



DIFERENCIA(S)

revista de teoría social contemporánea

GUSTAVO ROMERO

TRADUCCIÓN MARTINA LASSALLE

EL TIEMPO Y LA CIENCIA MODERNA

ENTREVISTA A CHRISTIAN WÜTHRICH

EN REVISTA DIFERENCIA(S)

TIEMPO - N°4 - AÑO 3 - MAYO 2017. ARGENTINA.

ISSN 2469-1100

PP. N° 161-169



EL TIEMPO Y LA CIENCIA MODERNA

ENTREVISTA A CHRISTIAN WÜTHRICH

GUSTAVO ROMERO

TRADUCCIÓN MARTINA LASSALLE

Newton afirmó ilustremente que el tiempo y el espacio son una cierta forma de entidades. Ilustremente también, Leibniz lo negó, y sostuvo que no hay sino relaciones entre las cosas. ¿De qué manera ha cambiado este debate con la introducción del concepto de “espaciotiempo” y con la teoría general de la relatividad?

La introducción de espaciotiempo por Minkowski en 1908 como la manera más económica y elegante de codificar el trasfondo inercial y cromométrico de la física relativista especial, y la formulación de la teoría general de la relatividad en 1915, han definitivamente revitalizado el debate clásico. El debate original puede ser visto como ganado por Newton: aunque Leibniz tenía un número de buenas objeciones al substantivalismo de Newton (y otras no tan buenas), su relacionalismo mostraba dificultades para incorporar los desplazamientos dinámicos propuestos en el experimento mental del cubo de agua de Newton en el cual efectos inerciales perceptibles, como la concavidad de la superficie del agua en el cubo durante la rotación, emergían de aceleraciones que parecían no poder explicarse simplemente por el movimiento relativo. A finales del siglo XIX, Mach reavivó el debate aduciendo que esos efectos podían, después de todo explicarse, por el movimiento relativo, esto es, por el movimiento relativo a las masas estelares distantes. En este punto, ocurrió entonces como si el relacionalismo pudiese ofrecer en principio la más atractiva metafísica, aunque en la práctica nuestra mejor física continuaba siendo formulada en términos ostensiblemente substantivalistas.

La introducción de espaciotiempo enriquece el debate al menos de dos maneras. Por un lado, la relatividad especial de Einstein fue formulada precisamente para albergar aspectos de la física clásica aparentemente contradictorios: conjuntamente los principios de la relatividad galileana empíricamente bien confirmados y la constancia de la velocidad de la luz requerían que abandonemos los supuestos intuitivos sobre la independencia del sistema de referencia de las distancias espaciales y las duraciones temporales, de la simultaneidad, así como también las presuposiciones naturales de cómo sumar las velocidades de diferentes cuerpos. En resumen, la estructura espaciotemporal encapsulada en el espaciotiempo de Minkowski puede ser vista como emergente de una consideración cuidadosa de la física de los objetos materiales, tales como los cuerpos rígidos y los campos electromagnéticos. Esto es claramente agua para el molino relacionalista. Por otro lado, la relatividad especial contenía modelos con una estructura espaciotemporal no completamente trivial a pesar de estar desprovista de objetos materiales – el espaciotiempo de Minkowski podía, después de todo, estar vacío. Pero, según el relacionalismo, no puede haber algo como un espaciotiempo vacío – un espaciotiempo sin cuerpos materiales.

El advenimiento de la relatividad general complicó el cuadro aún más. En primer lugar, el problema relacionalista de los espaciotiempos vacíos se vuelve más profundo cuando nuevos espaciotiempos vacíos son descubiertos (como los espaciotiempos de deSitter y anti-de Sitter, junto al espaciotiempo de Minkowski); ¿pero cómo podía, desde una perspectiva relacionalista, el espacio y el tiempo no sólo existir, sino existir

de diferentes formas, si el universo no contenía materia? Einstein había esperado que su relatividad general hubiese reivindicado lo que apodó 'el principio de Mach', la idea de que la distribución del contenido material del universo únicamente determinaría la geometría del espaciotiempo. Claramente, este principio es incompatible con el hallazgo de que la ecuación de Einstein permite diferentes geometrías si no hay ningún contenido material. En segundo lugar, está el infame 'argumento del agujero' redescubierto en los propios escritos de Einstein, y reformulado por John Stachel, John Earman, y John Norton en los años 1980. Sin entrar en detalles aquí, el argumento del agujero parece excluir ciertas maneras de identificar la 'substancia' del espaciotiempo en la formulación matemática de la relatividad general. Pero, sin duda, un substantivalista debería poder decir qué de esa formulación corresponde a la 'substancia' del espaciotiempo sobre la que deberíamos ser substantivalistas.

¿Cuál es el rol del tiempo en la mecánica cuántica y en la teoría cuántica de campos?

En la mecánica cuántica no relativista, el tiempo tiene esencialmente el mismo rol que en la física clásica pre-relativista: es simplemente el parámetro dinámico que aparece en las ecuaciones de movimiento y respecto del cual se sigue la dinámica del sistema físico estudiado. Los cambios significativos al concepto de tiempo sólo ocurren realmente una vez que la relatividad especial y, particularmente, la relatividad general son combinadas con la física cuántica. En la teoría cuántica de campos la física cuántica es conjugada con la relatividad especial y se vuelve consecuentemente una teoría de campos en lugar de una de partículas, al menos en la interpretación ortodoxa. Estos campos cuánticos, que son componentes fundamentales del contenido material de nuestro mundo, 'viven en' el espaciotiempo de Minkowski. En este sentido, según la teoría cuántica de campos, el tiempo es incorporado a un espaciotiempo en el cual ya no goza de existencia independiente. Los supuestos de fondo de las aproximaciones rigurosas a la teoría cuántica de campos, tales como la micro-causalidad, refieren a esta estructura del espaciotiempo como un todo.

De esta manera, en la teoría cuántica de campos el tiempo sufre precisamente la misma suerte que sufrió en la relatividad especial: las duraciones temporales y la simultaneidad no son ya absolutas, sino que sólo relativas a un sistema de referencia inercial. Así, el tiempo mismo no es fundamental en la teoría cuántica de campos. Si bien las revisiones a nuestro concepto de tiempo que nos fueron impuestas por la relatividad especial parecían por entonces radicales, vistas desde la perspectiva de la relatividad general y más allá, parecen en cambio leves en comparación con las revoluciones que aguardan al tiempo allí.

¿Cuál es, en su opinión, el origen de la irreversibilidad observada en el mundo y de la llamada "flecha del tiempo"?

El mundo tal como lo experimentamos está inmerso en procesos irreversibles: nuestros cafés, si son dejados, se enfrían y no se calientan, los huevos se rompen y nunca vuelven a rearmarse espontáneamente, y nuestra experiencia se despliega inexorable

e irreversiblemente de la cuna a la tumba. Si no hay nada absolutamente obvio e indiscutible sobre los múltiples cambios en el mundo tal como lo experimentamos, es que muchos de ellos se encuentran temporalmente dirigidos. Esto se vuelve profundamente desconcertante en el contexto de la física fundamental, la cual es casi completamente tiempo-simétrica. A excepción de la descomposición de kaones, en la física fundamental establecida todo puede desplegarse también en la dirección de tiempo opuesta a la que en realidad ocurre. En otras palabras, cualquier comportamiento dinámico de cualquier sistema físico autorizado por la física fundamental puede ser reversible en el tiempo en el sentido de que si damos vuelta la dirección del tiempo (y entonces la secuencia ordenada de sus estados dinámicos 'a la vez'), terminamos dando con otro comportamiento dinámico que está igualmente permitido por la teoría. De modo que nuestras teorías fundamentales son invariantes bajo inversión temporal [*time-reversal invariant*].

Pero la termodinámica, que no es una teoría fundamental, no es invariante bajo reversión temporal: lo que ocurre en una dirección de tiempo podría no ocurrir en la dirección inversa. Esto se debe a que la Segunda Ley de la termodinámica que establece que la entropía de un sistema termodinámico no puede decrecer a lo largo del tiempo, prohíbe, o al menos declara como extremadamente improbable, los comportamientos 'anti-termodinámicos' tales como el espontáneo calentamiento de nuestros cafés. Esto sugiere el interesante y plausible punto de vista según el cual la irreversibilidad observada sólo emerge en la física de sistemas suficientemente complejos, por ejemplo, sistemas con varios grados de libertad, del modo en que estos grados de libertad fundamental interactúan, y entonces se agregan colectivamente, para producir un comportamiento irreversible. Dado que por supuesto los seres humanos somos sistemas termodinámicos complejos con una física rica, no debería sorprendernos encontrar irreversibilidad generalizada a nuestra escala.

Hay, sin embargo, un elemento que falta en esta explicación. Resulta que el comportamiento termodinámico y anti-termodinámico son igualmente posibles a partir de condiciones iniciales genéricas. Sólo el presupuesto adicional de que el estado pasado del universo, y de casi todos los sistemas macroscópicos en él, debe haber sido uno de baja entropía, resulta entonces en la asimetría entre el pasado y el futuro en la dirección que lo observamos. ¿Cuál es el status de este presupuesto adicional? Tal vez sea él mismo una ley de la naturaleza, o quizás pueda ser explicado por una asimetría más fundamental que aún no hemos hallado.

¿Existe el tiempo en la Longitud de Planck?

Pareciera que no. Para comprender la física a la escala de Planck, la mayoría de los físicos y muchos filósofos coinciden en que necesitamos encontrar una 'teoría cuántica de la gravedad', una teoría que describa correctamente los sistemas físicos donde tanto los efectos relativistas generales como los cuánticos se vuelvan importantes.

Para muchos, la mejor apuesta para hallar tal teoría es permanecer lo más cerca posible de los principios físicos que demostraron ser centrales para comprender la gravedad y la relatividad general, o bien la física de los sistemas materiales y sus interacciones en el modelo estándar de la física de las partículas. De este modo, se aborda el problema comenzando por la relatividad general, que es una teoría del campo clásica, y se intenta convertirla en una teoría cuántica, o bien, alternativamente, se empieza por el modelo estándar y se trata de incorporar la gravedad. La última conduce, por ejemplo, a la teoría de cuerdas, y la primera de ellas resulta, por ejemplo, en la gravedad cuántica de bucles y la teoría de los conjuntos causales.

Si uno estudia los detalles de estos y de muchos otros enfoques, se da cuenta de que de un modo u otro la mayoría de ellos propone una visión de una realidad fundamental que parece ser no espaciotemporal de importantes maneras. El modo y la medida en que esta realidad es no espaciotemporal difiere de un enfoque a otro, por supuesto; pero en la mayoría de ellos el espaciotiempo como lo conocemos y lo queremos ha desaparecido de la ontología del mundo. De modo que, en lugar de ser fundamental – ser la primera cosa que existe, como lo era –, el espacio y el tiempo parecen emerger de estructuras fundamentales, de una manera similar en que las mesas y las sillas emergen de la acción colectiva de grados de libertad más fundamentales. Tal como las partículas elementales pueden fracasar en combinarse en mesas y sillas, así pueden pues las estructuras cuánticas gravitacionales fundamentales fracasar en combinarse de tal manera que el espacio y el tiempo emerjan. Pareceríamos estar viviendo en un mundo, o una parte un mundo, que es claramente espaciotemoral; pero si estas teorías son correctas, entonces somos afortunados puesto que el mundo podría bien haber sido no espaciotemporal. Nick Huggett y yo exploramos la desaparición y la re-emergencia del espaciotiempo en varias aproximaciones a la gravedad cuántica en un próximo libro titulado: *“Out of Nowhere: The Emergence of Spacetime in Quantum Theories of Gravity”*¹.

Uno podría preocuparse por considerar que el espacio y el tiempo, o el espaciotiempo, son condiciones necesarias para tener alguna física, o alguna confirmación empírica de la misma. Todos los resultados observacionales y de medición son, después de todo, en última instancia alguna detección o lecturas de eventos particulares, tales como del destello de una luz verde o de la coincidencia de un puntero con una marca en una escala, ocurriendo en algún lugar del espacio en algún momento de tiempo. Cualquier teoría que niegue la (fundamental) existencia del espacio y del tiempo parece ser, por tanto, empíricamente incoherente por negar las condiciones necesarias para cualquier confirmación empírica que podríamos tener de ella. Esto no es inconsistente: seríamos científicamente muy desafortunados de vivir en un mundo en el cual las condiciones para la confirmación empírica de cualquier teoría sobre este mundo no estuvieran dadas; si creyéramos que podemos hacer ciencia empírica en tal mundo, seríamos simplemente ingenuos. Ahora bien, como Huggett y yo hemos

¹ De próxima aparición por Oxford University Press.

argumentado, esta preocupación puede ser dejada a un lado si podemos mostrar que en un mundo como el nuestro las estructuras fundamentales genéricamente dan lugar a algo como el espaciotiempo. En esos casos, los científicos que trabajan al nivel de lo humano gozan entonces de todos los beneficios de un entorno espaciotemporal, como por ejemplo la posibilidad de confirmar empíricamente sus teorías a pesar de que básicamente no hay espaciotiempo.

Si bien todas las teorías de la gravedad cuántica deben ser aún completadas y confirmadas, estas consideraciones sugieren que unificar la relatividad general y la física cuántica pondrá en cuestión nuestras nociones del espacio y del tiempo de un modo que va mucho más allá de lo que hemos visto hasta ahora en la relatividad general.

¿Es la retro-causalidad posible?

Tal como la dirección del tiempo, y tal vez del espacio y del tiempo en conjunto, la causalidad podría ser un concepto emergente que sólo aplica realmente una vez que los sistemas se vuelven lo suficientemente complejos, y su física lo suficientemente rica. En otras palabras, podría ser útil, y hasta quizás ineludible, el que nuestra mejor comprensión de nuestro mundo macroscópico requiera que lo concibamos al menos parcialmente en términos causales; simultáneamente, sin embargo, esto bien podría no ser necesario, o incluso posible, para la física fundamental que describe mejor lo que se establece en este mundo macroscópico. Si esto es así, definitivamente esperaríamos que allí hubiera alguna explicación de por qué la causalidad parece ser temporalmente asimétrica, al menos la mayor parte del tiempo, y al menos en aquellos aspectos del mundo más cercanos a nuestra experiencia inmediata. De modo que, si bien la causalidad podría ser implementada al nivel fundamental, como algunos programas en gravedad cuántica sugieren, parece al menos muy plausible asumir que sería emergente a los mismos niveles y aplicable a sistemas similares como la asimetría del tiempo. Si ese es el caso, no deberíamos entonces sorprendernos de encontrar la causalidad igualmente asimétrica.

Dicho esto, este panorama es por supuesto coherente con la posibilidad de que ocasional, pero raramente, los efectos puedan ocurrir antes de sus causas. En ese caso, la retro-causalidad es posible aunque infrecuente, tal como el comportamiento anti-termodinámico.

Otra posibilidad señalada por la relatividad general es que, aunque la causalidad va localmente estrictamente 'hacia adelante' en términos temporales, la estructura causal más amplia puede contener 'bucles causales', de manera que las secuencias de conexiones causales entre causas y efectos se cierran sobre ellas mismas: A es una causa de B, el cual es una causa de C, que es a la vez, una causa de A. La relatividad general permite espaciotiempos con tales estructuras causales. Esto podría ocurrir, por ejemplo, dentro de los agujeros negros. Ese tipo de estructuras causales patológicas pueden no ser localmente detectables en el sentido de que podríamos hacer cualquier experimento que queramos en nuestros laboratorios terrestres, o incluso en el sistema solar, y seguiríamos sin notar nada fuera de lo común. Entonces, es incluso

posible que estemos atrapados en un gigantesco bucle causal sin darnos cuenta de él. En nuestra mejor física local esto parece improbable puesto que todos los procesos aparentemente irreversibles deberían ser reversibles al menos en el sentido de que nuestra evolución futura debe sin dificultades llevarnos en algún punto – tal vez muy destructivo - a nuestro pasado.

¿Puede resumir lo que entiende por “tiempo”?

Déjame intentar resumir el punto de vista que emerge de considerar nuestra mejor, pero parcialmente especulativa, física. El espacio y el tiempo resultan ser bastante diferentes de lo que intuitivamente esperaríamos que fueran. Debemos conciliar, como mínimo, la perspectiva de la física relativista con nuestra imagen manifiesta de cómo se nos aparece el mundo natural; específicamente, debemos aceptar que el espacio y el tiempo son ambos aspectos relativos al marco de una unidad más fundamental de un espaciotiempo. De esta manera, el tiempo, incluyendo la irreversibilidad temporal y la dirección de los procesos físicos en el tiempo, emergen de modos complejos de la física más fundamental, la cual carece tanto de la direccionalidad particular como de los rasgos puramente temporales de nuestro mundo manifiesto. De hecho, podría ocurrir que la mayoría de los aspectos del espaciotiempo y mucho de las dinámicas de las partes más fundamentales hoy de la física, invariantes en relación a la reversibilidad del tiempo pero aún temporales, deban ser finalmente reemplazadas por una física aún más fundamental que renuncie a muchos o a la mayoría de estos aspectos temporales en favor de una imagen de la física que es esencialmente atemporal. Esta perspectiva ofrecida por la gravedad cuántica constituye una interesante y desafiante posibilidad filosófica, la cual merece mayor indagación filosófica y científica. Es para mí un estimulante horizonte el asumir este desafío y considerar las implicancias de esta posibilidad.

Por último, ¿qué está investigando en este momento?

En términos generales, continúo trabajando en la filosofía de la gravedad cuántica, con un particular interés en cuestiones emergentes de un mundo potencial y fundamentalmente desprovisto de espaciotiempo [*spacetime-less*], y llevando a cabo varios proyectos de investigación financiados vinculados a este problema de diferentes maneras. Para darte un ejemplo concreto, Huggett y yo estamos actualmente trabajando en un escrito que explora las aproximaciones a la cosmología cuántica que surgen de la teoría de cuerdas y de la gravedad cuántica de bucles. La cosmología ofrece un desafío particularmente sorprendente, como cualquier modelo cosmológico viable debe serlo, de manera que, en tiempos lo suficientemente posteriores al big bang, debemos obtener, en un acercamiento muy próximo, un universo espaciotemporal completo tal como está pronosticado por nuestros mejores modelos cosmológicos basados en la relatividad general. Por otra parte, los modelos cosmológicos basados en la gravedad cuántica sugieren que en el universo ‘temprano’, los efectos de la cuántica se vuelven no despreciables, de manera que esta ‘fase temprana’ es

no espaciotemporal. No obstante, ¿cómo puede una fase (espacio)temporal ser temporalmente posterior, e incluso en un sentido no temporal emerger de una fase no espacio temporal? Estamos estudiando estos modelos físicos e intentamos responder esta pregunta. Estos modelos cosmológicos y su interpretación son sólo un ejemplo – particularmente claro – de las preguntas filosóficas novedosas y estimulantes que surgen de la física de frontera. ¡Son tiempos muy apasionantes para los filósofos del espacio y el tiempo!

SOBRE EL ENTREVISTADO

Christian Wüthrich

Máster en Física Teórica por la Universidad de Berna, en Historia y Filosofía de la Ciencia por la Universidad de Cambridge, y en Filosofía por la Universidad de Pittsburgh. Obtuvo su doctorado, también en Historia y Filosofía de la Ciencia, en la Universidad de Pittsburgh. Ha sido Profesor Asociado de Filosofía y Estudios de la Ciencia en la Universidad de California (San Diego) y actualmente se desempeña como Profesor Asociado en la Universidad de Ginebra. El Prof. Wüthrich es Investigador Principal del proyecto “Espacio y Tiempo luego de la Gravedad Cuántica”, financiado por la Fundación John Templeton (junto a Nick Huggett). Ha publicado extensamente sobre la filosofía del tiempo, en especial en conexión con problemas relacionados a su rol en la gravedad cuántica. Es junto al Dr. Huggett autor del libro *Out of Nowhere: The Emergence of Spacetime in Quantum Theories of Gravity*, de próxima aparición por Oxford University Press.

SOBRE EL EDITOR INVITADO

Gustavo E. Romero

Full Professor of Relativistic Astrophysics at the University of La Plata and Superior Researcher of the National Research Council of Argentina. As former President of the Argentine Astronomical Society, he has published more than 350 papers on astrophysics, gravitation and the foundations of physics. Dr. Romero has authored or edited 10 books (including *Introduction to Black Hole Astrophysics*, with G.S. Vila, Springer, 2014). His main current interests are on high-energy astrophysics, black hole physics, and ontological problems of spacetime theories. Email: romero@iar.conicet.gov.ar