

Texto:

“Sabido es que al aplicar la electrodinámica de Maxwell –tal y como se suele entender normalmente hoy día- a cuerpos en movimiento, aquella conduce a ciertas asimetrías que no parecen ser inherentes a los fenómenos. Piénsese, por ejemplo, en la acción electrodinámica recíproca de un imán y un conductor. [...]

Ejemplos de esta especie, junto con los intentos infructuosos de descubrir algún movimiento de la Tierra con relación al “medio lumínico”, obligan a sospechar que ni los fenómenos de la electrodinámica ni los de la mecánica poseen propiedades que se correspondan con la idea de un reposo absoluto. Indican más bien, como ya ha sido demostrado para magnitudes de primer orden, que las mismas leyes de la electrodinámica y de la óptica son válidas en todos los sistemas de referencia para los que son ciertas las ecuaciones de la mecánica. Elevemos esta conjetura (cuyo contenido llamaremos de ahora en adelante “Principio de Relatividad”) a la categoría de postulado, e introduzcamos además otro, cuya incompatibilidad con el primero es solo aparente, a saber: que la luz se propaga siempre en el vacío con una velocidad c independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor. Estos dos postulados bastan para obtener una teoría simple y coherente de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento basada en la teoría de Maxwell para los cuerpos estacionarios.”

A. Einstein, “Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento” (1905)¹.

Comentario de Texto:

“Después de siete años de reflexión en vano (1898-1905), la solución me llegó repentinamente con la idea de que nuestros conceptos y leyes de espacio y tiempo solo pueden reclamar validez en tanto que permanezcan en una clara relación con nuestras experiencias; y que la experiencia muy bien podría conducir a la alteración de dichos conceptos y leyes. A partir de una revisión del concepto de simultaneidad en una forma más maleable, llegué así a la teoría de la relatividad especial” (1924)².

Con la publicación en 1905 de “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento” (“Zur Elektrodynamik bewegter Körper”) Albert Einstein (1880-1955) presentaba los conceptos básicos de la Teoría de la Relatividad Especial o Teoría Restringida de la Relatividad y hacía entrar a la física en un nuevo paradigma.

La primera frase del ensayo y de nuestro texto reconoce el protagonismo de James Clerk Maxwell (1831-1879) en lo que sigue. Maxwell unificó mediante sus ecuaciones los fenómenos electromagnéticos investigados con anterioridad introduciendo el concepto de campo electromagnético. Llegó a la conclusión de que la velocidad de la luz (que identifica como fenómeno electromagnético) era la misma para cualquier observador y no obedecía a la invariancia galileana según la cual las leyes fundamentales de la física habrían de ser las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales. Como el propio Einstein nos anticipa en el texto que nos ocupa, cuando la electrodinámica de Maxwell se aplica a “cuerpos en movimiento” se producen ciertas asimetrías que el propio Einstein explica entre los dos párrafos del ensayo que hoy se seleccionan para comentar, en “la acción electrodinámica recíproca de un imán y un conductor”, cuando el conductor está en reposo y el imán en movimiento aparece un campo electromagnético junto al imán mientras que si lo que está en reposo es el imán y el

¹ El comentario de texto está tomado de WILLIAMS, L. P. (1973) pp. 61-62, coincidente con la tercera edición que yo cito de 1977. Sin embargo, para mi comentario y citas he usado la traducción que incluye el texto de STACHEL, J. (2011), pp. 161-193.

² Grabación transcrita en Friedrich Herneck, “Zwei Tondokumente Einsteins zur Relativitätstheorie”, *Forschungen und Fortschritte* 40 (1966), tomado de STACHEL, J. (p. 153).

conductor está en movimiento “no hay ningún campo eléctrico en la vecindad del imán, sino más bien una fuerza electromotriz en el conductor a la que no corresponde ninguna energía *per se*, sino que suponiendo una igualdad del movimiento relativo en los dos casos, da lugar a corrientes eléctricas de la misma magnitud y el mismo curso que las producidas por las fuerzas eléctricas en el primer caso”.³ El movimiento de un cuerpo dentro del campo electromagnético causaba una perturbación en su interior que debía ser tomado en cuenta a la hora de explicar el fenómeno.

Ni Maxwell ni Einstein son entes aislados a su tiempo, celebridades encapsuladas. La física en particular y la ciencia en general se habrían abierto paso sin sus mentes portentosas antes o después. Así, podemos establecer relaciones muy pertinentes entre “La mesure du temps” de Henri Poincaré y la definición de sincronización que va asociada al segundo postulado de Einstein; dice Poincaré: “La simultaneidad de dos eventos, o el orden de su sucesión, la igualdad de dos duraciones debe definirse de tal manera que la declaración de las leyes naturales sea lo más simple posible. En otras palabras, todas estas reglas, todas estas definiciones, son solo el fruto de un oportunismo inconsciente”⁴. Veremos que para Einstein el concepto de simultaneidad no es absoluto y distingue entre simultaneidad “local” y a “distancia”. John Stachel dice que “enunciados similares a muchos de los comentarios individuales hechos en [“Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”] se dan en la literatura contemporánea, y es muy probable que Einstein estuviera familiarizado con los libros y artículos en los que se encuentran”⁵, pero su enfoque, sigue Stachel, es único, porque se dio cuenta de que se necesitaba una cinemática universal “como base para un enfoque consistente de la electrodinámica de cuerpos en movimiento”. Decía hace unas semanas el profesor Sellés: “ante la disyuntiva de escoger entre un espacio y un tiempo absolutos o la universalidad de las leyes, se optó por lo segundo. La teoría de la relatividad estaba en el ambiente, y Poincaré casi llegó a formularla... pero según una opinión extendida, no se atrevió”⁶. Sánchez Ron llama también la atención sobre la cercanía del pensamiento de Poincaré y de Einstein⁷. Lewis Pyenson llega a decir que “hay muy poca diferencia entre la teoría de la relatividad especial exenta de éter y la teoría del electrón de Lorentz, y tampoco hay diferencia alguna entre la teoría de la gravitación de Hilbert y la teoría de la relatividad general de Einstein” cuyo pensamiento “era el de un físico teórico clásico, muy del estilo de sus mentores Lorentz y Boltzmann”⁸.

Además de Poincaré, Lorentz o Maxwell, según Stachel hay evidencias de que Einstein conocía la obra de Drude, Helmholtz, Hertz, Voigt, Wien o Föppl⁹. Para Sánchez Ron debemos también añadir a Kirchhoff, Boltzmann o Mach¹⁰. La que fuera esposa de Einstein, Mileva Maric, también colaboró con él en “nuestro trabajo sobre el movimiento relativo”¹¹. En 1908 Hermann Minkowski, el profesor más importante que tuvo Einstein en el Instituto Federal de Tecnología de Zurich¹², elaboraría la noción espacio-tiempo que sería fundamental para que Einstein desarrollase su Teoría de Relatividad General (1915)¹³. Pero ahora es momento, así nos lo

³ STACHEL, J. (p. 161). La cursiva es de Einstein.

⁴ La traducción es mía. Acceso telemático al texto original:

https://fr.wikisource.org/wiki/La_Valeur_de_la_Science/Chapitre_II._La_mesure_du_temps. A este respecto parece ser que Einstein no conocía este escrito de Poincaré (1904) aunque sí *La ciencia y la hipótesis* (1902) SOLÍS y SELLÉS (p. 836). STACHEL (p. 151). SANCHEZ RON, J.M. (p. 58).

⁵ STACHEL, J. (p. 150).

⁶ En su intervención de 29 de marzo en el foro de la asignatura.

⁷ SANCHEZ RON, J.M. (p. 58).

⁸ PYENSON, L. (P. 113).

⁹ STACHEL, J. (p. 151).

¹⁰ SÁNCHEZ RON, J. M. (pp. 56-48).

¹¹ Carta de Einstein a Maric de 1901. STACHEL, J. (p. 150).

¹² PYENSON, L. (p. 123). Einstein estudió nuevo cursos con Minkowski.

¹³ Pyenson dedica un capítulo a la relación de la Teoría de la Relatividad Especial de Einstein en comparación con la teoría de Minkowski y a sus “diferencias esenciales”. PYENSON, L. (pp. 122-148).

exige el texto, de ocuparnos de la primera Teoría, de la Teoría de la Relatividad Especial (1905) construida sobre la exactitud de las ecuaciones de Maxwell¹⁴, cuya importancia queda reverenciada al aparecer en la primera línea del ensayo, que es donde arranca nuestro texto.

El ensayo de Einstein es un examen crítico de los conceptos de intervalos espacial y temporal y de su significación física y su conclusión es que el tiempo universal o absoluto basado en la cinemática de Newton debía ser abandonado. Para Sánchez Ron aquí es fundamental la influencia de la filosofía del físico Ernest Mach, muy crítico con el concepto de espacio absoluto de Newton: "la definición einsteniana de simultaneidad no es sino una manifestación específica del registro de Mach de que toda afirmación que se haga en física se refiera a relaciones entre cantidades observables"¹⁵.

El texto que comentamos pertenece a la introducción del ensayo de 1905, de hecho, contiene el primer párrafo y retoma la narración tras el desarrollo que hace en el texto original de "la acción electrodinámica recíproca de un imán y un conductor" de la que ya hemos hablado. Después de la introducción, el ensayo tiene dos partes: "A. Parte Cinemática"¹⁶ y "B. Parte Electrodinámica"¹⁷. Cada parte, a su vez, se divide en cinco secciones. En la primera parte presenta una nueva cinemática basada en el principio de relatividad y en la constante de la velocidad de la luz; en la segunda parte aplica su cinemática a la resolución de problemas en la óptica y en la electrodinámica de cuerpos en movimiento.

Este pequeño texto introductorio ya presenta la hipótesis de trabajo de Einstein y los dos postulados que construyen su teoría que desarrollará en la Parte A:

1º "Las mismas leyes de la electrodinámica y de la óptica son válidas en todos los sistemas de referencia para los que son ciertas las ecuaciones de la mecánica" [sistemas de referencia inerciales] y "Elevemos esta conjetura (cuyo contenido llamaremos de ahora en adelante "Principio de Relatividad") a la categoría de postulado".

2º "Que la luz se propaga siempre en el vacío con una velocidad c independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor".

Señala Sánchez Ron que, lo que hacía Einstein, era modificar el planteamiento del problema (de Lorentz) de forma radical: "el principio de relatividad, pasaba a ser un requisito de las teorías no una propiedad de ellas"¹⁸.

Pero volvamos al principio. La intención inicial de Einstein fue la de modificar la teoría de Maxwell "de forma que se tuviese una construcción teórica para los fenómenos ópticos y electromagnéticos en la que solo tuviese significado físico el movimiento relativo"¹⁹; pero solamente el descubrimiento de un principio formal universal le conduciría a resultados seguros. Para conciliar la teoría de Maxwell con el principio de relatividad habría de modificar la noción de tiempo.

¹⁴En un principio Einstein se refirió al "principio de relatividad", lo vemos en el texto que hoy comentamos, y no fue hasta 1915 que empezara a referirse a Teoría de la Relatividad Especial y Teoría de la Relatividad General. El término "Teoría de la Relatividad" (*Relativtheory*) lo utilizó Max Planck "en 1906 para describir las ecuaciones de Lorentz-Einstein para el movimiento del electrón" (STACHEL p. 146). Roger Penrose desarrolla la aparente discrepancia entre dos de los artículos más importantes de Einstein de 1905, el que nos ocupa, sobre la Teoría de la Relatividad especial y aquél en el que propone en cierto sentido una vuelta a Newton y a la consideración de la luz como partículas y que es una de las bases de la posterior Física Cuántica: "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz". STACHEL, J. (pp. 8-12). Ambos recogidos en la edición centenaria de STACHEL.

¹⁵ SANCHEZ RON, J. M. (pp. 60-61).

¹⁶ STACHEL, J. (pp. 163-177).

¹⁷ STACHEL, J. (pp. 177-192).

¹⁸ SANCHEZ RON, J. M. (p. 63).

¹⁹ SANCHEZ RON, J. M. (p. 64).

El experimento de Michelson y Morley con el interferómetro en 1881²⁰ demostraba que la luz se propagaba a la misma velocidad y no contradecía la relatividad del movimiento, un insultantemente joven Einstein nos mostraría que no solo el movimiento era relativo, también lo es el tiempo. La Teoría de la Relatividad cambiaba profunda y radicalmente la historia del pensamiento señalando los límites de la física anterior.

El punto de partida se hallaba en el aparente conflicto entre el principio de relatividad (o del principio de movimiento relativo) originario de la física mecanicista de Newton y la teoría de Maxwell-Lorentz que implicaba un sistema inercial privilegiado. Siguiendo las leyes de movimiento de Newton se podía demostrar la imposibilidad de determinar el estado de movimiento de un sistema inercial a través de experimentos mecánicos en "un sistema cerrado con centro de masa en reposo en dicho sistema de referencia"²¹. La teoría ondulatoria de la luz invalidaba el principio para los fenómenos ópticos y exigía, en ausencia de materia, un medio que lo impregnara todo al que se denominó "éter luminífero" por el que se propagase la luz. Fizeau, en sus experimentos sobre la velocidad de la luz en medios en movimiento, había demostrado que la materia no arrastraba ese éter (como pensó Hertz), pero no se lograba verificar experimentalmente el movimiento relativo respecto a un sistema de referencia fijo en el éter. Las ecuaciones de Maxwell cobraron validez en el sistema de Lorentz, donde el éter permanece inmóvil en un sistema supuestamente inercial. Teóricamente debería ser posible detectar el movimiento de La Tierra a través del éter, pero no fue así.

Nuestro texto nos habla en estos términos:

"Ejemplos de esta especie, junto con los intentos infructuosos de descubrir algún movimiento de la Tierra con relación al "medio lumínico", obligan a sospechar que ni los fenómenos de la electrodinámica ni los de la mecánica poseen propiedades que se correspondan con la idea de un reposo absoluto". Es decir, de los experimentos fallidos de medir el movimiento de La Tierra respecto al éter (el "medio lumínico").

Lo que más tarde llamaría Poincaré "transformaciones de Lorentz" eran unos ajustes para las coordenadas espacio y tiempo y para los componentes del campo electromagnético que usadas con las ecuaciones de Maxwell toman la misma forma en todos los sistemas de referencia inerciales. Lo que trataba Lorentz en 1892 era resolver las inconsistencias entre el electromagnetismo y la mecánica clásica y para ello asumía que la velocidad invariante para la transmisión de las ondas electromagnéticas se refería a la transmisión a través de un sistema de referencia privilegiado (hipótesis del éter): Lorentz calculó la ecuación de ondas electromagnéticas en el éter desde un sistema de referencia en movimiento respecto al éter. Si empleaba una transformación en la ecuación y el sistema de referencia estaba en reposo no variaba respecto a la ecuación anterior. Todo cuerpo en movimiento respecto al éter se contraía en la dirección de su movimiento y en proporción al movimiento.

El paso definitivo hacia adelante de Einstein fue tomar estos fracasos en la medición del movimiento como prueba empírica de la validez del principio de relatividad. Para que ese principio de relatividad fuera compatible con la electrodinámica de Maxwell y Lorentz precisaba que la velocidad de la luz fuera constante, lo que era deducible de la teoría de Maxwell y Lorentz. Aunque, para estos, la velocidad de la luz era constante en el éter que Einstein desecharía. La conclusión que se obtenía era que la velocidad de luz era la misma en cualquier sistema de referencia inercial lo que obligaba a revisar los postulados newtonianos (ley de adición de velocidades) y toda la física clásica: "la simultaneidad de sucesos distantes solo está definida físicamente con relación a un sistema de referencia inercial concreto, lo que conduce a transformaciones cinemáticas entre las coordenadas espaciales y temporales de dos sistemas inerciales que concuerdan formalmente con las transformaciones que Lorentz había introducido

²⁰ Aunque Einstein manifestó a Shankland que no conocía en 1905 el experimento de Michelson y Morley ha "evidencias que demuestran que la memoria le jugó una mala pasada" SANCHEZ RON, J. M. (p. 62).

²¹ STACHEL, J. (p. 146).

en 1904²². La eliminación del éter suponía que los campos electromagnéticos no necesitaban un substrato subyacente y demostraba la validez de las ecuaciones de Maxwell-Lorentz en el vacío. Lo que sigue en el ensayo a lo que acota el texto seleccionado es: "La introducción de un "éter lumínico" se mostrará superflua, puesto que la idea que se va a desarrollar aquí no requerirá un "espacio en reposo absoluto" dotado de propiedades especiales, ni asigna un vector velocidad a un punto del espacio vacío donde están teniendo lugar procesos electromagnéticos"²³. El éter podía ser suprimido ya que el principio de relatividad no admitía sistemas de referencia privilegiados.

Finalmente, Einstein, en la parte B del ensayo, deducía las ecuaciones de movimiento de un electrón (de una partícula cargada) con velocidad arbitraria.

La teoría de Einstein reconciliaba el electromagnetismo con la física mecánica clásica. Desaparecía el éter y el vacío adquiría significado físico como asiento del "campo". El tiempo se integraba en el espacio. Dos acontecimientos simultáneos con respecto a un punto podían no serlo respecto a otro lo que pone en cuestión, relativiza, los conceptos de longitud, volumen, masa, aceleración, etcétera, que varían en función de la velocidad de cada cuerpo. Tiempo y espacio quedaban adscritos a nuestra experiencia como recoge la cita con la que comienzo este comentario.

Dice Penrose que la de Teoría de la Relatividad es la cuarta de las cinco revoluciones en la comprensión del mundo físico²⁴. La última sería la de la física cuántica, la primera la de la geometría euclidiana (comprensión de los cuerpos rígidos y configuraciones estáticas), la segunda la de Galileo y Newton (movimientos de los cuerpos, fuerzas y aceleraciones) y la tercera la de Faraday y Maxwell que es justo donde arranca el texto que hoy nos interesa sobre la cuarta revolución. Los físicos británicos del XIX nos mostraron que existían campos continuos que trascendían las partículas, nos hablaron del campo electromagnético y del comportamiento de la luz. Einstein no solo protagoniza la cuarta revolución; la quinta, en cierto sentido, también la inicio él, y también en 1905 con su "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz" donde ya nos habló del "cuanto de luz".

Bibliografía:

- EINSTEIN, A. (1905): "Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento", ICN-UNAM, 2005.

Acceso telemático: <http://webs.ftmc.uam.es/juancarlos.cuevas/Teaching/articulo-original.pdf>

La Universidad de Princeton da acceso a los textos de Einstein. Este artículo se corresponde con el documento 23 de *Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909* y su acceso telemático directo es:

<https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-trans/154#>,

El original en alemán, "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", se puede consultar en:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19053221004>

- EINSTEIN A. (1916): *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Madrid, Alianza Editorial, 2017.
- LANDAU, L. y RUMER, Y. (1980): *¿Qué es la teoría de la relatividad?*, Tres Cantos, Ediciones Akal, 2018.
- PEARCE WILLIAMS, L. (ed.) (1968): *La teoría de la relatividad*, Alianza Editorial, 1977.
- POINCARÉ H. (1904): "La mesure du temps", en *El valor de la ciencia*. Acceso telemático:

²² STACHEL, J. (p. 149). Sánchez Ron es rotundo: "sin lugar a duda Einstein no conocía el artículo de Lorentz de 1904", aunque sí sabemos que conoció otros escritos de Lorentz. SANCHEZ RON, J. M. (pp. 57-58).

²³ STACHEL, J. (p. 162).

²⁴ En el Prólogo a STACHEL, J. (pp. 7-8).

https://fr.wikisource.org/wiki/La_Valeur_de_la_Science/Chapitre_II._La_mesure_du_temps

- PYENSON, L. (1985): *El joven Einstein. El advenimiento de la relatividad*, Madrid, Alianza Editorial, 1990.
- SÁNCHEZ RON, J. M. (1983): *El origen y el desarrollo de la relatividad*, Madrid, Alianza Editorial.
- SOLIS, C. Y SELLÉS, M. (2005): *Historia de la Ciencia*, Barcelona, Espasa Libros, 2013.
- STACHEL, J. (ed.) (1998): *Einstein 1905. Un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, Barcelona, Crítica, 2011.