

La Física actual y el determinismo

LOS ANALES han publicado en uno de sus últimos números un interesante artículo de Ch. Fabry, sobre las modernas teorías de la Física. Los lectores de la Revista no estimarán tal vez inoportunas algunas nuevas consideraciones sobre este mismo tema, en vista de la extraordinaria importancia de las conclusiones a que se ha llegado, y que no han encontrado cabida en el artículo de Fabry, por la forma extremadamente sumaria como recorre el campo de las investigaciones recientes de la Física,

I

Se habla ahora continuamente de la crisis de la Física. En estos tiempos de honda crisis económica, la palabra se encuentra de moda, y uno se pregunta si efectivamente la crisis de la ciencia básica de la naturaleza inanimada tiene alguna semejanza con las crisis de que se llenan hoy día los diarios y revistas: crisis monetaria, crisis financiera, crisis social, etc.

¿Qué es una crisis económica? Sin pretender de economista, diré que es el estallido del desequilibrio crónico entre la producción y el consumo, así como es el desequilibrio entre el movimiento de las

partículas superficiales de la ola y el movimiento de las que se encuentran cerca del fondo, producido por la mayor resistencia que encuentran estas últimas al rozar contra la arena, el que, al acumularse en cierto trayecto, produce la quebradura de la cresta de la ola y forma la rompiente, que caracteriza las playas del mar.

Pues bien, la historia de la Física nos revela la existencia de crisis sucesivas, originadas también por un desequilibrio: el que se produce cuando las teorías explicativas no guardan la necesaria proporción con las teorías descriptivas de los fenómenos naturales. Desde los tiempos más remotos se han hecho notar dos corrientes de ideas en el estudio de la naturaleza: la corriente de los que tratan de reducir los fenómenos a acciones mecánicas entre las partículas más elementales de que se suponen compuestos los cuerpos, y la corriente de los que buscan las leyes generales que relacionan unos fenómenos con otros, sin hacerlos depender de hipótesis sobre la constitución de la materia o de los agentes físicos. De la primera corriente nacen las *teorías explicativas*, de la segunda, las *teorías descriptivas*.

Según Duhem, los que se afilian a la primera corriente, o escuela especula-

tiva, serían los espíritus amplios e imaginativos; los afiliados a la segunda corriente, o escuela positiva, serían los espíritus profundos y abstractos.

Los fundadores de la ciencia en la antigua Grecia: Demócrito, Empédocles, Leucipo, fueron los primeros grandes físicos especulativos, los que imaginaron los átomos como elementos constitutivos del mundo externo. Su escuela encontró numerosos discípulos que llenaron el mundo antiguo y que, por boca de Lucrecio, esparcieron la doctrina a través de los siglos, hasta los tiempos modernos.

Pero ya en la antigüedad tuvo su origen también la otra corriente, cuyo jefe indiscutible fué Aristóteles. Para el gran filósofo de Stagira, el análisis de la realidad se resume en el análisis del pensamiento. El no va a buscar los elementos constitutivos de la naturaleza objetiva en la materia misma, sino en nuestras ideas; las reduce a categorías y con estas categorías establece una teoría de la realidad externa, pues, según él, hay congruencia completa entre la realidad y el pensamiento. He aquí una teoría abstracta que la autoridad de su autor iba a hacer prevalecer durante toda la edad media, para ser después oscurecida por las teorías explicativas de los sabios del Renacimiento y no venir a resurgir sino en las postrimerías del siglo pasado, pero completamente modificada por el influjo de las corrientes modernas del pensamiento.

Descartes, Gassendi, Huygens, fueron los que en el siglo XVII crearon de nuevo, se puede decir, la física de los átomos, y los rápidos progresos efectuados por la ciencia en su tiempo se debe al impulso que ellos y sus discípulos le dieron, basándose en la explicación mecánica de los fenómenos, que las leyes del movimiento, descubiertas por Galileo y New-

ton, hacían posible, después de los largos siglos que las ideas de Aristóteles habían contribuído a mantener en completa ignorancia estos hechos.

Huygens decía, al comenzar su Tratado de La Luz, que «la verdadera filosofía» era aquella en que «la causa de todos los fenómenos naturales se concibe por razones de mecánica», «lo que es preciso hacer, agregaba, o bien renunciar a la esperanza de jamás comprender nada en la Física».

En Newton encontramos tal vez el primer gran ejemplo de un espíritu a la vez amplio y profundo, imaginativo y abstracto. Si con su famoso «*Hypothesis non fingo*», puso en guardia, por una parte, contra los sistemas demasiado audaces que pretendían reducir todo el Universo, sistemáticamente, al espacio y al movimiento, con su teoría corpuscular de la luz demostró prácticamente que, en ciertos momentos, la reducción de la experiencia a leyes sólo puede conseguirse apoyándose en construcciones explicativas que introducen elementos todavía no observados por los sentidos, pero que pueden llegar a ser observables con el progreso de los métodos experimentales.

Cobijados bajo su prestigio, sus continuadores se afiliaron ya en una, ya en otra corriente, y todo el siglo XVIII se llena con la lucha entre los cartesianos, partidarios del movimiento puro, y los leibnicianos, que llegaban en sus abstracciones hasta pretender unir en una gran síntesis los fenómenos de la naturaleza inanimada, de la vida y del espíritu.

El éxito de la teoría de la gravitación de Newton indujo a los físicos a quererlo explicar todo por medio de centros de fuerzas que se atraen y se repelen en razón inversa del cuadrado de las distancias y de flúidos imponderables que actúan según análogas leyes. A fines del

siglo, Laplace cree alcanzar la meta de la explicación mecánica del Universo, y pide se le den la posición y velocidades de los átomos de todos los cuerpos para deducir todos los hechos pasados y todos los venideros, del mundo inorgánico, al mismo tiempo que Lavoisier, siguiendo la corriente simplemente descriptiva, se limita a observar y a someter al control de su balanza los fenómenos, y esto le basta para demostrar que el calor no puede ser un flúido, y produce una revolución en las ciencias experimentales, de la que surgió, para dominar sin contrapeso en el siglo XIX, el principio netamente positivo, de la *Conservación de la materia*.

Fué la primera gran crisis de la Física. Como fruto de ella obsérvase un gran resurgimiento de las investigaciones experimentales, que el principio recientemente descubierto hacía posible con éxito creciente. Young y Fresnel descubren nuevos fenómenos que reviven la teoría ondulatoria de la luz de Huygens, los que parecen estar en contradicción con la teoría corpuscular de Newton, que sostiene Laplace, con argumentos comparativamente muy débiles. Esta lucha se prosigue hasta quedar, al parecer, definitivamente zanjada tiempo después, ante el resultado de la experiencia crucial de Foucault, sobre la velocidad relativa de la luz en el éter y en el agua.

Coulomb inicia sus investigaciones sobre las acciones eléctricas y magnéticas y enuncia luego las leyes de la atracción y repulsión de las masas, calcadas sobre la ley de Newton; Volta revive el galvanismo con su descubrimiento de la pila eléctrica y, gracias al impulso dado por estos sabios, esta ciencia alcanza un desarrollo que los primeros fenómenos electromagnéticos descubiertos por Ersted y estudiados teóricamente en seguida por Laplace y Ampère, no hicieron sino

extender por campos de investigación insospechados y de perspectivas incalculables.

La Física crece rápidamente como un árbol frondoso cuyas ramas fueron la Óptica, la Electricidad, la Mecánica y Acústica, el Calor, pero falta un principio director; el tronco común es demasiado débil y el peso de las ramas que avanzan confusamente parece que va a producir el desmembramiento de los retoños, nacidos de la madre común. La Química, definitivamente separada de su hermana la Física, se ha apoderado del Principio de la conservación de la materia y la ha dejado vagar un poco como cuerpo sin alma a través de los fenómenos naturales, que surgen incontables por doquier.

Pero, a impulso de las experiencias que sobre la naturaleza del calor realizan Black, Rumford y otros, se va formando una corriente subterránea que reúne una serie de hechos dispersos venidos de todas las ramas de la ciencia y que acusan un origen común. Existía la conciencia de que una gran ley natural común alimentaba todas las ramificaciones de la Física, pero faltaba el genio que descubriera y enunciara su existencia, y este genio tardaba en llegar. Nos encontramos en medio de la segunda gran crisis de la Física, crisis que se iba a resolver en una de las revoluciones más trascendentales y fecundas de la ciencia moderna.

En 1824, Sadi Carnot publica sus *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*, libro en que se encuentran, ya explícitamente enunciadas, ya sólo vislumbradas o encubiertas, ya, en fin, erróneamente consideradas pero en germen, todas las grandes ideas que transformarían la Física entre 1830 y 1850. Sabido es que sólo en 1842 fué por primera vez enunciado claramente el Principio de la Equivalencia entre el Calor y el

Trabajo, por el médico alemán Roberto Mayer, y que entre ese año y 1850, este Principio fué reconocido como una ley general de la naturaleza y aplicado a los fenómenos eléctricos, químicos y mecánicos, gracias a los esfuerzos de Joule, Helmholtz y otros, transformándose en el *Principio de la Conservación de la Energía*, base fundamental de la Física moderna y de todas las ciencias naturales.

Por los mismos años, los trabajos e investigaciones de William Thomson y de Clausius conseguían extraer de la obra de Sadi Carnot la ley de evolución de los fenómenos regidos por el principio de conservación de la energía, es decir, la ley que da el sentido en el cual el fenómeno deberá realizarse, y que es conocida por los nombres de *Principio de Carnot-Clausius*, del Aumento de la Entropía, de la Disipación de la Energía, o, simplemente, de Segundo Principio de la Termodinámica.

Como frutos de esta segunda gran crisis de la Física se obtienen, pues, los dos principios de la Termodinámica y, basándose en ellos, la ciencia se renueva y resurge animada de una vitalidad jamás alcanzada anteriormente, gracias a la brillante labor de los sabios más ilustres del siglo pasado: William Thomson, Helmholtz, Maxwell, Clausius, etc.

La Teoría mecánica del Calor fué el centro alrededor del cual se sistematizaron los hechos experimentales, y de nuevo esta teoría hizo renacer la esperanza en una explicación integral de la naturaleza como un gran mecanismo sometido únicamente a las leyes del movimiento y a los dos principios generales recientemente descubiertos. Expusieron sistemas en que la materia y la energía, las fuerzas y el movimiento, constituían los únicos ingredientes del Universo, y un resumen de ellos lo encontramos en

ese interesante libro «La Unidad de las Fuerzas Físicas», del P. Secchi, que fué como el breviario científico de toda una generación y que impregnó, hace ya más de 50 años, de entusiasmo sincero a nuestros padres y maestros, trayendo hasta estas apartadas regiones del planeta un eco de las más avanzadas corrientes de ideas de los centros intelectuales de Europa. Hoy, al releerlo, nos cautiva aún en su ingenua aspiración de construir un mundo regido únicamente por las leyes de la mecánica, porque nos descubre un estado general de los espíritus a principios de la segunda mitad del siglo XIX, que fué el resultado de los descubrimientos científicos que vengo recordando.

Pero esta aspiración al mecanismo universal fué poco a poco desvaneciéndose en una vaga ilusión al parecer irrealizable. Algunos fenómenos caloríficos parecen presentar caracteres irreductibles al mecanismo, y la explicación mecánica de los fenómenos luminosos no pudo alcanzarse jamás, a pesar de los esfuerzos incansables de William Thomson y otros físicos eminentes. Tampoco la electricidad parecía reducirse a la mecánica, y las concepciones concretas de Faraday sobre los campos eléctricos y magnéticos sólo sirvieron de guía para llegar a la abstracción más completa hasta entonces alcanzada, con la teoría electromagnética de la luz de Maxwell. Esta teoría realizó la síntesis grandiosa de la Electricidad y de la Óptica, cuyos fundamentos deben ir a buscarse en las dos ecuaciones generales del campo electromagnético, a que Maxwell llegó, guiado principalmente por su genial intuición, lo que hizo exclamar a Hertz la célebre frase: «¿fué Dios mismo el que trazó estos signos?».

Observóse entonces un fenómeno nuevo en el campo de los estudios físicos:

los sabios que hasta esa época habían seguido libremente sus inclinaciones espirituales, sea hacia las investigaciones abstractas de la escuela positiva, sea hacia las explicaciones mecanísticas o concretas de la escuela especulativa, comenzaron a agruparse en estas dos distintas corrientes, que propiciaban métodos divergentes de investigación. Un saludable espíritu filosófico animó entonces el ambiente de la Física, que contribuyó a estudiar y profundizar los fundamentos lógicos y experimentales de la ciencia, y a su influjo se delinearón, con mayores relieves, las dos escuelas de físicos que comenzaban a luchar ya abiertamente por el predominio en el campo de las investigaciones.

En la escuela de los físicos abstractos, o tendencia positiva, figuraron luego a la cabeza Kirchhoff, Mach, Duhem y Ostwald, este último, su más constante y decidido sostenedor, cuya ambición era sepultar definitivamente la teoría de los átomos, para establecer en su lugar una descripción de los fenómenos físicos basada exclusivamente en la noción de energía y la termodinámica. En la escuela de los físicos imaginativos, o tendencia mecanista, brilló con los fulgores de un sol incomparable la figura venerable de Lord Kelvin (W. Thomson), hasta que el peso de los años lo condujo a la inmortalidad en 1907. Pero el jefe indiscutible de esta escuela, el campeón irreductible de la hipótesis atómica, que soportó por momentos, casi solo, todo el peso del ataque de la escuela contraria, fué el físico vienés Boltzmann. En 1895, Ostwald canta victoria proclamando la derrota del atomismo contemporáneo, y Boltzmann responde con su artículo (1) «Die Unentberlichkeit der Atomistik», en los

precisos momentos en que Perrin demuestra la naturaleza corpuscular de los rayos catódicos y en que Becquerel descubre la radioactividad, descubrimientos seguidos inmediatamente por las investigaciones de J. J. Thomson y de los físicos de la Universidad de Cambridge sobre la constitución atomística de la electricidad.

La lucha entre los energetistas y los atomistas terminó, entonces, por el triunfo indiscutible de estos últimos, como consecuencia inmediata de los nuevos descubrimientos: el atomismo no sólo se mostraba eficaz en el estudio de la materia, sino que invadía el campo de la electricidad, y, aun, de las radiaciones:

La lucha trabada entre ambas escuelas no había sido estéril, sin embargo; lejos de eso sirvió para producir una saludable revisión de los principios de la Física y especialmente de la Mecánica y para apartar de estas ciencias los elementos metafísicos de que se encontraban impregnadas, como herencia de las grandes escuelas filosóficas de los siglos XVII y XVIII.

Para los nuevos físicos es la experiencia la única capaz de indicar rumbos al pensamiento científico. Las teorías e hipótesis tienen por finalidad la descripción de la experiencia y de las sensaciones futuras que el investigador prevé en su intuición de la realidad objetiva. Como lo dijo Perrin, por ese entonces, con palabras definitivas: «Yo no ceso de recordar que la sensación es la sola realidad. Es la sola realidad, pero a condición de agregar a las sensaciones actuales todas las sensaciones posibles».

Hemos visto que cada crisis anterior de la Física dejó como enseña perdurable de su influencia en el progreso de la ciencia, el establecimiento de un principio general y abstracto que rige los fenómenos. La crisis de fines del siglo pasado

(1) Traducido literalmente: «La indispensabilidad de la Atomística».

no debía faltar a esta regla, que da la medida del beneficio permanente conseguido después de vuelta la calma al mundo científico. En esta ocasión la conquista alcanzada fué el célebre teorema de Boltzmann que da el valor de la entropía de un sistema como medida de la probabilidad de su estado termodinámico y permite definir el segundo Principio de la Termodinámica como tendencia natural al paso de un estado menos probable a uno de mayor probabilidad, ley que, aunque descubierta por el sabio vienés muchos años antes, no había tenido aplicación y había permanecido como ignorada por todos los investigadores hasta que el triunfo de las ideas atomísticas la llevó de golpe a situarla a la cabeza de los principios directores de la Física moderna. Ya en el último año del siglo, Planck la tomó como base para sus investigaciones sobre la teoría de la radiación del calor, la que, junto con cerrar el período de las crisis pasadas, traía envuelto el germen de la crisis subsiguiente, a que se refiere principalmente este artículo.

Acabamos de decir que la crisis del atomismo y del energetismo dió lugar a una crítica de los principios generales de la Física y de la Mecánica, pero no pudo pretenderse que esa crítica dejara agotado el tema de discusión sobre la validez absoluta de esos principios, pues jamás se conseguirá asentar la ciencia sobre bases inamovibles, lo que equivaldría a conocer la verdad absoluta, quimera metafísica ajena a la preocupación de los hombres de ciencia. No es de extrañarse, entonces, que apenas apaciguada la lucha entre atomistas y energetistas, los nuevos y abundantes descubrimientos sobre la constitución corpuscular del átomo y de la electricidad, hicieron surgir nuevas discusiones alrededor del mismo problema,

que luego trascendieron al círculo más vasto de las personas de cultura general, gracias a la circulación de libros de vulgarización, que, con títulos más o menos llamativos, pusieron de moda la idea de que en la ciencia no había nada seguro y cada nuevo descubrimiento traía como consecuencia una total renovación de lo que hasta ese momento se estimaba como conocimiento definitivo.

Si esta impresión recibía el observador superficial y poco entendido en la materia, en el fondo lo que había era que la Física necesitaba otra vez una nueva revisión de sus fundamentos, pues los diez años de investigaciones transcurridos desde la crisis anterior, habían sido bastantes para acumular una serie de problemas que obstaculizaba el progreso de la ciencia. La crisis se precipitó con el advenimiento del sabio que tuvo el genio suficiente para ver con claridad cuáles eran esos problemas y la forma de resolverlos: me refiero a la crisis de la Relatividad, que había de hacer para siempre inmortal el nombre de Alberto Einstein.

Inútil sería querer esbozar en pocas palabras esta célebre teoría, pues nadie que se precie de medianamente ilustrado, ha dejado de estudiar, de leer o de comentar alguna vez las ideas de Einstein, y yo mismo he contribuído, años ha, a difundirlas, llevado por el juvenil entusiasmo que la genial concepción despierta en un aficionado a las ciencias físicas. Mencionaré, no obstante, las ideas fundamentales que guiaron a Einstein en sus investigaciones y que son los frutos que la crisis relativista produjo para la Física:

1.º) Relatividad del movimiento para todas las experiencias físicas y mecánicas, y, como consecuencia inmediata, relatividad del concepto de simultaneidad en dos lugares diferentes;

2.º) Relatividad de la inercia, y

3.º) Equivalencia de la inercia y de la pesantez.

Sabido es que estos principios permitieron a Einstein abordar y resolver el viejo enigma de la gravitación, y, como consecuencia, aclarar el misterio de la infinitud del espacio interestelar. Según Einstein el espacio sería ilimitado pero finito, y hoy día, complementadas estas ideas con las del abate Lemaitre, en su grandiosa concepción del Universo expansivo, comprendemos que no sólo la materia, sino también el espacio y el tiempo, nacen, crecen y se transforman, orientados hacia gigantes evoluciones que se desarrollan en nuestra presencia y sobrepasan ya los límites de nuestra capacidad de conocer.

II

La Mecánica clásica nació de la experimentación y reflexión sobre los fenómenos de la vida cotidiana. La leyenda de la manzana de Newton, si no es histórica, es perfectamente verosímil y retrata los procedimientos científicos de aquellos grandes descubridores.

El principio de relatividad hizo extensivo el campo de aplicación de la mecánica a las grandes velocidades, comparables a la velocidad de la luz, sólo alcanzadas por los corpúsculos y pudo, como consecuencia, extenderse su dominio a las enormes extensiones del espacio y del tiempo que sondéan apenas los grandes telescopios modernos. Antes de veinte años iba a culminar la nueva gran crisis de la Física, la crisis de los Cuantos, y su resultado sería incorporar a la mecánica los fenómenos interatómicos, del microcosmo, que sólo permite desentrañar y, a veces, sólo vislumbrar, el ultra-microscopio.

No es el caso de volver a repetir aquí

el origen y desarrollo de la Teoría de los Cuantos, hasta los años 1920-25, magistralmente expuesta por el Prof. P. Krassa en estos ANALES. Resumiré solamente la situación alrededor de este último año.

Las investigaciones físicas, tanto teóricas como experimentales, se concentraban en el problema de la emisión y de la absorción de la luz, es decir, en la región limítrofe entre la materia y el éter. Ya la teoría de la Relatividad había borrado un tanto las demarcaciones de este límite, poniendo en duda, primeramente, la existencia del éter y, en seguida, dando a la energía, aún en su forma más pura, la energía radiante, caracteres materiales: inercia y pesantez.

Para explicar los fenómenos luminosos se tenía la teoría ondulatoria del campo electromagnético, de tal manera completa y satisfactoria, que Hertz, físico de alto espíritu filosófico, se había atrevido a decir que era, más que una teoría, una realidad indiscutible. Pero, desgraciadamente, con esta teoría no se consiguió explicar los fenómenos de la emisión y de la absorción de la luz, y éstos quedaron durante toda la pasada centuria fuera del sistema de la Física teórica, hasta que Planck, al emitir en 1900 la hipótesis de la naturaleza discontinua de los procesos de emisión y absorción de la luz por la materia, abrió la brecha por donde iban a desarrollarse las nuevas concepciones. Un gran paso se había dado, pero el camino era largo y había todavía muchas etapas que recorrer. La primera la cubrió Einstein, quien, el mismo año que enuncia el principio de Relatividad, complementa audazmente las ideas de Planck con la hipótesis de la naturaleza discontinua, no ya sólo de los procesos de emisión y absorción, sino de la luz misma. Es decir, resucitando de un golpe la teoría

emisiva de Newton, se ponía frente a frente a la concepción ondulatoria de la luz, hasta ese momento indiscutida.

Esta hipótesis permite explicar a Einstein de la manera más sencilla, el fenómeno fotoeléctrico, o sea, la emisión de electrones por el choque de la luz ultravioleta contra un cuerpo, cuya explicación por la teoría ondulatoria era imposible. En efecto, cada electrón desprendido de la superficie recibe de la radiación una cantidad de energía invariable para cada especie de rayo, cualesquiera que sean las circunstancias del fenómeno: intensidad de la luz incidente, naturaleza de la superficie, etc. Este hecho es inconciliable con el hecho de que la energía radiante se halla distribuida en el espacio de una manera continua y con densidad proporcional a la intensidad de la radiación; en cambio, se desprende inmediatamente de la hipótesis de que la luz está constituida por granos, o fotones, dotados cada uno de una energía proporcional a la frecuencia de la radiación de que forma parte.

Diversos otros fenómenos relativos a la emisión o absorción de las radiaciones se explican fácilmente por la hipótesis de la naturaleza discontinua de la luz, el más importante de los cuales es el descubierto por el sabio norteamericano H. A. Compton en 1923, y que se refiere al cambio de frecuencia de los rayos X difundidos por las superficies metálicas.

A partir de esta fecha, se presenta en la Física el caso único y desconcertante de existir dos teorías paralelas y antagónicas para la misma clase de fenómenos, los de la energía radiante: la teoría ondulatoria de Huygens, Fresnel, Maxwell y Hertz, que explica en forma perfecta los fenómenos de la propagación de la luz en el espacio y en los medios materiales, y la teoría corpuscular de

Newton y Einstein, que explica no menos bien los fenómenos que se observan en el contacto de la radiación con la materia, y cada teoría es al mismo tiempo incapaz de explicar los fenómenos de la otra. Como dice J. J. Thomson, en un gracioso símil, las situaciones respectivas de ambas teorías son las del tigre y del tiburón: cada uno de estos animales representa lo que hay de más terrible en sus respectivos elementos, mientras que el valor del uno es nulo en el elemento del otro.

Por otra parte, la teoría planetaria del átomo, de Bohr y Sommerfeld, se mostraba cada día menos capaz de explicar algunos hechos nuevos de la espectroscopia, los que sólo pudieron ser incorporados a la teoría gracias al principio de correspondencia enunciado por Bohr en 1923, según el cual, las leyes cuantistas pasan a confundirse con las leyes de la Física clásica cuando los números cuantistas alcanzan valores suficientemente grandes, o sea, que en el fenómeno entran en juego un gran número de cuantos o unidades de energía. Con todo, siempre la explicación resultaba defectuosa, y hubo que adicionar la teoría primitiva con nuevas hipótesis inventadas ad-hoc para satisfacer los datos de la experiencia. Entre éstas, no era la menos caprichosa la que se refiere a la existencia de medios cuantos, hecho en sí mismo contradictorio, pues la unidad corpuscular de energía, el cuanto de Planck, no puede ser subdividido sin dejar de ser la unidad. Además, para explicar las series espectrales se tuvo que introducir una sucesión de números cuantistas que se combinan en forma más o menos caprichosa, con el objeto de satisfacer las exigencias de los resultados experimentales, y, aun así, el átomo de Bohr se mostraba incapaz ante el problema del átomo de helio, el

más simple de todos después del átomo de hidrógeno, en el cual la teoría de Bohr había cosechado tan brillantes triunfos.

Empero, lo más deficiente era el carácter completamente empírico y arbitrario de los dos postulados fundamentales, con ayuda de los cuales Bohr construyó su teoría del átomo: el postulado de que un electrón al girar alrededor del núcleo no emite radiación, lo que está en desacuerdo con la teoría electromagnética, y el postulado de que la emisión o la absorción se verifican cuando el electrón pasa de una órbita a otra, sin que se establezca la causa que da origen a este súbito cambio de situación del corpúsculo.

Era evidente, entonces, que se imponía una revisión de la teoría del átomo de Bohr, la que debería tener, como una de las finalidades principales, eliminar las contradicciones internas de esta teoría, en especial la abigarrada mezcla de principios basados en la Mecánica y Física clásicas y en las ideas cuantistas de Planck.

Alrededor de 1924, la Física se encontraba, pues, en un doble *impasse*: la oposición entre las teorías ondulatoria y emisora de la luz y la insuficiencia de la teoría planetaria del átomo. Diversos sabios se aplicaron a resolver estas dificultades; entre ellos debemos nombrar a J. J. Thomson y a Luis de Broglie.

Las ideas de este último son el punto de partida de las nuevas teorías cuantistas que han revolucionado la Física en los últimos años. Su rasgo genial fué el haber comprendido que las crisis de las teorías de la luz y del átomo tenían el mismo origen: el descoblamiento de la realidad en dos series divergentes de fenómenos, que en su constitución íntima, objetiva, no son sino dos aspectos de una misma causa interna. Para de Bro-

glie, el movimiento de un punto material es el movimiento de un conjunto de ondas cuya velocidad de fase es mayor que la velocidad de la luz, pero cuya velocidad de grupo es precisamente la velocidad de la partícula material considerada.

He tenido que referirme a los conceptos de velocidad de fase y velocidad de grupo de un sistema de ondas, conceptos que juegan un papel considerable en las nuevas teorías físicas. Si tenemos un medio dispersivo, es decir, en el cual se propagan movimientos ondulatorios cuya velocidad depende de la longitud de onda, entonces las ondas parciales interfieren unas con otras y sólo dejan subsistente, como movimiento resultante, una ondulación en la que se acumula toda la energía de las demás ondas. Esta onda se propaga con una velocidad menor y distinta de las velocidades de las ondas parciales: es la velocidad de grupo del sistema de ondas, que es también la velocidad de traslación de la energía propagada por el movimiento (en el caso de las ondas marinas, la fuerza de la ola). En contraposición a esta velocidad, la de las ondas parciales se denomina velocidad de fase.

De Broglie se vió, por este camino, conducido a establecer una analogía entre el principio de Fermat, que gobierna en Óptica la propagación de las ondas luminosas, y según el cual esta propagación se hace de manera a emplear el mínimo de tiempo al pasar un rayo de un medio a otro en el cual tiene distintas velocidades, y el principio de Maupertuis, o de la menor acción, que gobierna en la mecánica clásica el movimiento de los puntos materiales, y según el cual este movimiento se verifica de manera a emplear el mínimo de acción o producto de la velocidad por el espacio. Según el principio de Fermat, en un medio de índice

de refracción variable la integral de ds/v ($=dt$) es un mínimo; según el principio de Maupertuis, en un campo de fuerza, la integral de uds es mínima. Se establece así una relación entre la velocidad v de un movimiento oscilatorio y la velocidad u de una partícula material; pero esta relación no es directa, sino inversa. De Broglie escribe, entonces, la relación

$$uv = c^2, \quad (1)$$

siendo c la velocidad de la luz y de esta simple manera lanza el puente que permitirá unir y realizar la síntesis ansiada entre la Óptica y la Mecánica, entre las ondas y los corpúsculos, entre los fotones y los electrones, en otras palabras.

Ahora bien, si esta equivalencia existe, podremos igualar los valores, en unidades de energía, del fotón y del electrón. Según Planck y Einstein el fotón vale hn ergs., siendo h la constante de Plank, o cuanto de acción y n la frecuencia de la radiación luminosa; según Einstein el electrón vale mc^2 , en que m es la masa y c la velocidad de la luz, luego

$$hn = mc^2 \quad (2)$$

y obtenemos la segunda ecuación fundamental de la teoría de Broglie.

Con la ayuda de estas dos ecuaciones se obtienen fácilmente las dos condiciones cuánticas de Bohr, partiendo de la sola hipótesis que a cada elemento de materia, o sea, a cada electrón, se encuentra asociado un movimiento ondulatorio, cuyas características quedan definidas por las ecuaciones (1) y (2). En efecto, la ecuación (2), desde luego, define la frecuencia de la vibración y equivale a la segunda condición de Bohr.

Estudiando el movimiento de circunvalación del electrón alrededor del núcleo del átomo, se comprueba fácilmente que

la onda asociada debe necesariamente convertirse en una ondulación estacionaria, como si la trayectoria del electrón fuera una cuerda vibrando a impulsos de la onda. Pero como las frecuencias y, por tante, las longitudes de onda de la vibración quedan fijadas por la ecuación (2), resulta inmediatamente que sólo serán posible las trayectorias que corresponden a múltiplos enteros de la longitud de onda, lo que no es otra cosa que la primera condición cuantista de Bohr.

Esta manera, notablemente sencilla, como se deducen las dos condiciones fundamentales de la teoría de Bohr de la hipótesis de las ondas asociadas al corpúsculo, llamó la atención de los físicos que, por una parte, empezaron a profundizar en el estudio de estas nuevas ideas, y, por otra parte, trataron de someterlas al control de la experiencia.

En un principio, de Broglie supuso que las ondas asociadas eran sólo un artificio matemático, sin mayor alcance objetivo. El primero que tuvo la idea de que esas ondas podrían tener una realidad física fué Einstein, pero correspondió a los físicos norteamericanos Davisson y Germer el honor de haber sometido los primeros, la teoría de las ondas asociadas a la experimentación y haber obtenido resultados decisivos sobre ella. En efecto, estos físicos produjeron la reflexión de un rayo de electrones sobre una superficie pulida de níquel y constataron que los electrones reflejados se agrupaban en ciertas direcciones privilegiadas, como lo haría un sistema de ondas que experimentara el fenómeno de la difracción por reflexión, por ejemplo, un rayo X reflejado sobre un sistema cristalino. Posteriormente, G. P. Thomson ha mostrado la difracción de los electrones a través de una placa metálica delgadísima, y esta experiencia, con diversas variantes, ha sido repetida por distintos físicos, quedando

plenamente comprobado que, en condiciones convenientes, un flujo electrónico se comporta exactamente como un rayo luminoso.

Comprobada experimentalmente la hipótesis de Broglie, podía servir de fundamento para una teoría general de los fenómenos físicos; esta ha sido la obra de Erwin Schrödinger, cuyo nombre, hoy día célebre, ha pasado a ocupar uno de los más altos rangos en la ciencia contemporánea.

El punto de partida de Schrödinger ha sido una idea de una audacia sólo superada por la eficacia y trascendencia de sus proyecciones ulteriores: para Schrödinger, todos los fenómenos naturales tienen un carácter, o, mejor dicho, son, por su esencia, ondulatorios.

La formulación matemática de esta idea es de una belleza incomparable. El matemático inglés Hamilton había hecho notar, hace más o menos un siglo, sorprendido por la analogía entre el principio de Fermat y el de la menor acción, que existe una correlación entre la Mecánica clásica y la Óptica geométrica. Así, la trayectoria de una partícula material es equivalente al camino de un rayo luminoso. Esta notable intuición no había tenido aplicación hasta que Schrödinger la hizo el fundamento de una nueva doctrina, que ha adquirido enorme desarrollo y es conocida con el nombre de *Mecánica ondulatoria*.

Así como la Óptica geométrica es una primera aproximación en la expresión matemática de los fenómenos luminosos, cuya segunda etapa es cubierta por la Óptica física o teoría ondulatoria de la luz, así también la Mecánica clásica, que podríamos llamar Mecánica lineal (geométrica) y de cuya insuficiencia en la explicación de los fenómenos naturales dan testimonio las dificultades presentes de la Física teórica, constituirá un pri-

mer peldaño en la formulación matemática de las leyes físicas, cuyo segundo peldaño sería una teoría que sea a la Mecánica lineal lo que la Óptica ondulatoria es a la Óptica geométrica. Pero, el paso de la Óptica geométrica a la ondulatoria se realizó por Huygens en el siglo XVII, sustituyendo al principio de Fermat el principio que lleva su nombre, según el cual, todo punto alcanzado por una vibración luminosa es, al mismo tiempo, origen de un movimiento vibratorio que se propaga a partir de él, como centro, en todas direcciones. Luego, en la nueva Mecánica, se substituirá a las ecuaciones ordinarias de la dinámica del punto material, una ecuación que corresponda a la formulación matemática del principio de Huygens. Pero esto se consigue con la ayuda de la ecuación diferencial conocida con el nombre de ecuación de las ondas:

$$\frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta z^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\delta^2 \psi}{\delta t^2}$$

en que ψ es la magnitud que se propaga y u la velocidad de propagación.

Si se considera un movimiento ondulatorio simplemente sinusoidal, $\psi = A \text{ sen}(2\pi n t)$, y se comprueba inmediatamente que el segundo miembro es igual a

$$-\frac{4\pi^2 n^2}{u^2} \psi$$

en que n es la frecuencia de la onda. Ahora, la introducción de las ecuaciones (1) y (2) de Broglie permite escribir

$$\frac{n^2}{u^2} = \frac{m^2 v^2}{h^2}$$

y si en lugar de $m v^2$, la energía cinética de la partícula material, escribimos 2

$(E - V)$, designando por E la energía total y por V la energía potencial, obtenemos finalmente

$$\frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta z^2} + \frac{8 \pi^2 m}{h^2} (E - V) \psi = 0$$

como ecuación del movimiento de una partícula material en la Mecánica ondulatoria, y es la ecuación fundamental de esta nueva teoría.

«Al reemplazar la descripción mecánica ordinaria, dice Schrödinger, por una descripción mecánica ondulatoria, el objeto es obtener una teoría que comprenda, tanto los fenómenos mecánicos ordinarios, en los cuales las condiciones cuantistas no juegan ningún papel, como los fenómenos típicamente cuantistas. . . Pero, la descripción de un movimiento ondulatorio en términos de rayos es sólo una aproximación (llamada óptica geométrica en el caso de ondas luminosas) que sólo es válida si la estructura del fenómeno ondulatorio que consideramos es grande, comparada con la longitud de onda, y sólo en cuanto no nos interesamos, sino en la estructura a grande escala. La estructura fina detallista de un fenómeno ondulatorio no puede jamás ser revelada por un tratamiento en términos de rayos (óptica geométrica) y hay siempre fenómenos ondulatorios que son de tal manera minúsculos, que el método de los rayos no tiene aplicación y no proporciona información alguna. Entonces, al reemplazar la Mecánica ordinaria por la Mecánica ondulatoria, tendremos la esperanza, por una parte, de retener la Mecánica ordinaria como una aproximación que es válida para los fenómenos toscos macro-mecánicos, y por otra parte, alcanzar una explicación de aquellos minúsculos fenómenos micromecánicos de

los cuales la Mecánica ordinaria fué incapaz de proporcionar ninguna información» (1).

Los dos postulados cuánticos de Bohr se deducen inmediatamente de la sola consideración de la ecuación fundamental de la Mecánica ondulatoria: el postulado óptica por la introducción de las condiciones de De Broglie en el coeficiente de ψ , y el postulado mecánico, como consecuencia de la siguiente propiedad de esa ecuación diferencial: si se considera la energía E , que figura en la ecuación, como un parámetro arbitrario, se demuestra en la teoría de las ecuaciones diferenciales que la ecuación de Schrödinger no posee soluciones finitas, continuas y bien determinadas sino para ciertos valores de E que forman una sucesión discontinua, llamados valores característicos de la ecuación diferencial. El problema físico de la cuantificación de la energía resulta así haber sido reducido por Schrödinger a un mero problema matemático, sin el agregado de ninguna hipótesis artificial, una vez aceptada la base fundamental de la Mecánica ondulatoria.

Toda la teoría cuantista de Bohr y Sommerfeld se deduce, pues, de la ecuación de Schrödinger, pero lo verdaderamente notable es que, no sólo se establecen todas las deducciones que la teoría antigua conseguía solamente con ayuda de hipótesis *ad hoc*, sino que soluciona todas las dificultades existentes, como la introducción de los semi-cuantos, escollo de la teoría de Bohr, y da la clave de hechos físicos recientes todavía inexplicados, como la existencia de un determinado nivel energético cuando la temperatura de un cuerpo sólido tiende a cero.

Hasta este momento no hemos dicho nada sobre la interpretación de la función

(1) Four Lectures on Wave Mechanics. London, 1928, Pág. 7.

ψ de Schrödinger, cuyo significado físico responde a esta pregunta: ¿qué es lo que ondula?

Schrödinger ha hecho ver que era posible resolver algunas cuestiones importantes en los fenómenos cuantistas, admitiendo que la función ψ representaría la densidad de electricidad en la porción del espacio sujeta al movimiento ondulatorio. Empero, a pesar del valor intuitivo de esta interpretación, actualmente no es aceptada por los físicos y ha sido substituída por otra, de un carácter más abstracto, de que hablaré más adelante.

III

Hemos visto que la solución de las dificultades de la Física actual había sido buscada y encontrada por de Broglie y Schrödinger en las hipótesis de las ondas asociadas a los corpúsculos y de la naturaleza ondulatoria de los fenómenos naturales. Ambas hipótesis entran en la categoría de las concepciones figurativas, es decir, en la corriente de ideas que buscan, más allá de nuestros sentidos, una realidad subyacente que podremos llegar a percibir alguna vez, con el progreso incesante de los métodos experimentales. La Mecánica ondulatoria es el resultado del esfuerzo por hacer entrar las discontinuidades cuantistas dentro del marco clásico de los fenómenos de propagación por medio de ondas continuas; de *reducir el discontinuo experimental al continuo fundamental*.

La forma admirable como esta teoría ha podido explicar los fenómenos ópticos y atómicos que eran el escollo de las teorías electromagnéticas y de Bohr, demuestra a todas luces que encierra gran parte de la verdad. Pero no encierra toda la verdad.

Uno de los rasgos más interesantes que caracterizan el momento de la Física

de que me ocupo, es el de que, paralela e independientemente a la corriente de ideas personificada por de Broglie y Schrödinger, se desarrolló otra doctrina, al parecer antagónica a aquella, y cuya ambición era también solucionar el *impasse* en que la ciencia se encontraba encerrada. Si la primera era la manifestación de la tendencia explicativa en la Física, por medio de las hipótesis figurativas, esta otra era la exteriorización de la tendencia espiritual opuesta, puramente descriptiva o abstracta, a la que se halla ligado el nombre del profesor Werner Heisenberg, de la Universidad de Leipzig.

Si grande ha sido la novedad y trascendencia de las ideas de De Broglie y Schrödinger, la verdadera revolución que las ideas de Heisenberg han provocado en la Física, sólo puede encontrar parangón en la que originó Einstein, en 1905, con su principio de Relatividad.

Se ha hecho notar que la obra de Heisenberg presenta un carácter de crítica constructiva análoga a la que se constata en la obra de Einstein.

Para salir de dificultades tan fundamentales, en un caso como en el otro, ha habido que analizar el contenido de las nociones más antiguas y primordiales y reemplazarlas por otras en contacto más directo con la experiencia objetiva. Para Heisenberg, la raíz del mal que aquejaba la Física, estaba en el abuso que se había hecho de las explicaciones figurativas, e hizo notar cuán lejos se encontraba de la experiencia inmediata el deseo de construir una imagen del átomo sobre el modelo de un sistema planetario, extrapolando en ese nuevo dominio nociones introducidas para dar cuenta de hechos mecánicos y microscópicos enteramente diferentes de los hechos espectroscópicos y microscópicos de que se trata en este ejemplo. La idea de

la órbita electrónica al interior de un átomo no tiene ningún sentido experimental comparable al de la órbita de un planeta o a la trayectoria de un proyectil; por el contrario, la existencia de los cuantos de luz y los fenómenos fotoeléctricos a los que dan lugar, introducen una diferencia profunda entre el caso macrocósmico del planeta o del proyectil y el caso microcósmico del electrón intra-atómico.

Por un análisis profundo de las condiciones mismas de toda observación, Heisenberg muestra que ella implica siempre una acción del observador sobre el sistema observado y una reacción de éste, de donde resulta la observación. Para seguir a un proyectil en su movimiento es preciso alumbrarlo, enviar sobre él un cierto número de fotones, de los que algunos son devueltos por él y ponen de manifiesto su presencia, permitiendo determinar cada una de sus posiciones sucesivas. El choque de esos fotones perturba el movimiento que se desea estudiar, pero la constante de Planck es tan pequeña, los cuantos de luz visible tan pequeños, que la luz necesaria para alumbrarlo no transmite al proyectil más que cantidades insignificantes de energía y cantidad de movimiento, es decir, no perturba su movimiento sino de una manera inapreciable. Pero cesa de ser así cuando se desciende al dominio corpuscular: el hecho de que la cantidad de luz utilizada para alumbrar un átomo y poner en evidencia los electrones que él contiene, no puede descender más allá de un solo fotón, y que el encuentro de un fotón y de un electrón, por absorción completa del fotón o por efecto Compton, turba profundamente al movimiento del electrón, tiene por consecuencia que, aun empleando el lenguaje mecánico usual para explicar lo que sucede, no se puede esperar poner en evidencia el movimiento de un solo electrón sin modificarlo de

tal manera que toda observación individual resulta desprovista de sentido experimental. La existencia de los cuantos, su magnitud determinada por la constante de Planck, no permite ni siquiera imaginar que se pueda disminuir indefinidamente la importancia de la intervención del observador sobre el sistema observado, y que se pueda, a medida que aumenta la pequeñez de éste, aumentar paralelamente la delicadeza de los medios de observación. Nuestro escalpelo de diseccionar la naturaleza tiene un filo de finura limitada, medida por la constante de Planck, y esto se opone a que la idea de movimiento individual de un corpúsculo, de una órbita electrónica, pueda tener un sentido experimental (1).

Heisenberg hace ver que las nociones vulgares de subjetivo y objetivo, de sujeto y objeto, si tienen significado en la vida corriente, es porque nosotros nos podemos situar en frente de las cosas y observarlas sin penetrar en ellas, sin modificarlas, pero en el mundo de los fenómenos microscópicos, estas nociones dejan de tener un significado valedero, pues sujeto y objeto se compenetran necesariamente, fundiéndose en un solo todo, en el que aquellos dos aspectos de la realidad desaparecen como entidades separadas.

«La consecuencia inmediata de esta circunstancia, es que en general cada experimento realizado para determinar algunas cantidades numéricas, hace ilusorio el conocimiento de las otras, puesto que la perturbación incontrolable del sistema observado altera los valores de cantidades determinadas previamente. Si esta perturbación es seguida en sus detalles cuantitativos, aparece que en muchos casos es imposible obtener una de-

(1) P. Langevin: *L'Oriétation actuelle de la Physique*. París, 1931, pág. 54.

terminación exacta de los valores simultáneos de dos variables, pero que más bien existe un límite inferior para la exactitud con la cual pueden ser conocidas» (1).

Así como el punto de partida de la teoría de la Relatividad fué el postulado de que no hay señal física que se propague con velocidad mayor que la de la luz, de manera análoga este límite a la exactitud con que ciertas variables pueden ser conocidas simultáneamente, ha sido postulado por Heisenberg como una ley fundamental de la naturaleza, a la que ha dado el nombre de «Principio de Indeterminación».

Sean p y q dos variables que determinan el estado físico de un sistema (coordenadas generalizadas), Δp y Δq , los valores mínimos simultáneos de la inexactitud (error) con que pueden ser determinadas experimentalmente esas variables, entonces, Heisenberg, postula

$$\Delta p \times \Delta q = n h$$

en que h es la constante de Planck y n un coeficiente igual o poco diferente de la unidad. A esta ecuación Heisenberg la denomina *relación de incertidumbre*, y es la expresión matemática del Principio de Indeterminación.

De esta manera, Heisenberg asienta el edificio de la nueva mecánica cuantista. Con el concurso de algunos otros sabios, Born, Jordan, Dirac, en pocos años la construcción ha adquirido su desarrollo definitivo.

La formulación matemática de esta nueva mecánica es de un carácter tan abstracto y de una dificultad intrínseca tal, que se hace poco menos que imposible querer exponerla en pocas líneas sin

el concurso de un elevado aparato matemático. Creería, sin embargo, defraudar el interés de los lectores de este artículo si no diera siquiera un ligerísimo esbozo de su contenido.

Como, según Heisenberg, los conceptos de posición, velocidades, cantidades de movimiento, etc., no tienen ningún sentido físico en el interior del átomo, estas magnitudes no pueden ser introducidas directamente en la nueva mecánica y deben ser substituídas por otras que se refieran a los hechos observables experimentalmente. Estos son los proporcionados por la espectroscopía, es decir, las frecuencias de las radiaciones, la intensidad de los rayos y los niveles energéticos interatómicos determinados en las experiencias de choques de electrones con átomos. Es todo este conjunto, directamente suministrado por la experiencia, el que se trata de traducir por las nociones abstractas que formarán los elementos de la nueva doctrina.

Las matrices infinitas, algoritmo matemático estudiado por los géometras sin propósitos de aplicación práctica, desde tiempo atrás, fueron adoptados por Heisenberg para la representación del conjunto de fenómenos que constituye el mundo interatómico. Una matriz es un conjunto de cantidades agrupadas en líneas y columnas, cuya única propiedad colectiva es estar ordenadas sistemáticamente. Cada uno de los elementos de la matriz corresponde a una raya espectral y es un número imaginario cuyo argumento representa la frecuencia, y, el módulo, la intensidad de la raya. Basándose en la circunstancia que las frecuencias de las rayas espectrales satisfacen ciertas reglas de combinación, descubiertas y estudiadas experimentalmente desde principios del siglo, se encuentran para las matrices reglas simples que permiten pasar de la Mecánica ordinaria a

(1) Heisenberg: The Physical Principles of the Quantum Theory, Chicago, 1930, pág. 3.

la nueva Mecánica cuantista. Por una generalización genial de estas ideas, las leyes del mundo atómico se encuentran expresadas por relaciones entre magnitudes físicas de un tipo absolutamente nuevo, correspondiendo cada una a una matriz.

Las matrices satisfacen las reglas fundamentales de las cantidades algebraicas, pero la multiplicación matricial no es conmutativa. Heisenberg comprendió que esta propiedad era el germen de donde nacería toda la nueva mecánica y planteó la ecuación fundamental de ella como expresión física de este hecho matemático. Sean P y Q dos matrices que representan las coordenadas de posición y las cantidades de movimiento correspondientes a un sistema físico elemental (electrón, fotón, etc.). Entonces PQ es distinto de QP y, como este producto es de la dimensión de una acción, Heisenberg escribió, guiado principalmente por una genial intuición:

$$PQ - QP = nh,$$

en que n es un coeficiente numérico y h la constante o cuanta de acción de Planck. Se introduce por este medio la concepción cuantista antigua en la nueva doctrina, que viene a ser una generalización de aquella.

La aplicación de esta ecuación fundamental y el desarrollo sistemático de esta teoría físico-matemática, conducen a plantear las relaciones matriciales que reemplazan las ecuaciones diferenciales de la Física clásica. El cálculo de los elementos de las matrices permite prever las manifestaciones experimentales de la estructura atómica, los espectros de absorción o emisión, por ejemplo, y las modificaciones recibidas por esos espectros en circunstancias variadas.

El éxito de esta nueva mecánica ha

sido extraordinario: toda la teoría cuantista de Bohr y Sommerfeld queda incluida en ella, en lo que tienen de durable y, tal como la teoría de Schrödinger, salva todos los escollos encontrados anteriormente y explica en forma admirable los nuevos hechos experimentales que la antigua teoría no podía admitir.

Empero, cabría observar, que si el progreso de la Física, fruto de las teorías de Schrödinger y Heisenberg, ha sido considerable en cuanto atañe a la sistematización matemática de los hechos experimentales, en el aspecto formal de la ciencia no se habría avanzado gran cosa, pues, a la doble concepción ondulatoria y corpuscular de la Física antigua se habrían substituído dos teorías que, aunque marchando paralelamente, eran en su origen y desarrollo completamente independientes.

Se presenta entonces la cuestión de si estas dos concepciones tienen en el fondo un nexo común que explique esta dualidad; pues bien, Schrödinger, gracias a un esfuerzo notabilísimo de análisis y síntesis a la vez, ha llegado a demostrar que las dos mecánicas cuantistas recientes no sólo no son inconciliables, sino que, matemáticamente, son equivalentes. En realidad, no son sino dos aspectos diferentes de una misma concepción físico-matemática fundamental, que puede revestir la forma de la Mecánica ondulatoria o de la Mecánica matricial, según sea el algoritmo matemático a que se recurra para llegar a los resultados cuantitativos que se someten al control experimental.

IV

Si la identificación matemática de las dos nuevas teorías cuantistas se ha podido realizar con pleno éxito, ¿cabría decir lo mismo del contenido físico de

ambas? He aquí una cuestión que ha preocupado hondamente a los sabios y filósofos en los últimos tiempos, y de la que han surgido los más inesperados y trascendentes resultados tanto para la ciencia como para la filosofía.

La teoría de Schrödinger representa, como he dicho antes, un esfuerzo para reducir la discontinuidad fundamental de los fenómenos atómicos a la continuidad. En efecto, según esta teoría, los fenómenos son ondas, análogas a las consideradas en la Física clásica, y la discontinuidad sólo aparece indirectamente como una propiedad especial de las soluciones de la ecuación diferencial que define la onda. Además, al reducir Schrödinger el fundamento de su mecánica a una ecuación diferencial, coloca la continuidad como base de su concepción del mundo físico. pues, como es sabido, las ecuaciones diferenciales son la expresión matemática típica de los hechos continuos.

En cambio, Heisenberg sienta como base de su doctrina la discontinuidad pura, en su forma más abstracta, pues, como se ha visto, su ecuación fundamental es la expresión inmediata del discontinuo físico por medio de la constante de Planck, y, en todo su desarrollo, sólo tienen cabida los hechos discontinuos, pues la notación diferencial clásica ha sido reemplazada por las relaciones matriciales propias a expresar lo discontinuo en todos sus aspectos.

He recordado que Schrödinger interpretó la función escalar ψ de su ecuación fundamental como la densidad de electricidad en el espacio, de manera que, si esta densidad varía en el tiempo, las variaciones provocan la emisión de radiaciones electromagnéticas conforme a las leyes de la Física clásica. Sería éste otro lazo de unión entre las nuevas ideas y las antiguas, entre el discontinuo y el

continuo. Desgraciadamente, luego se comprobó que esta interpretación física de la función ψ estaba sujeta a graves objeciones que la hacían insostenible: obligaría a admitir, por ejemplo, que una partícula material se encuentra en dos estados energéticos diferentes al mismo tiempo, y cualquiera otra interpretación física que se le diera implicaría análogas dificultades.

No pudiéndosele atribuir a ψ ningún significado concreto, se imponía recurrir a una interpretación abstracta. Ha sido el profesor Bohr, de la Universidad de Göttingen, quien ha encontrado la solución a la cuestión, dando a ψ simplemente el significado de una *densidad de probabilidad*. En consecuencia, las ondas que define la ecuación de Schrödinger son sólo *ondas de probabilidad* y, según sea el caso particular o problema a que se la aplique, se tendrá una carga eléctrica probable, una energía probable, una masa probable, presentes en virtud del movimiento del electrón o del fotón, en el elemento de volumen para el cual se calcula la función ψ .

El electrón desempeña siempre el rol de punto material con una cierta carga eléctrica, una cierta masa y una cierta energía, como en la teoría antigua, pero ahora nos es imposible precisar su posición en el espacio en un momento dado: la función ψ nos permite sólo indicar la probabilidad que tenemos de encontrarlo en un volumen determinado. No podremos, entonces, seguir individualmente la evolución de un corpúsculo sino indicar solamente, para un conjunto de sistemas físicos similares, cuál es la probabilidad de que se encuentre en un estado determinado. Si lanzamos un rayo de luz a través de una pequeñísima abertura de un pantalla, la Física clásica nos da los medios de calcular la repartición del haz luminoso, desplegado por la difracción

en ondas sucesivas de distinta intensidad. La Física nueva nos da la probabilidad de que los fotones que atraviesan la abertura se dirijan en una dirección determinada, y esta probabilidad oscila armónicamente alrededor del rayo prolongado como eje, de manera que los resultados a que se llega por uno y otro camino coinciden, pues ambos describen igualmente bien el fenómeno observado. Pero en el fondo los dos métodos corresponden a interpretaciones opuestas de la realidad: uno establece una ley determinada; causal y fatal, el otro establece una ley estadística, de mera probabilidad, en que el nexo causal desaparece, sea por la existencia de un número enorme de pequeñas causas incontrolables, o por la falta absoluta de causa. Así, en Demografía podemos prever que dentro de un año, en un país o lugar determinado, un cierto número probable de individuos se quitarán la vida por propia voluntad, pero no podremos jamás asegurar si una persona determinada va o no a suicidarse el año que viene.

Pues bien, son éstas, precisamente, las conclusiones a que se llega, de una manera más directa aún, en la Mecánica cuantista de Heisenberg, y que la identifican físicamente con la Mecánica ondulatoria.

En efecto, si q es la coordenada de posición de un corpúsculo, y p la cantidad de movimiento correspondiente, el principio de indeterminación nos dice que no podremos conocer el producto pq con una precisión, en general, superior a h . Es decir, si pudiéramos determinar su velocidad, y, por tanto la cantidad de movimiento, con una precisión infinita, q quedaría en ese caso completamente indeterminada, es decir, el electrón podría ocupar cualquiera posición en el espacio, lo que viene a ser equivalente a la anulación del concepto de espacio

para este simple fenómeno. Inversamente, si pudiéramos determinar q con una aproximación infinita, la velocidad, y, por ende, el tiempo, quedaría completamente indeterminado, lo que equivale en este caso a la anulación del concepto de tiempo. En un caso intermedio general, será imposible situar el corpúsculo en un espacio y en un tiempo determinados; los conceptos de espacio y de tiempo de la Física clásica pierden, en consecuencia, su significado dentro del mundo intermolecular.

Esta conclusión nos sitúa en un punto de vista completamente diferente del que existía en la Física hace sólo pocos años. Los sabios habían admitido siempre implícitamente que los fenómenos del mundo externo se gobiernan por el *principio de causalidad*. Según éste, si se supone conocido el estado físico de un sistema a una época que podremos llamar el tiempo o , este estado queda completamente determinado a toda época ulterior t , por las leyes de la Mecánica y de la Física. Considerando el estado inicial como una *causa* de su evolución posterior, esta evolución misma, que es el *efecto* de aquella causa, está sometida a un determinismo riguroso. Por otra parte, nadie pensaba poner en duda la posibilidad de poder precisar el estado inicial de un sistema de una manera completa por medios apropiados. De suerte que el fin del estudio del mundo físico parecía poder resumirse de la manera siguiente: buscar procedimientos de medidas más y más precisos que permitan definir, en un momento dado, el estado de un sistema con la mayor exactitud posible; conocer, por otra parte, lo más completamente posible las leyes físicas de la evolución del sistema, de manera a poder calcular de antemano su estado en una época cualquiera a partir de un estado inicial dado. Así, la evolución de cada sistema,

tomado individualmente, se supone sometida a leyes determinadas, y el físico debe simplemente tratar de conocer lo más exactamente posible esa evolución, sin preocuparse de la de los sistemas vecinos o similares. Como esta manera de ver se ha mostrado siempre justificada por la experiencia, para los sistemas macroscópicos, con los que de ordinario tenemos que hacer, es por una extensión muy natural de las costumbres antiguas por lo que se han ampliado los mismos modos de raciocinar a los sistemas microscópicos y que se ha admitido la posibilidad de aplicarles igualmente la ley del determinismo individual, que es la regla para los otros sistemas (1).

Pero, como acabamos de comprobarlo en un ejemplo, es imposible establecer cuál es el estado inicial que puede servir de causa a un estado siguiente que sería el efecto. Hemos visto, también, que es imposible delimitar en los fenómenos microscópicos, cuál es el sujeto y cuál es el objeto, pues uno y otro se confunden: esto nos demuestra de otra manera que es imposible decir qué estado físico sería la causa de otro estado físico, porque tanto en un estado como en el otro se encuentra entremezclado el sujeto y el objeto, de modo que la causa y el efecto aparecerán confundidos en la observación.

Nos vemos, por tanto, obligados a renunciar a aplicar en los fenómenos microscópicos el principio de causalidad en todo su rigor. En el mundo reducido, pero complicadísimo, de los hechos atómicos, el determinismo de los fenómenos del mundo directamente observable, va siendo substituído por una indeterminación cada vez mayor, a medida que la magnitud del fenómeno se restringe. Esta

transformación es posible, porque las leyes físicas serían, de acuerdo con las nuevas ideas, *leyes estadísticas*, en que el determinismo se halla reemplazado por la *probabilidad*, enormemente grande, de modo que se confunde con la certeza, para los sistemas macroscópicos constituidos por un sinnúmero de elementos, y muy pequeña, acaso despreciable, para los sistemas microscópicos compuestos de un número reducidísimo de elementos. En resumen, los resultados de la Física actual nos llevarían a la conclusión de que *el determinismo de los fenómenos naturales es sólo el resultado de la indeterminación fundamental de los procesos elementales que constituyen el mundo externo*.

La revolución que estas ideas orijnan afectan no sólo a la Física, sino a todas las ciencias en general y aun a la Filosofía, influyendo profundamente en la Teoría del conocimiento y en la Metafísica.

Entre las cuestiones superiores que han agitado desde los albores de la cultura el intelecto humano se encuentra el problema de la *Libertad* y el *Determinismo*. El es el fundamento de la Moral y el Derecho, alrededor de él se han levantado las religiones positivas, y su debate ha dividido a veces a los pueblos y agitado a la Humanidad en tempestades doctrinarias, que se extinguen, para renacer años o generaciones después, con nuevos ímpetus.

Desde los tiempos de Platón y Aristóteles, todos los grandes pensadores han sido obsesionados por este gran problema, y, a pesar de la gran diversidad de opiniones que han prevalecido a través de los siglos, poco a poco la Filosofía ha ido concretando el contenido y estrechando los contornos de la cuestión hasta llegar en nuestros días a definirla en términos más o menos precisos.

Dos reputados historiadores de la Filosofía resumen así la lucha secular entre

(1) E. Bloch: *L'Ancienne et la Nouvelle Théorie des Quanta*. París, 1930, págs. 360 y siguientes.

los partidarios del libre arbitrio y los partidarios del determinismo: «Se ha querido dar a la libertad su derecho de intervención en el curso de los fenómenos, y la lucha se ha reabierto entre los partidarios del libre arbitrio y los deterministas. El determinismo, sin agregar nada de muy nuevo a los argumentos psicológicos de sus antiguos partidarios, pero fortificado sin cesar por los progresos de la ciencia, por la teoría mecánica del universo, por las relaciones cada vez mejor definidas de la vida espiritual y de la vida fisiológica, por los resultados de la estadística aplicada a los actos de los hombres, se ha apoyado en los resultados de la ciencia. Los partidarios del libre arbitrio se han creído, por esto mismo, obligados a una interpretación de los hechos que va más lejos que la libertad humana y coloca la libertad al origen mismo de las cosas. . . »

«A pesar de todos estos esfuerzos, no se puede decir que el problema del libre arbitrio haya sido resuelto ¿lo será alguna vez a la manera de un problema matemático? Se puede dudar de ello, y la naturaleza misma del problema excluye una tal solución, pero lo que puede decirse es que el problema ha sido planteado con más precisión. Los progresos mismos del determinismo han llevado a los partidarios del libre arbitrio a estrechar de más cerca sus doctrinas y a extender su aplicación. Ellos han visto que el libre arbitrio no puede ser un milagro, ni el hombre, como decía Spinoza, «un imperio en un imperio». Si el hombre es libre, es porque *la libertad es el principio mismo de las cosas, porque ella está por todas*

partes y el determinismo mismo no es más que un producto de la libertad» (1).

Compárese esta conclusión con aquella a que habría llegado la Física actual, según lo he expuesto más arriba, y se verá que coinciden aun casi con las mismas palabras. Se habría realizado, entonces, una gran síntesis del pensamiento filosófico y del pensamiento científico, y una sola y ancha vía quedaría trazada por donde sabios y pensadores avancen unidos a la conquista de nuevos problemas, para satisfacción del espíritu y del sentimiento humanos.

Al terminar este rápido estudio, tal vez el lector experimente la sensación que recibe el autor, de haber ascendido a una alta cima, guiados sus pasos por los sabios que han ilustrado la Física en los últimos tiempos. Desde lo alto se contempla un grandioso panorama; vastas lejanías, en donde se vislumbran hermosos parajes de reposo y ensueño, que incitan al espíritu a alcanzar hasta ellos y experimentar el gozo inefable de descubrir nuevas regiones hasta entonces desconocidas. Y, al sentirse embargado por esta emoción, uno se siente a la vez henchido de admiración y reconocimiento hacia todos los grandes hombres que, en distintas épocas y países, han contribuído a levantar el grandioso monumento de la Física moderna.

Hacienda Quipolemu,
Coelemu, Octubre de 1933.

(1) Janet e Seavilles: *Histoire des Problèmes Philosophiques*. Paris, 1921, pág 355 y sig. (Soy yo el que subrayo).