

TEMAS DE FÍSICA

SER Y NO ESTAR. Esa es la cuestión de la Física Cuántica.

DE LA TORRE, A. C.

Funes 3350, 7600 Mar del Plata, Argentina.

Departamento de Física. Universidad Nacional de Mar del Plata.

ABSTRACT

Quantum mechanics and relativity force drastic modifications in our concepts of space and time. Relativity introduces "proper" space-time and quantum mechanics modify the concept of localization.

RESUMEN

La mecánica cuántica y la relatividad han introducido modificaciones drásticas a nuestro concepto de espacio y tiempo. La relatividad introdujo al espacio-tiempo "propio" y la mecánica cuántica modifica el concepto de localización.

El concepto de *espacio* ha ocupado al intelecto humano desde sus orígenes. Es larga la lista de físicos y filósofos que han participado en la evolución de dicho concepto. Una rápida lectura "en diagonal" del ítem *espacio-tiempo* en un diccionario de filosofía, objeto al cual acudimos para ganar algún conocimiento superficial que nos permite impresionar aparentando erudición, hará resaltar los nombres de Euklides, Demócritos, Aristóteles, Galileo, Descartes, Newton, Leibniz, Kant, Hegel, Feuerbach, Bergson, Husserl, Heidegger, Einstein, etc. Mientras mejor sea el diccionario o enciclopedia que consultemos mayor será la lista y mejor podremos impresionar. Diría Dolinas¹, "hablar del espacio-tiempo puede servir bastante para levantar minas". No es mi intención, en esta nota, seducir a nadie y mi sinceridad científica

me impide hacer creer que conozco en profundidad el pensamiento de aquellos pensadores. Me limitaré entonces a hablar solamente de la implicaciones que la física, en particular la mecánica cuántica, tiene para el concepto de espacio-tiempo, que han resultado en drásticas modificaciones.

Sin entrar a analizar que es el espacio-tiempo, problema infinitamente complejo, podemos acordar que, cualquier cosa que sea el espacio-tiempo, el concepto que nosotros tenemos de él, está fuertemente condicionado por nuestra percepción sensorial. Hemos aprendido sobre el espacio-tiempo a través de nuestros sentidos. La necesidad de ordenar espacialmente y temporalmente a los objetos que percibimos con nuestro aparato sensorial ha generado el concepto que tenemos del espacio-tiempo. La estructura que asignamos al espacio-tiempo está entonces fuertemente condicionada por los sistemas físicos

¹ Agradezco a Manuel Comesaña que dirigió mi atención hacia ese pensador popular.

que son los objetos de nuestra percepción sensorial. Designemos por "*sistemas clásicos*" a estos sistemas físicos que podemos percibir en su posición y evolución con nuestros sentidos. Ahora bien, la física nos enseña que existen sistemas físicos que no dejan ninguna traza en nuestro aparato sensorial. No podemos percibir a los átomos individuales, entes extremadamente pequeños y sutiles para nuestros groseros sentidos, que sólo registran la presencia, ubicación y evolución de objetos grandes, llamados *macroscópicos*. Menos aún, podemos percibir el comportamiento de los electrones y núcleo que componen al átomo, ni los protones y neutrones que forman al núcleo, ni los quarks presentes en la estructura interna de estos protones y neutrones. Tampoco percibimos las nubes de partículas intercambiadas entre los electrones y los quarks, llamadas fotones, gluones, y W, que son las responsables de las fuerzas que las ligan. El mundo del átomo, maravillosamente rico, agitado, tenue, cambiando y bello, es inaccesible a nuestros sentidos. Tampoco es accesible a nuestros sentidos el comportamiento de partículas que viajan a velocidades tan altas que, a nuestra torpeza, se presentan como transmitidas instantáneamente. Ninguno de estos sistemas físicos ha participado en la formación de nuestro concepto de espacio-tiempo porque no pueden ser percibidos directamente por nuestros sentidos. ¿Tenemos derecho a pensar que el concepto de espacio-tiempo que hemos ganado percibiendo un conjunto muy restringido de sistemas físicos, los sistemas clásicos, ignorando a un maravilloso mundo microscópico y de altas velocidades, sea aplicable a toda la realidad de la naturaleza? Otorgarnos ese derecho es un error "antropocéntrico" varias veces repetido en la historia de la ciencia. No! No estamos justificados para pensar que el concepto ganado por nuestros sentidos corresponda a la *realidad* del espacio-tiempo en la naturaleza. Este concepto es, en el mejor de los casos, una buena aproximación que podemos aplicar, justamente a aquellos sistemas clásicos que generaron el concepto. ¿Es entonces el conocimiento exacto de la estructura del espacio-tiempo imposible?. No sé si es posible conocer exhaustivamente y perfectamente dicha estructura. Este es un problema epistemológico que no estoy capacitado para tratar con responsabilidad. Pero sí estoy

seguro que el intelecto humano, gracias a la física, ha podido avanzar enormemente en esa dirección perfeccionando el concepto ingenuo que nuestros sentidos han brindado sobre el espacio-tiempo. Podemos pensar que el intelecto, con la acumulación histórica del conocimiento y con la tecnología que permite acceder experimentalmente más allá de las fronteras impuestas a nuestros sentidos, es como un sexto sentido que ha contribuido en forma determinante a la reformulación de este concepto. Las dos grandes revoluciones científicas de este siglo, la relatividad y la mecánica cuántica, han contribuido para formar un concepto de espacio-tiempo que dista mucho de lo aprendido de nuestros sentidos. Veamos la contribución de la relatividad, mejor conocida, antes de concentrarnos en las consecuencias de la revolución cuántica, revolución, dicho sea de paso, aún no concluida.

El espacio-tiempo, como sustento para la ubicación y evolución de los sistemas clásicos, puede ser considerado como un absoluto inmutable, con medida idéntica para todo observador o sistema de referencia. Esto es, se supone que existe un espacio y un tiempo que todos compartimos cuyos contenidos, o sea las distancias espaciales y las duraciones temporales son invariantes para todos los observadores.

Se supone que la longitud de una varilla y la duración entre un "tic" y un "tac" de un reloj, es la misma para todos, independientemente del estado de movimiento que podamos tener. Esta es la visión de espacio y tiempo que prevalecía en la física hasta el advenimiento de la relatividad especial de Einstein, en 1905. Esta visión que parecía ser irrefutable, fue demostrada ser incompatible con resultados experimentales indudables. Se demostró experimentalmente que la velocidad de la luz tiene exactamente el mismo valor para toda persona, cualquiera sea la velocidad de ésta con respecto a la fuente que emitió la luz. Esto implica que las velocidades no pueden adicionarse como estamos acostumbrado a hacerlo con pequeñas velocidades. Cuando alguien, viajando en bicicleta a 25 kilómetros por hora, lanza una piedra a 5 kilómetros por hora, observamos desde la calle a la piedra con $25+5=30$ kilómetros por hora. Sin embargo, si estas velocidades fuesen muy grandes, cercanas

a la velocidad de la luz, o bien si en vez de una piedra lanzamos "luz" con una linterna, no deberíamos sumarlas tan sencillamente porque esto puede llevarnos a superar la velocidad de la luz, en contradicción con el resultado experimental, firmemente establecido, de la constancia de la misma para todo observador. Se ha encontrado cuál es la expresión matemática para adicionar velocidades que sea compatible con dichos requerimientos experimentales y que además, cuando las velocidades son pequeñas, brinde, en forma aproximada, el resultado esperado clásicamente. Al provenir o resultar, la velocidad, de combinar al espacio y al tiempo, esta nueva forma de adicionar velocidades trae consigo una fuerte modificación de aquellos conceptos, que se puede resumir de la siguiente manera: Podemos seguir pensando que existe un espacio y un tiempo que todos compartimos pero cuyos contenidos, o sea los intervalos espaciales y las duraciones temporales, o sea esas cualidades que medimos con reglas y relojes, no son absolutas sino que cada uno de nosotros posee sus coordenadas espaciales y temporales *propias*. Si cada uno de nosotros tenemos nuestro espacio y nuestro tiempo propio, es necesario dar las reglas de transformación que me permitan comparar *mi* espacio y tiempo con el correspondiente espacio y tiempo de *otra* persona (o sistema). Los físicos las llaman "Transformaciones de Lorentz". Si dos personas (o sistemas) están en reposo relativo, la transformación es idéntica y sus espacios y tiempos no se diferencian en nada pero, si están en movimiento, comienzan a aparecer diferencias que se hacen más importantes a medida que crece la velocidad entre ambas, y se harían infinitas si la velocidad entre ambas fuese la de la luz. Por eso dicha velocidad es inalcanzable, aunque podemos aproximarnos a ella sin límite. En estas transformaciones, el espacio y el tiempo se entremezclan, por lo cual es más apropiado hablar de espacio-tiempo que de espacio y tiempo.

Todos esto resulta altamente asombroso para nuestros conceptos clásicos, resultantes de la observación de sistemas con velocidades lentas. Si pudiésemos movernos entre nosotros a velocidades cercanas a la de la luz, y si pudiésemos lanzar piedras a esas velocidades, todo esto resultaría "natural" y hasta los niños de

la escuela primaria claramente percibirían que el espacio-tiempo de cada uno es relativo a la condición de movimiento con respecto a los otros. Los físicos sí lanzan "piedras" a velocidades cercanas a la de la luz con los aceleradores de partículas y se han acostumbrado, ya no se asombran, ante estos fenómenos. En lo descrito anteriormente, el espacio-tiempo, a pesar de las modificaciones introducidas, sigue siendo el "soporte cinemático" donde ordenamos a las cosas que se mueven o se aceleran por la acción de fuerzas. El advenimiento de la relatividad general, también iniciada por Einstein (¡realmente un gigante!) le dio al espacio-tiempo un carácter *dinámico*, generando las fuerzas gravitatorias como consecuencia de su curvatura. Sólo mencionamos esta nueva esencia otorgada al espacio-tiempo, que por sí sola, merecería una larga discusión y pasamos a considerar las consecuencias de la otra revolución física, la cuántica, para nuestra idea del espacio.

Estrechamente ligado al concepto de espacio, está el concepto de localización. Hemos aprendido a caracterizar los diferentes puntos del espacio por las diferentes posiciones en que un cuerpo material puede estar localizado. Esta relación ha llevado a pensar que el espacio, sin contener materia, es inconcebible. Esto es: el espacio absolutamente vacío es imposible. Otros pensadores han negado esto y adoptan la posibilidad del espacio inmaterial, como ente "a priori" independiente de lo que pudiera contener. A este debate filosófico, la física tiene algo que aportar ya que para la teoría de campos cuánticos, el vacío absoluto no existe y es reemplazado por una agitada creación y destrucción de partículas y antipartículas. De todas maneras, cualquiera sea la postura filosófica respecto a la relación espacio-materia, la cualidad que tienen los cuerpos materiales de estar localizados en algún lado ha intervenido en la formación de nuestro concepto de espacio. Aquí interviene la mecánica cuántica, modificando el concepto de localización. Los sistemas clásicos, macroscópicos, que han formado nuestras ideas sobre el espacio, tienen la propiedad de ser localizables (se puede pensar en algunas excepciones tales como las ondas en sus diferentes manifestaciones: sonido, olas, eléctricas, etc. pero esto no quita validez a lo expresado). Una piedra, está siempre en algún

lugar y entendemos su movimiento como el cambio de posición en el transcurrir del tiempo. Concebimos a los sistemas clásicos, grandes o pequeños, localizados con precisión ilimitada, fijada por la ubicación exacta de uno o varios de sus puntos. Clásicamente no podemos concebir la existencia de un cuerpo material que no esté localizado con exactitud en algún lado. ¿Esto es aplicable a sistemas que escapan a nuestra percepción sensorial tales como electrones por ejemplo?. No!. La mecánica nos enseña que siempre, asociado a la posición de un sistema, existe una incerteza en la misma, que puede hacerse pequeña en algunos casos, y es infinitamente pequeña y despreciable para los sistemas clásicos, pero es en general ineludible. ¿Cuál es la interpretación de dicha incerteza?. ¿Significa esto que el electrón sí está exactamente localizado en algún lugar pero *mi conocimiento* del mismo es incierto?. O por lo contrario ¿significa que la posición del electrón es *esencialmente* incierta o difusa?. En términos algo pedantes: ¿es la incerteza en la posición *gnoseológica u ontológica*?. El análisis detallado de estas preguntas y las diferentes respuestas sugeridas es demasiado extenso para ser presentado en esta nota². Veremos sin embargo algunos aspectos esenciales del problema. Si la incerteza en la posición de una partícula es de origen gnoseológico, o sea si la partícula tiene una posición bien definida que la mecánica cuántica es incapaz de predecir, entonces podemos pensar que existen algunas propiedades, ocultas para la mecánica cuántica, que son determinantes para fijar la posición exacta de la partícula. Estas propiedades son, por ello, llamadas "variedades ocultas". La incerteza en las posiciones y la posible existencia de las variedades ocultas aparecen relacionadas en un argumento magistral presentado por Einstein (¡otra vez!) Podolski y Rosen en 1935. Este argumento, que consiste en analizar un sistema de dos partículas separadas por una distancia suficientemente grande como para excluir la posibilidad de una interacción entre ambas, tuvo

una importancia enorme en el debate sobre la interpretación de la teoría cuántica. En 1964 J. Bell usando un sistema similar, publicó unas desigualdades cuya validez pudo ser sometida a prueba experimental. La consecuencia de todo esto es que, si existen dichas variables ocultas, entonces éstas no pueden ser "locales" lo que significa que, en ciertos casos, las incertezas en las posiciones de dos partículas muy distantes, a pesar de no existir ninguna conexión entre ellas, deben estar correlacionadas; no son independientes. Esto es muy asombroso y está caracterizado con el nombre de "no-separabilidad". Hoy se ha demostrado la existencia de dicha no-separabilidad, aún si no existen variables ocultas (alternativa ontológica). En consecuencia, en ambos casos, ontológico y gnoseológico, no solamente la posición de una partícula es incierta sino que dicha incerteza puede ser modificada a gran distancia sin que exista ninguna interacción conocida que se responsabilice de ello. Debemos aclarar que estos efectos asombrosos, que nos obligan a pensar al espacio en forma diferente, sólo se manifiestan con importancia en los sistemas cuánticos microscópicos del mundo subatómico. La incerteza en la localización es infinitesimalmente pequeña para los objetos grandes que percibimos con nuestros sentidos. ¡Que quede bien claro que estos efectos cuánticos no dan sustento a supercherías ni a los "fenómenos paranormales" de las pseudociencias!.

La posición para una partícula cuántica ha dejado de ser el concepto preciso y trivial de la física clásica. Si concebimos al espacio como el sustento donde se ubican las cosas y si las cosas no se ubican con exactitud, el espacio pierde la rigidez matemática que tenía, aún bajo la modificación introducida por la relatividad. En la física clásica, el *ser* de una partícula está asociado al *estar* precisamente en algún lugar. Con el advenimiento de la física cuántica debemos aprender a concebir la existencia de las partículas sin que esto implique una localización precisa. Esto requiere una angustiosa modificación de nuestros conceptos clásicos. Clásicamente *ser* y *estar* son casi sinónimos. El idioma castellano es uno de los pocos (si no el único) en utilizar palabras diferentes para estos conceptos clásicamente ligados. Inglés, francés, alemán, italiano y posiblemente otros lenguajes,

² Ver por ejemplo. A. C. de la Torre, "Un Desafío para la Intuición. La No Separabilidad en los Sistemas Físicos". Ciencia Hoy, 10, 44-49, 1990. Mayor detalle se puede encontrar en : A. C. de la Torre, "Física Cuántica para Filósofos". Fondo de Cultura Económica, Buenos Aires, 1992.

emplean la misma palabra. Si Hamlet, en vez de ser un príncipe Danés del siglo XVI fuese un físico del siglo XX, hubiese expresado su angustia diciendo: "Ser y no estar. Esa es la

cuestión de la física cuántica", que en inglés toma una forma aparentemente contradictoria: "to be *and* not to be..."