

“¿EL INDETERMINISMO DE LA FÍSICA?”

Extracto y comentarios del capítulo titulado “CAUSALIDAD e INDETERMINISMO EN LA FÍSICA TEÓRICA”, del libro “La estructura de la Ciencia”, de E. Nagel. Enero 2001.

RAFAEL GONZÁLEZ FARFÁN.
tychobrahe@wanadoo.es

Desde casi la época de Descartes –si no antes- se tenía la idea de que la Ciencia en general, y la Física en particular, con su estudio de las leyes de la Naturaleza, daba poca cabida a la aleatoriedad de los sucesos que se observaban, hasta tal extremo de que éstos eran resultado de causas bien concretas y determinadas que a su vez, podrían ser origen de otras posteriores. De este modo, con este panorama, pocas cosas –mas bien ninguna- escapaban de la acción inmisericorde de las leyes naturales, cuyo conocimiento era objeto de la Física. Si se conocían –mediante la observación objetiva y directa- una serie de datos de un fenómeno, era posible construir toda una ley que predijera resultados posteriores. Sin embargo, los avances recientes de la Física, han hecho evidentes las limitaciones de esta visión, e incluso han minado los mismos cimientos de esta óptica determinista, por juzgarlos insostenibles. A este debate ha contribuido de forma sustancial los avances en Mecánica Cuántica que van poniendo cada vez más el acento en el carácter “no causal” e indeterminista de la misma. La cuestión fundamental que se plantea, pues, es la del sentido preciso en el que las teorías de la física clásica son deterministas (en principio), mientras que la física subatómica no lo es.

La visión que se ofrece a continuación, resumen y síntesis extraído del capítulo que se menciona en el encabezado, rompe una lanza a favor de posturas deterministas en la cuántica, argumentándose de modo difícil de contrarrestar pero que dejan abierto el debate sobre el carácter de las leyes de la física.

1. LA MECÁNICA CLÁSICA: paradigma de determinismo.

Dado que históricamente la mecánica clásica ha sido considerada como el ejemplo típico de determinismo, es preciso comenzar analizando qué ha sido lo que la ha hecho alcanzar ese estatus. De modo general, la mecánica está repleta de ecuaciones que formulan la dependencia de ciertas características de los cuerpos con respecto a otras propiedades físicas, y aunque en esas ecuaciones no aparece la palabra “causa”, se dice a veces que expresan “relaciones causales” simplemente porque afirman una dependencia temporal de una magnitud con respecto a otras. Sin embargo, si este es el criterio para atribuir la causalidad, las ecuaciones de la mecánica cuántica también formulan relaciones causales.

Las ecuaciones del movimiento de la mecánica clásica pueden hacerse relacionar con otra función: la *función fuerza*; y de hecho, se dice que la posición y la cantidad de movimiento de una masa puntual en un instante determinado constituyen “**el estado mecánico**” de la masa puntual en ese instante, y las variables que definen el estado mecánico son llamadas “variables de estado”. De este modo, se puede concretar más esa “característica determinista” de la mecánica clásica en el sentido de que dada la función fuerza para un sistema físico, el estado mecánico del sistema en cualquier momento queda completa y unívocamente determinado por el estado mecánico en algún momento inicial arbitrario. De un modo mucho más general, puede decirse que *un conjunto de leyes L constituye un conjunto determinista de leyes para un sistema S relativo a ciertas variables K si, dado el estado de S en algún momento inicial, las leyes L determinan lógicamente un estado único de S para cualquier otro momento.*

Es importante, en mecánica y en otras ramas diferentes a ella, la noción de “estado de un sistema físico” hasta tal punto que si bien la mecánica es una teoría determinista, lo es exclusivamente con respecto a las “propiedades mecánicas” de los sistemas físicos y, en particular, con respecto a los estados mecánicos de los sistemas. Por ejemplo, aunque se conozca la función fuerza y el estado de

un sistema en algún determinado momento inicial, la mecánica NO nos permite predecir variaciones en las propiedades térmicas o electromagnéticas de un sistema, como tampoco ese determinismo mecánico excluye la posibilidad de que las alteraciones en el estado mecánico de un sistema puedan ser consecuencias de cambios en las propiedades de un sistema (p. ej., cambios químicos) NO analizables de esta manera. Esto es lo que se quiere decir con que el determinismo de la mecánica clásica se limita estrictamente a un determinismo con respecto a estados mecánicos.

Por otro lado, hay que tener muy presente que el determinismo de la mecánica sólo rige estrictamente para los estados mecánicos teóricos de los sistemas cuyas variables de estado son posiciones y momentos *instantáneos*. Sin embargo, los valores medidos experimentalmente de posiciones y cantidades de movimientos NO son nunca valores instantáneos, sino valores promedio durante algún intervalo de tiempo. Por tanto, las variables de estado teóricas de un estado mecánico pueden ponerse en correspondencia con magnitudes medidas experimentalmente que sólo son *coeficientes estadísticos* y que están afectados, por tanto, con una “dispersión” que no tiende a cero de magnitudes experimentalmente determinadas. Así, con la mecánica, a lo sumo, lo que se puede predecir exitosamente sólo es una *clase* de valores para las posiciones y los momentos que constituyen una buena aproximación a un estado teórico de un sistema, y NO un conjunto único de valores.

Ante lo anterior, cabe plantearse si la mecánica es una teoría determinista o si sólo se acerca a una teoría determinista. Si acudimos al plano teórico y analizamos la estructura interna de la mecánica, no nos quedará más remedio que proponer el determinismo mecánico, en base a los estados mecánicos definidos teóricamente, ya que según se nos revela, es posible a ese nivel teórico, predecir el estado de un sistema a partir del conocimiento de otro estado anterior del mismo sistema.

2. DESCRIPCIONES ALTERNATIVAS de “ESTADO FÍSICO”.

La mecánica no es la única rama de la física ni la única teoría que posee una estructura determinista. Pero aún un rápido examen de las otras teorías revela que NO todas ellas emplean definiciones de estado físico idénticas a la usada en mecánica. Ese ideal Laplaciano de una ciencia rigurosamente determinista en la que la definición mecánica de estado sea un aspecto esencial pronto se mostró irrealizable o demasiado complicado en otros dominios de la ciencia. Por ejemplo, en hidrodinámica, el suponer que eran fuerzas de tipo newtoniano las que actúan sobre las moléculas trajo consigo una complejidad matemática que hizo renunciable este enfoque y buscar otras variables de estado alternativas y que podían ser interpretadas como valores *promedio* de las variables de estado mecánicas (v.g. la temperatura). Sin embargo, y a pesar de todo, se sigue identificando equivocadamente “determinismo” con “mecanismo”.

Existen alternativas a la definición mecánica de estado; y de hecho, una teoría física puede ser rigurosamente determinista aunque use una de esas maneras alternativas de especificar el estado de un sistema físico. Antes, sin embargo, es necesario entrar someramente en el análisis de algunas características generales de la descripción mecánica de estado. Se pueden resumir en tres:

- A. Se especifica el estado mecánico de un sistema mediante DOS variables de estado. Si se refiere una masa puntual a un marco de referencia cartesiano, su estado mecánico estará definido por SEIS coordenadas de estado: una para cada una de las tres componentes de la posición y otras tantas para las componentes de la velocidad. Por tanto, para un sistema físico que contiene un número finito de masas, será preciso un número finito de valores de las variables de estado.
- B. Cada coordenada es un valor instantáneo de una variable de estado, de modo que el estado mecánico es un estado instantáneo.
- C. El estado mecánico de un sistema representa lo que llamaremos una *propiedad individual*, esto es, una propiedad que sólo puede ser aplicada con sentido a una masa puntual particular, o a un conjunto de tales masas tomados distributivamente y NO colectivamente.

Veamos, ahora sí, algunas de esas alternativas.

1. *Es posible definir una descripción de estado en términos de un número INFINITO de valores de algún conjunto de variables de estado.*

En efecto. Tal es lo que sucede, de hecho, con las teorías físicas de CAMPO. Por ejemplo, el estado de un campo electromagnético en un instante dado está determinado por los valores de los vectores campo eléctrico y campo magnético en todos y cada uno de los puntos de ese campo (que son infinitos). Por tanto, el estado del campo electromagnético en un determinado instante sólo es conocido si en principio se conoce el número infinito de valores de las dos variables de estado en ese instante. A pesar de todo, la teoría electromagnética clásica posee una estructura determinista, a pesar de que la descripción electromagnética del estado de un sistema se defina de modo distinto al estado mecánico, ya que obedece el canon expuesto anteriormente para este tópico: si se dan los valores de los vectores electromagnéticos para cada punto de una región en un instante inicial, entonces es posible determinar, mediante las ecuaciones de Maxwell, los valores de estos vectores para esa región en cualquier otro instante.

2. *Una descripción de estado puede ser definida en términos de valores de una variable que represente una propiedad estadística de una clase de elementos, y no una propiedad que sólo pueda ser aplicada, con sentido, a los individuos.*

Las descripciones de estado de este tipo son muy frecuentes en Mecánica Cuántica y en Mecánica Estadística clásica. Esta última nació bajo la idea de aplicar el análisis de Newton a un sistema gaseoso, considerando a cada molécula el objeto de su análisis. Pronto se vio que la situación no era abordable dado el gran número de moléculas a tratar así, y aunque se pudiera hacer, seríamos incapaces de predecir los estados mecánicos futuros del sistema a causa de las graves dificultades matemáticas que presenta el problema de resolver un número enorme de ecuaciones diferenciales simultáneas del movimiento. Para eludir estas dificultades se acudió al tratamiento estadístico, que aunque NO puede predecir el comportamiento individual de una molécula, sí hace posible predecir ciertos valores *promedios* de magnitudes asociadas a esos movimientos individuales.

Por tanto, junto a las ideas (no estadísticas) de Newton se añadieron hipótesis estadísticas adicionales sobre el movimiento molecular y que a la larga permitieron explicar propiedades macroscópicas observables del estado de un gas, o posteriormente al análisis del movimiento browniano.

Aunque la mecánica estadística NO predice el estado individual de moléculas, sería un error pensar por ello que NO es una teoría determinista. En primer lugar, la mecánica estadística incluye en sus pilares suposiciones que sí son mecánicas, de modo que –al menos en teoría– el estado inicial de las moléculas determina unívocamente el estado mecánico posterior, pero sobre todo es que la descripción de estado mecánica estadística se define en términos de variables de estado *estadísticas*, no en términos de variables de estado de la mecánica de partículas. Por tanto, con respecto a su *propia* manera de especificar el estado de un sistema, la mecánica estadística es una teoría determinista.

Tras todo lo anterior, puede deducirse que NO es sólo la Mecánica clásica el paradigma de determinismo, aunque sí es ella el ejemplo más recurrente. Este análisis anterior exige una definición de tal concepto que abarque otras teorías además de la mecánica clásica. Una teoría es determinista –podemos decir– si y sólo si, dados los valores de sus variables de estado para algún periodo inicial, la teoría determina lógicamente un conjunto único de valores de esas variables para cualquier otro periodo.

3. EL LENGUAJE DE LA MECÁNICA CUÁNTICA.

Si como parece la Mecánica Cuántica es el paradigma de indeterminismo, igual que la mecánica clásica lo es de lo contrario, habrá –como antes– que ver cuáles son los hechos o las aseveraciones que le confieren semejante estatus. Al igual que en la clásica, la Mecánica cuántica está también sujeta al hecho de que el juicio empírico NO está en un acuerdo total con las leyes numéricas que la teoría deduce, si bien tales discrepancias caen dentro de los límites del error experimental. Por tanto, en estos aspectos no hay nada nuevo en la teoría cuántica que la diferencie de la clásica. Sin embargo, es tal vez la naturaleza dual (ondas y a la vez partículas) de los elementos con los que trabaja la cuántica, lo que más desconcierto provoca, y sobre todo –y de ahí su “etiqueta de indeterminista” para la teoría– el conocido como *principio de indeterminación de Heisenberg*, en virtud del cual, si se mide con gran precisión una de las coordenadas de cantidad de movimiento o de posición, no es posible obtener *simultáneamente* un valor, con la precisión que se desee, para la otra.

Las ecuaciones de la Mecánica Cuántica no pueden establecer una correspondencia única entre posiciones y cantidades de movimiento precisas en un instante dado y posiciones y cantidades de movimiento precisas en otros instantes. Sin embargo, sí permite calcular *la probabilidad* de que una partícula tenga una cantidad de movimiento específico cuando tiene una posición dada, y viceversa. Por tanto, desde esta perspectiva, la teoría cuántica NO tiene una estructura determinista, pero sí un contenido estadístico.

Una interpretación muy difundida de estas ideas de incertidumbre y dualidad es la de que tales ideas formulan las variaciones relativamente grandes, pero intrínsecamente impredecibles, de ciertas características de las partículas y los procesos subatómicos, variaciones producidas por la interacción de estos últimos con los instrumentos de medida. Para Heisenberg, en las medidas de objetos a gran escala, los efectos provocados en los objetos por los procesos de medición pueden ser despreciados, pero no así en niveles subatómicos.

“La interacción entre el observador y el objeto provoca cambios incontrolables y grandes en el sistema observado, debido al carácter discontinuo de los procesos atómicos. La consecuencia inmediata de esta circunstancia es que, en general, todo experimento realizado para determinar una magnitud numérica convierte en ilusorio el conocimiento de otras magnitudes, pues las perturbaciones incontrolables del sistema observado alteran los valores de las cantidades determinadas previamente”

(Werner Heisenberg. *The Physical Principles of the Quantum Theory*)

En otro orden, con frecuencia se considera que la dualidad onda-partícula atribuida a elementos como los electrones indica que hay límites a la interpretación del formalismos de la mecánica cuántica en términos de las nociones tradicionales de espacio y de tiempo. Se ha sostenido, por ejemplo, que debemos renunciar a tomar como esquema universal de análisis la familiar costumbre de describir la naturaleza mediante la especificación de las propiedades y relaciones de individuos ubicados espaciotemporalmente. Es más, el propio Heisenberg llegó a plantear el dilema de que o bien podemos interpretar las ecuaciones de la teoría cuántica como descripciones de procesos subatómicos en términos de espacio-tiempo corrientes pero –debido a las relaciones de incertidumbre– al precio de abandonar las explicaciones deterministas, o bien podemos conservar tales explicaciones, pero al precio de renunciar a la posibilidad de interpretar las ecuaciones de la teoría como si se refirieran a individuos y a procesos localizados en el espacio y en el tiempo.

Sin embargo, sobre esto es necesario hacer algunas precisiones importantes. En primer lugar, la afirmación de que las relaciones de incertidumbre expresan las “incertidumbres” engendradas por las interacciones entre los objetos medidos y los instrumentos de medición y de que por tanto no puede mantenerse la distinción clásica entre “observador” y “observado” en el mundo microscópico suele presentarse como prueba de las relaciones de incertidumbre, en lugar de lo que es: una conclusión de tales relaciones. Por otro lado, estas mismas relaciones ponen límites al conocimientos *simultáneo* de posición y cantidad de movimiento, pero no a ellos por separado, por lo que no es convincente el argumento de que no se pueden establecer con precisión ilimitada las posiciones y las cantidades de movimiento simultáneamente aduciendo como razón las perturbaciones que introducen los instrumentos de medida.

Otro aspecto a considerar es la afirmación frecuente de que las nociones espaciotemporales tradicionales no son adecuadas para “describir” procesos subatómicos, cuando en realidad sean las mismas nociones de “onda” y de “partículas” las que fallan por tratar de identificar nuestra imagen de tales a los electrones y demás partículas del mundo microscópico. Es por ello que si es así, esto es, que falla nuestra asemejación de ondas y partículas en el mundo subatómico, se hace necesario tomar con cautela la idea de que la mecánica cuántica no sea una teoría determinista. Todo lo anterior exige examinar despacio el lenguaje propio de la mecánica cuántica.

Para empezar, no hay que olvidar que el formulismo matemático de la cuántica es heredado, o es el resultado, de una adaptación del desarrollado en la física clásica, por lo que no es de extrañar que el uso de tal lenguaje para formular ideas de cuántica conduzca a asignar posiciones y momentos a electrones con semejante sentido al que poseen esas ideas en clásica, notando que tales concepciones se ven cortas en función de la situación cuántica abordada, por lo que conviene apartar ambos significados. Por lo tanto, es un desatino suponer, como lo han hecho algunos comentaristas de la mecánica cuántica, que al mejorar nuestras técnicas experimentales quizás podamos establecer los valores simultáneos de las posiciones y las cantidades de movimiento de los electrones, en los sentidos de “posición” y “cantidad de movimiento” fijados por la teoría cuántica actual. Tal suposición es similar a la conjetura según la cual, mediante un estudio más profundo podríamos llegar a descubrir si la razón $2/3$ es o no impar. Dicha suposición pasa por alto el punto fundamental de que, en virtud de las relaciones de incertidumbre, la expresión “los valores simultáneos precisos de la posición y la cantidad de movimiento de un electrón” no tiene un sentido definido en la mecánica cuántica. El propio Heisenberg admite e insiste en esto (aunque hay pasajes en sus escritos en que lo olvida) pues si no está definida la expresión “los valores simultáneos precisos de la posición y la cantidad de movimiento de un electrón” entonces no hay cantidad de movimiento alguna que conocer en las circunstancias indicadas.

4. EL INDETERMINISMO DE LA TEORÍA CUÁNTICA.

Ante lo dicho, no cabe más que concluir que la mecánica cuántica NO puede ser caracterizada válidamente como indeterminista *solamente* sobre la base de que las relaciones de incertidumbre excluyen la posibilidad de valores precisos para las “posiciones y cantidades de movimiento” simultáneas de los electrones y otras “partículas” subatómicas, ya que incluso tal concepto posee una significación distinta en las dos parcelas. Es más, hay que hacer notar que la mecánica cuántica –a diferencia de lo que a menudo se cree– no define el estado de un sistema en base a un conjunto de valores instantáneos de posiciones y cantidades de movimiento, como lo hace la mecánica clásica. Por tanto, ha de admitirse que la cuántica NO es determinista con respecto a una descripción de estado en esos términos clásicos, pero de eso no se ha de deducir que la teoría cuántica no sea determinista con respecto a una *descripción de estado definida de modo diferente*. Es más, examinando las ecuaciones de la cuántica, se observa incluso que con respecto a su propia definición de estado, la teoría cuántica es determinista en el mismo sentido a como lo es la clásica con respecto a su propia definición de estado. Sin embargo, la descripción de estado usada en cuántica es extraordinariamente abstracta, comenzando por su concepto estrella, la *función Psi* (Ψ), expresada en términos de posición y tiempo. Una función que ha de satisfacer la ecuación de onda fundamental del sistema en estudio; ha de ser continua, uniforme y finita por toda la región en la que está definida. Pero lo más importante respecto de Psi, es que dados los valores de la función para cada punto de la región en un instante inicial, la ecuación de onda de Schrödinger determina un conjunto único de valores de la función en cualquier otro instante. La cuántica, por tanto, es una teoría determinista totalmente, con respecto a la descripción de estado mecánico cuántico definida por Psi.

Otro aspecto importante es analizar qué es Psi y qué representa. Está claro que no se la puede interpretar en los mismos términos o con los mismos modelos que se usan en la mecánica clásica. Esta función es, por lo general, de tipo complejo, cuyo cuadrado de su valor absoluto es real. Tal cuadrado, se lo viene interpretando como la *probabilidad* de que los constituyentes elementales del sistema para el que se definió se hallen en diversos puntos del espacio. Pero hay que notar que la misma función Psi no recibe ninguna interpretación, sólo su cuadrado. ¿De qué manera, entonces, es posible determinar el estado mecánico cuántico de un sistema? Está claro que no podrá hacerse

mediante la observación experimental. Mientras que en mecánica clásica las variables de estado están asociadas con propiedades de los individuos postulados por la teoría, en la cuántica la variable de estado está asociada con una propiedad estadística de los elementos postulados. En consecuencia, el hecho de que las observaciones reales de un sistema sólo concuerden aproximadamente con las predicciones de la teoría se interpreta de modo diferente en los dos casos. En la clásica se atribuye la discrepancia a una falta de conocimiento preciso de las condiciones iniciales del sistema. En cuántica, también se explica, en parte, la discrepancia en función de errores experimentales, pero una parte adicional de la explicación consiste en observar que las suposiciones y reglas que coordinan el estado teórico de un sistema con datos experimentales contienen un componente estadístico ineliminable.

A pesar de que la cuántica es determinista respecto a la descripción de estado definida por Ψ , es esta la razón por la que algunos físicos sostienen que la mecánica cuántica es “por naturaleza indeterminista, y por tanto, pertenece al dominio de la estadística”. Sin embargo, es necesario marcar que la función Ψ NO es una función probabilística. Ψ , “representa” una característica abstracta de los sistemas físicos, característica que determina ciertas probabilidades asociadas a esos sistemas. Por tanto, Ψ puede ser considerada como una variable de estado *casi* estadística. Entonces, por tanto, todas las predicciones basadas exclusivamente en esta interpretación de Ψ , han de ser, necesariamente, estadísticas y no pueden ser predicciones de propiedades NO estadísticas de individuos. Por tanto, no hay base alguna para la conclusión según la cual, puesto que la teoría cuántica no predice las conductas individuales detalladas de los electrones y otros elementos subatómicos, la conducta de tales elementos es intrínsecamente indeterminista y la manifestación del azar absoluto, es decir, si las suposiciones fundamentales de la cuántica sólo tienen un contenido estadístico, no es sorprendente ni paradójico que las conclusiones derivadas de tales suposiciones sólo tengan igualmente un contenido estadístico.

En ocasiones, se caracteriza a la cuántica como una teoría esencialmente estadística por que sus variables de estado –a diferencia de lo que sucede en mecánica estadística clásica- no pueden ser analizadas en términos de ninguna teoría determinista disponible que sólo use descripciones de estado no estadísticas. En consecuencia, a pesar de los éxitos cosechados por la cuántica, hay un elenco de físicos que han expresado una seria insatisfacción con respecto a ella en su forma actual, al considerar que es “una representación incompleta de cosas reales”.

El presunto carácter incompleto de la teoría cuántica actual consiste, aparentemente, en el hecho de que la teoría sólo formula ciertas propiedades estadísticas de los procesos subatómicos, pero no dice nada acerca de la conducta detallada de los elementos “individuales” de esos procesos. En la actualidad, la mayoría de los físicos desconfían de la posibilidad de hallar otra teoría que reemplace a la cuántica y que use variables de estado diferentes a la que aparecen en ella y se parezcan más a las de la física clásica. De hecho, el matemático John von Neuman demostró que NO es posible completar la teoría cuántica introduciendo “parámetros ocultos” adicionales para definir el estado de un sistema y convertir la teoría en una teoría NO estadística sin obtener resultados disconformes con los experimentales que confirman abrumadoramente la actual cuántica. Sin embargo, Von Neuman no demostró que esté excluida la posibilidad de lograr una teoría NO estadística, satisfactoria con los resultados experimentales, y que esté construida sobre cimientos muy diferentes. Evidentemente, tal teoría hoy por hoy no existe y las dificultades de su construcción son enormes. Sin embargo, el descubrimiento experimental de una variedad de “partículas elementales” extrañas y en parte inesperadas, dotadas de altas energías y para las que la cuántica de la actualidad no ofrece una explicación adecuada, ha llamado la atención sobre las limitaciones de la teoría, y algunos físicos, animados por este hecho, han intentado nuevas teorías NO estadísticas que eludan las prohibiciones del teorema de Von Neuman, por lo que el carácter esencialmente estadístico de la mecánica cuántica no es necesariamente el punto y final sobre el tema.

5. CUÁNTICA y CLÁSICA.

Muchos físicos han llegado a convencerse de que la teoría cuántica es la parte lógicamente fundamental de la física, y que en base a sus ideas ha de interpretarse las otras ramas de la física y de la ciencia. Se ha llegado a pensar, por su parte, que incluso las leyes que se refieren a objetos y sucesos macroscópicos, son en el fondo estadísticas y de que, en última instancia, todos los procesos naturales son “acausales”. Ya de hecho, la idea de que todas las leyes de la física representan simplemente regularidades promedio o estadísticas fue defendido antes incluso del advenimiento de la cuántica, y la interpretación de Boltzman del segundo principio de la termodinámica parecía confirmar esta idea. Tales ideas han sido argumentadas en mayor o menor proporción por físicos como Eddington, Exner o Schrödinger.

El eje principal del argumento que trata de defender esta postura pasa por admitir que dado que los objetos macroscópicos se forman a expensas de los subatómicos, y en el reino de lo minúsculo es la estadística y el indeterminismo el que reina, la conducta de los macroscópicos es también de tipo estadístico.

Aunque ya se ha hablado de la no concordancia entre teoría y observación en mecánica clásica, la cuestión que el argumento anterior plantea, es distinta. Hay una suposición implícita en ese argumento que no siempre se da, y es que “si una teoría –como la cuántica– es estadística, toda conclusión que de ella se deduzca también lo es”. Esto no siempre es cierto, y pueden valer de ejemplos la ley de radiación de Planck o la teoría cinética de un gas desembocando y describiendo la temperatura.

Para terminar de apostillar esto, ha de observarse que aun cuando aceptemos las afirmaciones más extremas acerca de la conducta indeterminista de los elementos subatómicos postulados por la cuántica, esta indeterminación NO se presenta en ninguna conducta experimentalmente proyectable de objetos “macroscópicos”. En realidad, el indeterminismo teórico que se deduce de la cuántica hasta en los movimientos moleculares (por no hablar ya de cuerpos de masa mayor) es mucho menor que los límites de exactitud experimentales. Como observó De Broglie, la indeterminación teórica de los procesos subatómicos no contradice en modo alguno el *aparente determinismo* de los fenómenos en gran escala. Pues esta indeterminación “se halla completamente disimulada por los errores que se introducen en el curso del experimento y, por tanto, todo sucede como si no existieran en absoluto... En la práctica, como en los experimentos, todo sucede como si... hubiera un determinismo estricto.”

En consecuencia, el contenido estadístico de la mecánica cuántica no anula la estructura determinista y no estadística de otras leyes físicas. Igualmente, aquellas conclusiones que circulan sobre la libertad y la responsabilidad moral humanas cuando se basan en la presunta conducta “acausal” e “indeterminista” de los procesos subatómicos, tienen cimientos de arena.

6. EL PRINCIPIO DE LA CAUSALIDAD.

Otra de las aparentes conclusiones inmediatas del advenimiento y posterior éxito de la cuántica, ha sido considerar tal éxito como una demostración de la inaplicabilidad, a los procesos subatómicos, de la llamada *ley de la causalidad* y por tanto y por extensión, un indicio éste de la decadencia de este principio.

Algunos intentos notables de enunciar este llamado principio de causalidad fueron los de *John Stuart Mill* y el de *Laplace* que no viene muy al caso recordar pero que se mostraron insuficientes con requerimientos posteriores de tipo empírico. Más actualmente, tiende a interpretarse este principio más bien como *una norma* que nos insta a analizar los procesos físicos de tal manera que sea posible establecer que su evolución es independiente de los tiempos y lugares particulares en los cuales esos procesos se producen.

Visto de este modo, el principio de causalidad es una recomendación generalizada que nos insta a construir teorías y hallar sistemas apropiados a los cuales puedan aplicarse con éxito esas teorías, lo cual, por cierto, no es siempre posible.

Bajo este punto de vista de “norma”, el principio no es una generalización empírica acerca de la estructura del mundo y tampoco aparece como la “premisa principal y fundamental” de toda explicación. La función del principio es hacer explícito un objetivo de la investigación y formular en términos generales una *condición* que se exige de las premisas propuestas como explicaciones. Además, según esta interpretación el principio no puede ser refutado por ningún experimento ya que tal principio no es más que una *directiva* que nos prescribe la búsqueda de explicaciones que posean ciertas características y aunque se den fracasos en hallarla tales explicaciones, esto no constituye un obstáculo lógico para seguir la búsqueda.

Por tanto, el principio expresa, como máxima, el objetivo general de la ciencia teórica de obtener explicaciones *deterministas*. En su formulación más general, el principio no prescribe una definición particular de la definición de estado ni postula como objetivo de la ciencia la elaboración de teorías que posean una forma lógica especial. No prohíbe el uso de variables de estado estadísticas o casi estadísticas, por lo que los avances recientes en cuántica no están en conflicto con sus directivas. La afirmación usual de que el principio de causalidad es inaplicable a la cuántica sólo es defendible si se lo concibe como legislando el uso de tipos especiales de descripciones de estado y sólo si se considera que el uso de variables de estado estadísticas constituye la señal de que la teoría carece de estructura determinista.

7. AZAR e INDETERMINISMO.

Otra cuestión fundamental a tratar es la de que si los sucesos reales de la naturaleza son en sí mismos, parcial o totalmente, *indeterminados* o hechos “de azar”, y de si el uso de variables de estado esencialmente estadísticas es o no una consecuencia del hecho de que ciertos procesos físicos pertenezcan al dominio de lo fortuito.

Habrà que comenzar por desentrañar qué se entiende por azar, término éste bastante vago cuando se lo cita sin más. A veces, se lo usa cuando hay una ignorancia casi completa acerca de las condiciones determinantes de un suceso, o bien cuando se sabe que estas condiciones pertenecen a alguna clase de tipos alternativos de condiciones, pero se desconoce cuál. Una primera definición aceptable de tal sería admitir que un conjunto ordenado de sucesos es casual si y sólo si satisface postulados del cálculo de probabilidades. Con todo, es esencial observar que decir de un suceso que se produce por azar no es incompatible con la afirmación de que está causado; pues admitir ignorancia concerniente a las condiciones específicas que determinan un suceso no implica negar la existencia de tales condiciones.

A veces, se dice que una ley o una teoría es “contingente” o se cumple “por azar” si en un contexto dado dicha ley o teoría no deriva de otras premisas, y dado que en un estado del desarrollo científico no se puede continuar indefinidamente el proceso de explicación, es evidente que debe haber siempre algunas teorías que sean contingentes en el sentido considerado. Otras veces, sin embargo, se dice que una teoría es una verdad contingente simplemente porque no es una verdad lógicamente necesaria y sólo se la puede asentar en elementos de juicios empíricos. Se supone tácitamente, por supuesto, que hay algunos enunciados que son lógicamente necesarios y su verdad puede ser certificada considerando sólo el significado de sus términos, mientras que hay enunciados que no lo son. Por ejemplo, el enunciado “*la suma de los ángulos de un triángulo es de dos rectos*” es un caso del primer grupo, mientras que otros como “*en la electrólisis el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno*” corresponde al segundo grupo. Por tanto, ya que se supone que las teorías y leyes científicas sólo son contingentemente verdaderas, en el mejor de los casos, ningún fenómeno aislado de la naturaleza y ningún esquema de coexistencia o de cambio que formulen las teorías o las leyes, son lógicamente necesarios. Si se identifica una explicación lógicamente racional con una explicación cuyas premisas son verdades necesarias, entonces, no se puede dar ninguna explicación totalmente racional del mundo o de alguno de sus fenómenos.

Otra acepción frecuente, es considerar que un suceso se produce “al azar” cuando no sólo no conocemos las condiciones determinantes de su producción, sino que ni siquiera existen tales condiciones, según se afirma en la acepción. Hay numerosos ejemplos de este tipo de acepción a lo largo de la Historia, empezando por la idea epicúrea de los átomos que se desviaban “espontáneamente” de sus caminos normales, e incluso muchos físicos de hoy día sostienen tal acepción, y al parecer, los procesos subatómicos se caracterizan por un azar absoluto, de modo que por ejemplo, la emisión de partículas subatómicas radiactivas es considerada como un proceso *debido a la descomposición espontánea de sus átomos*. Debe admitirse, en todo caso, que en la actualidad NO se sabe que la desintegración radiactiva de átomos sólo se produzca en condiciones determinantes específicas. Pudiera ser, por tanto, que ese fenómeno sea un hecho de “azar absoluto”. Por otro lado, aunque la teoría física actual no es incompatible con la suposición de que las desintegraciones atómicas son hechos de azar absoluto, en sus formulaciones no hace ningún uso específico de tal suposición. Por tanto, la teoría actual es compatible con la suposición más débil de que éstos sucesos son hechos de “azar relativo”, en alguna de los sentidos de “azar” comentados anteriormente.

Además, hay una seria dificultad asociada a la noción de azar que hace de la suposición de “azar absoluto” una hipótesis gratuita. La razón por la que se dice habitualmente que los sucesos se producen de un modo totalmente fortuito es que no aparece “orden” alguno en la secuencia de sus apariciones y por tanto, no pueden formularse relaciones funcionales entre los sucesos y los tiempos en los que ocurren. Pero la afirmación de que una secuencia de sucesos manifiesta un desorden absoluto sólo es defendible si se usan los términos “orden” y “desorden” en algún sentido especial o restringido, y sólo si se entiende “relación funcional” en el sentido de alguna clase limitada de funciones matemáticas.

Para finar ideas, consideremos los átomos de un determinado radio y supongamos que se registra el momento en el que cada átomo se desintegra. Ahora bien, indudablemente no habrá ninguna fórmula obvia que vincule el número de desintegraciones con los tiempos en los que se producen. Pero como por hipótesis hay una correspondencia entre las desintegraciones y los tiempos, se define por extensión, una función matemática que vincula la primera con los segundos. Por tanto, no es imposible que tal función exista, todo lo compleja que sea. En consecuencia, no hay ningún desorden absoluto en la distribución de las desintegraciones atómicas en el tiempo, ya que hay un orden, más o menos escondido, en su ordenamiento. Esto NO significa que CADA suceso de una serie no pueda ocurrir de un modo al azar, pero SÍ significa que el desorden predicado de la *distribución de estos sucesos en el tiempo* deba ser entendido como relativo a algún tipo de orden o clase de funciones matemáticas.

El resultado final de este análisis es que, decir que un suceso “ocurre por azar” no es, en general, incompatible con afirmar que el suceso está determinado, excepto cuando se entiende “suceder por azar” en el sentido de que no hay condiciones determinantes para que el suceso se produzca. Pero de hecho, no conocemos las condiciones precisas para que se produzcan muchas especies de sucesos, aunque podamos confiar en que tales condiciones existan. En sustitución de tal conocimiento, con frecuencia, podemos establecer relaciones de dependencia entre propiedades estadísticas de sucesos, y NO entre sucesos individuales o propiedades individuales de éstos. En realidad el uso de variables estadísticas de estado en la física moderna se basa en la suposición de que, aunque NO conocemos la conducta detallada de los elementos microscópicos “individuales” postulados por la teoría, podemos reducir bastante nuestra ignorancia examinando diversas propiedades estadísticas de esos elementos.

En la cuántica se cree comúnmente que el uso de la descripción estadística de estado refleja la naturaleza intrínsecamente indeterminista o absolutamente al azar de ciertos procesos subatómicos. Sin embargo, la cuestión de saber si éstos procesos son o no absolutamente fortuitos no es un tema de importancia científica, pues la teoría cuántica es compatible con cualquiera de las alternativas. Mientras que no aparezca una teoría que venga a suplir ese carácter estadístico y al azar de la cuántica, se seguirá hablando y escribiendo sobre el indeterminismo de la mecánica cuántica.