

Arieh Ben-Naim



El mito de la segunda ley de la termodinámica y el sentido común

Uno de los misterios más insondables de la física moderna

METATEMAS
LIBROS PARA PENSAR LA CIENCIA

Para los poco versados en ciencia, la «entropía» —término de origen griego que significa «transformación»— es un extraño concepto que tiene que ver, vagamente, con el calor y la energía, el paso del orden al desorden, el aumento de la incertidumbre y la irreversibilidad del caos. Sea como fuere, la entropía siempre parece estar creciendo.

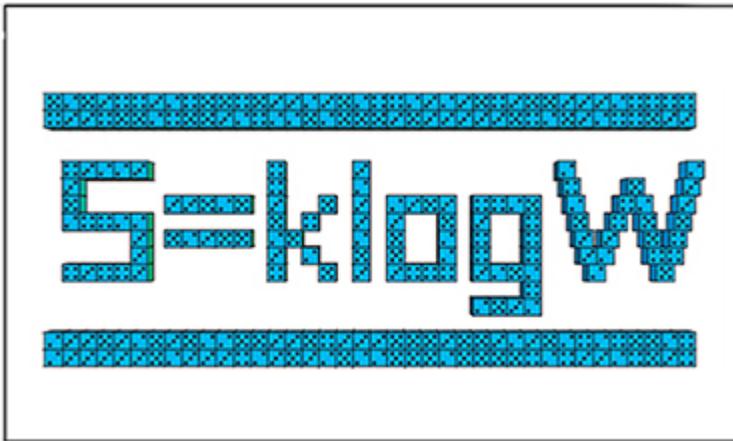
Los científicos, por su parte, precisan que la célebre segunda ley de la termodinámica (la que enuncia la entropía) establece que, en cualquier proceso espontáneo, es imposible convertir completamente el calor en trabajo, pues se pierde parte del calor. Pero por qué la naturaleza se comporta de este modo sigue siendo objeto de polémica, hasta el punto de que, en más de una ocasión, se ha dicho que la ley de la entropía constituye uno de los misterios más profundos de la física moderna.

Escrito con el máximo rigor pero sin tecnicismos, este libro tiene como principal objetivo que el lector aplique sencillamente el sentido común y descubra que una de las leyes de mayor alcance en el universo es de una claridad meridiana.

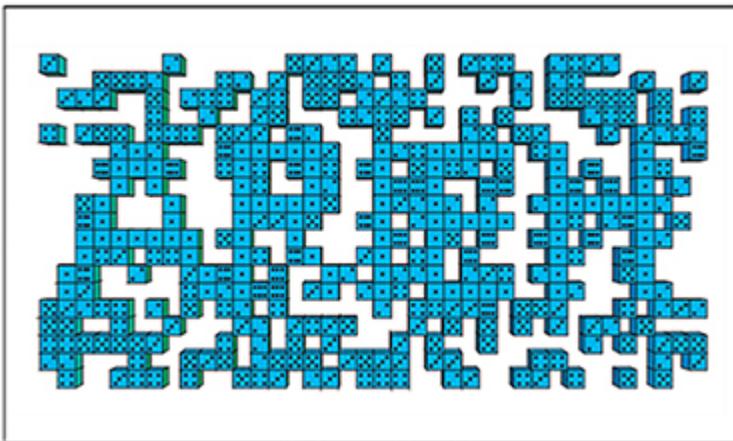
Explica asimismo la fascinante evolución de la noción de entropía a partir de los trabajos de Sadi Carnot, Clausius, Lord Kelvin o el gran Ludwig Boltzmann. Además, BEN-NAIM, una autoridad mundial en el campo de la termodinámica, formula una sugestiva interpretación de la entropía apoyándose en la noción de pérdida de información.

Este libro está dedicado a Ludwig Boltzmann

Fotografía tomada por el autor en Viena, septiembre de 1978.



Ordenado



Desordenado

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento y aprecio a todos los que se han prestado a leer partes o la totalidad del manuscrito y me han ofrecido sus comentarios y críticas. En primer lugar, quiero dar las gracias a mis amigos y colegas Azriel Levy y Andrés Santos por su meticulosa lectura y examen del manuscrito entero. Me han ahorrado errores embarazosos que yo no había detectado o no podía detectar. Gracias también a Shalom Baer, Jacob Bekenstein, Art Henn, Jeffrey Gordon, Ken Harris, Marco Pretti, Samuel Sattath y Nico van der Vegt, quienes leyeron partes del manuscrito y me hicieron comentarios valiosos. Por último, quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi compañera Ruby por su paciencia a la hora de pelearse con mi ilegible letra y corregir y recorregir el manuscrito. Sin su amable ayuda este libro no habría visto la luz de la publicación. El proyecto tuvo un largo periodo de incubación. La redacción del libro comenzó en Burgos y se completó en La Jolla, California.

Arieh Ben-Naim Departamento de Química Física Universidad Hebrea de Jerusalén, Israel.

Prefacio

Desde que escuché la palabra «entropía» por primera vez, me fascinó su naturaleza misteriosa. Recuerdo vívidamente mi primer encuentro con la entropía y con la segunda ley de la termodinámica. Fue hace más de cuarenta años. Recuerdo el aula, la profesora, incluso el lugar donde me sentaba: en primera fila, frente a la tarima donde ella estaba de pie.

Tras explicar el ciclo de Carnot, la eficiencia de los motores térmicos y las diversas formulaciones de la segunda ley, la profesora introdujo la intrigante y misteriosa magnitud conocida como *Entropía*. Me sentí confundido y desconcertado. Hasta entonces ella había expuesto conceptos con los que estábamos familiarizados: calor, trabajo, energía y temperatura. Pero ahora, de pronto, nos presentaba una palabra desconocida, nunca oída antes por nosotros, y que denotaba un concepto enteramente nuevo. Esperé pacientemente a poder preguntar algo, aunque no estaba seguro de cuál sería la pregunta. ¿Qué es esa cosa llamada entropía y por qué aumenta siempre? ¿Es algo que podemos ver, tocar o percibir con alguno de nuestros sentidos? Al acabar su exposición, la profesora exclamó: «Si no entienden la segunda ley, no se desanimen. Están en buena compañía. Por ahora no están capacitados para entenderla, pero lo estarán cuando estudien termodinámica estadística el próximo curso». Con este comentario final eludía cualquier demanda de aclaración. La atmósfera quedó cargada

de misterio. Todos permanecemos en silencio, con nuestra ansia de comprender insatisfecha.

Años más tarde comprobé que la profesora tenía razón al decir que la mecánica estadística alberga las claves para comprender la entropía, y que sin ella no hay manera de entender lo que hay detrás del concepto de entropía y de la segunda ley. Pero en aquel momento todos sospechamos que la profesora había optado por una elegante escapatoria de preguntas embarazosas que no podía responder, así que aceptamos su consejo sin convencimiento.

Aquel año nos enseñaron a *calcular* los cambios de entropía en numerosos procesos, desde la expansión de un gas ideal hasta la mezcla de gases, la transferencia de calor de un cuerpo caliente a uno frío, y muchos otros procesos espontáneos. Nos ejercitamos en el *cálculo* de incrementos de entropía, pero de hecho nos quedamos sin captar su esencia. Hacíamos los cálculos con destreza profesional, tratando la entropía como una magnitud más, pero en lo más hondo sentíamos que el concepto quedaba envuelto en un denso aire de misterio.

¿Qué es esa cosa llamada entropía? Sabíamos que se definía sobre la base del calor transferido (reversiblemente) dividido por la temperatura absoluta, pero no era ni una cosa ni otra. ¿Por qué aumenta siempre y de qué combustible se sirve para propulsarse hacia arriba? Estábamos acostumbrados a las leyes de conservación, que se conciben como más «naturales». La materia y la energía no pueden generarse de la nada, pero la entropía parece desafiar el sentido común. ¿Cómo puede una magnitud física «producir» inexorablemente más de sí misma sin ninguna fuente de alimentación aparente?

Recuerdo haber oído en una de las lecciones de química física que la entropía de la disolución de argón en agua es grande y negativa^[1]. La razón ofrecida era que el argón *incrementa* la *estructura* del agua. Un incremento de estructura equivalía a un incremento de orden, y la entropía se

asociaba vagamente con el desorden, así que se suponía que eso explicaba el *decremento* de entropía. En aquella lección, nuestro profesor nos explicó que la entropía de un sistema *puede* disminuir cuando el sistema está acoplado a otro (como un termostato) y que la ley del aumento incesante de la entropía sólo vale para un sistema aislado (que no interactúa con su entorno). Este hecho no hacía más que aumentar el misterio. No sólo no conocemos la *fente* que alimenta el incremento de entropía, sino que, en principio, no hay fuente alguna, ningún mecanismo ni aporte externo. Además, ¿cómo se ha deslizado la idea de «estructura» u «orden» en la discusión de la entropía, un concepto definido en relación con *calor y temperatura*?

Al año siguiente aprendimos mecánica estadística, así como la relación entre la entropía y el número de estados, la famosa fórmula esculpida en la lápida de Ludwig Boltzmann en Viena^[2]. La relación de Boltzmann proporcionaba una interpretación de la entropía sobre la base del desorden, y del aumento de la entropía como el proceder de la naturaleza del orden al desorden. Ahora bien, ¿por qué debería un sistema pasar del orden al desorden? Éstos son conceptos intangibles, mientras que la entropía se *definía* a partir del calor y la temperatura. El misterio del incremento perpetuo del desorden no resolvía el misterio de la entropía.

Enseñé termodinámica y mecánica estadística durante muchos años, a lo largo de los cuales me di cuenta de que el misterio que envuelve la segunda ley no puede disiparse dentro del marco de la termodinámica clásica (o, mejor, la formulación no atomista de la segunda ley; véase el capítulo 1). Por otro lado, al contemplar la segunda ley desde el punto de vista molecular, comprendí que no había misterio alguno.

Creo que el punto decisivo en mi propia comprensión de la entropía (y, por ende, mi capacidad de explicar el concepto a mis alumnos) surgió al escribir un artículo sobre

la entropía de mezcla y la entropía de asimilación. Sólo entonces comprobé que podía ver a través de la neblina que envolvía la entropía y la segunda ley. Mientras redactaba el artículo, se me revelaron dos rasgos clave de la teoría atómica de la materia que eran cruciales para dispersar las últimas brumas que rodeaban la entropía: los grandes (inimaginablemente grandes) números y la indistinguibilidad de las partículas que constituyen la materia.

Una vez disipada la niebla, todo resultaba claro, incluso obvio. El comportamiento de la entropía, antes tan difícil de comprender, quedaba reducido a una cuestión de simple sentido común.

Es más, de pronto comprendí que *no hace falta* estudiar mecánica estadística para comprender la segunda ley. Lo que descubrí es que *todo* lo que se necesita de la mecánica estadística es la *formulación atomística* de la entropía. Esta constatación fue una motivación poderosa para escribir este libro, que está dirigido a los que no saben nada de mecánica estadística.

Mientras lo escribía, me pregunté más de una vez en qué momento exacto decidí que valía la pena hacerlo. Pienso que hubo tres momentos clave.

El primero fue el reconocimiento de los hechos cruciales e indispensables de que la materia está constituida por un número gigantesco de partículas y de que dichas partículas son mutuamente indistinguibles. Estos hechos han sido bien conocidos y reconocidos desde hace al menos un siglo, pero creo que los autores que han escrito sobre la segunda ley no los han destacado lo bastante.

El segundo momento fue cuando, al leer los dos libros de Brian Greene^[3], me tropecé con estas palabras referidas a la entropía y la segunda ley^[4]:

Entre las características de la experiencia común que se han resistido a la explicación completa está una que se en-

marca en los misterios sin resolver más profundos de la física moderna.

No podía creer que un autor como Greene, capaz de explicar de manera tan brillante y sencilla tantos conceptos difíciles de la física moderna, hubiera escrito aquello.

El tercer momento tiene que ver más con la estética que con la sustancia. Después de todo, he estado enseñando termodinámica estadística durante muchos años, y a menudo he recurrido a juegos de dados para ilustrar lo que ocurre en un proceso espontáneo. Pero la correspondencia entre las caras cambiantes de los dados y las partículas que se apresuran a ocupar todo el espacio accesible durante un proceso de expansión siempre me pareció lógicamente, y quizás estéticamente, insatisfactoria. Como veremos en el capítulo 7, se me ocurrió establecer una correspondencia entre dados y partículas, y entre los resultados de las tiradas de dados y las *localizaciones* de las partículas. Esta correspondencia es correcta. Siempre podemos atribuir la etiqueta «D» a las partículas situadas en el lado derecho y la etiqueta «I» a las situadas en el lado izquierdo. Pero hasta que no me puse a escribir el mencionado artículo sobre las entropías de mezcla y de asimilación no «descubrí» un proceso diferente para el que esta correspondencia puede hacerse más «natural» y satisfactoria. Es lo que se conoce como desasimilación. Se trata de un proceso espontáneo donde el cambio de entropía se debe únicamente a que las partículas adquieren una nueva identidad. Ahora la correspondencia era entre un dado y una partícula, y entre la *identidad* del resultado de la tirada de un dado y la *identidad* de la partícula. Esta correspondencia me parecía perfecta y más gratificante estéticamente, lo que la hacía digna de publicarse.

En este libro he evitado deliberadamente los tecnicismos. En vez de explicar lo que es la entropía, cómo varía y, lo más importante, por qué sólo lo hace en un sentido, simplemente guiaré a los lectores para que «descubran» la se-

gunda ley y obtengan la satisfacción de desvelar por sí mismos el misterio que la rodea.

La mayor parte del tiempo estaremos jugando, o imaginando que jugamos, a los dados. Partiremos de un dado, luego dos, diez, cien, mil, etcétera, para ir ejercitando la capacidad de analizar lo que ocurre. Averiguaremos qué es eso que cambia con el tiempo (o con el número de tiradas) y cómo y por qué cambia. Para entonces ya seremos capaces de extrapolar lo aprendido con un número pequeño de dados a sistemas constituidos por un número incontable de elementos.

Tras experimentar la expresión de la segunda ley en el mundo de los dados y haber comprendido plenamente lo que ocurre, queda un último paso que daremos en el capítulo 7. Ahí *traduciremos* lo aprendido con los dados al mundo experimental real. Una vez que los lectores hayan captado la evolución de los juegos de dados, estarán en condiciones de entender la segunda ley de la termodinámica.

He escrito este libro pensando en lectores que no saben nada de ciencia ni matemáticas. El único prerrequisito para leer este libro es el mero sentido común, y la voluntad de aplicarlo.

Una advertencia antes de seguir leyendo: «sentido común» no significa fácil o elemental.

Hay dos «destrezas» que el lector debe adquirir. La primera es aprender a pensar números grandes, fantásticamente grandes, inconcebiblemente grandes y más allá. Nos aplicaremos a esto en el capítulo 2. La segunda es algo más sutil. Tendremos que aprender a distinguir entre un evento (o configuración, o estado) *específico* y un evento (o configuración, o estado) *inespecífico*. Aunque suenen técnicos, no hay que dejarse intimidar por estos términos^[5]. Ofreceré ejemplos de sobra para familiarizarnos con ellos, porque son indispensables para comprender la segunda

ley. Si el lector tiene dudas de su capacidad para entender este libro, le sugiero un test simple.

Al final del capítulo 2 encontrará dos cuestionarios pensados para evaluar su comprensión de los conceptos «específico» e «inespecífico».

Si responde correctamente todas las preguntas, puedo asegurarle que entenderá todo el libro sin problemas.

Si se ve incapaz de contestarlas o da respuestas incorrectas, no se desanime. Consulte las respuestas que doy. Si le satisfacen aunque no las haya encontrado por sí mismo, creo que está en condiciones de leer y entender el libro, aunque le costará un poco más.

Si desconoce las respuestas y sigue perdido aun después de haberlas consultado, eso no significa que el libro esté más allá de su capacidad. Le sugiero que lea detenidamente el capítulo 2 y se ejercite en el pensamiento *probabilístico*. Si necesita más, le invito a escribirme y prometo ayudarle en lo que pueda.

Una vez más, no hay que dejarse intimidar por el término «probabilístico». Si al lector no le sorprende que nunca le haya tocado un premio grande de la lotería, aunque tenga por costumbre comprar décimos, entonces está pensando «probabilísticamente». Para sentirnos más cómodos con esta formidable palabra, permítaseme contar una pequeña historia.

Mi padre solía comprar lotería cada fin de semana; lo hizo durante casi sesenta años. Estaba seguro de que alguien «ahí arriba» le favorecería y haría que le tocara el premio gordo. Una y otra vez intenté explicarle que sus posibilidades de conseguir un premio importante eran reducidas, de hecho menos del 0,01 por ciento. Pero él hacía oídos sordos. Si acertaba siete u ocho números (de diez) se mofaba de mí por no haber sido capaz de ver los «signos» claros e inequívocos que había recibido de Él. Estaba convencido de ir por buen camino. Una semana tras otra, sus esperanzas subían y bajaban según su número de aciertos o, aún

mejor, según los signos que le había mostrado la Providencia. Poco antes de morir, a la edad de noventa y seis años, me dijo que estaba muy decepcionado y enfadado porque se sentía traicionado por la deidad en la que había creído toda su vida. Me entristeció comprobar que seguía sin querer o poder pensar probabilísticamente.

Quienes nunca hayan oído hablar de la entropía o la segunda ley de la termodinámica pueden leer la descripción breve y carente de matemáticas de las diversas formulaciones y manifestaciones de la segunda ley en el capítulo 1. En el capítulo 2 expongo los elementos básicos de la probabilidad y la teoría de la información que el lector podría necesitar para expresar sus hallazgos en términos probabilísticos. Quiero subrayar que los fundamentos tanto de la teoría de la probabilidad como de la teoría de la información se inspiran sólo en el mero sentido común. No hace falta saber nada de matemáticas, física o química. Sólo hay que saber contar (matemáticas), saber que la materia está hecha de átomos y moléculas (física y química) y que los átomos son indistinguibles (¡esto sí es física avanzada!). Todo esto se explica en el capítulo 2. En los capítulos 3-5 nos dedicaremos a jugar con un número variable de dados. Veremos lo que pasa y sacaremos conclusiones. Tendremos numerosas ocasiones de «experimentar» la segunda ley con los cinco sentidos, un minúsculo reflejo de la inmensa variedad de manifestaciones de la segunda ley en el mundo físico real. En el capítulo 6 recapitularemos nuestros hallazgos de forma fácil de traducir al lenguaje de un experimento real. El capítulo 7 está dedicado a describir dos experimentos simples que tienen que ver con el incremento de entropía; todo lo que hay que hacer es establecer la correspondencia entre el número de dados y el número de partículas en una caja, entre los diferentes resultados de la tirada de un dado y los estados de las partículas. Una vez establecida esta correspondencia, es fácil aplicar lo aprendido a partir de los

juegos de dados para entender la segunda ley en el mundo real.

Después de acabar de leer el capítulo 7, entenderemos lo que es la entropía y cómo y por qué se comporta como lo hace. Veremos que no hay ningún misterio en su comportamiento: simplemente es de sentido común.

Tras haber entendido esos dos procesos concretos, veremos con claridad cómo funciona la segunda ley. Por supuesto, hay muchos más procesos «gobernados» por la segunda ley. Poner de manifiesto su intervención en tales procesos no siempre es algo tan simple y directo. Para ello hay que recurrir a las matemáticas. Hay muchos más procesos de gran complejidad donde *creemos* que interviene la segunda ley, pero hasta ahora no tenemos una demostración matemática de su papel. Los procesos biológicos son demasiado complejos para admitir un análisis molecular sistemático. Aunque soy muy consciente de que muchos autores apelan a la segunda ley en conjunción con diversos aspectos de la vida, creo que, en la coyuntura actual, esto es muy prematuro. Estoy completamente de acuerdo con Morowitz^[6] cuando escribió: «El empleo de la termodinámica en biología tiene una larga historia de confusión».

En el último capítulo he incluido algunas reflexiones y especulaciones personales. No son opiniones universalmente aceptadas, ni mucho menos, y las críticas serán bienvenidas (pongo mi dirección de correo electrónico a disposición de los lectores).

Mi objetivo general al escribir este libro es dar respuesta a dos cuestiones asociadas a la segunda ley: *qué* es la entropía y *por qué* cambia sólo en un sentido (desafiando en apariencia la simetría temporal de las otras leyes de la física).

La segunda cuestión es la más importante, y el meollo del misterio asociado a la segunda ley. Espero convencer al lector de que:

- 1) La segunda ley es básicamente una ley de probabilidad.
- 2) Las leyes de probabilidad son básicamente leyes de sentido común.
- 3) De (1) y (2) se sigue que la segunda ley es básicamente una ley de sentido común, y nada más.

Por supuesto, admito que las proposiciones (1) y (2) han sido enunciadas muchas veces por muchos autores. La primera está implícita en la formulación de Boltzmann de la segunda ley. La segunda fue expresada por Laplace, uno de los padres de la teoría de la probabilidad. Desde luego, no puedo pretender que soy el primero en enunciarlas. Pero quizá sí pueda reclamar la autoría de la idea de que la relación de «basicidad» que permite deducir (3) de (1) y (2) es una relación transitiva.

La primera cuestión tiene que ver con el *significado* de la entropía. Durante casi una centuria, los científicos han especulado sobre este asunto. La entropía se ha interpretado como una medida del desorden, la confusión, la desorganización, el caos, la incertidumbre, la ignorancia, la información perdida y cosas por el estilo. Hasta donde yo sé, el debate continúa. Incluso en libros recientes, científicos importantes expresan opiniones diametralmente opuestas. En el capítulo 8 expongo en detalle mi propia postura. Aquí me limitaré a adelantar que la entropía puede *identificarse*, formal y conceptualmente, con una medida específica de la información. Se trata de una idea que está lejos de ser universalmente aceptada. La esencia de la dificultad para admitir esta identidad es que la entropía es una magnitud físicamente medible que tiene unidades de energía dividida por temperatura y, por lo tanto, es una magnitud *objetiva*. La información, en cambio, se considera una magnitud adimensional y nebulosa que expresa algún atributo humano del estilo del conocimiento, la ignorancia o la incertidum-

bre, lo que la convierte en una magnitud altamente *subjetiva*^[7].

A pesar del carácter a primera vista irreconciliable entre una entidad objetiva y una entidad subjetiva, sostengo que la entropía es información. Su carácter objetivo o subjetivo es una cuestión que se adentra en la filosofía o la metafísica. Mi opinión es que ambas magnitudes son objetivas. Pero si uno piensa que una es subjetiva, tendrá que admitir que la otra también debe serlo.

La identidad por la que abogo tiene una contrapartida, y es que hay que redefinir la temperatura a partir de la energía. Ello requerirá el sacrificio de la constante de Boltzmann, que debería haber sido erradicada del vocabulario de la física. Esta supresión reportará unos cuantos beneficios. Para los propósitos de este libro, la ausencia de la constante de Boltzmann convierte la entropía en una magnitud adimensional e *idéntica* a una medida de información. Esto «exorcizará», de una vez por todas, el misterio de la entropía.

Me atrevo a prometer lo siguiente:

- 1) A los lectores que tengan alguna noción de la entropía y les haya parecido misteriosa, les prometo desmitificarla.
- 2) los que nunca hayan oído hablar de la entropía, les prometo inmunidad ante cualquier mistificación futura del concepto.
- 3) A los lectores que hayan oído hablar de la entropía pero no la hayan estudiado, les prometo que si después de haber leído este libro oyen a gente hablar del profundo misterio en torno a la entropía, *deberían* sentirse confusos e intrigados, no por la entropía ni la segunda ley, sino por todo el alboroto sobre el «misterio» de la entropía.
- 4) Finalmente, quienes lean este libro de manera atenta y aplicada y hagan los pequeños deberes