



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Mathematics Letters

journal homepage: www.elsevier.com/locate/aml

Una reconsideración de la Segunda Ley

Granville Sewell*

Departamento de Matemáticas, Universidad de Texas, El Paso, Estados Unidos

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido 21 octubre 2010

Recibido en forma revisada 14 enero 2011

Aceptado 19 enero 2011

Palabras clave:

Entropía

Segunda ley

RESUMEN

Se suele argumentar que el espectacular aumento de orden que ha tenido lugar sobre la Tierra no viola la segunda ley de la termodinámica porque la Tierra es un sistema abierto, y que cualquier cosa puede suceder en un sistema abierto en tanto que los aumentos de entropía fuera del sistema compensen las disminuciones de entropía en el interior del sistema. Sin embargo, si definimos «X-entropía» como la entropía asociada con cualquier componente X que se difunde (por ejemplo, X podría ser calor), y, por cuanto la entropía es una medida de desorden, «X-orden» como el negativo de X-entropía, un examen más detenido a las ecuaciones para el cambio de entropía enseña que no sólo nos dicen que el X-orden no puede aumentar en un sistema cerrado, sino que también nos dicen que en un sistema abierto el X-orden no puede aumentar más rápidamente de lo que es importado a través del límite. Así, las ecuaciones para el cambio de entropía no sustentan la ilógica idea de la «compensación»; en lugar de ello, ilustran la tautología de que «si un aumento de orden es extremadamente improbable cuando un sistema está aislado, seguirá siendo extremadamente improbable cuando el sistema sea abierto, a no ser que entre alguna cosa que lo haga no extremadamente improbable». Así, a no ser que estemos dispuestos a argumentar que la entrada de energía solar en la tierra hace que el surgimiento de naves espaciales, computadoras e Internet no sea extremadamente improbable, hemos de llegar a la conclusión de que la segunda ley ha resultado realmente violada en este caso.

© 2011 Elsevier Ltd. Todos los derechos reservados.

1. Compensación

Probablemente será justo decir que la perspectiva mayoritaria de la ciencia actual mantiene que la física explica toda la química, que la química explica toda la biología, y que la biología explica la mente humana; y, por tanto, que la física por sí sola explica la mente humana, y todo lo que ella realiza.

De hecho, como hay sólo cuatro fuerzas conocidas en física (la interacción gravitatoria, la interacción electromagnética, y las interacciones nucleares fuerte y débil), esto significa que estas cuatro fuerzas tienen que explicar todo lo que ha sucedido sobre la tierra, según esta perspectiva mayoritaria. Por ejemplo, Peter Urone, en *College Physics* [Física Universitaria] [1], escribe que «Una de las más extraordinarias simplificaciones en física es que sólo cuatro fuerzas distintivas explican todos los fenómenos conocidos».

En mi artículo publicado en el año 2000 en *Mathematical Intelligencer*, «A Mathematician's View of Evolution [La perspectiva de un matemático acerca de la evolución]» [2], presenté razones contrarias a tal opinión, haciendo ver que el aumento en orden que ha tenido lugar sobre la Tierra parece violar la segunda ley de la termodinámica de una forma espectacular. Escribí entonces:

Me imagino visitando la Tierra cuando era joven y volviendo ahora para descubrir carreteras con automóviles corriendo por ellas, aeropuertos con aviones a reacción, y altos edificios repletos de complicados equipamientos, como televisiones, teléfonos y computadoras. Luego me imagino la construcción de una gigantesca computadora que comienza con las condiciones iniciales en la tierra hace 4 mil millones de años y que trata de simular los efectos que las cuatro fuerzas conocidas de la física tendrían que ejercer sobre cada átomo y sobre cada partícula subatómica sobre nuestro planeta. Si ejecutásemos una simulación así hasta nuestro tiempo presente, ¿Predeciría acaso que las fuerzas fundamentales de la Naturaleza reorganizarían las partículas básicas de la Naturaleza para formar

* Tel.: +1 915 747 6762; fax: +1 915 747 6502.

Correo electrónico: sewell@utep.edu.Traducción del inglés: © Santiago Escuin 2012 - s.escuin@gmail.com

0893-9659/\$ - see front matter © 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

doi:10.1016/j.aml.2011.01.019

bibliotecas llenas de enciclopedias, de textos científicos y de novelas, plantas nucleares, portaaviones con reactores supersónicos aparcados en la cubierta, y computadoras conectadas a impresoras láser, monitores y teclados? Si representásemos gráficamente las posiciones de los átomos al final de la simulación, ¿descubriríamos que se habían formado autos y camiones, o que habían aparecido superordenadores? Naturalmente que no, y no creo que añadir luz solar al modelo serviría de gran ayuda.

Cualquiera que haya presentado un argumento así está familiarizado con la respuesta típica: La tierra es un sistema abierto, recibe energía procedente del sol, y la entropía puede disminuir en un sistema abierto, siempre y cuando esté «compensado» de alguna manera por un incremento comparable o mayor fuera del sistema. Por ejemplo, Isaac Asimov, en la revista del Smithsonian [3], reconoce este evidente problema:

Uno puede argumentar, naturalmente, que el fenómeno de la vida puede ser una excepción [a la segunda ley]. La vida en la tierra ha ido haciéndose constantemente más compleja, más versátil, más elaborada, más ordenada, a lo largo de los miles de millones de años de la existencia del planeta. Desde una total ausencia de vida, se desarrollaron moléculas vivientes, luego células vivientes, luego conglomerados vivientes de células, gusanos, vertebrados, mamíferos, y finalmente el Hombre. Y en el Hombre hay un cerebro de 1,4 kilogramos de peso que, hasta donde sepamos, es la formación de materia más compleja y ordenada en el universo. ¿Cómo pudo desarrollarse el cerebro humano a partir del légamo original? ¿Cómo pudo tener lugar un incremento tan ingente de orden (y por ello aquella ingente disminución en entropía)?

Pero Asimov concluye que la segunda ley no resulta realmente violada, porque

Eliminemos el sol, y el cerebro humano no se habría desarrollado . . . Y en los miles de millones de años que necesitó el cerebro humano para desarrollarse, el aumento en entropía que tuvo lugar en el sol fue mucho mayor; excedió en mucho, muchísimo, a la disminución que queda representada por la evolución necesaria para desarrollar el cerebro humano.

De forma parecida, Peter Urone escribe en *College Physics* [1]:

Algunas personas usan mal la segunda ley de la termodinámica, expresada en términos de entropía, para decir que la existencia y la evolución de la vida violan la ley y que por ello demandan una intervención divina. ... Es cierto que la evolución de la vida a partir de materia inerte hasta su forma presente representa una gran disminución en entropía para sistemas vivos. Pero siempre es posible que la entropía de una parte del universo disminuya, a condición de que el cambio total en entropía del universo aumente.

Algunos otros autores parecen sentirse un poco tontos sugiriendo que los aumentos en entropía en otros lugares en el universo podrían compensar disminuciones de la misma sobre la Tierra, de modo que ponen cuidado en explicar que esta «compensación» sólo funciona localmente; por ejemplo, en *Order and Chaos* [Orden y Caos] [4], los autores escriben:

En un cierto sentido, el desarrollo de la civilización puede parecer una contradicción a la segunda ley. ... Incluso aunque la sociedad pueda realizar reducciones locales de entropía, la tendencia general y universal de aumento de la entropía abruma fácilmente a los anómalos pero importantes esfuerzos del hombre civilizado. Cada disminución localizada de entropía debida a actividad humana o de máquinas va acompañada de un mayor aumento en entropía en sus alrededores, con lo que se mantiene el necesario aumento en la entropía total.

2. Las ecuaciones del cambio en entropía

Naturalmente, toda la idea de compensación, sea por sucesos distantes o cercanos, no tiene sentido lógico: un suceso extremadamente improbable no se hace menos improbable simplemente por la ocurrencia de sucesos «compensadores» en otras partes. Según este razonamiento, la segunda ley no impide que la chatarra se reorganice para formar una computadora en una habitación, a condición de que dos computadoras en la siguiente estancia se estén deteriorando para formar chatarra —con la puerta abierta.¹ (¡O que la entropía térmica en la habitación contigua esté aumentando, aunque no sé de cierto a cuánta velocidad tiene que aumentar para compensar la construcción de una computadora!)

Para comprender el origen de este argumento, tenemos que considerar las ecuaciones para el cambio de entropía tal como aparecen en el Apéndice D de mi libro de texto publicado en 2005 por John Wiley[5], y previamente en mi artículo de 2001 publicado en *Mathematical Intelligencer*[6], «Can ANYTHING Happen in an Open System? [¿Puede suceder CUALQUIER COSA en un sistema abierto?]

Consideremos la difusión (conducción) de calor en un sólido, R , con una distribución de temperatura absoluta $U(x, y, z, t)$. La primera ley de la termodinámica (conservación de energía) exige que

$$Q_t = -\nabla \cdot \mathbf{J}, \quad (1)$$

donde Q es la densidad de energía térmica ($Q_t = c\rho U_t$) y \mathbf{J} es el vector de flujo de calor. La segunda ley exige que el flujo vaya en una dirección en la que la temperatura esté decreciendo, es decir,

$$\mathbf{J} \cdot \nabla U \leq 0. \quad (2)$$

La Ec. (2) dice simplemente que el calor fluye de las regiones calientes a las frías —porque las leyes de la probabilidad favorecen una distribución más uniforme de la energía térmica.

¹ Se puede observar que algo tiene que estar efectivamente entrando o saliendo de un sistema antes que pueda considerarse «abierto», pero si uno puede mirar en el interior de la habitación contigua, está entrando al menos una radiación electromagnética, y esto es lo que convierte a la tierra en un sistema abierto!

La «entropía térmica» es una cantidad que se usa para medir la aleatoriedad en la distribución del calor. La tasa de cambio de la entropía térmica, S_t , va dada por la definición usual como

$$S_t = \iiint_R \frac{Q_t}{U} dV. \quad (3)$$

Usando (3) y la primera ley (1), después de realizar una integración (multidimensional) por partes, conseguimos

$$S_t = \iiint_R \frac{-\mathbf{J} \cdot \nabla U}{U^2} dV - \iint_{\partial R} \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{n}}{U} dA, \quad (4)$$

donde \mathbf{n} es el vector normal saliente sobre el límite ∂R . Por la segunda ley (2), vemos que la integral de volumen es no negativa, y por ello

$$S_t \geq - \iint_{\partial R} \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{n}}{U} dA. \quad (5)$$

De (5), se desprende que $S_t \geq 0$ en un sistema aislado, cerrado, donde no hay flujo de calor a través del límite ($\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = 0$). De ahí que, en un sistema cerrado, la entropía nunca puede decrecer. Por cuanto la entropía térmica mide aleatoriedad (desorden) en la distribución de calor, su opuesto (negativo) puede ser designado como «orden térmico», y podemos decir que el orden térmico nunca puede crecer en un sistema cerrado.

Como la entropía térmica es cuantificable, la aplicación de la segunda ley a la entropía térmica se usa comúnmente como el problema modelo sobre el que se basa nuestro pensamiento acerca de las otras aplicaciones menos cuantificables. El hecho de que la entropía térmica no puede disminuir en un sistema cerrado, pero sí puede disminuir en un sistema abierto, se usó para concluir que, en otras aplicaciones, una disminución de entropía en un sistema abierto es posible siempre que quede compensada de alguna manera por aumentos en entropía fuera del sistema, de modo que la «entropía» total (como si hubiera sólo un tipo) en el universo, o en cualquier otro sistema cerrado que contenga el sistema abierto, siga aumentando.

Sin embargo, no hay nada realmente especial acerca de esta entropía «térmica». La conducción de calor es sencillamente difusión de calor, y podemos definir una « X -entropía» (y un X -orden = $-X$ -entropía), para medir la aleatoriedad en la distribución de cualquier otra sustancia X que se difunda; por ejemplo, podemos dejar que $U(x, y, z, t)$ represente la concentración de carbono difundándose en un sólido, y usar la Ec. (3) otra vez para definir esta entropía ($c\rho = 1$ ahora, y por ello $Q_t = U_t$), y repetir el análisis que lleva a la Ec. (5), que ahora dice que «el orden del carbono» no puede aumentar en un sistema cerrado.²

Además, la Ec. (5) no dice simplemente que la X -entropía no puede disminuir en un sistema cerrado; dice también que en un sistema abierto la X -entropía no puede disminuir más rápidamente de lo que es exportada a través del límite, porque la integral en el límite ahí representa la tasa a la que la X -entropía es exportada a través del límite. Para ver esto, observemos que sin el denominador U , la integral en (3) representa la tasa de cambio de X total (energía, si $X = \text{calor}$) en el sistema; con el denominador representa la tasa de cambio de X -entropía. Sin el denominador U , la integral en el límite en (5) representa la tasa a la que X (energía, si $X = \text{calor}$) es exportada a través del denominador; con el denominador, por tanto, tiene que representar la tasa a la que se exporta la X -entropía. Aunque desde luego no soy el primero en reconocer que la integral en el límite tiene esta interpretación [véase [8], p. 202], esto ha sido observado por un número relativamente bajo de personas, sin duda porque generalmente se supone el caso especial de conducción o difusión isotrópica del calor, en cuyo caso $\mathbf{J} = -K\nabla U$, y luego el numerador en la integral en el límite se escribe como $-K\frac{\partial U}{\partial n}$, y en esta forma no es obvio que se esté importando o exportando nada, sólo que, en un sistema cerrado, la integral en el límite es cero. Además, la entropía según se define en (3) parece ser una cantidad más bien abstracta, y es difícil visualizar qué significa importar o exportar entropía.

Expresada en términos de orden, la Ec. (5) enuncia que el X -orden en un sistema abierto no puede aumentar más rápidamente de lo que se importa a través del límite. Según (4), el X -orden en un sistema puede disminuir en dos formas diferentes: se puede convertir a desorden (primer término integral) o se puede exportar a través del límite (término integral de límite). Puede aumentar sólo de una manera: por importación a través del límite.

3. Una tautología

La segunda ley de la termodinámica es exclusivamente acerca de probabilidades; usa la probabilística a nivel microscópico para predecir cambios macroscópicos.³ El carbono se distribuye más y más uniformemente en un sólido aislado porque esto es lo que predicen las leyes de la probabilidad cuando está operando la difusión sola. Así, la segunda ley predice que las causas naturales (no inteligentes) no realizarán cosas macroscópicamente descriptibles que sean extremadamente improbables desde el punto de vista microscópico.

² «Entropía» suena a mucho más científico que «orden», pero se debe observar que, en este artículo, «orden» se define simplemente como lo contrario de «entropía». Cuando la entropía es cuantificable, como aquí, el orden es igualmente cuantificable. Los libros de texto usan también a menudo el término «entropía» en un sentido menos preciso, para describir el incremento en desorden asociado, por ejemplo, con la rotura de un plato o con el estallido de una bomba (p.ej., [7], p. 651). En tales aplicaciones, ¡el «orden» es igualmente difícil de cuantificar!

³ En *Classical and Modern Physics*, Kenneth Ford [7] escribe: «Hay una diversidad de formas en las que se puede expresar la segunda ley de la termodinámica, y de momento hemos encontrado dos de ellas: (1) Para un sistema aislado, la dirección de cambio espontáneo va desde una disposición de menor probabilidad a una disposición de mayor probabilidad. (2) Para un sistema aislado, la dirección de cambio espontáneo es de orden a desorden.»

La razón por la que las fuerzas naturales pueden transformar una computadora o una nave espacial en chatarra y no al revés es la probabilidad: de todas las posibles disposiciones que pudieran adoptar los átomos, sólo un porcentaje muy bajo podría añadir, sustraer, multiplicar y dividir números reales, o transportar a astronautas a la luna y devolverlos a la Tierra sanos y salvos.

Naturalmente, debemos tener cuidado para definir sucesos «extremadamente improbables» como sucesos de una probabilidad inferior a algún umbral: si definimos sucesos con una probabilidad inferior a 1% como extremadamente improbables, entonces es obvio que las causas naturales sí pueden hacer cosas extremadamente improbables.⁴ Pero después de definir un umbral suficientemente bajo, todos parecen estar de acuerdo en que la afirmación «las fuerzas naturales dispondrán los átomos para formar computadoras digitales» se refiere a un suceso macroscópicamente describable que sigue siendo extremadamente improbable desde el punto de vista microscópico, y por ello prohibido por la segunda ley —al menos por lo que se refiere a un sistema cerrado. Pero no es cierto que las leyes de la probabilística sólo sean de aplicación a sistemas cerrados: si un sistema está abierto, sencillamente es necesario tener en cuenta lo que atraviesa el límite cuando se decide qué es extremadamente improbable, y qué no lo es. Lo que sucede en un sistema cerrado depende de las condiciones iniciales; lo que sucede en un sistema abierto depende también de las condiciones en el límite.

El contraargumento de la «compensación» fue elaborado por personas que generalizaron la ecuación modelo para sistemas cerrados, pero olvidaron generalizar la ecuación para sistemas abiertos. Ambas ecuaciones son sólo válidas para nuestros modelos simples, donde se supone que sólo está sucediendo conducción de calor o difusión; naturalmente, en situaciones más complejas las leyes de la probabilística no hacen unas predicciones tan simples. Sin embargo, en «¿Puede CUALQUIER COSA suceder en un sistema abierto?»[6], generalicé las ecuaciones para sistemas abiertos mediante la siguiente tautología, que es válida en todas las situaciones:

*Si un aumento de orden es extremadamente improbable cuando un sistema está aislado, seguirá siendo extremadamente improbable cuando el sistema sea abierto, a no ser que entre alguna cosa que lo haga **no** extremadamente improbable.*

El hecho de que esté desapareciendo orden en la siguiente habitación no hace más fácil que aparezcan computadoras en nuestra habitación —excepto si este orden está desapareciendo hacia nuestra habitación, y entonces sólo si es un tipo de orden que hace que la aparición de computadoras no sea extremadamente improbable, por ejemplo, computadoras. La importación de orden térmico hacia un sistema abierto puede hacer que la distribución de temperatura sea menos aleatoria, y la importación de orden carbónico puede hacer que la distribución de carbono sea menos aleatoria, pero ninguna de ambas entradas hace más probable la formación de computadoras.

Mi conclusión, que se da en «¿Puede CUALQUIER COSA suceder en un sistema abierto?»[6], es como sigue:

El orden puede aumentar en un sistema abierto, no debido a que las leyes de la probabilidad queden suspendidas cuando se abre la puerta, sino sencillamente porque el orden puede entrar por la puerta. ... Si encontramos evidencia de que entraron ADN, piezas de automóviles, chips de computadoras y libros a través de la atmósfera de la Tierra en algún tiempo en el pasado, entonces quizá se podría explicar la aparición de humanos, automóviles, computadoras y enciclopedias sobre un planeta previamente estéril sin postular una violación de la segunda ley. ... Pero si todo lo que vemos que entra es radiación y fragmentos de meteoritos, parece claro que lo que está entrando a través del límite no puede explicar el aumento de orden que se observa aquí.

4. Conclusiones

Naturalmente, todavía se podría argumentar que el espectacular aumento en orden sobre la Tierra no viola la segunda ley porque lo que ha sucedido aquí no es realmente extremadamente improbable. Sin embargo, no hay demasiadas personas dispuestas a mantener esta clase de argumento; de hecho, el argumento de que la segunda ley no es de aplicación a sistemas abiertos se inventó en un intento de evitar tener que presentar este argumento. Y quizá sólo parece sumamente improbable, sin serlo en realidad, que, bajo las condiciones correctas, la irrupción de energía estelar en un planeta podría hacer que los átomos se dispongan a sí mismos para formar plantas nucleares y naves espaciales y computadoras digitales. Pero sería de pensar que al menos esto se consideraría como una cuestión abierta, y que los que argumentan que en realidad se trata de algo extremadamente improbable, y por ello contrario al principio básico subyacente a la segunda ley de la termodinámica, son merecedores de un cierto respeto y que sus colegas se los tomen en serio; pero no es así.

Referencias

- [1] Paul Peter Urone, College Physics, Brooks/Cole, 2001.
- [2] Granville Sewell, A mathematician's view of evolution, The Mathematical Intelligencer 22 (4) (2000) 5–7.
- [3] Isaac Asimov, In the game of energy and thermodynamics, you can't even break even, Smithsonian, August 1970, p6.
- [4] S. Angrist, L. Hepler, Order and Chaos, Basic Books, 1967.
- [5] Granville Sewell, The Numerical Solution of Ordinary and Partial Differential Equations, second edition, John Wiley & Sons, 2005.
- [6] Granville Sewell, Can ANYTHING happen in an open system? The Mathematical Intelligencer 23 (4) (2001) 8–10.
- [7] Kenneth Ford, Classical and Modern Physics, Xerox College Publishing, 1973.
- [8] J. Dixon, Thermodynamics I: An Introduction to Energy, Prentice-Hall, 1975.

⁴ Si repetimos un experimento 2^k veces, y definimos un suceso como «describible de forma simple» (macroscópicamente describable) si se puede describir en m o menos bits (de modo que haya 2^m o menos sucesos de esta clase), y «extremadamente improbable» cuando tenga una probabilidad de $1/2^n$ o inferior, entonces la probabilidad de que cualquier suceso extremadamente improbable y describable de forma simple pueda jamás llegar a ocurrir es inferior a $2^{k-m}/2^n$. Así, tan sólo tenemos que asegurar que escogemos n como mucho más grande que $k+m$. Si echamos al aire mil millones de monedas legítimas, cualquier resultado que consigamos puede considerarse como extremadamente improbable, pero sólo habrá motivo de pasmo si sucede algo extremadamente improbable y describable de forma simple, como «todo caras», o «cada tercera moneda es cruz», o «sólo cada tercera moneda es cruz». Para efectos prácticos, casi todo lo que se pueda describir sin recurrir a detallarlo átomo por átomo (o moneda por moneda) se puede considerar como «macroscópicamente describable».