

## ACCIÓN A DISTANCIA Y LOCALIDAD ESPACIO-TEMPORAL: ¿UN PARADIGMA EN PELIGRO?

### ¿Qué es la espacio-temporalidad local?

Ing. Luis A. de Vedia

La primera pregunta que puede surgir cuando analizamos las relaciones causales entre eventos, es: ¿Puede haber una diferencia temporal o espacial entre un efecto y su causa? Esta es una pregunta cuya respuesta implica varias consideraciones previas. En primer lugar, para hablar de una diferencia temporal y espacial entre efecto y su causa, es necesario que cada uno ocurra en un momento dado y en un lugar determinado. Analicemos si esto es siempre efectivamente así. Consideremos el caso de una piedra que arrojada a una ventana provoca su rotura. Es evidente que la rotura de la ventana se inicia en el instante en que la piedra habiendo tomado contacto físico con el vidrio de la ventana, lleva la deformación local de este hasta su límite rotura. En este caso tenemos un instante y un lugar perfectamente determinado para que la causa (la piedra que toma contacto físico con la ventana) detone el proceso de rotura del vidrio. Podemos en este caso afirmar que el evento causa se produce en correspondencia (temporal y espacial) con el evento inicio de la rotura. Lo mismo puede afirmarse del desarrollo del resto del proceso de rotura. La onda elástica que se origina con el primer contacto de la piedra con la ventana se propagará a través del vidrio de la misma y de esa manera la rotura progresará en correspondencia con ese frente de onda de choque, de modo que en cada instante, la causa (deformación local del vidrio) es correspondiente espacial y temporalmente con el efecto (rotura del vidrio). Observemos que en nuestra percepción cotidiana, posiblemente la causa para nosotros sería la persona que arrojó la piedra. Sin embargo, si bien esta es una causa relevante, es una causa mediata, ya que hay todo un encadenamiento de eventos desde el momento en que la persona arroja la piedra hasta la rotura de la ventana.

Hay sin embargo situaciones en las cuales la vinculación entre causa y efecto no es tan clara. Tomemos por ejemplo el caso de una “corrida” bancaria. Una corrida bancaria se produce cuando una cantidad muy grande de ahorristas decide retirar en forma más o menos simultánea sus ahorros de los bancos. Generalmente, la corrida bancaria se detona luego de un período en el cual por distintas razones, el público comienza a perder confianza en los bancos como custodios de sus ahorros. Por razones que son muy complejas de analizar, la comunidad actúa en estos casos en forma concertada como una suerte de organismo que en determinado momento decide retirar sus ahorros con el consiguiente problema de liquidez que esto implica para las instituciones bancarias. Es evidente que frente a esta situación, identificar la localización temporal y espacial de la causa es imposible y hasta cierto punto carece de sentido porque el efecto, es decir la corrida bancaria no es en sí un evento localizado en un instante y lugar determinado sino que está constituido por una multitud de eventos particulares (cada persona retirando sus ahorros) que se producen en una extensión dada del tiempo y del espacio. Sin embargo, si analizamos el fenómeno en detalle, vemos que cada operación de retiro de fondos es en sí un evento que es consecuencia de la decisión tomada por el ahorrista individual en determinado momento que ciertamente no coincide en general con el instante en que se materializa el retiro de los fondos. Esto nos muestra claramente que cuando nos estamos refiriendo a procesos mentales que derivan en acciones físicas, la causa no es fácilmente localizable ni en el tiempo ni en el espacio. Sin

embargo, si aceptamos que los procesos mentales son procesos físicos y que como tales obedecen las leyes de la física (algo que no constituye una opinión unánime), debemos aceptar que el encadenamiento de procesos mentales y las acciones físicas que culminan en la de retiro de fondos, constituye también una cadena causal en la cual las causas son correspondientes espacial y temporalmente con los efectos.

Una pregunta que surge es si un efecto tiene siempre una única causa o es consecuencia de una conjunción de causas. Es obvio que para que ocurra un evento efecto es necesario en general un conjunto de condiciones que tienen que estar presentes como un evento en correspondencia con el efecto. Por ejemplo, para que una madera se prenda fuego requiere que su temperatura en un dado lugar e instante alcance un dado valor, que se encuentre seca en ese lugar y en ese instante, etc. Nada impide considerar al conjunto de eventos como “la” causa del efecto, pero para precisar el concepto, nos referiremos a un *conjunto completo de eventos-condición* como el conjunto de eventos *necesario y suficiente* para producir el efecto. Es importante destacar que cada uno de los eventos-condición son *necesarios* para producir el efecto, pero sólo el conjunto completo de eventos condición es *suficiente* para dicho efecto. Además, aceptaremos que el conjunto completo de eventos-condición constituye la causa *directa* del efecto y no una causa indirecta o mediata.

La espacio-temporalidad local se refiere entonces a la correspondencia espacial y temporal que existe entre el evento causa y el evento efecto en el mundo físico. Hasta aquí hemos hablado de una relación de correspondencia espacial y temporal sin definir con precisión que entendemos por tal relación. Obsérvese que no hemos empleado el término “*coincidencia*” entre eventos causa y efecto porque la relación causal entre ambos *sugiere* que el evento causa se produzca infinitamente próximo tanto en el tiempo como en el espacio al evento efecto pero no coincidente, donde le estamos dando al término “evento” el significado con que lo hemos utilizado en la teoría de la relatividad, es decir un suceso que puede ser considerado como un punto del espacio-tiempo. Por lo tanto, introduciremos las siguientes definiciones de localidad espacial, temporal y espacio-temporal (1).

*Localidad temporal:* Para cualquier evento  $E$  y para un intervalo temporal  $\tau > 0$  arbitrariamente corto, hay un conjunto completo de eventos-condición de  $E$  tal que para cada evento condición  $C$  en este conjunto, hay un instante en el cual ocurre que está separado por un intervalo no mayor que  $\tau$  del momento en que  $E$  ocurre<sup>1</sup>.

Con esta definición, cada uno de los eventos-condición de un efecto se encuentran arbitrariamente próximos temporalmente al efecto. En otras palabras, para un evento efecto  $E$  y para un intervalo temporal  $\tau$  arbitrariamente breve, hay un conjunto completo de eventos-condición de  $E$  que se producen con una separación temporal no mayor que  $\tau$  del instante en que tiene lugar  $E$ .

En forma análoga, definimos la localidad espacial como

*Localidad espacial:* Para cualquier evento  $E$  y para un intervalo espacial  $\delta > 0$  arbitrariamente pequeño, hay un conjunto completo de eventos-condición de  $E$  tal

---

<sup>1</sup> En esta definición hemos utilizado la expresión *evento-condición* en lugar de *causa* como lo hace M.Lange por entender que esto evita posibles confusiones entre condición necesaria y causa directa.

que para cada evento condición  $C$  en este conjunto, hay un lugar en el cual ocurre que está separado por una distancia no mayor que  $\delta$  del lugar en que  $E$  ocurre.

Por último, definimos la localidad espacio-temporal, como

*Localidad espacio-temporal:* Para cualquier evento  $E$  y para un intervalo temporal  $\tau > 0$  arbitrariamente corto y para un intervalo espacial  $\delta > 0$  arbitrariamente pequeño, hay un conjunto completo de eventos-condición de  $E$  tal que para cada evento condición  $C$  en este conjunto, hay un lugar y un instante en el cual  $C$  ocurre que está separado por una distancia no mayor que  $\delta$  y por un intervalo no mayor que  $\tau$  del lugar e instante en que  $E$  ocurre.

De manera que la localidad espacio-temporal requiere que se cumpla la localidad espacial y la localidad temporal. Sin embargo, podemos referirnos a ejemplos en los que sólo se cumple una de ellas. Efectivamente, en la concepción newtoniana de la mecánica las interacciones gravitatorias se transmiten a distancia en forma instantánea. De este modo, si hipotéticamente se produjese la repentina creación de un cuerpo estelar con una cierta masa a una distancia de 100 años luz de la tierra, esta debería sentir instantáneamente el correspondiente efecto gravitatorio con lo que tendríamos que se cumple la localidad temporal pero estaríamos frente a una clara violación de la localidad espacial. Si ahora interpretamos el mismo fenómeno pero aceptando, en línea con la teoría de la relatividad que la velocidad de propagación de la información de la creación de la masa estelar no puede ser superior a la de la luz en el vacío y si consideráramos que no hay fenómenos físicos en el espacio interestelar que puedan considerarse eventos causalmente relevantes a la interacción gravitacional entre la estrella y la tierra, tendríamos que un evento que se produjo a una distancia de 100 años luz de la tierra hace 100 años está causando un evento “ahora” en la tierra. En tal caso no sólo tendríamos violación de la localidad espacial sino también de la localidad temporal.

Por supuesto que en el caso descrito en el último ejemplo, la relatividad general nos enseña que de crearse súbitamente una masa estelar, esto generaría una onda gravitacional que se propagaría a velocidad finita en todas direcciones creando un campo gravitacional a su paso. De manera que si aceptamos la existencia real de campos de fuerza, es la interacción local de este campo con la tierra lo que produce el efecto gravitatorio sobre esta, con lo que rescatamos tanto la localidad espacial como la temporal en la relación causa-efecto.

### **Relevancia causal y relaciones no causales.**

La teoría de la relatividad nos enseña que cuando dos eventos tienen separación “*spacelike*” no puede existir una relación causal entre ambos dado que sólo podrían estar vinculados mediante una señal que viajase a mayor velocidad que la de la luz, lo cual está prohibido en el marco de aquella teoría. En términos de espacio-temporalidad local, lo que esto implica es que si un evento  $A$  tiene separación “*spacelike*” con un evento  $B$ , el evento causa de  $B$  (este evento existe ya que asumimos que  $B$  se produce) no puede tener relación alguna con el evento  $A$ .

Por el contrario, todo par de eventos con separación “*timelike*” podrían estar vinculados causalmente y por esta razón su ordenamiento temporal es necesariamente el mismo para todos los observadores, lo que significa que si los

eventos  $A$  y  $B$  tienen separación “*timelike*”, el evento causa de  $B$  puede tener relación (a través de una cadena causal de eventos) con el evento  $A$ . Hasta que punto la *posibilidad* debe considerarse una *necesidad* no tiene una respuesta inequívoca. Pensemos por ejemplo el caso en que una persona jugando a la ruleta en el casino de Montecarlo toma la decisión de apostar al color rojo. Otro jugador, en un casino de Las Vegas, a unos miles de kilómetros del anterior toma la decisión 5 minutos más tarde de apostar al color negro. Obviamente ambos eventos tienen separación *timelike* ya que hay tiempo más que suficiente para que una señal luminosa que parte del primer apostador cuando efectúa su apuesta, llegue al segundo apostador para cuando hace la suya. ¿Puede en este caso decirse que ambos eventos están vinculados causalmente? El sentido común nos dice que a menos que ambos apostadores estuviesen en contacto por algún medio y acordaran entre ellos como hacer sus apuestas, no hay relación causal entre sus acciones. Pero no es imposible concebir que la acción del primer apostador detonase una cadena de eventos que sutilmente influenciara al segundo en el momento de hacer su apuesta. De manera que no es fácil en todos los casos determinar cuando un evento tiene relevancia causal sobre otro con el cual tiene separación *timelike*. Es importante notar que de existir entre ambos apostadores una relación causal, el evento constituido por el segundo apostador haciendo su apuesta no violaría la localidad espacio-temporal ya que esta acción sería el efecto de una causa directa que le llega a través de una cadena causal desde el primer apostador. Recordemos que en el espacio-tiempo de Minkowski, todo evento que se encuentre en el cono de luz del pasado de un evento puede tener relación causal con este evento.

Surge de la discusión anterior que lo que es más importante que determinar si un evento *es o puede* ser causalmente relevante para otro evento, es determinar cuando un evento *no puede* ser causalmente relevante de otro evento. Sabemos que no puede ser causalmente relevante un evento que tiene separación *spacelike* con otro evento. Pero consideremos el siguiente ejemplo de trivialización de la relación de localidad espacio-temporal entre eventos con separación *timelike*: supongamos que un objeto pasa por una dada posición sin dejar rastro alguno de su paso. Una hora más tarde otro objeto pasa por la misma posición y es afectado por el hecho que el primer objeto pasó una hora antes por la misma posición. Evidentemente, de ser esto así estamos en una situación en la que se satisface la localidad espacial pero frente a una violación de localidad temporal. Sin embargo, podemos argumentar que esta temporalidad local también está satisfecha porque en el momento en que pasa el segundo objeto, tenemos localmente el evento que hace exactamente una hora pasó el primer objeto por ese lugar. Obviamente, aquí tenemos un evento (que el primer objeto haya pasado una hora antes por el mismo lugar) que si bien satisface la localidad espacial y temporal con el evento “paso del segundo objeto”, claramente no tiene relevancia causal sobre este último evento. Si así fuera, la localidad temporal se cumpliría siempre automáticamente. Por lo tanto debemos encontrar algún criterio para saber si un evento puede ser causalmente relevante sobre otro.

La primera consideración que surge de la argumentación anterior es la forma peculiar de clasificar una situación como un evento. Si bien es cierto que la circunstancia que “*hace exactamente una hora*” haya pasado “*por aquí*” un objeto, es *ahora* y *aquí* un hecho y por lo tanto calificaría como evento. Pero *cualquier* evento  $C$  que ocurra en el lugar y en el momento en que el segundo cuerpo pasa, automáticamente tiene la propiedad de ocurrir una hora después que el primer cuerpo haya pasado, de manera que no puede haber una relación causal entre  $C$  y

el hecho que hace una hora pasó el primer cuerpo, ya que  $C$  puede ser cualquier evento. Analicemos esto: un evento implica siempre la *instanciación* de algunas propiedades en un lugar y momento determinados que constituyen la localización espacio-temporal del evento<sup>2</sup>. De modo que el hecho que hace una hora pasó por el lugar el primer cuerpo no es la instanciación de una propiedad *intrínseca* al evento sino simplemente una relación temporal entre eventos con la misma localización espacial.

Decimos que una propiedad es intrínseca a una entidad cuando su instanciación requiere algo sólo de esa entidad y no de su relación de esa entidad con otras entidades. En el ejemplo anterior, el evento “*hace una hora pasó el primer cuerpo por aquí*” se refiere a una propiedad *extrínseca*, es decir no intrínseca. Esto nos sugiere que para que un evento pueda ser causalmente relevante a un efecto, debe referirse a la instanciación de una propiedad intrínseca en la localización espacio-temporal del efecto. Consideremos otro ejemplo: tomemos la propiedad de tener padres vivos. El hecho que aquí y ahora Juan tiene padres vivos es la instanciación de una propiedad no intrínseca ya que no depende exclusivamente de Juan sino de su relación con otros seres humanos que son sus padres. Un día los padres de Juan mueren en un accidente automovilístico a kilómetros de distancia de donde se encuentra Juan. Instantáneamente, Juan pasa a ser huérfano. ¿Estamos ante una violación de la localidad espacial? Obviamente no. Juan volviéndose huérfano no es algo que ocurre en el momento del choque en virtud de lo que está ocurriendo en el lugar y en el momento en que Juan se encuentra. La propiedad “huérfano” no es una propiedad intrínseca de ningún evento que ocurre en la localización espacio-temporal de Juan en el momento del accidente. Efectivamente, todo lo que Juan estaba haciendo en el momento del accidente no se vio modificado para nada por aquél suceso. De manera que la propiedad “Juan es huérfano” no es causalmente relevante a su orfandad.

Por todo lo visto, podemos estar razonablemente seguros de que la relación causa-efecto satisface la localización espacio-temporal. Sin embargo, la evidencia física nos pone frente a situaciones en las que esta localización parecería violarse. Veremos este punto a continuación.

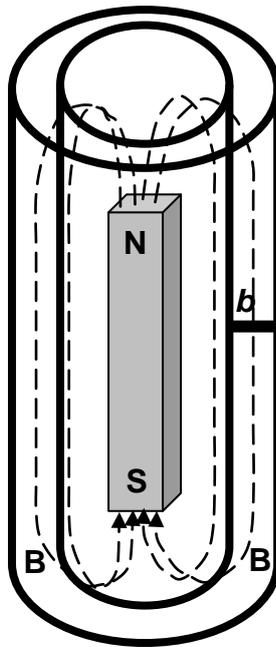
### **La realidad de los campos clásicos de Maxwell.**

Hemos visto que en la mecánica newtoniana las acciones se transmiten a distancia en forma instantánea, lo cual es una violación de la localidad espacial. La introducción del concepto de “*campo*” o “*campo de fuerzas*” vino al rescate de la localización espacial en la medida que podamos aceptar que esos campos son “*reales*”, es decir que poseen status ontológico concreto. Según esta idea, la acción gravitatoria de un cuerpo sobre otro se materializa por el campo gravitatorio que el primer cuerpo crea en el lugar y en el instante en que se encuentra el segundo cuerpo. De esta manera la localidad espacial y temporal queda a salvo dado que el campo alcanza y actúa sobre el segundo cuerpo luego de propagarse con velocidad finita a través del espacio entre ambos cuerpos siendo el proceso de propagación un encadenamiento de relaciones causales localizadas espacial y temporalmente.

Esta idea es inmediatamente trasladable al caso de interacciones eléctricas

---

<sup>2</sup> El término *instanciación* se refiere a la materialización de una propiedad abstracta en alguna entidad. Por ejemplo, la propiedad abstracta color “azul” se instancia cuando un objeto posee ese color.



**Fig. 1 – Experiencia consistente en dos cilindros conductores concéntricos vinculados mediante una barra conductora de modo de que al rotar en el campo magnético del imán permanente central se genere una fuerza sobre los electrones libres de la barra.**

y magnéticas y si bien no nos detendremos a analizarlos hay argumentos convincentes que justifican aceptar la realidad de los campos electromagnéticos.

Una experiencia particularmente convincente en este sentido es la siguiente: se disponen dos cilindros conductores concéntricos unidos por una barra conductora *b* como se muestra en la **Figura 1**. En el eje de común de dichos cilindros se coloca un imán permanente que genera un campo magnético estacionario **B** como lo indican las líneas de fuerza<sup>3</sup> representadas en trazo punteado en la figura.

La experiencia consiste en hacer girar los dos cilindros en forma solidaria alrededor del imán que permanece fijo. De este modo, los electrones libres de la barra *b* se mueven con una cierta velocidad cuya dirección es perpendicular a la del campo magnético **B**, por lo que de acuerdo con la ley de Lorentz se debe producir una fuerza sobre dichos electrones de conducción que, como la experiencia lo confirma, se acumulan en uno de los cilindros que queda cargado negativamente mientras el otro adquiere una carga igual y contraria (positiva).

Si en lugar de mantener el imán fijo, se lo hace rotar junto con los cilindros, el resultado experimental es que también en este caso se genera la carga igual y opuesta entre los cilindros, lo que indica que el campo magnético no “rota” con el imán que lo produce ya que si así fuese, no habría fuerza actuando sobre los electrones por ser nula velocidad relativa entre estos y el campo magnético.

<sup>3</sup> Las líneas de fuerza son un recurso gráfico usualmente empleado para visualizar un campo eléctrico o magnético. Su propiedad es que en cada punto de la línea de fuerza el vector campo es tangente a la misma. A diferencia de lo que ocurre con los campos, la posición aceptada habitualmente entre los físicos es que las líneas de fuerza no tienen realidad física.

Finalmente, cuando se hace rotar sólo el imán y se mantienen inmóviles los cilindros, no se observa la carga de los mismos. Este resultado es consistente con el anterior ya que si el campo magnético  $\mathbf{B}$  no rota con el imán, tampoco hay en este caso fuerza de Lorentz para mover los electrones.

Esta experiencia sugiere fuertemente que el campo magnético  $\mathbf{B}$  tiene existencia real en el espacio, ya que si así no fuese deberíamos aceptar que el imán actúa sin mediación alguna sobre los electrones de la barra  $\mathbf{b}$ . Pero el resultado de la última experiencia nos dice que la rotación relativa del imán respecto de la barra  $\mathbf{b}$  no produce ningún efecto, lo que lleva a concluir que la fuerza sobre los electrones de la barra no es el resultado de una acción directa del imán sobre esos electrones ya que de lo contrario “sentirían” el movimiento del imán. Surge entonces como razonable aceptar que existe una entidad intermediaria del efecto del imán sobre los electrones que no sería otra cosa que el campo magnético. Está claro que esta experiencia no constituye una demostración de la realidad del campo magnético, pero es bastante convincente en tal sentido.

### Disposiciones, categorías y explicación.

Cuando se utiliza la expresión “en este punto del espacio y en este instante hay un campo eléctrico de 10 dynas por statcoulomb” hay dos maneras de interpretarla. Una de ellas, que sería la forma “*literal*” es aceptar que efectivamente en ese punto del espacio en ese instante tiene existencia real un campo eléctrico del valor mencionado. La otra forma de interpretar la expresión es la “*no literal*” entendiéndose entonces que si en ese punto del espacio en ese instante *hubiese* una carga de 1 statcoulomb, sobre esta *actuaría* una fuerza de 10 dynas. Este tipo de propiedades, que no se materializan pero que son enunciadas en forma condicional, se denominan *disposiciones*. Una propiedad de tal tipo es por ejemplo la fragilidad de una copa de vidrio. La disposición se expresa diciendo que si se la golpease o dejase caer, la copa se rompería. La fragilidad es una propiedad que el objeto posee sin que necesariamente se materialice y es por lo tanto una disposición. Otras propiedades en cambio, no son disposiciones como por ejemplo el color, la forma, etc., sino que se las considera *categorías*.

Una forma de trivializar la localización espacio-temporal de la relación causa-efecto es recurriendo a las disposiciones. La disposición de que si en un punto del espacio en un dado instante *hubiese* una carga eléctrica, sobre esta *actuaría* una fuerza, puede ser efectivamente considerada una propiedad de ese punto del espacio en ese instante, con lo cual se podría argumentar que se cumple la localidad espacial y temporal. Es obvio que esto no es nada más que una “trampa” dialéctica que no explica nada. Con el mismo criterio podría explicarse cualquier fenómeno diciendo que el mismo ocurre porque en un lugar e instante determinado existe la disposición, que surge de alguna propiedad oculta, para que el fenómeno se produzca. La fragilidad de una copa de vidrio no queda *explicada* por su disposición a la fragilidad sino por su estructura atómica, tipos de enlaces interatómicos, etc., que son categorías y no disposiciones. De modo que la *explicación* de la fuerza que experimenta una carga eléctrica cuando es colocada en un dado lugar y en un dado instante en presencia de otras cargas debe buscarse en categorías instanciadas en algún otro y en otro momento, como la distribución de las otras cargas, lo cual nos retorna a la acción diferida a distancia.

De todas formas, el atractivo de la espacio-temporalidad local se debe a que tenemos la idea que si no existe nada que medie entre el efecto y la causa, no puede haber explicación de esa causa. Pero en realidad este es un argumento circular, ya que implica tácitamente la aceptación de la espacio-temporalidad local.

La ley de Coulomb o la ley de gravitación universal nos dice que las fuerzas disminuyen con el cuadrado de la distancia. Si estas fuerzas operan en base a un proceso local, los detalles de este proceso posiblemente explicarían la razón por la cual las fuerzas disminuyen con la distancia de esa manera. Por el contrario, si estas fuerzas implican acción a distancia, es difícil concebir la existencia de una ley de aquel tipo que las gobierne ya que en tal caso el concepto de “distancia” se hace dificultoso. En efecto, si la ley de la inversa del cuadrado de la distancia es una ley de acción a distancia, como “sabe” una carga que produce un campo eléctrico, que fuerza aplicar sobre otra carga a menos que haya una forma local de medir la distancia hasta esa otra carga. Como dice Richard Feynman en “*The Character of Physical Law*” (2) refiriéndose a la acción gravitatoria: ¿Una masa “mira” donde se encuentra la otra y “calcula” el valor de la fuerza de interacción para ese punto? Sin ninguna duda el concepto de acción local salva en buena medida este tipo de dificultades. Aún más, sabemos que la acción es retardada, por lo tanto si la acción es a distancia, ¿qué es lo que demora la acción sobre la otra carga si no es la propagación de la información sobre esa acción?

Por las razones recién vistas es difícil concebir que pueda haber una explicación a una ley de variación de la fuerza con la distancia en el contexto de la acción a distancia. Del mismo modo, que pueda haber una explicación para la acción retardada. Estas deberían ser entonces en ese contexto leyes básicas de la naturaleza sin explicación, lo que contradice una idea muy aceptada en ciencia y en filosofía que es el “*Principio de razón suficiente*” al cual ya nos hemos referido anteriormente. Este principio, enunciado por Gottfried Leibnitz (1646-1716) dice que nada ocurre sin una razón o explicación. Estos argumentos ya no son tan circulares y constituyen razones bastante elocuentes para la aceptación del principio de espacio-temporalidad local. En el próximo capítulo, exploraremos otras razones que justifiquen tal aceptación.

### ¿Un paradigma cuestionado?

La localización espacio-temporal de las relaciones causales y el determinismo son dos atributos clásicos que siempre se ha considerado debe exhibir cualquier fenómeno para que pueda ser considerado real. Estos atributos son precisamente los que se encuentran cuestionados en la interpretación ortodoxa de la MC y es lo que introduce un cuestionamiento sobre la realidad de las entidades que la MC postula, tales como electrones y otras microentidades. Debido a esto, podemos decir que la MC en su interpretación ortodoxa no se refiere a los que *es*, sino a lo que *ocurrirá* cuando *observamos* un sistema y esta predicción tiene en general como dijimos, un carácter esencialmente *probabilístico*.

Efectivamente, si en mecánica clásica el cálculo nos permite predecir que una partícula se encontrará en la posición  $x$  en el instante  $t$ , sabemos que si en ese instante efectuásemos una observación en aquél punto, nos encontraríamos con la partícula. En MC, una partícula, digamos un electrón, estará representado por un

vector o función de onda  $\psi(x, t)$  que depende de la posición  $x^{(4)}$  y del tiempo  $t$ . Ahora bien, la MC nos enseña que la probabilidad de hallar el electrón cuando hacemos una observación en la región limitada por el intervalo  $\Delta x$ , es  $|\psi(x, t)|^2 \Delta x$ , es decir hay una probabilidad *finita* de encontrar al electrón en cualquier región del espacio en que no se anule la función de onda.

En otras palabras, el electrón se encuentra *deslocalizado* a diferencia de lo que ocurre con una partícula clásica. El acto de observación es lo que hace que el electrón, hasta ese instante deslocalizado, se transforme en una partícula concreta de localización definida como consecuencia de la reducción de la función de onda inducida por el acto de medición. Este fenómeno de reducción o colapso de la función de onda es sin duda uno de los más intrigantes de la MC y se encuentra en la base misma de las especulaciones sobre la realidad del mundo cuántico.

Otra manifestación de la no-localidad de los sistemas cuánticos la obtenemos cuando consideramos un sistema constituido por dos partículas de algún modo correlacionadas (por ejemplo por tener spin total nulo, o algo similar). En este caso la función de onda del sistema  $\psi(x_1, x_2, t)$  dependerá de las posiciones  $x_1, x_2$  de ambas partículas y del tiempo  $t$ . El “objeto” representado por esta función de onda es ciertamente peculiar dado que la probabilidad de hallar una de las partículas en una dada posición depende de la posición de la otra partícula por muy alejada que se encuentre, lo que nos vuelve a sugerir una extraña acción instantánea a distancia entre ambas partículas (lo que en la literatura anglo-sajona suele llamarse “*spooky action at a distance*”, algo así como “*acción a distancia fantasmal*”).

Ya hemos mencionado que esta extraña acción a distancia, que no sólo es extraña sino que violaría uno de los dos postulados fundamentales de la relatividad especial que establece a la velocidad de la luz en el vacío como un límite imposible de superar por cualquier entidad física, puede ser eliminada o al menos atenuada si consideramos que hasta el momento en que se efectúa la primer medición, el sistema no está constituido por dos partículas independientes sino por dos entidades correlacionadas de algún modo. De hecho, la forma matemática  $\psi(x_1, x_2, t)$  de la función de onda del sistema nos está diciendo que el sistema queda descrito en cada instante por una distribución de probabilidades que es función de ambas variables  $x_1$  y  $x_2$ .

Quizás la dificultad para asignarle existencia real a esta entidad, proviene de nuestra experiencia cotidiana que atribuye a los eventos que vemos que suceden en el mundo una localización espacio-temporal, ya que aún aquellos acontecimientos que se extienden en el tiempo y en el espacio, siempre pueden ser reducidos a una cadena causal, en la que cada eslabón causa-efecto tiene contigüidad espacio-temporal con el siguiente.

Sin embargo, la realidad puede ser mucho más extraña a nuestra intuición que lo que suponemos, lo que nos llevaría a aceptar que un sistema cuántico puede representar una totalidad aunque exista en forma deslocalizada espacial y temporalmente. De acuerdo con esta idea, la perturbación que sufre una de las partículas en el momento en que se hace una medición sobre la otra, no implica la transmisión de una señal superlumínica sino que es una modificación del estado

---

<sup>4</sup> Por simplicidad, estamos considerando un sistema unidimensional.

del sistema, que hasta ese instante es una totalidad, ya que no puede hablarse de “partes” del sistema.

### Referencias

---

- 1 M.Lange, *“An Introduction to the Philosophy of Physics: Locality, Fields, Energy and Mass”* Blackwell Publishing, USA, 2002.
- 2 R.P.Feynman *“The Carácter of Physical Law”* Penguin Books, UK, 1992.