspondientes neutrinos, partículas con una masa casi indetectable–, así como cuatro partículas mediadoras o portadoras de las interacciones –fotones para la electromagnética, bosones Z^0 y W^\pm para la débil y gluones para la fuerte–. A estos hay que añadir el bosón de Higgs, que explicaría por qué la mayoría de las partículas tienen masa y, probablemente, ahora se esté cerca de detectar en el LHC del CERN.

Este modelo de la materia es amplio, explica un inmenso volumen de resultados experimentales –desde la física nuclear hasta a la cosmología– y resulta internamente consistente, pero no es aún completo ni plenamente satisfactorio. Una de las más importantes cuestiones abiertas es la integración en el modelo de la gravitación, para la que no existe una teoría cuántica aceptable. Por otra parte, muchos especialistas opinan que existen demasiados parámetros en el modelo estándar y que sería deseable una teoría más fundamental y unificadora. De cualquier manera, este modelo contiene, ciertamente, el resultado más espectacular de la aproximación reduccionista, al permitir la explicación de vastos campos de la realidad en muchas escalas de volumen y tiempo a partir de unas pocas partículas e interacciones.

También partiendo del átomo, pero yendo en sentido contrario, otro de los desafíos para la física en el s. XX fue aplicar la teoría cuántica a los conjuntos de átomos, desde las moléculas a los sólidos o a los líquidos. En estas escalas la única interacción relevante es la electromagnética, y matemáticamente el problema se reduce a la solución de la llamada ecuación de Schrödinger para el estado cuántico de un conjunto de electrones en interacción. Por desgracia, los acoplamientos entre ellos son lo suficientemente complejos para convertir la solución directa en intratable, por lo que se requirieron métodos aproximados.

La primera aproximación útil –pero precaria– se debe a Douglas Hartree y Vladimir Fock, y fue desarrollada en las décadas de los años veinte y treinta del pasado siglo, dando origen a una serie de métodos que hoy se agrupan bajo el nombre de química cuántica. Su precisión es muy elevada, de manera que permite explicar muy adecuadamente resultados experimentales de la física molecular, pero el número de átomos que permite tratar es pequeño, lo que impone límites a esta aproximación completamente reduccionista.

Otro camino menos directo para la solución de la ecuación de Schrödinger de un sistema de muchos electrones es el basado en la teoría del funcional densidad –o DFT–, que parte de ideas matemáticas de Walter Kohn y Lu Jeu Sham, según las

cuales este sistema es equivalente a un conjunto de electrones ficticios no interactuantes entre ellos bajo el efecto de un campo igualmente ficticio en el que se engloban los efectos colectivos. La DFT presenta una imagen menos reduccionista que los métodos descendientes del de Hartee-Fock, y a pesar de que la falta de conocimiento de una forma exacta de este campo efectivo limita la precisión del método, esta es suficiente para haber dado lugar a infinidad de aplicaciones descriptivas y predictivas, a menudo para sistemas de muchos átomos.

Finalmente, hay sistemas físicos –los sólidos cristalinos– que por su regularidad en el espacio pueden ser reducidos analíticamente a términos de unos pocos átomos; su estudio dio lugar a la física del estado sólido.

Incluso en los casos en los que se dispone de un buen modelo teórico, como en los métodos químico-cuánticos, la capacidad de cálculo del ser humano es demasiado limitada para atacar más allá de los problemas numéricos más sencillos. El desarrollo de los ordenadores y la electrónica en el s. XX permitieron a la física superar esta limitación y ampliar enormemente su alcance. Es probable que las primeras utilidades de computadoras a la solución de problemas físicos hayan tenido lugar en la década de los años cuarenta del pasado siglo durante la investigación en armamento nuclear en EE.UU. a cargo de John von Neumann, importante físico y pionero de la teoría y la práctica de la computación.

Durante el resto del siglo los ordenadores se popularizaron y se hicieron progresivamente más pequeños, baratos y accesibles, llevando a la entrada del cálculo numérico y de la simulación computacional en todos los campos de la física, desde los problemas de química cuántica hasta la predicción meteorológica, pasando por problemas de mecánica de fluidos o por la integración de las ecuaciones de Newton para sistemas de muchas partículas, conocidas como dinámica molecular. Esto supuso en sí incluso un cambio de foco en la teoría, que dejó de expresarse solamente en términos de matemáticas continuas, y el final del reinado casi exclusivo del cálculo infinitesimal en la física. La computación requiere de matemática discreta, de aproximaciones numéricas eficaces a cálculos integrales y diferenciales, de soluciones aproximadas para grandes sistemas de ecuaciones, etcétera, y los números se representan en los ordenadores con una precisión finita que hace muy importante conocer y limitar los efectos del error y la deriva numérica.

Otro conjunto de métodos poco aplicado en el pasado y que ha ganado relevancia con la aparición de la computación fue el de los basados en números aleatorios o pseudoaleatorios, recogidos hoy bajo el nombre de métodos de Montecarlo. La integración numérica de sistemas de ecuaciones diferenciales facilitó el estudio de casos más complejos y el descubrimiento de sensibilidades extremas a las condiciones iniciales en tipos de sistemas mucho más generales que los gravitatorios tratados en los siglos anteriores, ayudando al surgimiento de la teoría matemática del caos. De ella se alimentaron muy productivamente, a su vez, la dinámica de fluidos, la termodinámica, la cinética química y otras ramas de las ciencias naturales.

Como parte del desarrollo de la teoría necesaria para la computación, apareció la teoría de la información, que estudia el procesado y la transmisión de señales, la compresión, el cifrado o la inteligencia artificial. Su padre es Claude Shannon, quien comenzó su actividad en la década de los años treinta del s. XX. Shannon re-descubrió la entropía de Boltzmann y Gibbs en un contexto mucho más general, como una medida de la información que falta para poder definir unívocamente el estado de un sistema –de ahí su caracterización popular como medida de desorden–, dándole una estructura puramente deductiva como el único funcional de la distribución de probabilidades que cumple una serie de condiciones conocidas ahora como axiomas de Shannon-Khinchin.

La teoría de la información proporciona un método –el de máxima entropía– para imponer ligaduras a un sistema y deducir su distribución de probabilidad. Partiendo de esto, el conjunto de la física estadística fue resistemizado por Edwin Thompson Jaynes (Jaynes, 2003) como un problema de inferencia bayesiana a partir de una información –la macroscópica– insuficiente.

Por otro lado, la física estadística halló mejor acomodo sobre las bases de la mecánica cuántica que sobre la clásica. Surgieron nuevas distribuciones de probabilidad (Bose-Einstein y Fermi-Dirac), diferentes a la clásica de Boltzmann, que incluyen efectos colectivos en partículas como los electrones y los fotones. El conocimiento que esos avances permitieron alcanzar hizo avanzar campos tan diversos como la astrofísica y la electrónica, a la que la física del estado sólido, junto con la teoría estadística del comportamiento de los conjuntos de muchos electrones, proporciona la base conceptual.

Por lo que respecta a los estudios puramente macroscópicos, la termodinámica tuvo que enfrentarse con la insuficiencia de la teoría construida en el siglo anterior, que se limitaba a los estados de equilibrio y a los procesos cuasiestáticos. La evolución desde este punto de partida se produjo por varias vías, en general tratando de conservar lo posible del formalismo decimonónico. Una de estas vías dio origen a la termodinámica de sistemas próximos al equilibrio, en los que se establecen flujos estacionarios –independientes del tiempo– de magnitudes extensivas debidos a pequeñas variaciones sobre sus valores de equilibrio –bien definidos– que se comportan como fuerzas termodinámicas.

Existen relaciones fenomenológicas lineales entre flujos y fuerzas termodinámicas, y la termodinámica de sistemas próximos al equilibrio ofrece algunos resultados generales sobre los coeficientes implicados y las relaciones entre ellos y con las covarianzas de las magnitudes de equilibrio del sistema gracias a los trabajos, entre otros, de Lars Onsager, Melville Green y Ryogo Kubo, que se desarrollaron entre las décadas de 1930 y 1960.

Una extensión similar es el tratamiento de sistemas espacialmente heterogéneos mediante la combinación de las leyes mecano-clásicas de la dinámica de fluidos y de la termodinámica bajo una hipótesis de equilibrio local, consistente en la existencia de “elementos de fluido” mesoscópicos lo suficientemente pequeños para

tratarlos como entes puntuales para la mecánica, pero que contienen el número suficiente de átomos para poder ser considerados internamente en un equilibrio termodinámico significativo.

Un paso más allá en el distanciamiento del equilibrio llevó al estudio termodinámico de las estructuras disipativas en sistemas autoorganizados debido a Ilya Prigogine y a otros. Este tipo de sistemas físicos –análogos a otros de campos tan diversos como la química, la sociología, la neurofisiología o la biología evolutiva– presentan una fenomenología muy rica debida a que determinados bucles de retroalimentación en sus ecuaciones dinámicas llevan a la aparición en ellos de patrones espaciales o temporales sin necesidad de la intervención de un agente organizador externo. Son ejemplos propiamente físicos las celdas de convección y los sistemas de reacción-difusión.

Aunque en una primera aproximación la aparición espontánea de orden puede parecer un desafío a la segunda ley de la termodinámica, lo cierto es que es en estos casos donde brilla el valor de la entropía como concepto unificador: las estructuras resultantes de la autoorganización se mantienen ordenadas a cambio del consumo de recursos y de la “desordenación” de su entorno, esto es, de la producción de entropía. El estudio de estas estructuras supone actualmente una de las fronteras de la física y un punto de contacto con muchas otras disciplinas, incluyendo la teoría general de sistemas y ramas de la matemática como la geometría fractal –que trata con construcciones con una estructura que se repite a todas las escalas–, la teoría de redes complejas –que estudia la estructura y evolución de sistemas que se pueden representar por un conjunto de nodos con una topología de interconexión–, la estadística de fenómenos extremos y la teoría del caos –de la que se extraen conceptos como el de atractor en el espacio de estados o el de bifurcación debido a un cambio en los parámetros del sistema–.

Entre los resultados termodinámicos de mayor potencia surgidos de la física estadística de sistemas complejos se encuentra el teorema de Denis Evans sobre las fluctuaciones, que se extiende hasta lejos del equilibrio y generaliza la segunda ley de la termodinámica a sistemas posiblemente autoorganizados de todas las escalas. Los sistemas autoorganizados son terreno fértil para todo tipo de fenómenos emergentes y estructuraciones a múltiples niveles, que dificultan enormemente la separación de un sistema en componentes y que limitan la utilidad de las aproximaciones reduccionistas tradicionales.

El conjunto de cambios en el paradigma físico ocurridos en el s. XX lleva a esta ciencia a su punto actual. Resulta claro que nos hallamos en el momento de la historia humana con mayor número de individuos dedicados a la ciencia, con lo cual todas sus disciplinas se encuentran en un estado de continua efervescencia, circunstancia que no puede menos que considerarse muy afortunada teniendo en cuenta los enormes retos teóricos y prácticos que es necesario afrontar.

Considerando solo la física, los desafíos se presentan en ambos extremos del espectro de la complejidad, puesto que abarcan desde la compleción del programa

reduccionista de la explicación de la estructura de la materia, mediante la superación del modelo estándar y la unificación de las interacciones conocidas, hasta la comprensión de la geometría global del espacio-tiempo y su papel en el destino del universo. Sin embargo, hay motivos fundados para suponer que es en el límite complejo donde existen más posibilidades de expansión, ya que las estructuras autoorganizadas fuera del equilibrio parecen presentarse en la materia a todos los niveles, ya sea en forma de galaxias, de dominios magnéticos o de mitocondrias celulares.

La adopción de un marco metodológico adecuado, que combine la elucidación de la reducción más útil a elementos constituyentes con descripciones dinámicas de distintos grados de abstracción y globalidad, debe ser el camino para superar los límites conceptuales y computacionales de la aproximación exclusivamente reduccionista, ya que esta sigue siendo una barrera en el estudio de los sistemas complejos. En su avance hacia esa meta, la física establecerá, sin duda, productivas sinergias con otras ciencias que le permitirán exportar sus métodos a ámbitos tradicionalmente fuera de su dominio. Un buen deseo para el futuro es que tiempo después, vista con perspectiva, la división del conocimiento humano en miles de disciplinas se vea como un efecto de sesgo debido a limitaciones metodológicas que nos obligaron a centrarnos en aquello que era más fácil tratar desde cada una, y que fueron superadas para avanzar en el entendimiento de la realidad natural y humana, que es una y la misma.

BIBLIOGRAFÍA¹

- ALTMANN, E.G. (2007): *Intermittent Chaos in Hamiltonian Dynamical Systems*. (Doctoral Thesis). Dresden: Max Planck Institut.
- ARANA, J. (1991): “Traducción e introducción de *Defensa de la revelación divina contra las objeciones del librepensador*, de Leonhard Euler”, *Thémata, Revista de Filosofía*, 8, pp. 195-222.
- BUSCHMAN, T.J.; SIEGEL, M.; ROY, J.E.; MILLER, E.K. (2011): “Neural Substrates of Cognitive Capacity Limitations”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (27), pp. 11252-11255.
- CALLEN, H.B. (1985): *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. New York, NY: Wiley.
- CONNELL, R.J. (1995): *Nature's Causes*. New York, NY: Lang.
- EARMAN, J. (1995): *Bangs, Crunches, Whimpers, and Shrieks: Singularities and Acausalities in Relativistic Spacetimes*. New York, NY: Oxford University Press.
- GILSON, E. (1985): *La filosofía en la Edad Media*. Madrid: Gredos.

¹ Tratándose este artículo de un trabajo de tipo histórico de amplio espectro acerca de un período correspondiente a la totalidad de la historia humana, sería sencillo construir una lista de referencias con una longitud superior a la del propio texto. Atendiendo a razones de extensión y teniendo en cuenta que muchos de los datos aquí recogidos pueden encontrarse en múltiples fuentes corrientes –como enciclopedias–, se ha optado por listar solo aquellas referencias que contienen datos relativamente menos conocidos, con criterio inevitablemente subjetivo.

- GINGERICH, D. (2004): *The Book that Nobody Read*. New York, NY: Walker.
- GOPNIK, A. (2010): "How Babies Think", *Scientific American*, (July), pp. 76-81.
- GRANDY, W.T. (2008): *Entropy and the Time Evolution of Macroscopic Systems*. New York, NY: Oxford University Press.
- GUICCIARDINI, N. (2011): *Newton*. Roma: Carocci.
- JAYNES, E.T. (1995): *Probability Theory: The Logic of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- NEEDHAM, J. (1986): *Science and Civilization in China*. Taipei: Caves.
- SALIBA, G. (2007): *Islamic Science and the Making of the European Renaissance*. Cambridge, MA: MIT Press.
- TRUESDELL, C.A. (1980): *The Tragicomical History of Thermodynamics*. New York, NY: Springer.
- WORMALD, B.H.G. (1993): *Francis Bacon: History, Politics, and Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- XIA, Z. (1992): "The Existence of Noncollision Singularities in Newtonian Systems", *Annals of Mathematics*, 135, pp. 411-468.