

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XVIII JORNADAS

VOLUMEN 14 (2008)

Horacio Faas
Hernán Severgnini

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



La teoría cinética de la materia. Entre los límites clásicos y el nacimiento de la física cuántica*

Jorge Gianfelice†, Eleonora Berger‡, Vicente Menéndez§

Introducción

Una de las ideas más controvertidas en la historia de la física fue sin lugar a dudas, la de *energía*. Romper con un cúmulo de creencias y representaciones fue difícil. Por un lado, se tuvo que esperar a cierta maduración de las teorías científicas, pero por el otro, y aun cuando su incorporación fue aceptada, los hombres de ciencia seguían pensando en función de *substancias materiales* en lugar de dar espacio al nuevo concepto. Un sencillo análisis de nuestras expresiones cotidianas muestra que en lugar de hablar de energía calórica, decimos el calor *fluye, pasa o transmite* de un cuerpo a otro, como si se pensara en una sustancia material que se mueve entre ellos. Se habla, asimismo, de *fluidos* eléctricos y magnéticos, en lugar de *energía* electromagnética.

En su devenir histórico, la idea de energía fue resistida en muchas ocasiones y de diversas formas, y actualmente en nuestra manera de pensar, sigue latente la idea de un *fluido sutil* que se esconde dentro los cuerpos materiales.

A lo largo del siglo XIX, la incorporación de la idea energía comienza teniendo un significado vago y reducido en la mecánica newtoniana. Hacerlo preciso y amplio, hasta ser utilizado en los problemas relacionados con el calor y en general en la termodinámica, ha costado a los científicos una extraordinaria labor de abstracción al punto de hacer pronunciar al físico Richard Feynman, su célebre frase: “es importante constatar que al día de hoy no sabemos bien que es la energía”.

1. Constancia de la energía de movimiento - Conservación

En el caso ideal tan trillado como ejemplo en la enseñanza de la física elemental, de caída de un cuerpo, podemos decir que la energía del cuerpo es igual a su energía cinética en el punto donde está más baja, pero también que es igual a su energía potencial cuando está en el punto más alto y en reposo. Pero, ¿cuál de estas energías representa el estado del cuerpo? La respuesta de los físicos del siglo XIX fue sencilla: energía potencial y cinética coinciden, nada impide pensar que en un punto intermedio el valor se mantendrá igualmente constante. Esto llevó a la idea de una *energía mecánica*.

A diferencia del caso ideal, el caso real en donde la caída no es en el vacío o el plano no está idealmente pulido, no se observan los efectos de la *conservación de la energía mecánica*, por lo tanto, se puede inferir que hubo una pérdida de energía mecánica.

* El presente trabajo ha sido realizado en el marco del Proyecto Ubacyt. X097 “Ciencia, religión y sociedad en los siglos XVIII y XIX” en donde los autores, Gianfelice, J. y Menéndez, Vicente se desempeñan como Investigadores en formación. Director del Proyecto, Prof. Guillermo Boido.

† U T N Facultad Regional Delta Campana.

‡ Instituto Superior de Formación Docente N° 55 Escobar

§ U B A Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Instituto Superior del Profesorado Joaquín V. González.

A partir de la formulación de los *Principia*¹, los físicos aceptaron que sólo son fuerzas las que producen efectos ponderomotrices. Por lo tanto, era razonable pensar que sólo la fricción es causante de la pérdida de energía y no un defecto de la ley de conservación de la energía misma: el defecto no está en la ley expuesta sino en las características propias de la experiencia. Existía un consenso generalizado acerca de las transformaciones de la energía: energía cinética, potencial o pérdida por fricción.

No obstante, aunque este ejemplo nos sirvió para ilustrar la potencia del término *energía*, ni Galileo ni Newton usaron ni desarrollaron dicho concepto. En la experiencia de caída de cuerpos en los planos inclinados no era fácilmente detectable el destino de la energía perdida. Fue el conde de Rumford², quien sin establecer el vínculo *energía-calor*, sí infiere una relación entre calor y movimiento.

La concepción mecanicista de la energía se difundió en todas las áreas de la física, particularmente en la naciente termodinámica macroscópica, donde su principal impulsor, Joule, agota el concepto aplicándolo al estudio de máquinas térmicas, postulando y midiendo la relación entre calor y trabajo mecánico³: el *equivalente mecánico del calor*. Una vez establecida esta equivalencia se pudo tratar al *calor* como una forma de energía. A esta extrapolación de la noción de energía del ámbito de la mecánica al ámbito de la teoría del calor la llamamos *enfoque reducido*. En ésta, el calor sigue manteniendo una notable adhesión a la materia y a la substancia. Los alcances explicativos, son restringidos.

2. Calor y movimiento: La teoría cinético-molecular de la materia

A partir de la historia del calor, que fue concebido como *energía* en la termodinámica macroscópica, se ha podido arribar a algunas conclusiones importantes respecto de ciertas variables tales como temperatura, presión, volumen, calor específico, etc.. Pero este avance no sólo permitió caracterizar con precisión a estas magnitudes, sino que paralelamente dio lugar a nuevas cuestiones y derivaciones, que como veremos en nuestro marco histórico, han permitido a los hombres de ciencia *ampliar* la concepción del término *energía* conjuntamente con la audaz idea⁴ de la composición *atómico - molecular* de la materia proveniente de la química.

La teoría atómica fue resistida por científicos de diversas áreas en base a diferentes argumentos, sin embargo, había un lugar en donde dicha teoría florecía sin dificultades epistemológicas: en el naciente campo de la química. Sin discutir el atomismo de Dalton, podemos resumir que para esta teoría, la materia es de naturaleza granular o corpuscular: átomos y moléculas se hallan separados por espacio vacío, animados de movimientos. La acción de fuerzas es la responsable de mantenerlos más o menos unidos. Los gases están formados por moléculas que prácticamente no ejercen fuerzas entre sí, y en el otro extremo, los sólidos están fuertemente unidos por fuerzas atractivas. Por otro lado, ninguno de los impulsores de la concepción mecánica del calor mencionados pudo dar una imagen en conjunto de la relación entre calor y movimiento. Unir ambas ideas fue producto del abordaje molecular de los gases desarrollado, en sus comienzos, por Rudolph Clausius y James Clerk Maxwell. En el estudio mecánico del estado gaseoso fue donde comenzó la asociación de los conceptos macroscópicos de energía mecánica y calor con los movimientos moleculares bajo interacciones simples. De esta forma, ambas ideas, una derivada de la termodinámica macroscópica (*energía*) y la otra de la composición granular de la materia proveniente de la química (*átomo - molécula*), darían origen

a un nuevo capítulo en la historia de la física: el de la teoría cinética de la materia, que, aunque logró sus primeros triunfos en el estado gaseoso luego se hizo extensivo a los otros estados de agregación.

A esta altura, podemos hacernos dos preguntas. Una: ¿en qué sentido el calor y el movimiento se asocian a la idea de energía mecánica? Otra: ¿como interviene la teoría atómico molecular en la teoría cinética? Las respuestas están en las hipótesis de Maxwell, que dan sustento a la teoría cinética, hoy llamadas hipótesis molecular. Tales respuestas son:

- a) *Todo volumen finito de gas posee un gran número de moléculas perfectamente esféricas.*
- b) *Las moléculas están separadas por grandes distancias en relación con su tamaño.*
- c) *Las moléculas se encuentran en movimiento continuo.*
- d) *Las moléculas no ejercen fuerzas entre sí, excepto durante los choques. Sus movimientos respetan la ley de inercia.*
- e) *Las paredes del recipiente que las contiene son perfectamente lisas, lo cual permite que los choques sean elásticos.*
- f) *En el recipiente la cantidad total de movimiento de las moléculas es una magnitud conservada.*
- g) *La distribución de las moléculas en el recipiente es uniforme.*
- h) *Todas las moléculas en el recipiente se mueven en direcciones equiprobables.*

Si analizamos las hipótesis propuestas por Maxwell, podemos diferenciar tres categorías subyacentes. La primera responde a la segunda cuestión planteada, ya que no sería posible hablar de molécula sin la formulación atomista de la materia. La segunda instala fuertemente los conceptos mecánicos y los extiende a las concepciones microscópicas (en este caso de un gas). La tercera impone una concepción estadística en la interpretación de la materia, al hablar de distribución molecular y direcciones no privilegiadas de las moléculas⁵. Esta tercera categoría no guarda relación directa con las teorías desarrolladas hasta ese momento. Así, las hipótesis, g) y h) forman la base sobre la cual se sustenta una nueva interpretación de la física: *la mecánica estadística*.

Sin embargo, las hipótesis parecen soslayar la relación entre calor – movimiento y energía mecánica. De hecho el concepto de energía no se explicita, pero sí el de movimiento molecular. No obstante, las conclusiones a las que Rumford⁶ había llegado sostenían que el calor podía ser engendrado por el movimiento, una de las formas de producir calor. Por esa razón la naturaleza del calor debía ser mecánica. Pero ¿qué tipo del movimiento se asocia al calor? Es aquí donde la teoría cinética entra en escena. Se postula que el calor debe provenir del movimiento de las moléculas del gas. Dado que el movimiento se asocia mecánicamente a la energía cinética, como explicamos anteriormente, el calor no debe ser ni más ni menos que energía cinética molecular. Pero esto no es tan simple como parece. Hasta aquí, hemos aceptado que la materia es granular como estableció Dalton, primera categoría que hemos indicado en las hipótesis moleculares; la segunda categoría de hipótesis parte de considerar que las moléculas deben cumplir con las leyes de Newton, pero esto es complejo, dado que el conjunto de moléculas que conforman una determinada masa de gas, aunque no es infinito, es muy grande, y la aplicación de estas leyes para cada una de las moléculas sería casi imposible de realizar. En este contexto interviene el tratamiento estadístico. El razonamiento, según la teoría cinética sería el siguiente: un gas es una

enorme congregación de moléculas que se mueven en todas direcciones y sentidos chocando entre sí y contra las paredes del recipiente, respetando las leyes de Newton. Así como en una ciudad existe una edad *media* o *promedio* entre las personas que la habitan, entre las moléculas deberá existir una *velocidad media* o *promedio*. Como a la velocidad de una molécula se le asocia una energía cinética, existirá entonces una energía cinética media o promedio por molécula. Al aumentar la cantidad de calor en el recipiente, las moléculas aumentarán su velocidad, como así también su velocidad promedio y en consecuencia su energía cinética media. De esta forma, queda establecido que el calor no representa nada más que a la energía cinética de las moléculas, o, en otras palabras, que el calor es una forma de energía que no difiere de la energía mecánica tradicional. De esta manera, el concepto *energía* ya no está solamente asociado a los procesos macroscópicos, vinculados con el trabajo mecánico. Los avances que representa en la teoría cinética, son dos. por un lado, la identificación del calor como *energía en tránsito* entre las moléculas; por el otro, la redefinición de la magnitud macroscópica *temperatura*. La teoría cinética permite afirmar que a una temperatura dada corresponde una única energía cinética media por molécula, por lo tanto la temperatura se independiza de la sustancia termométrica y de la escala arbitraria que hasta ese momento se empleaba para definirla. Es así como, tanto calor como temperatura, han tomado un nuevo sentido en términos de la teoría cinética. Pero estos no fueron los únicos alcances que se derivaron de la misma. La teoría permitió, además, definir y establecer cuantitativamente la distribución de velocidades moleculares, los choques con las paredes del recipiente y la presión sobre las paredes del mismo, entre otros.

La teoría cinética nos permite dar a conocer algunos de los resultados, tanto cualitativos como cuantitativos. Consideremos dos recipientes con gases diferentes, en idénticas condiciones, de acuerdo con las variables presión, volumen y temperatura. Pero si la temperatura es la misma, la teoría cinética asegura que la energía cinética media por molécula también debe ser la misma. Como la presión también es la misma, los golpes de las moléculas contra el pistón dan la misma fuerza resultante. Y, finalmente, como ambos recipientes tienen el mismo volumen, se infiere que la cantidad de moléculas de gas en cada uno de ellos debe ser el mismo, aunque los gases sean de diferente naturaleza química. Es decir que, en términos modernos "*el número de moléculas de cualquier gas en un volumen, temperatura y presión dados no depende de la composición química del gas*" Este resultado no pudo predecirse sin el auxilio de la teoría cinética. Consecuentemente la teoría no sólo dio esta formulación cualitativa sino que también pudo establecer el valor cuantitativo de este asombroso resultado⁷.

Es necesario resaltar que la teoría cinética, que obtuvo sus más espectaculares resultados en la descripción de las propiedades de los gases, se pudo extender satisfactoriamente a los sólidos y líquidos. Un ejemplo de lo último fue la explicación del movimiento Browniano⁸.

3. Los aportes de Ludwig Boltzmann

En este contexto, el término *energía* comenzó a tomar una connotación completamente diferente. Como la cuestión estaba planteada en relación con el movimiento de cada molécula, en el año 1871 el físico Ludwig Boltzmann publica un trabajo en el que da a conocer, por un lado, que la energía media del movimiento de una molécula es igual para cada dirección, y por otro, que las distribuciones moleculares quedan bien establecidas por una función de distribución estadística

(lo que hoy se conoce como la distribución Maxwell-Boltzmann). Lo relevante es que una vez establecida la ley de distribución molecular de Maxwell⁹, se puede determinar, para un gran número de moléculas, tanto su energía total como su energía en una dirección arbitraria del espacio. Este cálculo, que es de naturaleza puramente estadística, muestra por primera vez una constante (hoy llamada constante de Boltzmann), y que deviene de las propias connotaciones mecánico-estadísticas que se le asigna al movimiento molecular. Al mismo tiempo, tales interpretaciones de la energía exigían su independencia como entidad física. A raíz de esto, en la década de 1890 se estructura una nueva formulación a la segunda ley de la termodinámica y la formulación del principio de equipartición de la energía. En 1884 Boltzmann realizó un desarrollo teórico, sobre la ley empírica de Joseph Stefan, formulada en 1879 sobre la radiación del cuerpo negro. Aquí, demostró que la radiación de cuerpos negros se podía derivar de las leyes de la termodinámica macroscópica. Finalmente podemos decir que Boltzmann fue el fundador de la mecánica estadística, la cual le otorgó su fama. Pese a todo, las ideas de Boltzmann no fueron aceptadas por muchos científicos. En 1895, en un congreso en Lübeck, Wilhelm Ostwald presentó las siguientes indicaciones y alcances sobre el trabajo de Boltzmann:

La real irrevocabilidad de los fenómenos naturales, en sí prueba la imposibilidad de describir la existencia de procesos a través de ecuaciones mecánicas, y con ello los veredictos de un materialismo científico¹⁰

Los ataques de Ostwald, contra su trabajo continuaron y Boltzmann presionado no solo por sus colegas, sino por la angustia de no encontrar una solución o explicación coherente de sus teorías terminó quitándose la vida en 1906.

Para finalizar, el *enfoque amplio* del término energía resulta de la definición de calor a partir de nociones mecánicas bien establecidas que se sustraen a la materialidad de un calor concebido como sustancia. De esta manera el calor adquiere el estatus de una entidad abstracta, y a su vez adquiere un nuevo significado dentro de la formalidad propia de la mecánica estadística.

4. A modo de conclusión

En la segunda mitad del siglo XIX, el principio de conservación y el principio de disponibilidad de la energía¹¹, los dos pilares del denominado *enfoque reducido* se vieron empañados por:

... el descubrimiento de la segunda ley de la termodinámica que mostraba que la cantidad de energía en el universo era limitada y tendía a disminuir. Según la formulación molecular de Maxwell todo sistema que contenga inicialmente moléculas en movimiento rápido (calientes) y lento (frías) finalizará con la mayoría de sus moléculas moviéndose a velocidades intermedias (tibias) o siguiendo la formulación de Gibbs (1839-1903), la igualación confusa (entropía) de un sistema, tiende siempre a aumentar¹².

Para Lord Kelvin, la idea acerca de este desafortunado evento se resumía en:

... Si se considera al universo como un todo, parece inevitable que las fuentes de calor lleven por sí mismas a una tibieza universal, a la llamada muerte térmica.¹³

Aunque él mismo deja una puerta abierta, ya que expresa que

... a menos que existan nuevas formas de energía hasta ahora desconocidas en el gran almacén de la Creación...¹⁴

Paralelamente, en este período, la formulación de Maxwell y los aportes de Boltzmann, al *enfoque amplio* de la energía, le permitieron adquirir independencia de la materia donde la concepción estadístico-probabilística da cuenta de estos fenómenos naturales. Esto permitió establecer el principio de equipartición y condujo al descubrimiento de nuevas fuentes de energía, asociadas a la estructura interna del átomo. A partir de aquí, no sólo el término energía se resignifica, sino que se asiste a una situación histórica cuya trascendencia es ineludible: el nacimiento de la física cuántica.

Consideramos por lo tanto, dos cuestiones que entendemos trascendentes: que solamente se pudo llegar a la discretización de la energía, precisamente a partir del momento en que se logra desprender el concepto de energía de su vinculación con la materia, y que además, el desarrollo de la mecánica estadística, fue el comienzo del fin del determinismo planteado por la física clásica. Con estas dos cuestiones, a fines del siglo XIX, quedaba abierto, no sin inconvenientes, el camino hacia la nueva concepción de la materia que plantearon en el siglo XX los iniciadores de la mecánica cuántica.

Notas

¹ Para mayor detalle ver: Newton, I (1997) *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Madrid. Tecnos.

² Orígenes de la termodinámica. El calor y los fluidos sutiles (o cómo Aristóteles sigue presente en el siglo XIX) Gianfelice, Jorge; Menéndez, Vicente.

³ El trabajo mecánico se define como el producto entre la fuerza aplicada y la distancia recorrida por el punto de aplicación.

⁴ Propuesta originalmente por Dalton, No entraremos aquí en los detalles acerca del atomismo de Dalton ya que un tratamiento riguroso excede los límites de este trabajo. Para los interesados ver: Solís, C. Sellés, M. (2004) *Historia de la Ciencia* España, Espasa-Forum. Págs. 846-848.

⁵ Por ser tan pequeñas, no resultan prácticamente afectadas por la atracción gravitatoria, por esta razón no existen movimientos en direcciones privilegiadas.

⁶ Orígenes de la termodinámica. El calor y los fluidos sutiles (o cómo Aristóteles sigue presente en el siglo XIX) Gianfelice, Jorge; Menéndez, Vicente.

⁷ Es el *Número de Avogadro*.

⁸ Puede consultarse: Einstein, A., Infeld, L. (2002) *La física, aventura del pensamiento*. Buenos Aires, Losada. Cap. 1

⁹ Gamow, G (1971). *Treinta años que conmovieron a la física. La historia de la teoría cuántica*. Buenos Aires. Eudeba. Págs. 21-23

¹⁰ Bernal, J (1967) *Historia Social de la Ciencia*. Barcelona. Península. Vol. I. Pág. 454.

¹¹ Entendida en términos de la segunda ley: cuánta energía está efectivamente disponible en una transformación entre calor y otro tipo de energía.

¹² Bernal, J op. cit. Pág. 453.

¹³ Bernal, J op. Cit. Pág. 453-454.

¹⁴ Bernal, J op. Cit. Pág. 453-454.

Bibliografía

Bernal, J (1967) *Historia Social de la Ciencia*. Barcelona. Península. Vol. I.

Einstein, A., Infeld, L. (2002) *La física, aventura del pensamiento*. Buenos Aires, Losada.

Gamow, G (1971). *Treinta años que conmovieron a la física. La historia de la teoría cuántica*. Buenos Aires. Eudeba.

Gianfelice, Jorge; Menéndez, Vicente, (2006) *Orígenes de la termodinámica. El calor y los fluidos sutiles (o cómo Aristóteles sigue presente en el siglo XIX)*. Inédito

Guggenheim, E. A. (1965) *Ley de Distribución de Boltzmann*. Buenos Aires. Eudeba.

Solís, C. y Sellés, M. (2005). *Historia de la Ciencia*. Madrid. Espasa Calpe.