

TEMAS DE FÍSICA

LA ENERGÍA ENTRE LA FÍSICA Y LA METAFÍSICA.

MARIO BUNGE

Foundations & Philosophy of Science Unit
McGill University
Montréal, Qué., Canada H3A 1W7

RESUMEN

El concepto general de energía es algo oscuro mientras se lo confina a la física, ya que cada capítulo de ésta define su propio concepto particular de energía. El concepto general se aclara si se lo relaciona con los conceptos hipergenerales (filosóficos) de cosa concreta y de mutabilidad. Así se logra construir una mini-teoría que identifica la energía con la posibilidad de cambio, y que hace de ella, así como de su conservación, la propiedad universal de las cosas concretas. Moraleja: físicos y filósofos pueden aprender unos de otros.

Palabras clave: Energía, cosa, mutabilidad, propiedad.

ABSTRACT

The general concept of energy is somewhat unclear as long as it is confined to physics, since every chapter of it defines its own particular concept of energy. The general concept can be elucidated in terms of the hypergeneral (philosophical) concepts of concrete thing and changeability. In this way one succeeds in crafting a minitheory that identifies energy with mutability, and that regards it, as well as its conservation, as the universal property of concrete things. The moral is that physicists and philosophers can learn from one another.

Key words: energy, thing, changeability, property.

Es sabido que la palabra *energía* designa un concepto clave de la física moderna, particularmente a partir de mediados del siglo XIX. Sin embargo, en las famosas *Feynman Lectures on Physics* se afirma que la física actual no sabe qué es la energía. ¿Verdadero o falso? Veamos.

Hay muchas "formas" (tipos) de energía: cinética, elástica, térmica, gravitatoria, eléctrica, magnética, nuclear, química, etc. Más precisamente, hay tantos tipos de energía como tipos de procesos.

A diferencia de otras especies, las diversas clases de energía son equivalentes, en que pueden transformarse entre sí (módulo la disipación concomitante con la generación de calor).

Por ejemplo, cuando tensamos un arco transformamos energía cinética en energía potencial elástica, la que vuelve a transformarse en energía cinética cuando disparamos la flecha. En este proceso en dos etapas cambia la cualidad o clase de energía pero no su cantidad.

Esta conservación cuantitativa es la razón por la cual consideramos todas las cantidades de energía como equivalentes. En otras palabras, la introducción del concepto general de energía se justifica por el principio general de conservación de la energía. Pero tanto el concepto como el principio desbordan la física. Expliquémonos.

Cada concepto particular de energía se define en un capítulo de la física. Por ejemplo, la energía cinética se define en dinámica; la térmica en termodinámica; la electromagnética en electrodinámica; y la nuclear en física nuclear. Cada uno de estos campos contiene su propio concepto de energía. Más aun, en todos estos campos, salvo en termodinámica clásica, se demuestra un teorema de conservación de la energía a partir de las correspondientes ecuaciones de movimiento o de campo.

Para poder sumar energías de dos o más tipos es preciso unir las disciplinas correspondientes. Por ejemplo, la energía total de un chorro de fluido cargado eléctricamente (y por tanto rodeado de un campo magnético) sólo puede calcularse en una ciencia híbrida: la electromagneto-termo-hidrodinámica (que interviene en el estudio de la atmósfera solar y en el diseño de plantas de fusión nuclear).

Por cierto que se puede postular las ecuaciones canónicas para una cosa concreta cualquiera: electrón o planeta, célula o empresa. Pero no se puede sostener que la función (u operador) H que figura en esas ecuaciones represente la energía total de la cosa en cuestión, a menos que se interprete adecuadamente las variables independientes (las coordenadas y los momentos generalizados). Y esto requiere especificar el tipo de cosa de referencia—lo que restringe el tipo de energía.

Todas las ciencias que tratan de cosas concretas (o materiales), desde la física hasta las ciencias sociales, utilizan uno o más conceptos de energía. Por ejemplo, el psicobiólogo quiere medir el costo metabólico (en calorías) de un bit de información transmitido a través de una sinapsis; el antropólogo, el sociólogo y el economista se interesan por saber cuál es el consumo energético de una comunidad per capita; también desean averiguar si los miembros de una sociedad dada trabajan de manera de optimizar su eficiencia energética.

Siendo ubicuo, el concepto general de energía debe de ser filosófico y, en particular,

metafísico (u ontológico). O sea, es del mismo género que los conceptos de cosa y propiedad, espacio y tiempo, causalidad y azar, ley y tendencia, y muchísimos más.

Admitiendo que el concepto general de energía sea filosófico, intentemos definirlo en términos filosóficos. Y, puesto que el mejor análisis es la síntesis, o incorporación a una teoría, construyamos una miniteoría centrada en el concepto de energía.

Empezaremos por identificar energía con mutabilidad.

O sea, proponemos la

DEFINICIÓN: Energía = mutabilidad.

Esta convención puede reescribirse así: "Para todo x : (x posee energía $=_{df}$ x es cambiante)".

Ahora pongamos a trabajar esta definición. Empezamos por enunciar el:

POSTULADO 1: Todos los objetos concretos (materiales), y sólo éstos, son cambiables.

O sea: "Para todo x : x es concreto (material) si y sólo si x es cambiante".

En símbolos lógicos:

$$\forall x (Mx \Leftrightarrow Cx).$$

Comentario 1.

Hemos identificado "material" con "concreto". Esta convención es más corriente en filosofía que en física. Según ella, los campos son tan materiales como las piedras.

Por ejemplo, los fotones son materiales en el sentido filosófico de la palabra, aunque no tienen masa, solidez ni forma propia (atributos de la materia antes del nacimiento de la física de campos).

Del Postulado 1, junto con la Definición, se sigue el:

TEOREMA Para todo x : si x es un objeto material, entonces x posee energía, y vice versa.

En resumen:

$$\forall x (Mx \Leftrightarrow Ex)$$

He aquí dos consecuencias inmediatas de

este teorema. La primera es el:

COROLARIO 1: *Los objetos abstractos (no concretos) carecen de energía.*

Por ejemplo, el concepto de energía carece de energía. Dicho de otra manera, los objetos conceptuales no son cambiables. Los que cambian son los cerebros que los piensan. Por ejemplo, se puede redefinir el concepto de energía tantas veces como sea necesario. Pero cada uno de estos conceptos es intemporal. Más precisamente, las sucesivas creaciones conceptuales no cambian por sí mismas. Lo mismo vale para el concepto de materia: la materia, en cuanto concepto, es inmaterial.

COROLARIO 2 *La energía es una propiedad, no una cosa ni un estado ni un proceso.*

Comentario 2.

Por ser una propiedad, la energía se representa, ya mediante una función, ya mediante un operador. Para hallar la forma de la función energía en física clásica, empecemos por llamar $E(c, x, s, t, u) = e$ a la energía de la cosa c , en el punto x , relativa al referencial s , en el instante t , y calculada o medida en la unidad u . La función en cuestión tiene la forma general

$$E: C \times E^3 \times S \times T \times U \rightarrow R,$$

donde C es un conjunto de cosas concretas, E^3 el espacio euclídeo, S un conjunto de sistemas de referencia, T uno de instantes, U uno de unidades de energía, y R la recta real (ocasionalmente el plano complejo). En el caso de una energía de interacción, C se reemplazará por el producto cartesiano $C \times C$. En la física cuántica la energía se representa mediante un operador H en el espacio de los estados ψ . La propiedad correspondiente es la densidad $\psi^* H \psi$, que tiene la misma forma general que la clásica.

La presencia de S en la fórmula anterior muestra que, en la mayoría de los casos, la energía es una propiedad relacional (no intrínseca) de las cosas. En este respecto, la energía es similar a la masa y a la temperatura, y difiere de propiedades intrínsecas tales como la energía propia o en reposo $m_0 c^2$, la carga eléctrica, la entropía y el número de componentes.

Comentario 3.

Relativamente al sistema de referencia del corpúsculo, la energía cinética de éste es nula. Análogamente, la energía total de una cosa sumergida en un campo puede anularse, por

compensarse su energía cinética con su energía potencial. Pero energía nula no es lo mismo que ausencia de energía, del mismo modo que temperatura nula (en alguna escala) no es lo mismo que ausencia de temperatura. Un valor nulo no es sino un valor numérico especial.

Comentario 4.

Del Corolario 2 se sigue que no es posible reemplazar el concepto de cosa concreta o material por el de energía. No hay tal cosa como energía en sí: toda energía es energía de alguna cosa material. En otras palabras, el energetismo, que fuera propuesto a comienzos del siglo XX como alternativa al materialismo, erraba de raíz. Con todo, los energetistas, en particular Wilhelm Ostwald, tuvieron razón en sostener que la energía es universal, o una suerte de moneda transdisciplinaria. Mejor dicho, habrían tenido razón si hubieran propuesto el

POSTULADO 2: *La energía es la propiedad física universal: es la única propiedad común a todas las cosas materiales.*

Comentario 5.

Podría objetarse que la posición en el espaciotiempo es otra propiedad física universal. Lo es, pero, conforme a cualquier teoría relacional del espaciotiempo, éste no es básico e independiente de la materia, sino derivado: es la estructura básica de la colección de todas las cosas, cada una de las cuales posee energía.

Dicho de otro modo, la raíz del espacio es la distancia entre cosas, y la del tiempo es la sucesión de eventos.

Comentario 6.

El Postulado 2 no afirma que toda cosa tenga un valor preciso de la energía en un instante dado y relativamente a un referencial dado. No lo afirma, porque un valor único de la energía es la excepción antes que la regla.

En efecto, según la mecánica cuántica, en general un cuantón (referente de la física cuántica) está en una superposición de una infinidad de autoestados, cuyos autovalores correspondientes se distribuyen en torno a un promedio (tal como un nivel de energía atómico).

Finalmente, enunciemos el principio general de conservación de energía:

POSTULADO 3: *La energía total de un objeto concreto aislado no cambia en el transcurso del tiempo.*

Comentario 7.

Este principio es tan general, que no figura (sino de contrabando) en capítulo alguno de la física: pertenece a la filosofía.

Comentario 8.

En un universo en expansión, la energía no se conserva exactamente, sino que se disipa lentamente.

Comentario 9.

Según la electrodinámica cuántica, la energía del vacío no es nula, sino que fluctúa irregularmente en torno al valor nulo. Este resultado no invalida la identificación de la energía como la propiedad universal de todas las cosas: sólo restringe el dominio de validez de la definición clásica del concepto de vacío como ausencia de materia dotada de masa. El campo electromagnético residual, que queda en un recinto después que se han neutralizado todas las cargas eléctricas y extinguido todas las corrientes eléctricas, es una cosa concreta aunque tenue. Tan concreta es, que ejerce una fuerza sobre los electrones de los átomos que constituyen el recinto: este es el corrimiento Lamb de los niveles energéticos, uno de los efectos medibles del vacío.

Comentario 10.

Los escritores del New Age no tienen el monopolio de disparates sobre la energía. Algunos autores descuidados han fabricado varios mitos al respecto. En efecto, a veces se confunde energía con radiación, y masa con materia. Examinemos una pequeña muestra de errores de este tipo.

Ejemplo 1. Las expresiones "aniquilamiento de la materia" y "materialización de la energía", que designan la destrucción y la formación de pares electrón-positrón, respectivamente, son incorrectas. Lo que desaparece cuando un electrón y un positrón se unen y transforman en un fotón, no es materia sino masa, propiedad ésta de partículas y cuerpos pero no de fotones. Análogamente, en el proceso de creación de un par, no emerge materia sino que un fotón, trozo de materia, se transforma en un par de cosas materiales dotadas de masa. (Los dos miembros de la ecuación de conservación, " $2mc^2 = h\nu$ ", no valen al mismo tiempo. El primero vale antes, y el segundo después del "aniquilamiento".) En resumen, a diferencia de la energía, la masa no es una propiedad universal.

Ejemplo 2. Cuando una antena irradia ondas electromagnéticas por un total de E ergios, pierde E/c^2 gramos de masa. Este no es un ejem-

plo de transformación de materia en energía, sino de transformación de parte de la energía de la antena (y del campo ligado a ella) en energía radiante, con la consiguiente pérdida de masa.

Ejemplo 3. La fórmula " $E = mc^2$ " no dice que masa y energía sean lo mismo módulo c^2 . En efecto, E y m son propiedades muy diferentes. En primer lugar, E es posibilidad de cambio, mientras que m es inercia, o disposición a resistir cambio de un tipo muy especial (de velocidad). En segundo lugar, la fórmula sólo vale para cosas dotadas de masa (partículas propiamente dichas y cuerpos). Tan es así, que es un teorema de la mecánica relativista, no de teoría alguna de campo.

Con esta observación culmina la exposición de nuestra miniteoría de la energía. Ahora estamos en condiciones de responder la pregunta que gatilló este artículo: ¿es verdad que en física no se sabe qué es la energía? Esta es una semiverdad. En efecto, en cada capítulo de la física podemos identificar un tipo esencial de energía y enunciar una ley de conservación de la energía de ese tipo. Pero el concepto *general* de energía es filosófico.

Sin embargo, la filosofía no puede dilucidar el concepto ni la ley sin ayuda de la física. Sólo uniendo ambas disciplinas puede darse una respuesta precisa al problema en cuestión. Ella reza como sigue. La energía es la propiedad universal de lo concreto o material: la propiedad de cambiar o poder cambiar en algún respecto.

Lo que complica el problema y a veces despista al especialista es que (a) hay tantas clases de energía como grandes géneros de proceso; (b) hay tantos conceptos de energía como teorías físicas generales; (c) el concepto general de energía, o energía a secas, es tan general, que pertenece a la metafísica u ontología; y (d) por consiguiente, también el principio general de conservación de la energía es filosófico, aunque tiene múltiples raíces físicas.

MORALEJA.

La física no puede prescindir de la filosofía, así como ésta no adelanta si ignora a la física y a las demás ciencias. En otras palabras, la ciencia y la filosofía científica se solapan parcialmente y pueden interactuar fructíferamente. Si no lo hacen, la primera pierde en profundidad y la segunda se estanca.