

Popper y el argumento de Einstein - Podolsky - Rosen

José M. SÁNCHEZ-RON
Departamento de Física Teórica
Universidad Autónoma de Madrid

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos que hacen más atractiva e importante la obra filosófica de Karl Popper es, en mi opinión, lo íntimamente relacionada que siempre ha estado con la ciencia en general, y con la física en particular. Precisamente uno de los casos que mejor ilustran este hecho es el del argumento (terminología de Popper) de Einstein-Podolsky-Rosen (1935)¹. De hecho el interés de Popper por este tipo de problemas data, al menos, de 1934. En aquel año Popper publicó en *Die Naturwissenschaften* un artículo² en el que presentaba un experimento imaginario en el que se discutía la interacción entre dos partículas y la realización, después de que aquellas se separasen, de una medida en una de ellas para obtener una predicción sobre la otra. Este experimento también apareció en su *Logik der Forschung* (1934). Popper envió una separata de su artículo junto con una copia de su libro a Einstein en diciembre de 1934. Este contestaba el 11 de septiembre de 1935 demostrando —como antes también había hecho C.F. von Weizsäcker³— que el experimento imaginario de Popper se basaba en un error. En la primera edición inglesa (1958) de *La lógica de la investigación científica*, Popper reconocía su equivocación (ver sección 77), reproduciendo (en el apéndice XII) la carta de Einstein.

De hecho, según Max Jammer⁴, «no es imposible que fuese precisamente

¹ A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen, «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be considered Complete?», *Phys. Rev.* 47, 777-780 (1935).

² «Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen», *Die Naturwissenschaften*, 22, 807-808 (1934).

³ *Die Naturwissenschaften* 22, 808 (1934).

⁴ *The Philosophy of Quantum Mechanics*, págs. 174-178 (J. Wiley, Nueva York 1974).

esta equivocación [de Popper] la que indujese a Einstein (que inmediatamente reconoció el error) a publicar, junto con Podolsky y Rosen, el argumento en contra de la completitud de la mecánica cuántica». La evidencia en este sentido es, no obstante, muy frágil, y de cualquier manera mi preocupación no es la de tratar de prioridades, sino la de demostrar la vinculación de Popper con el argumento de Einstein-Podolsky-Rosen, vinculación que es patente en *La lógica de la investigación científica*, y que continuó en un precioso artículo («Particle Annihilation and the Argument of Einstein, Podolsky and Rosen») que Popper publicó en 1971⁵.

En esta ocasión mi intención es comentar algunas de las afirmaciones que Popper ha incluido en el volumen tercero del «Postcrip» a *La lógica de la investigación científica, Quantum Theory and the Schism in Physics*⁶, afirmaciones que han surgido de los últimos resultados experimentales (los de Aspect y su grupo)⁷ relativos al argumento de Einstein-Podolsky-Rosen.

2. ARGUMENTOS DE POPPER

En efecto, los resultados del último experimento llevado a cabo por Aspect, Dalibard y Roger⁸, han significado una nueva, y aparentemente decisiva, confirmación del carácter no local de la mecánica cuántica. En otras palabras, estos experimentos *parecen* haber establecido la existencia de una acción a distancia instantánea dentro de la física.

En su «Author's Note» (pág. XVIII) a *Quantum Theory and the Schism in Physics*, Karl Popper ha resumido el desarrollo de este tema de la siguiente manera:

«1936-1948:...Einstein propuso (en un pequeño artículo publicado en *Dialéctica*, 1948) la tesis de que la mecánica cuántica implica acción a distancia; pero esta tesis pasó desapercibida...

1964-1981: J.S. Bell reformula el experimento de EPR a la luz del descubrimiento de Einstein de que la mecánica cuántica implica acción a distancia. Nuevos experimentos, especialmente los experimentos de Aspect, parecen confirmar la acción a distancia.

⁵ En *Perspectives in Quantum Theory*, W. Yourgrau y A. van der Merwe, eds., págs. 182-198 (The M.I.T. Press, Cambridge, Mass. 1971).

⁶ Hutchinson, Londres 1982.

⁷ Para mayor información sobre este punto, así como, en general, sobre el argumento de Einstein-Podolsky-Rosen, véase, J.L. Sánchez-Gómez y J.M. Sánchez-Ron, «Quantum Mechanics and Macroscopic Separability: A Critical Review», *Anales de Física* 79 A, 85-94 (1983) y «Quantum Mechanics and Macroscopic Separability II: Further Comments» *Anales de Física*, 81 40-43 (1985).

⁸ «Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers», *Phys. Rev. Lett.* 49, 1804-1807 (1982).

Mi propia reacción —continúa Popper— es esta: No estoy totalmente convencido de que se hayan interpretado correctamente los experimentos; pero si se han interpretado correctamente, entonces tenemos que aceptar la acción a distancia».

Creo que la descripción de Popper es —especificando que la acción a distancia es instantánea (hay otros tipos de acción a distancia)— correcta y equilibrada.

*El siguiente punto que quiero mencionar es que Popper no cree que la reintroducción de la acción a distancia en la física «haga estremecerse, o incluso, que toque, el realismo»⁹: «Newton y Lorentz» —escribe también en *Quantum Theory and the Schism in Physics*— «eran realistas y aceptaban la acción a distancia»¹⁰. Hay que decir, no obstante, que esta última cita es un tanto problemática. Recordemos en este sentido la conocida carta que Newton escribió a Richard Bentley en 1693¹¹ con relación a las acciones a distancia. Resulta difícil aceptar después de leer dicha carta que el realista Newton aceptaba la acción a distancia. ¡Y qué decir de Lorentz, cuya electrodinámica tenía como una de sus piedras básicas la transmisión de la interacción a través de propagaciones en el campo!*

Pero aunque los argumentos de tipo histórico que Popper ofrece sean incorrectos, yo creo, como ya opinaron entre otros el filósofo William Whewell¹² o el físico Arthur Schuster¹³, que efectivamente, Popper tiene razón; realismo y acción a distancia no son incompatibles.

Hay que señalar aquí también un hecho, que el propio Popper recalca, y que me parece interesante. En su aceptación —dolorosa aceptación habría que decir¹⁴— de la compatibilidad de la acción a distancia con el realismo, Popper difiere radicalmente de Einstein; y esto es, repito, interesante, ya que no hay muchos ejemplos de divergencias entre estos dos pensadores. Como prueba de los sentimientos de Einstein en este punto tenemos una carta que escribió a Max Born en 1947¹⁵. Escribía allí el genial creador de las relatividades.

⁹ *Quantum Theory and the Schism in Physics*, pág. XVIII; ver también la pág. 25.

¹⁰ Pág. XVIII.

¹¹ He citado esta carta en J.M. Sánchez Ron, «The Problem of Interaction: On the History of the Action-at-a-Distance Concept in Physics», *Fundamenta Scientiae* 4, 55-76 (1983).

¹² Ver *The Philosophy of Inductive Sciences*, (John W. Parker, Londres 1847; reimpresso por Frank Cass, Londres 1967).

¹³ En *The Progress of Physics During 33 Years*, pág. 35 (Cambridge University Press, Cambridge 1911).

¹⁴ No olvidemos que Popper escribe (en *Quantum Theory and...*, pág. 25): «Debo admitir que estos resultados me han sorprendido. Cuando supe por primera vez que John F. Clauser y Abner Shimony estaban intentando comprobar experimentalmente el teorema de Bell, esperé que sus resultados refutarían la teoría cuántica».

¹⁵ *Born/Einstein Letters*, Londres 1971.

*«No puedo defender mi actitud en la física, que tu consideras nada razonable. Admito, por supuesto, que existe mucho de válido en el enfoque estadístico que tu fuiste el primero en reconocer claramente... [Sin embargo] no puedo creer seriamente en [dicho enfoque] ya que la teoría no puede reconciliarse con la idea de que la física debería **representar una realidad en el tiempo y en el espacio, libre de las fantasmales acciones a distancia**» (énfasis añadido).*

El siguiente punto que quiero comentar es el más importante. De hecho, las tesis de Popper en las que ahora voy a entrar, y que él ha sido, por lo que yo sé, el primero en formular, tienen una importancia absolutamente fundamental. De confirmarse constituirían una revolución radical dentro de la física moderna, una revolución que obligaría a un largo período de ajuste no sólo en el contenido de gran parte de la física actual, sino también en muchas creencias filosóficas comúnmente aceptadas. Incluso en nuestra visión general del mundo. Sería algo así como una revolución «anti-copernicana» o «ptolemaica».

Para explicar en qué consiste esta tesis de Popper nada mejor que citarle a él mismo. Comenzaré utilizando unos párrafos de un pequeño artículo, «A Critical Note on the Greatest Days of Quantum Theory»¹⁶, publicado en 1982, cuando todavía no se conocían los resultados del experimento de Aspect con los polarizadores en movimiento. Allí, Popper escribía (pág. 976):

*«... si los resultados de estos experimentos... se aceptan, e interpretan en el sentido de que establecen acción a distancia física (con velocidad infinita), entonces estos experimentos deberían ser considerados como **los primeros experimentos cruciales entre las interpretaciones de Lorentz y Einstein del formalismo de la relatividad especial.***

*La razón de esta afirmación es que la mera existencia de una velocidad infinita implica una simultaneidad absoluta y por consiguiente un espacio absoluto. El que se pueda alcanzar o no una velocidad infinita **en la transmisión de señales** es irrelevante para este argumento: aquel sistema inercial para el que la simultaneidad einsteniana coincide con la simultaneidad absoluta (claramente no puede existir más de un sistema de esta clase) sería el sistema en reposo absoluto —podamos o no identificar experimentalmente este sistema en reposo absoluto».*

En *Quantum Physics and the Schism in Physics* encontramos de nuevo el mismo tipo de argumentación (pág. 29).

*«Esto [los experimentos de Aspect] **podría** interpretarse como indicativo de una acción a distancia, y si esto es así ello significaría que tenemos que abandonar la interpretación de Einstein de la relatividad especial y volver a la interpretación de Lorentz y con ella al espacio y tiempo absolutos*

¹⁶ *Foundations of Physics* 12, 971-976 (1982).

de Newton. No necesitamos, en este caso, abandonar ninguna fórmula de la teoría de la relatividad especial. Ya que la relatividad especial es una interpretación de un formalismo; y el mismo formalismo se puede interpretar bien con la relatividad especial o con el punto de vista de Lorentz de que tenemos un espacio y tiempo absolutos pero que no podemos detectarlo, por razones que el formalismo revela. Mientras que la teoría de la relatividad especial, en la interpretación de Einstein, dice que la simultaneidad no tiene un sentido absoluto; que si no tenemos ningún medio para detectar el espacio y el tiempo absolutos —si su detección está de hecho excluida por el formalismo— entonces no deberíamos suponer que existe.»

No hay duda de que los argumentos de Popper son tan sencillamente profundos como trascendentales. Pero pasemos a mis comentarios. En primer lugar vemos que Popper no sólo da estos pasos con sorprendida relucencia, sino que además es muy precavido. Expresiones como «*si los resultados de estos experimentos... se aceptan, e interpretan en el sentido...*», o «*esto podría intrepretarse*», demuestran que Popper es consciente de las muchas posibilidades que pueden existir en principio. ¿Podría acaso el filósofo de la ciencia Karl Popper ignorar el difícil equilibrio que es el método científico?

Para demostrar lo delicado del tema en el que ha entrado Popper voy a referirme en la sección siguiente a la cuestión de si los experimentos de Aspect sobre la no separabilidad cuántica son de hecho, como afirma Popper, «*los primeros experimentos cruciales entre las interpretaciones de Lorentz y de Einstein del formalismo de la relatividad especial.*»

3. EXPERIMENTOS CRUCIALES: LORENTZ vs. EINSTEIN

Si uno consulta artículos de recopilación como el que escribió en 1973 Herman Erlichson¹⁷, se encuentra con afirmaciones como las siguientes: «*La posibilidad de una diferencia experimental entre las dos teorías puede residir en un experimento en un sólo sentido... [pero] hasta el momento no parece que alguien haya hecho una propuesta específica para tal experimento crucial, ni que nadie haya demostrado conclusivamente la imposibilidad de semejante experimento*» (pág. 1.068).

No obstante, la situación no parece estar tan clara. Así, por ejemplo, nos encontramos con la siguiente rotunda afirmación del historiador de la física, Arthur I. Miller¹⁸: «*Por decirlo una vez más, la teoría del electrón de*

¹⁷ «The Rod Contraction-Clock Retardation Ether Theory and the Special Theory of Relativity», *Am. J. Phys.* 41, 1068-1077 (1973).

¹⁸ En *Some Strangeness in the Proportion*, H. Woolf, ed. pág. 110. (Addison-Wesley, Nueva York 1980).

Lorentz-Poincaré es matemáticamente idéntica a la teoría de la relatividad especial, pero no es idéntica observacionalmente.»

En su reciente libro *Albert Einstein's Special Theory of Relativity (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*¹⁹, Miller ha sido más explícito en este punto²⁰:

«Tanto Lorentz como Planck (y es innecesario decirlo, Abraham también) continuaron manteniendo la equivalencia observacional de las dos teorías a pesar de la sugerencia que en 1908 hicieron Einstein y Laub de un experimento decisivo para distinguir entre ambas; a saber, que H.A. Wilson repitiese su experimento de 1904 sustituyendo el dieléctrico situado entre las placas de un condensador por un dieléctrico magnético. Laub repitió esta predicción en su artículo de recopilación de 1910, y en 1913 el experimento fue realizado [por H.A. y M. Wilson] *con resultados que apoyaban a Einstein y Laub.*»

Pero no sólo es Miller el que opina esto. De hecho, él repite afirmaciones ya mantenidas por científicos de la talla de Hermann Weyl y Wolfgang Pauli. En efecto, en sus respectivos libros, *Raum-Zeit-Materie*²¹ y *Relativitätstheorie*²², Weyl y Pauli defendieron el que el experimento de los Wilson apoyaba la teoría (interpretación) de Einstein frente a la de Lorentz; opinión, por cierto, no compartida por los propios H.A. y M. Wilson quienes en su artículo de 1913²³ afirmaban:

«*Estos experimentos confirman, por consiguiente, la teoría de la relatividad, pero no entran en conflicto necesariamente con las suposiciones fundamentales de la teoría de Larmor y H.A. Lorentz.*»

Y si he sacado esta última evidencia es porque no creo que, a pesar de la enorme autoridad de Pauli y Weyl, sea inevitable u obvio considerar el experimento de los Wilson como crucial. Las opiniones sobre este punto de Ebenezer Cunningham en su monografía *The Principle of Relativity*²⁴, por ejemplo, no coinciden con las de Pauli y Weyl. Mi propia opinión es, siguiendo a J. Jeans²⁵, que los problemas que presentan los fenómenos en dieléctricos y medios magnéticos son mucho más complejos; pertenecen a lo que se denomina teoría *macroscópica* de Lorentz, y puede que no

¹⁹ Addison-Wesley, Nueva York 1981.

²⁰ Pág. 271.

²¹ Publicado por primera vez en alemán en 1918. Ver las págs. 192-193 de la traducción inglesa de la 4ª edición alemana: *Space-Time-Matter*, (Dover, Nueva York n.d.).

²² Publicado en alemán por primera vez en 1921. Ver las págs. 112-113 de la traducción inglesa: *Theory of Relativity*, (Pergamon Press, Oxford 1958).

²³ *Proc. Roy. Soc.* 89 A, 99 (1913).

²⁴ Cambridge University Press, Cambridge 1914.

²⁵ *The Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*, 4ª edición, (Cambridge University Press, Cambridge 1923); ver pág. 605.

afecten a la más básica teoría *microscópica* en cuyo rango nos movemos al comparar la teoría de Lorentz con la de Einstein. No obstante, y por ello he sacado este tema, es necesario volver a analizar estos experimentos a la luz de la problemática que, vía los experimentos de Aspect, Popper ha resucitado. No es en absoluto trivial que, como Popper arguye, los experimentos de Aspect sean los primeros experimentos cruciales que distinguen entre Lorentz y Einstein.

4. UN ARGUMENTO EN FAVOR DE LA INTERPRETACIÓN DE EINSTEIN

Al llegar a este punto voy a pasar a mi propia visión del problema. Y antes de hacerlo tengo que explicar que mi punto de partida, mi prejuicio si se quiere decir así, ha sido el intentar salvar una interpretación que, como la de Einstein, tanto ha significado y significa para la física y para la filosofía de nuestro siglo. No sé si mi defensa de Einstein es inevitable. Sí acepto que es sutil y en cierto sentido indirecta. Y en cualquier caso mi opinión es la de que hay que discutir y analizar esta fundamental cuestión desde todos los puntos de vista posibles. Paso, por tanto, a explicar mi argumentación.

Las interpretaciones de Einstein y de Lorentz de la relatividad especial difieren *matemáticamente* en un punto crucial: para Einstein las transformaciones de Lorentz *forman grupo*, mientras que para Lorentz no²⁶. En efecto, para Lorentz dos sistemas de referencia (uno en reposo en el sistema del éter y otro en movimiento inercial) están relacionados por las transformaciones hoy denominadas de Lorentz, que *no forman grupo*, y no lo forman porque como el éter no se mueve nunca (es el sistema universal de referencia, nuestro espacio absoluto), no tiene sentido la transformación inversa del sistema de referencia en movimiento al sistema en reposo con respecto al éter. Esto Einstein no lo podía admitir; el principio de relatividad exigía que no existiesen sistemas de referencia privilegiados, lo cual implicaba que el éter era superfluo. Utilizando la magistral expresión de Einstein que con una sola frase destruía décadas de duros esfuerzos²⁷:

«La introducción de un "éter luminífero" demostrará ser superflua en tanto que la visión desarrollada aquí no requiere un "espacio absoluto estacionario"».

Mi siguiente paso es el crucial: Si queremos trascender —y debemos, insistiré en esto más adelante— la visión electromagnética de la materia,

²⁶ Ver para un mayor desarrollo de este punto, José M. Sánchez Ron, *El origen y desarrollo de la relatividad*, pág. 67. (Alianza, Madrid 1983).

²⁷ A. Einstein, «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», *Ann. d. Phys.* 17, 891-921 (1905).

o, más apropiadamente, una interpretación en la que la relatividad especial sólo se aplique a los fenómenos electromagnéticos, entonces debemos aceptar el que las transformaciones de Lorentz formen grupo. Una forma de ver esto es como sigue: ha sido argumentado (por M. Abraham²⁸ y muchos otros) que el segundo postulado, el de la constancia de la velocidad de la luz, evidencia la íntima relación de la relatividad especial con el electromagnetismo, y esto se ha utilizado con diversos²⁹, y erróneos fines, uno de ellos el favorecer una interpretación de tipo lorentziano. Una manera de escapar de todo esto es a través de una demostración a lo W. von Ignatowsky (Terlestsckii, Lévy-Leblond, etc.)³⁰ en la que se parte de los siguientes axiomas³¹:

- I) El espacio es isótropo (esto es, todas las direcciones espaciales son equivalentes).
- II) El espacio y el tiempo son homogéneos (esto es, las propiedades del espacio y del tiempo son independientes de la elección que hayamos hecho para los puntos iniciales de nuestras medidas).
- III) Principio de relatividad (esto es, la dinámica no depende del sistema de referencia inercial utilizado).

En este enfoque se llega, sin utilizar el segundo postulado, a las ecuaciones de transformación de Galileo y Lorentz (se obtienen una u otra dependiendo del valor que demos a una constante). Ahora bien, el punto es que esto sólo se puede conseguir, al menos por lo que yo sé, empleando la propiedad de reciprocidad de la ley de composición de elementos de un grupo (paso de v a $-v$ sin alterar la relación de pertenencia al grupo).

En otras palabras, no parece que se pueda transcender totalmente el electromagnetismo sin recurrir a que las transformaciones de Lorentz formen grupo. Ahora bien, hace mucho tiempo que se tienen comprobaciones experimentales de la relatividad especial en fenómenos no electromagnéticos. Por ejemplo, en la desintegración de los mesones que forman los rayos cósmicos, en las múltiples comprobaciones que se realizan en los aceleradores de partículas, o incluso a través de las consecuencias que se derivan de la teoría cuántica relativista (p. ej., la ecuación de Dirac). No es casualidad, por consiguiente, que los defensores de la teoría «absolutista» de Lorentz (los Abraham, Ives, etc.) se muevan habitualmente dentro del

²⁸ «Die neue Mechanik», *Scientia* 15, 10 (1914).

²⁹ Ver, en este sentido, José M. Sánchez Ron, «Bunge: Cajas negras y translúcidas y acción a distancia», *Teorema* XII/1-2, 195-213 (1982).

³⁰ Para más detalles ver J.M. Sánchez Ron, *El origen y desarrollo de la relatividad*, op. cit., nota 26, págs. 89-90.

³¹ Una exposición particularmente clara se encuentra en Ya. P. Terlestsckii, *Paradoxes in the Theory of Relativity*, (Plenum Press, Nueva York 1968).

ámbito del electromagnetismo. De hecho, la relatividad especial tal y como la formuló Einstein tiene sentido únicamente como cinemática general, independiente del tipo de interacción que se esté considerando, mientras que la teoría de Lorentz toma sentido dentro del contexto electromagnético. El «teorema de los estados correspondientes» del que Lorentz obtuvo³² la contracción de longitudes y su «principio de relatividad», es un teorema de la electrodinámica de Maxwell. Pretender ahora que, no obstante, la teoría de Lorentz se puede aplicar, ya que existe innegable evidencia de su existencia, a otras interacciones fuera de la electromagnética, plantea en principio problemas. No es evidente, habría que extender la teoría de Lorentz.

Estos sencillos razonamientos destruirían, caso de demostrarse su total validez, los argumentos de Popper en defensa de la interpretación lorentziana de la relatividad especial, en tanto que dicha interpretación sería errónea o deficiente. No resolverían, naturalmente, el problema, ya sea éste aparente o real, de la no localidad cuántica, el problema de la aparente acción a distancia instantánea. Pero existen diversas posibilidades para «explicar» esta extraña característica de la teoría cuántica. Ejemplos: las teorías de David Bohm y Basil Hiley, varios modelos estocásticos, o incluso teorías de acción a distancia en las que se introducen interacciones avanzadas junto a las retardadas³³.

El problema es, sin duda, difícil y delicado. Yo diría, en cualquier caso, que la situación es, en algunos sentidos, seria pero no desesperada.

³² En este punto sería necesario hacer algunas precisiones. Ver en este sentido el capítulo 3 de mi libro citado en la nota 26.

³³ J. G. Cramer, «Generalized Absorber Theory and the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox», *Phys. Rev. D* 22, 362 (1980).