

## SOBRE LAS DEFINICIONES Y LAS LEYES DE LA FÍSICA

Alberto Chamorro

Los pilares básicos de cualquier teoría son los conceptos y las leyes que los relacionan. Los conceptos han de estar provistos de significado y de aquí que alguna clase de definición o caracterización de ellos sea necesaria. En muchos casos es posible disponer de una cierta definición de los conceptos con anterioridad al establecimiento de las leyes que los interrelacionen con otros conceptos. En realidad siempre sería posible partir de un conjunto de conceptos básicos definidos con anterioridad a las leyes que vayan a formar el entramado teórico; pero una selección de los conceptos básicos realizada con total anticipación e independencia de las leyes a ser establecidas solo casualmente podría conducir a una teoría significativa, a una verdadera teoría científica. Para fijar ideas, y a efectos de una mayor claridad, en lo que sigue trataremos esta cuestión en el marco específico de la Mecánica que, después de todo, se puede considerar el tronco primitivo del que emergieron todas las demás ramas de la Física; ello no restará generalidad a las ideas que se exponen. La realidad es que en la Mecánica, como en cualquier otra ciencia, es crucial cuales sean los conceptos fundamentales que se elijan para su construcción, y por otra parte la selección de estos conceptos, si se ha de terminar elaborando una teoría no trivial, ha de estar fuertemente determinada por la naturaleza y estructura de las leyes que rijan los fenómenos objeto de la disciplina en cuestión. Hay pues una interconexión sutil y compleja entre las definiciones y las leyes. Por una parte las leyes han de establecer concomitancias y regularidades correspondientes a distintos conceptos; por otra, la utilidad y significación de los conceptos sólo queda suficientemente aclarada a través de las leyes en que intervienen.

Naturalmente que una teoría puede ser en principio edificada sobre conjuntos diversos de conceptos básicos; recordemos como en los orígenes del desarrollo de la Mecánica la fuerza, masa y momento de la escuela de Newton eran sustituidas en la de Huygens por el trabajo, la masa y la *vis viva*, y que, como señala Mach<sup>1</sup>, lógicamente ambas esferas de ideas podrían haberse desarrollado ampliamente con mútua independencia. Sin embargo dependiendo de cual sea el conjunto de conceptos básicos por el que se opte la teoría será mas o menos complicada, incluso en aquellos casos en que las teorías finales tuvieran el mismo contenido. El carácter económico de la ciencia demanda que entre dos teorías distintas con el mismo contenido se prefiera la más simple, que también suele coincidir con la más bella. Los conceptos fundamentales de la mecánica de Newton de espacio, tiempo, masa, momento, fuerza y trabajo han demostrado exhaustivamente su utilidad y significación al haber hecho posible una teoría tan simple, sólida y estética como la mecánica clásica. Aunque el criterio de que el conjunto de conceptos y/o definiciones básicas que se elijan conduzca a la teoría más simple entre todas las posibles de igual contenido es un buen criterio tampoco hay que deificarlo ingenuamente; pues una teoría nunca es algo totalmente acabado, y puede ocurrir que en un cierto estadio de desarrollo el conjunto de conceptos básicos A dé lugar a una teoría mas simple que el conjunto de conceptos B, pero con menor potencia para desarrollarse en una teoría más rica de mayor alcance. Por ejemplo, el concepto de fuerza, tan básico en la mecánica newtoniana, no lo es en absoluto en la mecánica cuántica o en relatividad general; sin embargo utilizar para el ámbito de aplicación de la mecánica de partículas de Newton ideas como la de función de onda, tensor de impulsión-energía, o métrica del espacio-tiempo llevaría a innecesarias complicaciones.

En cualquier definición ordinaria el concepto a ser definido, o *definiendum*, ha de serlo en términos de ideas o conceptos de significación previamente conocida, el *definiens*. Pero tener todos los conceptos o términos usados en una teoría definidos en este sentido es lógicamente imposible, pues para haber dado la definición de un término tendríamos que haber definido a su vez cada uno de los términos usados en el *definiens* y, luego, de los términos usados para definir los términos de éste, y así sucesivamente. Para evitar círculos viciosos de cadenas de definiciones conteniendo en algún *definiens* términos que hayan sido definidos previamente en la misma cadena es inevitable una cadena infinita en la que, por lejos que podamos llegar, los términos usados en el último *definiens* solo quedarán definidos más lejos a lo largo de la cadena. Así pues, no todo término de un sistema científico se puede definir por medio de otros términos del sistema: tendrá que haber un conjunto de los llamados

*términos o conceptos primitivos*, de los que no se da ninguna definición dentro del sistema, y que sirven como base para definir todos los demás términos.

Ahora bien, los primitivos de la teoría no pueden ser entes adoleciendo de una total indefinición. Han de ser caracterizados, al menos parcialmente de algún modo, o por lo menos en algún momento del desarrollo teórico. Una cosa es que no se pueda dar una definición completa de estos términos y otra que no se pueda determinar algo sobre su naturaleza. En la aproximación axiomática de la Mecánica, por ejemplo, se toman como primitivos las fuerzas, los pares, la masa, la posición y el tiempo a los que se caracteriza en cierta medida mediante axiomas que deben satisfacer<sup>2</sup>. Como indica Truesdell esta visión está en línea con la actitud de Newton (que introducía el concepto de fuerza **a priori**) y de Euler, y en oposición a aquellas de D'Alembert, Lagrange y Mach.

Un punto de vista distinto es el de los operacionalistas radicales. Según estos cualquier concepto cuantitativo de la Mecánica queda completamente definido especificando las operaciones necesarias para su medida. Más aún, el operacionalismo sostiene que el significado de un término queda total y exclusivamente determinado por su definición operacional. Así Bridgman dice: *El concepto de longitud queda, por tanto, fijado cuando se fijan las operaciones mediante las cuales se mide la longitud: es decir, que el concepto de longitud envuelve tanto como, y nada más que, el conjunto de operaciones mediante las cuales se determina la longitud. En general, un concepto cualquiera no significa otra cosa que un conjunto de operaciones; el concepto es sinónimo del conjunto de operaciones*<sup>3</sup>. Nosotros mismos, en relación con la medida del espacio-tiempo en relatividad, escribíamos hace años: *En toda teoría deben especificarse claramente los medios para medir las magnitudes con las que la teoría trata. En efecto las magnitudes que intervienen en una teoría no poseen una existencia independiente y anterior a los métodos operacionales establecidos para medirlas. Es la operación de medida prescrita la que **define** las magnitudes a medir por ella. Diferentes métodos de medida pueden ser equivalentes en el sentido de definir por su misma operación las mismas magnitudes físicas, dando en consecuencia valores idénticos para ellas, cuando hay una ley física que garantiza un resultado común para las dos operaciones. Sin embargo, en general, si la prescripción operacional se cambia, las magnitudes por ella definidas cambiarán también*<sup>4</sup>.

Hoy ya no mantenemos que la operación de medida defina un concepto o magnitud física. Más bien creemos que la *definición* de un concepto físico, ya sea axiomática u operacional, sólo provee un modelo, siempre provisional e incompleto, para el concepto. Una definición operacional rígida limita empobrecedoramente el concepto por su identificación con el resultado de la operación de medida. Además las definiciones operacionales suelen *quemar* una ley de la teoría por cada definición. Así, por ejemplo, cuando se introduce el concepto de fuerza a través de su medida mediante cierta extensión patrón en un muelle patrón, se está renunciando a la ley de Hooke que deja de ser tal ley para convertirse en un resultado trivial de la definición de fuerza. O cuando se define la masa de un cuerpo como el cociente de la fuerza que sobre él actúa por la aceleración que ésta le imparte, se está degradando la segunda ley de Newton si no fuera por el hecho significativo que el contexto teórico y experimental de la mecánica clásica asegura que la masa de un cuerpo es independiente de la naturaleza, dirección y magnitud de la fuerza aplicada. Una caracterización axiomática de un concepto físico o mecánico, olvidando que la Mecánica no es una parte de la Matemática sino una ciencia de la naturaleza, puede fácilmente introducir al concepto en un corsé impidiéndole su propio desarrollo y clarificación con el avance teórico y experimental.

En definitiva, pensamos que las definiciones de los conceptos dicen algo o mucho sobre ellos, pero no lo dicen todo, y aún más, lo que dicen nunca puede considerarse absolutamente definitivo. Es la teoría con el entramado de sus leyes y correlaciones, junto con la observación experimental, la que conjuntamente con las definiciones y caracterizaciones primitivas de los conceptos va esclareciendo la naturaleza de los mismos. Puesto que ninguna teoría, y en particular la Mecánica, es una teoría acabada en un sentido absoluto, es necesario renunciar a la definición completa de un concepto; en el

sentido de que ni la totalidad de su naturaleza e implicaciones es nunca conocida, ni se puede estar seguro de que aquello que de él se sabe es irrevisable en todas sus partes.

Lo anterior parece estar en consonancia con el punto de vista de Lenzen cuando dice: *Existen la abstracción de conceptos a partir de la experiencia, el descubrimiento de leyes expresadas a base de los conceptos, la definición de los conceptos originarios con un orden superior de aproximación a la vista del aumento de exactitud en la definición de condiciones, la redefinición de los conceptos basándose en las leyes y la reinterpretación de los conceptos originales a base de los nuevos*<sup>5</sup>. La misma visión parece ser básicamente la de Hempel<sup>6</sup> y Margenau<sup>7</sup>, aunque nos parece confusa la noción de definición constitutiva, como diferente de la epistémica u operacional, tal como la introduce el último autor.

En la Mecánica hay ejemplos relevantes de como conceptos fundamentales han tenido que ser modificados a lo largo del tiempo. En realidad no es que hayan sido modificados, sino que el desarrollo de la teoría los ha iluminado haciéndonos aprehender en un mayor grado su naturaleza y significado. La extensión de la Mecánica que supuso la relatividad especial conllevó tal evolución. Así, por ejemplo, en contraste a la concepción newtoniana, en relatividad la magnitud fuerza, en general, no es codireccional con la aceleración que produce ni tiene propiedades de transformación tan simples cuando se pasa a otro sistema inercial. La masa se reveló igualmente como dependiente de la velocidad, algo ajeno a su primitiva concepción.

En Mecánica quizás nada sea tan apropiado como los conceptos de fuerza y masa para ilustrar esa sutil y compleja relación entre definiciones y leyes.

Ya hemos dicho que si se define operacionalmente, aún desde el punto de vista de un operacionalismo crítico, la fuerza como proporcional a la extensión o compresión de un cierto muelle patrón se esta renunciando al derecho lógico de afirmar que el muelle en cuestión satisface la ley de Hooke. Evidentemente, lo que sí se podrá decir es que muelles **distintos** sí la satisfacen, si en verdad éste es el caso. Supongamos que una vez hecha esta definición se introduce el concepto de masa como el cociente de la fuerza impartida al cuerpo de que se trate por la aceleración que adquiere. Esta definición sería algo trivial desprovista de significación física importante, si no fuera por el hecho experimental de que la magnitud así definida resulta ser, bajo condiciones no relativistas, independiente de la dirección y valor de la fuerza aplicada. Es este hecho el núcleo esencial de la segunda ley de Newton, y lo que confiere verdadera importancia dinámica al parámetro masa. La ley, pues, ilumina el significado del concepto masa, o bien, se podría decir que la segunda ley de Newton debe considerarse a la vez como la definición y el descubrimiento de la masa.

Otra posible definición de masa es la de Mach. Para ello se elige un cuerpo A como cuerpo normal y se considera arbitrariamente su masa como unidad. Se hace entonces interaccionar de alguna manera el cuerpo B con el cuerpo A y se mide la aceleración simultánea de ambos; si se encuentra que son  $a_A$  y  $a_B$ , respectivamente, se define la masa de B como  $-a_A/a_B$ . De nuevo vemos que esta definición sería algo poco significativo si no fuera por el hecho de que la masa así definida no depende de la forma como interaccionen los cuerpos (suponemos que la distancia entre ellos es despreciable), ni de que se cambie el cuerpo patrón (haciendo naturalmente el correspondiente cambio en la unidad). Si por otra parte se da por establecida la segunda ley de Newton, la definición machiana de masa implica automáticamente la tercera ley. La definición de masa, con toda su significación de magnitud poseída por un cuerpo, reemplaza aquí al principio de acción y reacción.

Puesto que, según nuestro anterior punto de vista, ninguna definición básica es exhaustiva o definitiva, toda definición tiene sus ventajas y limitaciones. Así, la definición de Mach, suplementada con suposiciones muy simples hace obvio que las masas pueden ser medidas por el peso<sup>8</sup>, pero al mismo tiempo puede ser criticada por otras razones<sup>9</sup>. En la teoría general de la relatividad la masa de

una partícula, junto con su velocidad, determina la métrica del espacio-tiempo en el entorno de su línea de universo. En ausencia de otros cuerpos o campos, el conocimiento de esta métrica puede ser en principio utilizado para la definición de masa. Una definición de este tipo no sería estrictamente equivalente a las anteriores, pero podría ser más conveniente en contextos experimentales más amplios.

Toda la historia de los conceptos fundamentales de la Mecánica está transida de un continuo refinamiento de estos a la luz de nuevas leyes. Más aún, se podría decir que la definición de un concepto realmente importante ha sido generalmente equivalente al establecimiento de una ley. Si la definición de Mach de masa puede equipararse a la tercera ley de Newton, la segunda ley de Newton con la masa así definida podría identificarse con la definición de fuerza desde esta óptica.

Como dijimos anteriormente, las consideraciones hechas para los conceptos y leyes de la Mecánica son generalmente aplicables al resto de la Física.

#### REFERENCIAS

1. E. Mach, *The Science of Mechanics*, The Open Court Publishing Co., La Salle, Illinois, pp. 314-5, 1974 .
2. W. Noll, The Foundations of Classical Mechanics in the Light of Recent Advances in Continuum Mechanics, pp. 266-81 de *The Axiomatic Method, with Reference to Geometry and Physics* (Symposium en Berkeley, 1957), North-Holland, Amsterdam, 1959; reimpresso en W. Noll, *The Foundations of Mechanics and Thermodynamics*, Springer-Verlag, New York, 1974; C. Truesdell, *A First Course in Rational Continuum Mechanics*, Vol. 1, Academic Press, pp. 3-69, 1977.
3. P. W. Bridgman, *The Logic of Modern Physics*, The Macmillan Co. New York, p. 5, 1927.
4. A. Chamorro, *On the Perception and Measurement of the Accelerated Observer of the Clock Problem*, *Pramana*, **9**, 362 1977.
5. V. F. Lenzen, *The Nature of Physical Theory*, John Wiley & Sons, New York, 1931.
6. C. G. Hempel, *Filosofía de la Ciencia Natural*, Alianza Editorial, Madrid, 1980.
7. H. Margenau, *La Naturaleza de la Realidad Física*, Editorial Tecnos, Madrid, 1970.
8. Ref. 1, pp. 264-71.
9. M. Bunge, *Am. J. Phys.* **34**, 585, 1966.