TEMAS DE FÍSICA

ANÁLISIS DEL CONCEPTO DE MAGNITUD FÍSICA.

MARIO BUNGE

Department of Philosophy, McGill University, Montréal QC, Canadá.

Una magnitud física es un concepto que representa una propiedad de algún objeto físico real o posible. Por ejemplo, la posición de una partícula y el tiempo que ella tarda en atravesar una distancia son magnitudes físicas. En cambio, la posición y el tiempo en sí mismos, sin referencia a objetos físicos, no son magnitudes sino propiedades del espacio-tiempo.

Esta diferencia se refleja en la notación. Por ejemplo, el valor de la coordenada de una partícula p, referida a un referencial f, y en el instante t, puede escribirse $x(p, f, t)$. En cambio, la coordenada de un punto del espacio, referida al sistema de coordenadas que representa al referencial f, se denotará por x. Esta es la coordenada que aparece, por ejemplo, en el gradiente $\partial U/\partial x$ del potencial U del campo gravitatorio que rodea a p.

Hasta aquí no hemos dado sino un par de ejemplos. Podríamos multiplicarlos sin fin, añadiendo, por ejemplo, los momentos lineal y angular, la densidad de masa y de corriente eléctrica, las componentes del campo electromagnético en el vacío, la energía, el lagrangiano, y la función de estado de la teoría cuántica. Todas estas son magnitudes porque representan propiedades de cosas físicas. Pero una lista de ejemplos no reemplaza a una definición. Veamos primero una definición errada, que aun se encuentra en muchos libros de texto, y luego la correcta.

En 1927 el gran físico experimental P. W. Bridgman propuso explícitamente la difundida tesis operacionista. Según ésta, los conceptos físicos se definen por operaciones de medición. Por ejemplo, la regla graduada definiría el concepto de longitud, el reloj el de tiempo, y la balanza el de peso. Los filósofos positivistas, en particular Carnap y Reichenbach, adoptaron, elaboraron y difundieron esta tesis, que aun se encuentra en manuales científicos y en escritos filosóficos.

La tesis operacionista es falsa por varias razones. La primera es que una definición propiamente dicha es una operación puramente conceptual. (Si es explícita, es una identidad; si es implícita, es un sistema de postulados.) La segunda razón es que no todas las magnitudes físicas son medibles: baste pensar en fases, potenciales y hamiltonianos. La tercera es que las magnitudes medibles suelen serlo mediante técnicas y aparatos diferentes. De modo que habría que hablar, por ejemplo, de tantos conceptos de masa como de técnicas de medición de la masa. (De hecho, algunos lo han hecho así, introduciendo el pseudoconcepto de masa gravitatoria, que sería diferente de la inercial por medirse mediante balanzas. Pero ocurre que ninguna teoría física distingue ambas masas.) La cuarta razón es que, antes de diseñar una técnica de medición de una magnitud, es necesario saber de qué magnitud se trata; y sólo una teoría puede decirnos esto. La quinta razón es que los físicos teóricos, que son los encargados de introducir o refinar nuevas magnitudes, no proceden conforme a la receta operacionista. Veamos cómo proceden de hecho.

Toda magnitud física se define, explícita o implícitamente, en alguna teoría o familia de teorías. Por ejemplo, en mecánica de los medios continuos la densidad de masa se introduce como concepto primitivo, mediante un par de postulados, uno de los cuales es la ecuación general de movimiento. A su vez, el concepto de masa total se define como la integral de la densidad de masa sobre todo el volumen del cuerpo. En cambio, en la mecánica de las partículas puntiformes, el concepto de masa es básico (no definido).

El que una propiedad sea un concepto básico o primitivo en alguna teoría no implica que sea inanalizable. Tomemos nuevamente como ejemplo el concepto sencillo de masa corpuscular tal como figura en mecánica clásica de partículas. Denote $M(p, t, u)=m$ el valor teórico de la masa de una partícula p en un instante t, y calculado o medido en la unidad de masa m. Esto muestra que la propiedad masa es conceptualizada por la función

$$M_c: P\times T\times U_M \rightarrow \mathbb{R}^+,$$

donde $\times$ designa el producto cartesiano de los conjuntos P de partículas, T de instantes, U de unidades de masa, y $\mathbb{R}^+$ de números reales positivos. La masa relativista se analiza en cambio como la función

$$M_r: M_c: P\times F\times T\times U_M \rightarrow \mathbb{R}^+$$

donde F es el conjunto de todos los sistemas de referencia posibles.

Estas son las funciones que representan la propiedad masa en las mecánicas clásica y relativista respectivamente del punto material. Se ve que, contra lo que afirmaron Thomas S. Kuhn y Paul Feyerabend, esos conceptos son "conmensurables" entre sí, o sea, comparables. En efecto, M_c es un caso particular (una proyección) de M_r.

Obsérvese también que en ambas funciones figura el concepto de unidad, ausente de las elucidaciones operacionistas (y estructuralistas). Además, ni M_c ni M_r hacen referencia a operaciones de medición. Sería absurdo atar una teoría a un procedimiento determinado de medición.

Hasta aquí, dos conceptos teóricos de masa. El concepto de masa que se usa en un laboratorio físico es éste:

$$\mu_\tau(p, f, t, u)=m'\pm\varepsilon,$$

donde μ_τ y ε denotan la técnica de medición y el error relativo respectivamente. La expresión anterior puede leerse así: el valor medido con la técnica τ, de la masa de $\underline{p}$, relativa al referencial f, al tiempo t, en la unidad u, y a menos del error experimental ε, es m'.

Obsérvese que este concepto de valor medido incluye el concepto teórico "masa de p". Además, mientras que el valor teórico suele ser un número, el empírico suele ser un intervalo numérico $[m'-\varepsilon, m'+\varepsilon]$. Con refinadísima instrumentación y mucha suerte, el valor teórico m coincidirá (casi) con el valor medio m' de una sucesión de mediciones. Pero en general ambos valores serán diferentes. También suelen diferir los valores que se obtengan usando técnicas de medición diferentes. En resumen, los conceptos teórico y empírico son diferentes, y el segundo presupone al primero.

Otra diferencia importante entre las dos familias de conceptos deriva de la diferencia entre magnitudes extensivas, tal como la masa total, y magnitudes intensivas, tal como la densidad de masa. Una magnitud es extensiva si su valor para la suma física o yuxtaposición $\underline{a} \circ \underline{b}$ de dos cosas $\underline{a}$ y $\underline{b}$ del mismo género es igual (o casi igual) a la suma de los valores parciales:

$$M(a \circ b)=M(a)+M(b).$$

(De hecho, la masa es levemente subaditiva, y la entropía es levemente superaditiva.) Y una magnitud es intensiva si no es extensiva.

En física teórica las magnitudes intensivas suelen ser las más importantes, por ser primitivas (no definidas). Por ejemplo, la masa total de un cuerpo se define como la integral de su densidad de masa extendida a todo el volumen del cuerpo. Otro tanto vale para la carga eléctrica total de un cuerpo.

Además, sólo las magnitudes extensivas son medibles. Por ejemplo, la densidad de masa un fluido en un punto no puede medirse: se mide la masa de un pequeño volumen de fluido, y se la divide por este volumen para obtener la densidad media en ese volumen. Análogamente, no se puede medir la temperatura de un cuerpo en un punto del mismo: lo que se mide es la temperatura global del sistema compuesto por el cuerpo, o parte de él, y el termómetro, una vez alcanzado el equilibrio térmico entre los dos.

A propósito, los operacionistas sostienen que los cuerpos que no están en equilibrio térmico carecen de temperatura, que es como decir que el balancín no existe cuando está en movimiento, ya que en este caso falla la definición de equilibrio (que pasa por ley de Arquímedes). Esto les lleva a ignorar la termodinámica, y a ocuparse exclusivamente de la termostática. (Análogo económico: puesto que el precio de una mercancía es el que tiene cuando coinciden la oferta y la demanda, cuando esta condición no rige, habría que decir que las mercancías no tienen precio cuando hay, ya escasez, ya abundancia.) Lo que a su vez muestra que una filosofía falsa de la ciencia puede constituir un obstáculo al avance de la investigación científica.

En resumen, ninguna teoría física admite la receta operacionista para la formación de conceptos físicos. Todas las magnitudes que figuran en las teorías clásicas son funciones de la forma

$$M: A \times B \times \cdots \times N \rightarrow \mathbb{C}^n$$

donde $\mathbb{C}$ designa, en general, el conjunto de los números complejos, y $\underline{n}$ es un número natural mayor que 0.

De hecho, sólo unas pocas magnitudes físicas son funciones de valores complejos: el índice de refracción, la impedancia, el campo electromagnético en el vacío, y el estado cuántico. En la enorme mayoría de los casos las magnitudes físicas tienen valores reales, o sea, la fórmula anterior se reduce a

$$M: A \times B \times \cdots \times N \rightarrow \mathbb{R}^n$$

donde $\mathbb{R}$ designa la recta real.

Tal vez se objete que hay que agregar los puntos en el infinito (potencial), o sea, reemplazar $\mathbb{R}$ por $\mathbb{R} \cup \{-\infty, +\infty\}$. Respondo: No, porque uno de los postulados tácitos de la física es que ninguna magnitud (a diferencia de las coordenadas geométricas y del tiempo) pueden asumir valores infinitos. Es verdad que en muchas teorías, en particular teorías de campos, hay singularidades, es decir, valores para los cuales una magnitud toma un valor infinito. Pero estas singularidades son consideradas patológicas, y uno se esfuerza por eliminarlas, o al menos remendarlas, del mismo modo que en el caso de la ley de Boyle, "$p \cdot V = \text{const.}$", no se admiten los valores negativos de la presión y del volumen, pese a que satisfacen la ecuación, por carecer de significado físico.

En física cuántica, algunas variables dinámicas (mal llamadas "observables"), tales como el hamiltoniano y el spin, no son funciones de variables reales o complejas, sino operadores definidos en espacios funcionales (por ejemplo, el hamiltoniano $\mathcal{H}$ es un operador en el espacio H de los estados, o sea, $\mathcal{H}: H \rightarrow H$). Pero ninguna variable dinámica se "define" en términos de operaciones empíricas. Si así se hiciera, las teorías serían paquetes de datos, y no tendría caso contrastar valores calculados con valores medidos. Lo interesante es compararlos, no intentar reducir los unos a los otros.

La gran novedad introducida por los operadores cuánticos es que, a diferencia de las funciones, ellos no tienen (auto)valores precisos en todo momento. Tienen, en cambio, distribuciones de valores. En el mejor de los casos, estas distribuciones tienen picos correspondientes a los valores medios. Por ejemplo, las variables posición y momento lineal tienen distribuciones con varianzas Δx y Δp respectivamente, las que están relacionadas por la desigualdad de Heisenberg $\Delta x{:}\Delta p \geq h/2$. Estas dispersiones pueden modificarse experimentalmente, pero existen aun para cuantones libres.

Esta novedad es aun más evidente en el caso de otras magnitudes, tales como el momento angular y el spin, cuyas componentes carecen de valores precisos al mismo tiempo, de modo que no son vectores propiamente dichos, ni siquiera tensores. En efecto, las componentes del momento angular $L = r \times p$ satisfacen la igualdad:

$$L_x L_y - L_y L_x = ih\, L_z$$

que implica la desigualdad:

$$\Delta L_x\, \Delta L_y \geq h < L_z > \Delta L_z,$$

donde $<L_z>$ es el valor medio de L_z. Con el spin ocurre otro tanto. Y lo mismo sucede con la velocidad en mecánica cuántica relativista: puesto que su componentes no conmutan, carecen de valores precisos al mismo tiempo.

En cambio, en esta teoría sí conmutan entre sí las componentes de la posición y del momento lineal: son vectores propiamente dichos. (Pero no tienen la propiedad de ser definidos como ternas de números.)

Si embargo, no habrá que sorprenderse si un día de éstos se propone una teoría aun más refinada, y por lo tanto más complicada, en que ni siquiera las componentes de estas magnitudes conmuten y, por lo tanto, carezcan de valores precisos al mismo tiempo. Paradoja: cuanto mayor es la exactitud de una teoría, tanto más se esfuman los valores de las magnitudes que contiene.

Bibliografía.

- Bridgman, Percy W. 1927. *The Logic of Modern Physics*. New York: Macmilan Co.

- ---------------------------. 1955. *Reflections of a Physicist*. New York: Philosophical Library.

- Bunge, Mario. 1967 *Foundations of Physics*. Berlín-Heidelberg-New York: Springer-Verlag.

- ----------------. 1982. *Filosofía de la física*, 2da. ed. Barcelona: Ariel.