

# Tiempo e incertidumbre en la Física Cuántica

## Time and uncertainty in Quantic Physics

*John Fernando Zapata Mesa\**

Recibido abril 10 de 2012, aprobado mayo 26 de 2012

### Resumen

El tiempo es un concepto que se matiza en formas diferentes en la física moderna, o sea desde la teoría de la relatividad de Albert Einstein y la física cuántica. Este escrito muestra los principales rasgos que acercan, al concepto de tiempo en la física cuántica no relativista y al concepto cuántico de incertidumbre como un principio inherente al proceso de medición, o sea de percibir la “realidad”.

*Palabras clave:* principio de complementariedad, principio de incertidumbre, observable.

### Abstract

Time is a concept that is qualified in different ways by modern Physics, that is, from Einstein's Relativity Theory to Quantic Physics. This paper shows the main traits that brings close the non-relativistic quantic Physics to the quantic principle of uncertainty as an inherent principle to the process of measuring, that is, of preceiving the “reality.”

*Keywords:* Complementarity principle, Uncertainty principle, observable.

---

\* Físico Cuántico. (M. Sc). Docente e Investigador Tiempo Completo Institución Universitaria de Envigado. Correo electrónico [jfzapata@iue.edu.co](mailto:jfzapata@iue.edu.co)

## Introducción

La física cuántica surge en el siglo xx y es la que describe la fenomenología en el microcosmos. Esta física reestructura los conceptos de tiempo, espacio, materia, energía, entre otros, o sea reestructura al sujeto, se relaciona con la conciencia. Hasta principios del siglo pasado, el conocimiento científico difundido en el mundo occidental estaba basado siempre en la observación de los fenómenos externos que nos rodean, seguido por una explicación “lógica” en forma de teorías o modelos.

Antes del advenimiento de la física cuántica, el ser humano ve al universo como un objeto de estudio separado de su propio ser. El universo ha sido percibido como una entidad regida por leyes que escapan a nuestro conocimiento; pero, cuyo descubrimiento se va dando en tanto se avance en los medios de observación. Muchas personas participan aún de esta opinión y creen que cualquier realidad puede ser conocida, siempre y cuando los telescopios, microscopios u otros instrumentos, sean lo suficientemente poderosos. Esta forma de pensar tiene la enorme desventaja de mantener una separación entre ser humano y el universo que lo rodea, postura que lleva a deslegitimar el poder que se tiene y es el de ser partícipe y constructor de las propias realidades.

De forma implícita, la física cuántica propone que el individuo del siglo XXI, debe lograr un cambio radical en su representación del universo, un cambio total de lógica y de lenguaje. Los tradicionales conceptos de espacio, tiempo, energía y materia, precisamente son dogmas y tabúes que regulan y definen las realidades humanas. Para acceder a la física cuántica, el individuo debe abandonar las interpretaciones e ideas del mundo al que está acostumbrado, sus leyes, estabilidades y certidumbres, para sumergirse en su propia ilusión epistemológica, al distinguir cómo se despliega un mundo de apariencias y de “hechos” frente a lo que hasta hoy se identificaba como “realidad”.

Esta innovación de la física nos sugiere que el individuo de estos tiempos entra en un serio proceso de desmitificación de nociones fundamentales como la de pensar que el universo es una máquina y, en general, de enfoques deterministas, mecanicistas y materialistas de lo "real". El individuo contemporáneo entra en un riguroso y también misterioso proceso de destilación conceptual y lingüística. Tal proceso, que es propio de la física cuántica, coincide con algunos desafíos del psicoanálisis y la psicología contemporánea en sus aplicaciones clínicas, psicosociales y organizacionales.

Una indagación crucial de la física cuántica consiste en preguntar por la "unidad de pensamiento o conocimiento" que claramente es el "universo". En particular, hace un llamado a realizar un cambio paradigmático de este, el que debe traducirse en un cambio total de mentalidad y de práctica de vida. Nos anticipa que cada individuo –de estos tiempos y de los que vienen– deberá observarse a sí mismo y al mundo que le rodea; revisar creencias aprendidas acerca del espacio y el tiempo. El individuo es llamado a reexaminarse en toda lógica de pensamiento, imágenes que se hace acerca de las cosas, de procesos y, por ejemplo, acerca de la causalidad que se le asocia a los acontecimientos. Últimamente el sujeto contemporáneo está orientado a cuestionar el carácter separable de las cosas que existen articuladas bajo el mismo esquema de pensamiento llamado universo.

En el universo que nos abre la física cuántica, cada individuo es instado a ver qué hay "más allá de la materia", a reconocer que bajo un velo de ilusión de un paradigma materialista y determinista existe una realidad profunda hecha de otra esencia. Esta realidad es "un universo pensante", un universo que encierra un misterioso código cósmico y del cual hacemos parte estructural y nos invita a descifrarlo. La esperanza de una nueva representación que incluya este desciframiento, es que el individuo del siglo XXI conecte su pensar con el universo, con la naturaleza, en tanto reconozca que es parte de ella y esta de él.

Esta revolución cuántica ha trascendido la física como tal y ha acarreado una completa reinterpretación de sus fundamentos en el ámbito de la ciencia en general. En esta nueva realidad universal se está conquistando el hecho de que la conciencia –en el acto individual de observación y la propia conciencia observadora– interviene en la definición y en la existencia final de lo observado. Tanto el acto de observación como el fenómeno observado forman un sistema único dentro de un espacio físico, lo cual indica que lo que alguien puede considerar o ver como aparentemente separado en el espacio-tiempo, no es más que una ilusión de los propios sentidos. El mundo "objetivo" no existe absolutamente fuera de la conciencia individual por cuanto la conciencia individual determina las "propiedades del mundo" en que habita.

### 1. El tiempo no es "real"

La física cuántica no relativista, desde su construcción, sus postulados y más concretamente su segundo postulado (Cohen, 1977, p. 215), plantea que una cantidad para que sea física "real" y tenga propiedades medibles, debe ser descrita por un operador matemático lineal, a este operador se le llama observable. Propone el postulado que hay una estrecha relación entre este tipo de matemáticas, asimismo, lo conocible y lo propone como un camino de acceder al conocimiento del "universo", solo a través de las propiedades de estos matemáticos podremos medir, conocer y acercarnos a la naturaleza de las cantidades físicas y obtener la información de los sistemas físico-cuánticos.

Desde la matemática pura se demuestra que estos operadores lineales se pueden expresar en forma de matrices, que tienen asociados dos conceptos de suma importancia en la construcción de la teoría cuántica, que son los llamados *autoestados*, los que definen las funciones de onda y los *autovalores*, los que definen lo que se llama el espacio espectral. El primer postulado de la mecánica cuántica establece que estos autoestados definen un espacio de funciones que tienen toda la información del sistema físico en un tiempo dado; es decir, en este

objeto matemático se encuentra encapsulado lo que es posible conocer del sistema físico al cual es asociado. El tercer postulado de la mecánica cuántica (Cohen, 1977, p. 215) establece que los autovalores constituyen el conjunto de resultados de las medidas posibles o de lo que se puede observar en una medición en relación con el observable asociado.

El tiempo no se ha podido describir por un operador cuántico lineal como lo requiere el postulado; es decir, no se ha encontrado hasta el momento un operador matemático lineal que describa el tiempo y cuyos autovalores sean los posibles valores de una medición de tiempo; por esta razón el tiempo no es una cantidad medible en el mundo de la física cuántica no relativista. El tiempo no es algo propio de la naturaleza de las cosas, ni algo estructural del universo y, por tanto, no es “real”, de ahí que es muy usual encontrar en textos clásicos de la física cuántica, como los de creadores y autoridades en la materia, entre los que se destacan: Dirac (1958), Pauling (1935), Merzbacher (1970), Sakurai (1967), Landau (1965), en los cuales no se asocian atributos al tiempo, en cuanto a que sea homogéneo o inhomogéneo, relativo o absoluto, por eso no se hace mención a si el tiempo es un concepto relacional o intrínseco. El tiempo no es una cantidad física medible porque no puede ser descrito por un operador lineal que se define en un espacio funcional, como lo proponen los postulados, y eso es lo fundamental en la física cuántica.

¿Qué es el tiempo para la física cuántica? es un parámetro que va ligado a los cambios de energía, no es más que eso, es un asunto cultural, algo útil. De manera paradójica, el tiempo entra a la física cuántica, desde el macromundo, desde la medida y los atributos que pueda tener en el mundo clásico, por lo que no ha sido de relevancia en el mundo cuántico; prueba de ello es que la teoría funciona muy bien con el uso que se le ha dado como un parámetro y, asimismo, no se ha observado cualquier conexión que pudiera haber entre los atributos del tiempo y la dinámica cuántica, por lo tanto no existen en el mundo cuántico y esto es una consecuencia directa de no tener un autoestado asociado y

de la interpretación que en Copenhague se le dio a la mecánica cuántica (Heisenberg, 1958, p. 17).

Algunos atributos que se le han asociado al tiempo a través de la historia, requieren de muchas cosas para poder que operen en los conceptos termodinámicos, como la entropía por ejemplo, que es el concepto en el que se ha fundamentado la asociación del tiempo a un flujo (pasado-presente-futuro) y un espacio métrico puntual como el Euclidiano, donde la misma palabra flujo connota algo muy distinto a lo que se considera en un espacio métrico funcional, de ahí que muchos atributos o no tienen cabida –como un átomo de hidrógeno constituido por un protón y un electrón que interactúan entre sí– o no se necesitan pero, aún así es un parámetro muy útil, aunque esta reflexión podría llevar a pensar que eventualmente se puede prescindir de él. ¿Cómo entra el concepto de tiempo en los formalismos cuánticos? Fundamentalmente de dos maneras:

1. A través del sexto postulado de la mecánica cuántica (Cohen, 1977, p. 222), el cual propone que la evolución temporal de un vector de estado o autovector es gobernada por la ecuación de Schrödinger. Esta ecuación determina la dinámica cuántica: en lenguaje matemático la ecuación de Schrödinger se escribe:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = H(t) |\psi(t)\rangle$$

Donde  $i$  representa el número imaginario,  $\hbar$  es la constante de Planck,  $H(t)$  es el *hamiltoniano* del sistema cuántico y  $|\psi(t)\rangle$  es el autoestado.

La mecánica cuántica describe el estado instantáneo de un sistema (estado cuántico) con una función de onda que codifica la distribución de probabilidad de todas las propiedades medibles u observables. Algunos observables posibles sobre un sistema dado son: la energía, posición, momento y momento angular. La mecánica cuántica no asigna valores definidos a los observables,

sino que hace predicciones sobre sus distribuciones de probabilidad (Cohen, 1977, p. 236).

La ecuación de Schrödinger es en parte determinista en el sentido de que, dada una función de onda en un tiempo inicial determinado, la ecuación suministra una predicción concreta de la función que tendremos en cualquier tiempo posterior; pero, durante una medida, el autoestado al cual colapsa la función es probabilista y en este aspecto es no determinista. Así que, la naturaleza probabilista de la mecánica cuántica nace del acto de la medida, esta es la esencia del cuarto postulado de la mecánica cuántica (Cohen, 1977, pp. 216-217).

Cuando se realiza una medición en un observable del sistema, la función de onda se convierte en un elemento del conjunto de las funciones llamadas funciones propias o estados propios del observable en cuestión. Este proceso es conocido como colapso de la función de onda. Las probabilidades relativas de ese colapso sobre alguno de los estados propios posibles son descritas por la función de onda instantánea justo antes de la reducción. Lo sorprendente es que el colapso de la función de onda no ocurre en el espacio-tiempo, o sea, no hay distancias en el sentido cotidiano del término y ocurre instantáneamente; por tanto, la mecánica cuántica es no local y en este sentido del colapso, de la realización del fenómeno, es atemporal.

2. A través del Principio de Incertidumbre. La complementariedad cuántica en su versión más general establece que si preparamos un sistema de manera tal que la propiedad  $A$  toma un valor preciso, entonces siempre existe otra propiedad  $B$  cuyo valor está completamente indeterminado. En este caso, afirmamos que las propiedades  $A$  y  $B$  son “complementarias”.

Es decir, si preparamos el sistema para medir con precisión un valor  $A$  y medimos la propiedad  $B$ , se obtienen resultados diferentes, distribuidos aleatoriamente, de manera totalmente azarosa.

El principio de incertidumbre está íntimamente relacionado con el principio de complementariedad, en cierta forma, es su versión matemática. Se aplica a situaciones, por ejemplo, en las que preparamos un electrón en un estado en el que su posición no toma un valor preciso, sino que cuando se hace la medida se obtienen valores distribuidos con una dispersión alrededor del valor más probable. En una situación de este tipo, si se mide el momento lineal del electrón, tampoco se obtiene siempre el mismo valor, sino que se verifica que los resultados de las medidas, tienen una dispersión. El principio de Incertidumbre establece que la posición del electrón y el momento lineal son cantidades complementarias y sus varianzas y satisfacen la siguiente relación matemática:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$$

Donde  $h$  es la constante de Planck.

La mecánica cuántica afirma que el indeterminismo es de naturaleza fundamental y que no se origina en ninguna limitación de los instrumentos; es decir, la razón por la cual al repetir el experimento se obtienen resultados diferentes no es la falta de precisión o de resolución de los instrumentos que se utilizan antes de efectuar la medida, ni tampoco la falta de control en los instrumentos de medición. Más aún, lo que establece la mecánica cuántica en este principio es que el indeterminismo tampoco se debe a la ignorancia sobre los detalles del objeto estudiado. Es así como, las probabilidades no surgen de nuestra ignorancia ni de nuestra incapacidad de controlar todas las variables experimentales, sino que tienen un origen fundamental e inexplicable. Esto es algo sorprendente, los principios de complementariedad y de incertidumbre fueron formulados por Niels Bohr y Werner Heisenberg hacia 1925 y evidencian lo extraño que es el mundo cuántico, lo probabilístico y a la vez lo fundamental a nuestro universo, a la "realidad". ¿Cómo es posible que se pueda preparar un objeto en un estado de modo



que una propiedad  $A$  se pueda medir exactamente, pero que sea imposible darle un valor preciso a otra propiedad complementaria  $B$ ? Esta pregunta no tiene respuesta dentro de la física cuántica. Dicha teoría acepta este sorprendente “hecho” como una propiedad de la naturaleza y a partir de ahí formula un modelo que tiene una notable capacidad predictiva.

Otras dos propiedades complementarias son el tiempo y la energía. Lo paradójico es que, según este principio, el tiempo cuánticamente es inherente a los cambios de energía, así la medida se haga en el macromundo y así el tiempo no sea una cantidad física medible, sino más bien un parámetro. En forma matemática el principio de incertidumbre se escribe:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

Donde  $h$  representa la constante de Planck,  $\Delta E$  representa la varianza en la energía y  $\Delta t$  representa la varianza temporal. Este principio no solo revela la estrecha relación que el tiempo tiene con la energía, sino que establece límites de medición, establece los rangos en los que podemos saber algo o entender algo; solo en esos rangos se podrá acceder a la información de cualquier proceso cuántico. Este principio cuantifica los límites que el universo nos pone y creamos mutuamente, por decirlo de alguna manera, pues esa separación, entre el universo y nosotros, se comparte aquí, no existe.

Este principio permite en los procesos cuánticos, por ejemplo los de la electrodinámica cuántica, que se viole la ley de la conservación de la energía por intervalos de tiempo muy cortos y esto da origen al vacío cuántico, a las partículas virtuales, las cuales son las que estructuran o fundamentan las interacciones entre las partículas elementales (quarks, leptones y los bosones que median las interacciones entre ellos) y, asimismo, las que constituyen la materia son: el electromagnetismo, la interacción fuerte o nuclear,

la interacción débil, y la gravitacional, que son descritas por la teoría cuántica de campos, excepto la gravedad.

Resulta paradójico que el principio de incertidumbre ponga límites, pero a la vez abre miles de posibilidades, porque –fuera de esos límites– se violan las leyes de la física y es esa extralimitación la que permite generar una nueva física, por ejemplo, basada en una teoría cuántica de la gravedad, como las teorías del espacio-tiempo espuma (*space-time foam*) que están conectadas con las teorías de redes de spines cuánticos (*spin networks*) o las teorías cuánticas de lazos o bucles (*quantum loop gravity*).

El principio de incertidumbre asociado al colapso de la función de la onda, en teoría, da origen a miles de universos, los llamados universos paralelos, pero estarían más allá de nuestro espacio y tiempo, por decirlo de alguna manera.

### 3. Conclusiones: algunas consideraciones cuánticas en relación con lo que es “real”

La mecánica cuántica postula la existencia de propiedades cuánticas que son incompatibles entre sí, esto es algo novedoso y profundo. Para acercarse a este concepto se hace necesario cambiar radicalmente nuestra visión de lo que es real. En primera instancia, se debe admitir que al hablar de las propiedades de un objeto, se puede generar cierta confusión. Esta terminología induce a pensar que las propiedades son algo que es propio del objeto, que le pertenecen a él, pero la mecánica cuántica establece algo muy distinto, por no decir lo contrario. Lo que esta define es que aquello que llamamos propiedades, en “realidad” es un canal mediante el cual el objeto interactúa y se crea con el observador; las propiedades las pone el sujeto formando una sola entidad con el objeto; la separación entre objeto y sujeto es superflua en mecánica cuántica. Lo que llamamos “posición” o “momento” son en “realidad” idealizaciones que lo único que expresan son formas distintas de interactuar, de que se establezca el observador-objeto, o

sea, expresan distintos mecanismos de interacción (canales) por los cuales los objetos de la naturaleza pueden afectarse mutuamente en su interacción con su observador.

Una de las cosas que nos enseña la física cuántica es que hay ciertos mecanismos de interacción, de “creación”, que son compatibles entre sí y que, por el contrario, hay otros que no lo son. Esta es la esencia del principio de complementariedad y es un hecho fundamental.

Otra de las enseñanzas de la física cuántica, es que el acto de medición no es un acto pasivo. Es probable que este sea uno de los aspectos más complejos y controversiales de la física cuántica. En efecto la física cuántica coloca al observador en un lugar diferente al que tradicionalmente le otorgaba la física. En la física clásica se pensaba que las perturbaciones inherentes a la observación podían ser minimizadas. Se pensaba que era posible concebir al acto de observación como una acción reveladora de algo que está escrito en el objeto estudiado. La física cuántica derribó ese paradigma y lo reemplazó por otro en el que el acto de observación es una interacción de creación. En efecto, si interactuamos con un objeto mediante un cierto canal, determinamos el valor de una de sus propiedades, creamos un estado de valores indeterminados de sus caras complementarias que están completamente indefinidas. Lo sorprendente es que, de acuerdo con la física cuántica, esto no se debe concebir como un estado de ignorancia sobre los valores de las caras complementarias.

Las predicciones cuánticas para los sistemas compuestos nos dicen que podemos encontrar un conjunto de propiedades globales de un sistema compuesto que sean complementarias a todas las propiedades de cualquiera de sus partes. Cuando medimos ese conjunto de propiedades colectivas de un sistema compuesto, preparamos al objeto en un estado en el que todas las alternativas de sus facetas complementarias están presentes. Ese es un estado entrelazado en el cual los valores de las propiedades de las partes, que son complementarias con las propiedades medidas, están completamente indefinidos.

Por último, si el objeto se prepara para no ser afectado por ningún mecanismo que induzca *decoherencia cuántica*, entonces seguirá comportándose como un todo. Será un objeto extendido, una unidad no-local, así sus partes se hayan desplazado a lugares distantes. Esta es una propiedad cuántica que, como todas, es muy compleja de entender; pero que se reproduce en los laboratorios, lo que da lugar a la teletransportación a nivel atómico, a la comunicación entre estructuras genéticas, al cambio en la paridad de dos fotones que interactúen, entre otros fenómenos y son interacciones cuánticas que no se dan en el espacio y el tiempo.

K

## Referencias

- Cohen-Tannoudji, C., Diu, B., Laloe, F. (1977). *Quantum Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
- P.A.M Dirac (1958). *The Principles of Quantum Mechanics*. United Kingdom: Oxford University Press.
- Pauling L. & Wilson E.B. Jr. (1935). *Introduction to Quantum Mechanics*. New York: McGraw Hill.
- Merzbacher, E. (1970). *Quantum Mechanics*. New York: Wiley.
- Sakurai, J.J. (1967). *Advanced Quantum Mechanics*. New York: Addison-Wesley.
- Landau, L.D. & Lifshitz, E.M. (1965). *Quantum Mechanics, Nonrelativistic Theory*. United Kingdom: Pergamon Press.
- Heisenberg, W. (1958). *Physics and Philosophy*. New York: Penguin Books.