

# SOBRE EL CONCEPTO DE PARTICULA ELEMENTAL Y EL PRINCIPIO DE HEISENBERG DE LA FISICA ACTUAL

F. M. Gomide \*

## INTRODUCCION

Una mirada superficial al panorama científico de la Física podría provocar conceptos errados, como: precisión absoluta de las dimensiones físicas, comportamiento del universo "more" mecánico, o, lo que es lo mismo, perfecto comportamiento espacio—tiempo de los componentes de los sistemas materiales.

Estos conceptos errados provienen generalmente de un supuesto epistemológico inaceptable, relativo al conocimiento de los objetos materiales. Encontramos, en primer lugar, el siguiente error en ese supuesto: cosificación de los conceptos que el físico utiliza. Otro error es: identificación de los valores numéricos de dimensiones físicas con los números de las matemáticas (el mito de la precisión absoluta).

El físico utiliza formalismos matemáticos que representan, en el plano intencional, los procesos observados en la experiencia planificada. Como tales, esos formalismos no se identifican con *conceptos de cosas*, pues son construcciones ideales que dan sentido a las operaciones inherentes a las cosas observadas. Como vamos a ver, los conceptos de "punto material" y de "partícula elemental" no pueden ser concebidos como cosas. En otros términos, podemos decir que el formalismo utilizado por los físicos constituye una estructura de relaciones intencionales formales representativas de las relaciones formales en los objetos del mundo físico. Lo que significa, por lo tanto, que la Física focaliza relaciones formales de las cosas materiales y no las cosas mismas.

En cuanto al segundo error, el mito de la precisión absoluta, debemos decir que está emparentado con el primero. Una cosa es la matemática pura, disciplina ideal, cuyo criterio de verdad es la consistencia lógica de la teoría con el cuerpo de postulados escogidos, y otra cosa es la matemática aplicada a la Física. La matemática en Física, por el hecho de servir para significar procesos materiales, está sujeta a otro criterio de validez. Así, por ejemplo, la Geometría de Riemann, en cuanto matemática pura, es válida, pero en cuanto teoría del espacio físico en los sistemas astronómicos, depende de la verificación experimental. Pero esto significa *medida*. Ahora bien, la medida de magnitudes no nos proporciona valores numéricos idénticos a los de la matemática, pues existe el error de medida o desviación, que impone un límite necesario al número de cifras significativas del valor numérico. Nunca un aparato de medida podrá medir el número  $\sqrt{2}$  como siendo: 1.414... ad infinitum. El "ad infinitum" sólo existe en la matemática: las medidas físicas desconocen tal infinito. Además, hemos de tener en cuenta que los valores numéricos medidos se refieren a dimensiones físicas, lo que

significa que esos valores están referidos a elementos materiales, lo cual no es el caso de la matemática. Por ejemplo, cuando decimos que una partícula posee "masa de  $x$  gramos", estamos imprimiendo al número  $x$  un elemento no matemático, un significado de origen material.

Ese mito de la precisión absoluta envuelve el concepto de "proceso físico" con la idea de "determinismo matemático", "previsibilidad absoluta", "elucidación de todos los secretos del universo". Queremos, en este trabajo, explicitar, con el concepto de partícula elemental y el principio de indeterminación de Heisenberg, lo que hemos procurado mostrar en esta introducción. Sobre el principio de Heisenberg presentamos dos demostraciones elementales conocidas, la que recurre a la idea de "corpúsculo" y la que se basa en el concepto de "haz" de ondas" (wave packet). Al lego no le es en absoluto necesario seguir esas demostraciones, toda vez que lo que nos interesa primordialmente es el significado epistemológico de esos conocimientos. Entre tanto, siempre es elucidativo para el filósofo de las Ciencias acompañar el formalismo físico—matemático con la base de los conceptos y principios fundamentales de la Física.

## CONCEPTO DE PARTICULA

Veamos de modo sumario cómo es definido ese concepto en el esquema clásico y luego en el esquema cuántico de la Física moderna. La Física nos muestra que, tanto en el esquema de la teoría clásica como en el de la cuántica, debemos apartar la idea de que una partícula es un "cuerpo en miniatura". La *aplicabilidad del formalismo matemático*, que define "partícula", a un determinado sistema físico, estriba en que diga si éste está constituido por partículas. En la mecánica cuántica, el principio de Heisenberg introduce una transformación profunda en el formalismo que define el concepto considerado. Veamos estos dos esquemas.

El concepto de "punto material" de la mecánica clásica no es algo así como "un cuerpo cuyo diámetro tiende a cero". "Punto material" es una idea definida en función de ciertas ecuaciones fundamentales de la mecánica clásica. Si tales ecuaciones son aplicables a un sistema físico determinado, podemos decir que tal sistema está constituido por puntos materiales. Por ejemplo: el sol y la tierra forman un sistema compatible con las ecuaciones que definen el concepto de punto material; las moléculas de un gas en la estadística de Boltzmann también pueden ser consideradas como puntos materiales. Sin embargo, esos mismos objetos dejan de ser puntos materiales cuando son tomados bajo otra consideración. Así, por ejemplo: la tierra, en el sistema tierra—luna, no puede ser tomada como punto material, pues debemos tener en cuenta su estructura; en el estudio de los espectros moleculares, ya las moléculas no pueden ser tomadas como puntos materiales. En otros términos, podemos definir "punto material" como *cualquier* entidad física que, abstractamente considerada, puede ser definida mecánicamente por los vectores de posición ( $X, Y, Z$ ) y por cantidad de movimiento ( $P_x, P_y, P_z$ ). Ahora bien, en la mecánica cuántica esta definición no funciona.

La partícula elemental de la Física actual es una entidad bastante compleja, para la que no funciona el esquema clásico. No puede ser asociada a la simultánea determinación de los vectores "p" y "q" a causa del principio de Heisenberg. El concepto de partícula elemental debe ser definido mediante una ecuación

ción diferencial, cuya solución es la función "psi", o función de onda. La función que define a la partícula no son los vectores "p" y "q", sino la función de estado "psi". Esta función, en la mecánica cuántica relativista, es visualizada como un campo, el campo ondulatorio. En esta mecánica cuántica, introducida por Dirac en 1928, la partícula es vista como una indeterminación o cuantización del campo "psi". El hecho de que no podemos describir una partícula elemental mediante las ecuaciones de la mecánica clásica, significa que no puede ser descrita mediante un esquema espacio—temporal perfecto.

David Bohm considera que la partícula es un concepto que se refiere a una potencialidad de propiedades que se manifiestan por interacciones. Este carácter *no actual*, sino *potencial*, de lo que se llama "partícula elemental", muestra que no podemos considerarla como un "micro—cuerpo". La mecánica cuántica nos prohíbe que visualicemos las partículas elementales como entidades concretas según el modelo de los átomos de Demócrito. El célebre filósofo griego consideraba los átomos como las partículas elementales constitutivas de la materia, poseedoras de un carácter espacio—temporal, lo que significa que eran vistas como cuerpos en miniatura. Este realismo ingenuo de Demócrito es rechazado por el contexto de la mecánica cuántica de modo más enfático todavía que en la mecánica clásica.

## EL PRINCIPIO DE HEISENBERG

Respecto al principio de indeterminación, o principio de Heisenberg, debemos observar inicialmente que no tiene una interpretación uniforme de su significado en los medios científicos, toda vez que el principio considerado introduce, dentro del dominio de las leyes y conceptos fundamentales de la Física, conceptos que son de nivel filosófico. Su formulación matemática es sencilla, pero su significado no es tan sencillo por la indicada razón. Encontramos escuelas diversas en la interpretación del principio de Heisenberg, entre las cuales la más importante, por el hecho de ser la de mayor aceptación en los medios científico—filosóficos, es la escuela de Heisenberg y Niels Bohr. A pesar de las diferencias entre las diversas interpretaciones de la relación de la indeterminación o incertidumbre, existe una línea de pensamiento común, y es esto precisamente lo que vamos a explicitar, de una manera general, en este trabajo.

Sin embargo, antes de estudiar el principio, veamos el concepto de *determinismo o causalidad de la Física*. En la mecánica clásica existe el siguiente principio fundamental, que resulta del teorema de Peano del análisis matemático, aplicado a las ecuaciones diferenciales que obedecen las condiciones de continuidad en su campo de definición:

"Dadas las ecuaciones diferenciales de movimiento de un sistema de puntos materiales y conocidas las condiciones iniciales y del contorno, se pueden hallar las funciones solución del sistema de ecuaciones diferenciales, funciones de tiempo, de modo que se puede determinar el estado del sistema en cualquier tiempo "t" de evolución del mismo".

En otros términos: dadas las condiciones iniciales:

$$q_{0i} = q_{0i}(t_0)$$

$$i = 1, \dots, 3n$$

$$p_{0i} = p_{0i}(t_0)$$

y dadas las condiciones del contorno, podemos determinar los valores para cualquier

$$q_i = q_i(t)$$

$$p_i = p_i(t)$$

para cualquier tiempo (igual o mayor que  $t_0$ ) en la evolución del sistema. Los valores  $q_i$  y  $p_i$  son las coordenadas de posición y cantidad de movimiento de  $n$  puntos materiales, dadas en coordenadas generalizadas: así, pues,  $q_i$  puede ser una distancia o un ángulo, y  $p_i$  puede ser cantidad de movimiento lineal o angular. El conjunto de esas coordenadas constituye el *estado* del sistema dinámico. El principio enunciado dice, consiguientemente, que el estado del sistema en un tiempo  $t_0$  determina su estado futuro en un tiempo  $t$ . Por eso, ahora, y conociéndose sus ecuaciones de movimiento, podemos determinar su estado en cualquier tiempo futuro. Esa determinación del futuro por el pasado es lo que significa un nexo causal; de ahí, el término "causalidad" o "determinismo".

Observemos lo siguiente: las condiciones de contorno determinadas, lo que es necesario para la validez del principio, muestran que debemos considerar la aplicabilidad del mismo como limitada, toda vez que esa condición matemática representa el hecho físico de que el sistema debe ser visto como *aislado*. Ahora bien, sistemas aislados en la naturaleza sólo los hay dentro de ciertos límites. Por ejemplo, nada nos garantiza que el sistema solar, considerado aislado, no encuentre en un futuro desconocido algún astro que venga a perturbar su equilibrio. Las ecuaciones de movimiento de un péndulo son válidas dentro de un cierto margen de error, pues en un péndulo real nos dice que el mismo no es un sistema aislado. Por otra parte, el principio supone que las condiciones del contorno sean matematizables, esto es, determinadas. Pero sucede que en la naturaleza esas condiciones son así en casos límite, como, por ejemplo, las fluctuaciones técnicas imprevisibles que circundan un sistema. El principio supone una matematización de los parámetros de movimiento, así como de las condiciones iniciales y del contorno; ahora bien, sabemos que esa matematización pertenece a la esfera de los entes ideales de la matemática; en la Física no tiene sentido el hablar, por ejemplo, de:

$$\sqrt{2} = 1,414... \text{ ad infinitum.}$$

Con esto ya vemos que Laplace estaba equivocado. Este matemático y astrónomo decía que si conociésemos las condiciones iniciales del universo, podríamos conocer su estado futuro en cualquier tiempo. La actitud de Laplace constituía una extrapolación indebida. Hans Reichenbach, analizando la idea del determinismo clásico, llegó a la conclusión de que es un caso límite de secuencias de previsiones con probabilidad creciente.

La teoría de la relatividad, desarrollada en este siglo, vino a mostrar que la misma determinabilidad de las condiciones iniciales no puede ser universal, ni siquiera para sistemas dinámicos matematizables en la teoría. Las limitaciones ya señaladas, se refieren a la aplicación del principio matemático a los sistemas físicos, pero, en la relatividad, *esa limitación se muestra ya dentro de la misma teoría*.

La mecánica cuántica, como el principio de indeterminación de Heisenberg, dan un golpe de muerte al principio en el dominio de los sistemas atómicos, pues,

de acuerdo con el mismo, es imposible representar el estado del sistema dinámico por la simultánea determinación de las coordenadas de posición y cantidad de movimiento. En la esfera de los fenómenos atómicos, no funciona la mecánica de Newton, sino la llamada *mecánica cuántica*. En esta mecánica, el estado de un sistema de partículas ya no puede ser representado por las coordenadas "p" y "q", sino por la función "psi". Veamos el enunciado del principio y dos deducciones elementales presentadas por Heisenberg. (1)

Debemos observar lo que ya señalamos antes, que una imprecisión en una medida no es sinónimo de error, sino algo que representa la diferencia que hay entre número matemático y número aplicado a los sistemas físicos. La demostración de Heisenberg muestra que, en el campo atómico, la desviación se vuelve importante hasta el punto de dejar sin sentido el determinismo clásico. Por otra parte, la mecánica cuántica deduce el principio independientemente de apelar a la idea de medida. La interpretación general en la mayoría de las escuelas científicas es que tal indeterminismo es objetivo y no subjetivo. Aquí podemos dar otra deducción del principio en que no entra la noción de medida. Heisenberg realiza una deducción elemental, basada en el concepto de "haz de ondas" introducido por Schroedinger. Schroedinger, viendo que las partículas elementales presentan propiedades ondulatorias, imaginó que la partícula podría ser un fenómeno ondulatorio en una estrecha región del espacio. El principio de Heisenberg y la mecánica cuántica vienen a mostrar que en el universo no debemos buscar un proceso que se desenvuelve mecanicísticamente, según el modelo de la mecánica clásica. Los éxitos de la mecánica clásica en el siglo pasado llevaron a algunos filósofos precipitados a ver en el universo una evolución determinística inexorable, como, por ejemplo, Hegel y Marx, cuya filosofía de la historia humana se compagina muy bien con la suposición laplaciana. La Física, en nuestros días, no ofrece *background* para tales fábulas.

### B I B L I O G R A F I A

- F. M. GOMIDE, *On the Causality Principle of Physics*. Anais do Congresso Internacional de Filosofia, Vol. III, pág. 833, 1954, Sao Paulo.
- F. M. GOMIDE, *Sobre o conceito de lei nas ciencias do mundo inorgânico*, Revista Brasileira de Filosofia; Vol VII, pág. 285, 1957.
- W. HEISENBERG, *Quantum Theory*, Dover.
- D. BOHM, *Quantum Theory*, Prentice-Hall.
- M. BUNGE, *Survey of the Interpretations of Quantum Mechanics*, American Journal of Physics, Vol. 24, N. 4, 1956.
- H. MARGENAU, *Advantages and Disadvantages of Various Interpretations of the Quantum Theory*, Physics Today, Vol. 7, N. 10, 1954.

F. M. GOMIDE es Profesor del Instituto de Tecnología de la Aeronáutica, de Sao Paulo, Brasil. Físico de formación, se ha dedicado especialmente a la Filosofía de la Ciencia, campo en el que ha publicado prestigiosos trabajos. Discípulo de César Lattes, actualmente se dedica a la Física cuántica.

Trad. C. L. C.

(1) N. de R.: Por dificultades materiales, se han suprimido.