

“El universo está construido sobre un plan,
la profunda simetría del cual está
de alguna manera
presente en la estructura interna
de nuestro intelecto.”
Paul Valéry

"La noción de simetría en la elección de las teorías físicas modernas"

por Nicolás Gaudenzi

La simetría se encuentra hoy en el corazón mismo de la física teórica. El lenguaje cotidiano de sus practicantes se ha plagado de expresiones extravagantes como “partícula supersimétrica”, “rompimiento espontáneo de la simetría” o “simetría asociada a la conservación” y en un sentido muy general, la física teórica se puede concebir ahora como el estudio matemático de las simetrías del mundo empírico (o, en su defecto, la explicación de la ausencia de una simetría particular). El papel central que dicho concepto juega en la red argumentativa de las teorías físicas actuales no es accidental, y de hecho, la preocupación por encontrar descripciones de los datos en las que sea posible estudiar claramente las propiedades de simetría es uno de los rasgos distintivos de modernidad en esta disciplina. Es decir que la simetría está presente como faro en el horizonte, como principio regente, como aspiración teórica, desde el momento mismo en que aparecen las teorías que reformaron las concepciones físicas clásicas. Por ello, el siguiente estudio de un caso histórico sobre su rol heurístico tiene el doble propósito de retratar algunos aspectos clave de la extraña práctica que llamamos física teórica y, sobre todo, aclarar algunos puntos sobre la forma en que aparecieron teorías que originalmente sonaban descabelladas (como lo fueron la relatividad y la cuántica en su momento) pero que se convirtieron en las ideas que dominan, desde hace ya casi un siglo, esa práctica. Con esto en mente, voy a tomar como ejemplo principal a la historia de las transformaciones de Lorenz, pero señalaré algunas conexiones con otras áreas. Empezaré por describir en términos generales el contexto intelectual de la comunidad de físicos *circa* 1900, puesto que la importancia y profundidad de la transformación que representaron las teorías modernas sólo puede ser adecuadamente evaluada en términos de la comparación con las alternativas que ofrecía dicho contexto. En ese marco, haré una comparación del rol que las transformaciones de Lorenz jugaron en las teorías rivales de la época, con el objetivo de mostrar claramente algunas características de la alternativa moderna y el rol que la simetría jugó en su concepción.

I. Contexto histórico.

Cuando revisamos el estado de la física en los albores del siglo XX, encontramos una disciplina dinámica y activa: un conjunto de tradiciones que, a pesar de los doscientos años que llevaba produciendo resultados “positivos”, parecía no detenerse sino por el contrario acelerar. Cuando llegamos a 1900 los frutos de ese esfuerzo continuo son visibles en tres grandes teorías matemáticas que, por su sofisticación y detalle, pueden ser consideradas como “imágenes del mundo” (Weltbild) de los físicos. Así, podemos hablar de una “imagen **mecánica** del mundo”, como el conjunto de compromisos, prácticas y resultados que se desprenden de explicar la evidencia empírica en términos de las ecuaciones de Newton. Por otra parte, las ecuaciones que Maxwell presentó en 1865

describiendo el campo electromagnético, junto con las evidencias experimentales que apartaron Hertz (ondas electromagnéticas 1885-1889), J.J. Thompson (electrones en 1897) et al. constituyeron la “imagen **electromagnética** del mundo”. Finalmente, el conjunto de principios que sugirieron Carnot, Clausius, y William Thomson (entre muchos otros) basados en el estudio de la energía y la entropía, junto con la enorme gama de aplicaciones exitosas que dichos principios habían conseguido durante todo el siglo XIX, constituyeron la “imagen **termodinámica** del mundo”. Si bien en 1900 nada hacía dudar que estas tres imágenes eran todas versiones provisionales de una única imagen integrada (¿“la imagen **física** o incluso **científica** del mundo?”), la mayoría de los retos apremiantes de la física del periodo giraban en torno a resolver las relaciones y tender los puentes entre estas tres aproximaciones distintas.

La física estadística que se desprende de los trabajos de Ludwig Boltzmann (a partir de 1866), por ejemplo, se pueden entender como un intento por reducir las leyes de la termodinámica al comportamiento estadístico de unas partículas microscópicas que están sujetas a las reglas mecánicas conocidas (en particular, intentó probar, sin éxito, la segunda ley de la termodinámica a partir de argumentos puramente mecánicos) . Así, la introducción a la física de las herramientas matemáticas de la probabilidad que se volverían, años después, un sello distintivo de la interpretación más conocida de la cuántica (la interpretación de Copenhague) aparecieron originalmente como parte de un argumento sobre la prioridad teórica de la **mecánica** sobre la **termodinámica**, usando para ello una teoría de la materia particular (y que no era vista con mucho agrado por sus colegas físicos): la teoría cinética (la idea de que las propiedades termodinámicas macroscópicas de la materia se pueden explicar en términos de interacciones simples entre átomos o moléculas microscópicas).

Una motivación similar tenía James Clerk Maxwell cuando interpretó las ondas electromagnéticas que predecían sus ecuaciones como la oscilación de un medio material que permeaba todo el espacio y que, además de explicar en términos mecánicos (es decir, en términos de interacciones locales entre los componentes análogos a los de la teoría cinética) la propagación de la luz, coincidía con ser el marco de referencia privilegiado respecto al cual la velocidad de la luz debía medirse. La existencia de esta sustancia, conocida como éter (electromagnético), era consistente con las hipótesis “razonables” de la época (como la creencia de que las ondas sólo se pueden propagar en un medio material o la existencia de un espacio absoluto en la mecánica a partir del cual es posible medir el resto de las velocidades) y permitía preservar el papel hegemónico de la **mecánica** reduciendo las interacciones **electromagnéticas** a la dinámica de este caprichoso fluido. Si bien los detalles de la propagación dependían de encontrar la constitución del éter (un problema que resultaba experimentalmente elusivo) las predicciones teóricas coincidían tan bien con los experimentos (los de Hertz, por ejemplo) que la descripción oscilatoria de la luz se convirtió rápidamente en un rival genuino de la vieja y establecida idea (de, entre otros, Newton) de que la luz está compuesta de partículas. Lejos del debate entre estas dos posibles descripciones (¿onda o partícula?), en el proyecto de integración de Maxwell, una pregunta empírica ineludible era la de medir la velocidad de la Tierra respecto del éter. Por razones que exceden el objetivo de este escrito, la sensibilidad necesaria para medir dicha velocidad se esperaba tan delicada, que el trabajo de la pareja de físicos que diseñó el experimento capaz de realizar esa medición pasó a la historia como uno de los esfuerzos experimentales más notables. Efectivamente, el interferómetro de Michelson y Morley (M&M) no sólo

superó las cotas de sensibilidad de los detectores que se conocían sino que arrojó resultados francamente inesperados: incluso con esos niveles de detalle, no era posible medir ninguna velocidad apreciable entre la Tierra y el éter.

Entre las múltiples posibles soluciones a este resultado aparentemente negativo (en el sentido de que la reducción intuitiva del electromagnetismo a la mecánica que Maxwell tenía en mente era incapaz de explicar), voy a discutir sólo tres (por motivos de espacio dejaré fuera de este relato a participantes muy importantes como Pointcaré o FitzGerald). La primera alternativa interesante la representa la propuesta de Lorenz, quien introdujo, en sus propia opinión, un poco a la fuerza y de modo *ad hoc*, la idea de que si el fluido en el que la luz y la Tierra viajan se comprime en la dirección del movimiento una cantidad que está en función de la velocidad relativa entre ellos, entonces ningún detector en la superficie del planeta sería capaz de notar ese movimiento. De hecho, calculó la función explícita de cuánto se debe comprimir el éter, así como cuanto se deben modificar las medidas del tiempo, y desde entonces se conocen como transformaciones de Lorenz (o Lorenz-FitzGerald). Si bien es cierto que el propio Lorenz no estaba del todo convencido de la solidez de esta solución, un tanto parchada y hecha a la medida, desde el punto de vista matemático, estas transformaciones explicaban perfectamente el resultado de M&M.

La segunda alternativa proviene de Joseph Larmor, un heredero de la tradición de Maxwell, pero que, a diferencia de este, está dispuesto a renunciar al papel que tradicionalmente se le otorgaba a la mecánica y alterar el balance de prioridades a favor de la imagen electromagnética del mundo. En su visión, la masa que la mecánica usa en sus descripciones es de origen electromagnético, con lo que una teoría completa de la materia se podría obtener de la interacción entre cargas positivas, cargas negativas, y éter (todos descritos por las ecuaciones de campo de Maxwell). En esta versión, aparecen exactamente las mismas transformaciones de Lorenz, pero ya no como un parche *ad hoc* sino como una consecuencia natural de la interacción de materia (constituida por elementos que interactúan electromagnéticamente) y el éter (el medio en el que dicha interacción se propaga. Desde el punto de vista matemático esta alternativa usa exactamente las mismas transformaciones que la solución de Lorenz, pero a diferencia de aquella, la hipótesis de que toda la materia se puede explicar con electromagnetismo hace que en esta se vean como un rasgo deseable de la descripción.

II. Una solución moderna.

La tercera solución a los resultados negativos de M&M se encuentra en un famosísimo artículo de 1905 titulado “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento” y, por la forma en que contado la historia hasta aquí, es natural suponer que su autor, un tal Albert Einstein, tenía en mente el experimento de M&M cuando la propuso. Esta lectura de la aparición de la relatividad como una forma de explicar M&M es una confusión historiográfica con enorme difusión, en parte porque se adecua con facilidad a la narrativa del empirismo ingenuo según la cual la ciencia progresa porque determina las teorías verdaderas partiendo únicamente de los datos (“Hypoteses non fingo”, y esas cosas). Así, a pesar de que populares libros de texto anglosajones sugieren que los principios de la relatividad especial están “probados experimentalmente” por M&M, esto es **falso** (en el sentido histórico) y, peor aun, es una presentación simplista que pierde los elementos más interesantes e innovadores del proyecto del joven Einstein. No quiero entrar aquí en los detalles del debate historiográfico, baste decir que la lectura de los artículos originales, sumados a los comentarios que el propio Einstein hizo retrospectivamente sobre su

trabajo y los estudios que los historiadores han realizado sobre el mismo, es concluyente sobre este punto: los argumentos originales a favor de la relatividad no dependían de los resultados de M&M. Es decir, aunque formalmente son una solución a los problemas que presenta M&M, las ideas contenidas en el artículo de 1905 se desarrollaron con una motivación independiente de dicho experimento, expresada explícitamente en el párrafo inicial de ese trabajo que dice: “Es sabido que la electrodinámica de Maxwell- como la entendemos actualmente - cuando se aplica a cuerpos en movimiento, conduce a **asimetrías** que no parecen inherentes a los fenómenos”.

Recordemos que Einstein creció en el contexto de la *Einstein & Cie* (la compañía de ingeniería eléctrica que su padre y su tío fundaron en 1880) y que trabajaba como agente de patentes en Berna, por lo que no era en absoluto ajeno a la práctica experimental y el desarrollo de aplicaciones concretas del electromagnetismo, pero aun así, el documento en el que se inaugura la teoría de la relatividad especial no parte de fenómenos empíricos concretos, sino de un comentario respecto a las propiedades matemáticas de las ecuaciones de Maxwell. Lo que a Einstein le preocupaba, era restablecer la **simetría**. Cuando a continuación menciona los intentos fallidos por medir la velocidad entre la Tierra y el “medio luminoso” (que yo aquí llamé éter electromagnético) se refiere a una serie de pruebas experimentales (como el experimento de Frizeau o el fenómeno de aberración de la luz) que se hicieron en el siglo XIX en el contexto de un debate sobre la dinámica. Quiero insistir en que lo importante es que Einstein nunca argumenta que los principios de su teoría están “experimentalmente probados”.

¿Cuál es entonces la propuesta de la relatividad especial? Curiosamente, desde el punto de vista del contenido, nada sustancialmente nuevo. Sus grandes innovaciones provienen, en realidad, de la forma de estructurar resultados que ya se conocían y en su forma de interpretarlos. En la introducción del artículo, Einstein parte del hecho de que la descripción electromagnética de lo que ocurre cuando un imán se mueve hacia un conductor resultaba, en ese momento, distinta de aquella que suponía al imán quieto y al conductor en movimiento: una situación claramente asimétrica. Notemos que esta interpretación de las ecuaciones de Maxwell parece capaz de determinar qué objetos se mueven y qué objetos están “absolutamente” quietos. Esto implicaría que existe un marco de referencia privilegiado respecto del cual podemos decir si algo se mueve o no: un espacio absoluto respecto al cual el éter está inmóvil (y por lo cual queden identificados en la mayoría de las discusiones). Por ello, la estrategia del artículo de 1905 es partir de una descripción del movimiento (cinemática) en la que se omite la noción de espacio absoluto y mostrar que las descripciones electrodinámicas resultantes no violaban esa **simetría**. Es decir, en el balance de fuerzas entre “imágenes del mundo”, Einstein prefiere dejar las ecuaciones de Maxwell sin modificación y atacar frontalmente uno de los aspectos de la mecánica que más críticas recientes había recibido. Efectivamente, desde los populares comentarios de Ernst Mach a los trabajos de Newton, existía una creciente preocupación por realizar “limpia” de todas las creencias “injustificadas” o metafísicas, entre las cuales el “espacio absoluto” aparecía como principal sospechoso. Es la forma en que Einstein realiza esta “limpia”, en la que por cierto, se deshace al mismo tiempo del éter juzgándolo como “irrelevante”, la que implica la innovación que justifica que se lea este artículo como el origen de la relatividad especial.

Lo primero que hace es definir qué significa que dos eventos sean simultáneos. Es imposible aquí entrar en los detalles técnicos de la definición, pero baste con decir que los

párrafos dedicados a ese propósito cumplen la tarea de darnos una serie de operaciones que podemos realizar con pulsos de luz para sincronizar dos relojes. Esta forma de definición operativa, en la cual el significado de un término teórico como “tiempo” se equipara al conjunto de reglas que hay que satisfacer para medirlo, es similar a una propuesta previa de Poincaré, y por su uso de haces de luz, liga de manera inextricable los conceptos de tiempo, espacio, y la velocidad de la luz.

Con la definición de simultaneidad, Einstein explica qué significa un “intervalo de tiempo” y, a continuación, **postula** dos principios a partir de los cuales construye deductivamente las reglas para describir la electrodinámica de objetos en movimiento. Los postulados son:

- Las leyes de acuerdo a las cuales cambian los estados de los sistemas físicos no dependen de si estos cambios de estado se refieren a uno u otro de dos sistemas de coordenadas que se encuentran en movimiento relativo de traslación uniforme (*como el imán y el conductor*).
- Cualquier rayo de luz se propaga en un sistema de coordenadas en reposo" con cierta velocidad V , independientemente de si este rayo de luz ha sido emitido por un cuerpo en reposo o en movimiento. En este caso:

velocidad = trayectoria de la luz/intervalo de tiempo

donde el concepto de “intervalo de tiempo” se debe entender en el contexto de la definición presentada en 1.

Con estos tres ingredientes (definición operativa de “intervalo de tiempo”, principio de relatividad y principio de constancia de la velocidad de la luz), Einstein deduce que la forma en las que se transforman las ecuaciones de Maxwell cuando cambiamos de un observador a otro son exactamente las transformaciones de Lorentz, pero que ahora son interpretadas como que la cantidad de tiempo que transcurre y la longitud de los objetos, dependen de la velocidad de quien las mide. En este nuevo lenguaje, el problema original del imán y el conductor tiene descripciones simétricas sin importar a cual de los dos se describa (notoriamente, ese es un postulado de la teoría) y, por satisfacer las transformaciones de Lorentz, constituye una solución a M&M (aunque no haya sido su objetivo). Este es el punto importante: a diferencia de las explicaciones “mecánicas” de la propagación de la luz, que requerían la construcción de modelos específicos de la constitución del éter y la materia (y suponían fenómenos como la contracción de éter debido al paso de objetos por él), el tratamiento puramente “axiomático” de la formulación de Einstein le permite explicar los mismos fenómenos pero con menos hipótesis (el éter) y con mayor simetría. Misión cumplida.

III. Termodinámica, teorías de principios y temáticas.

Resulta interesante que el “ingrediente secreto” de la receta de Einstein, el tratamiento axiomático de la teoría, tiene su principal inspiración en la otra gran imagen del mundo, que hasta este momento parecía desconectada de esta discusión: la termodinámica. La característica más fértil de dicha teoría es que es capaz de establecer relaciones entre variables medibles sin construir ningún modelo de los detalles de la interacción, partiendo de unas leyes sobre la dinámica de objetos muy abstractos como la

energía o la entropía. Precisamente por El Einstein de principios del siglo XX está convencido de que ese tendría que ser el proceder de todas las teorías físicas y en gran medida, la influencia de sus estudios en termodinámica sobre el origen de la relatividad tiene un peso comparable a la crítica positivista de Mach que mencionaba previamente.

El ejemplo más importante en ese sentido es el modelo de construcción de las teorías que Einstein defiende. Mi insistencia inicial sobre la independencia de los argumentos relativistas de los resultados de M&M es justamente el hecho de que él está convencido de que no es posible deducir los principios de una teoría a partir de los datos exclusivamente. Puesto que no hay una conexión directa entre las inferencias que uno puede extraer de los datos y las leyes, las ecuaciones fundamentales, o los axiomas de una teoría, tenemos libertad total para postularlos sin necesidad de citar evidencia empírica en su favor, siempre y cuando mostremos que las consecuencias observables que se siguen de esos postulados coinciden con la evidencia que tenemos. En particular, no es necesario que esas consecuencias se deduzcan con el uso de modelos mecánicos (del tipo este engrane da vuelta y empuja a la canica que cae y le pega al resorte, etc.) y es suficiente con que se pueda establecer un argumento matemático entre lo postulado y lo observable. ¿Cuál es el mejor ejemplo de una teoría así? La termodinámica. Hablamos entonces de dos “tipos de teorías”: aquellas en las que se **construyen** los principios y aquellas en las que se **postulan**.

El problema inmediato de concebir que los principios no provienen de manera directa de los datos y que uno los puede postular, es la posibilidad de que frente a la misma evidencia exista más de una teoría que, en sus propios términos, explique esos datos. De hecho, la situación en la que aparece la relatividad es una clara muestra de ello: la teoría de la materia electromagnética (TME) de Larmor, la teoría del electrón de Lorenz y la teoría de la relatividad de Einstein (entre otras), son equivalentes empíricos en lo que respecta a la medición de la velocidad de la luz (porque las tres concluyen que se debe usar la estructura matemática de las transformaciones de Lorenz). De hecho, un físico inglés de la época podría leer el artículo de su colega alemán como irrelevante, puesto que en la tradición en la que está inscrito la TME explicaba además propiedades de la constitución de la materia. La historia de cómo la teoría menos intuitiva entre estos rivales (la relatividad) se convirtió, mucho años después, en la que se enseña en todas las universidades del mundo es materia para un estudio completamente distinto y por ahora solo quiero centrarme en los argumentos que su autor esgrimía para defenderla.

Nos encontramos entonces con un problema clásico en la filosofía de la ciencia: si es posible que más de una teoría explique satisfactoriamente los datos ¿cómo elegimos entre ellas? (conocido en el lenguaje contemporáneo como la sub-determinación de las teorías por la evidencia empírica). Un estudio que Gerard Holton hace sobre la construcción de teorías, y que estudia a detalle el caso de Einstein, sugiere que los saltos que se hacen entre la evidencia que explican y los principios de los que parte la explicación se “llenan” con consideraciones “temáticas” que no son necesariamente lógicas; guías heurísticas que responden al sentido de la estética específica de un autor o una cultura científica, o a la metafísica aceptable en un contexto particular. En el caso que nos ocupa, podemos citar 3 de estas “consideraciones temáticas”:

- **La unidad.** El mejor ejemplo se encuentra en la ecuaciones de Maxwell, que describen los fenómenos eléctricos y magnéticos. en términos de una sola entidad (el campo electromagnético). La renuncia al éter que propone Einstein hace que esa misma entidad explique además los fenómenos ópticos.

- **La simplicidad.** Si bien siempre se requieren suposiciones para llenar el salto entre los datos y las ecuaciones, debemos preferir las teorías que tengan la menor cantidad de estas, sin comprometer su poder explicativo. Si podemos prescindir del éter sin dejar de explicar fenómenos, debemos hacerlo.
- **La simetría.** Por razones que podemos considerar puramente estéticas, Einstein está convencido de que las descripciones matemáticas más simétricas tienen mayor valor epistémico. En este sentido parece compartir la opinión del poeta Paul Valéry que citaba al inicio de este texto y encuentra en la simetría la guía y la innovación de su propuesta.

No sólo en la relatividad especial, sino a lo largo de todo su proyecto científico podemos encontrar a la simetría como la cereza del pastel del "proyecto Einstein", como el elemento que, en su opinión, caracteriza las explicaciones con mayor valor científico.

IV. Conclusiones: el lenguaje y la modernidad. Recopilando entonces los elementos más importantes de la discusión anterior, encontramos que, a diferencia de algunas reconstrucciones históricas que citan la evidencia empírica (M&M) o la insatisfacción con la solución *ad hoc* de interpretar las transformaciones de Lorentz como "contracciones del éter como los elementos que motivaron la aparición de la relatividad, en este recuento las ideas de Einstein compiten con teorías rivales genuinas (como la TEM) y, para un físico teórico de aquél momento, la elección entre ellas no era, en ningún sentido trivial (es decir, que la relatividad no aparece sola y que no era posible apelar a la "verdad" para distinguir entre ella y otras). Puesto que las distintas alternativas explicaban la misma evidencia y llegaban a las mismas conclusiones matemáticas (las transformaciones de Lorentz), la diferencia entre ellas radica en la forma de presentar e interpretar los resultados (la construcción vs. la postulación de los principios), en el tipo de entidades teóricas que supone (éter o un tiempo y un espacio "relativos"), en lo que se entiende por explicación (modelo mecánico de interacciones vs descripción matemática abstracta) y finalmente, criterios para elegir entre teorías (en particular, la preferencia de Einstein por la **simetría**).

Atendiendo a la motivación original de aclarar las características de la práctica de la física teórica moderna, quiero subrayar el hecho de que las diferencias epistemológicas de la relatividad son comentarios meta científicos, filosóficos si se quiere, sobre los criterios que debería usar la ciencia para evaluar el mérito de teorías rivales. En este sentido, el ascenso del poder explicativo que la relatividad de 1905 le concede al lenguaje matemático, según el cual para explicar un fenómeno basta con tener conexiones deductivas abstractas que parten de los postulados, se convierte en la puerta de entrada de teorías muy generales, muy poco intuitivas y muy exitosas empíricamente, características claras de nuestras teorías contemporáneas. Al mismo tiempo, en tanto que ese "ascenso semántico" devalúa los modelos mecánicos como los mejores representantes de la explicación física, las teorías que lo suscriben pueden deshacerse de entidades que servían para cumplir ese rol (como el éter). El precio que hay que pagar por esta reestructuración de lo que significa una teoría es que ya no existe una conexión inferencial sólida entre la descripción matemática y la ontología que implica, por lo que la conexión entre modelos matemáticos y datos requiere ahora una interpretación (por ejemplo ¿qué significan las transformaciones de Lorentz?). Einstein sugiere que un criterio para elegir entre interpretaciones alternativas, es buscar aquella con mayor simetría.

Todas las consideraciones que menciono en el párrafo anterior están presentes, (como

espero que, después de todo lo dicho, sea claro) en la teoría de la relatividad especial, pero además, lo encontramos de manera muy similar en la física cuántica, en la relatividad general, en las teorías físicas contemporáneas, en programas de fundamentación de la matemática que surgen también a principios del siglo XX, y en programas de filosofía de la ciencia de esa misma época. Estos “meta-comentarios” sobre la normativa de las disciplinas, el reconocimiento del papel central del lenguaje en nuestra comprensión del mundo y el reconocimiento de la necesidad de incluir elementos meta-empíricos (como la simetría) para elegir entre alternativas rivales son todos rasgos de la modernidad en la física teórica. Sólo en esa modernidad un poeta puede apreciar la belleza que expresa Valery en su frase, sólo en esa modernidad puede la simetría jugar un papel tan relevante para la física.

Bibliografía

Einstein, Albert (1905b), *A new determination of molecular dimensions*. This PhD thesis was completed 30 April and submitted 20 July.

Einstein, Albert (1905a), "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt (*On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light*)", *Annalen der Physik* 17 (6): 132–148, This annus mirabilis paper on the photoelectric effect was received by *Annalen der Physik* 18 March.

Holton, G. J. (1988). *Thematic origins of scientific thought : Kepler to Einstein* (Revised [2.] edition ed.). Cambridge, Mass. [u.a.]: Harvard University Press

Hiesenberg, Werner. (1958). *Physics and Philosophy*. E.U: Prometheus Books.

Mach, E. (1960). *The science of mechanics: a critical and historical account of its development*: Open Court Pub. Co

Crelinsten, J. (2006). *Einstein's jury : the race to test relativity*

Glick, T. F. (Ed.). (1987). *The comparative reception of relativity* (Vol. 103). Dordrecht [u.a.]: Reidel

Jensen, M. (2002). Reconsidering a Scientific Revolution: The Case of Einstein versus Lorentz. *Physisc in perspective*, 4, 421-446.

Lehner, C., Renn, J. r., & Schemmel, M. (Eds.). *Einstein and the changing worldviews of physics* (Vol. 12). Boston [u.a.]: Birkhäuser.

Rynasiewicz, R., & Renn, J. r. (2006). The turning point for Einstein's 'Annus mirabilis'.

Renn, J. r. (1994). *The third way to general relativity* (Vol. 9). Berlin: Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte.

- Einstein, Albert (1905c), "On the Motion – Required by the Molecular Kinetic Theory of Heat – of Small Particles Suspended in a Stationary Liquid", *Annalen der Physik* 17(8): 549–560, [Bibcode:1905AnP...322..549E](#), [doi:10.1002/andp.19053220806](#). This annus mirabilis paper on Brownian motion was received 11 May.
- Einstein, Albert (1905d), "On the Electrodynamics of Moving Bodies", *Annalen der Physik* 17 (10): 891–921, [Bibcode:1905AnP...322..891E](#), [doi:10.1002/andp.19053221004](#). This annus mirabilis paper on special relativity was received

30 June.

Einstein, Albert. 1905. "On the Electrodynamics of Moving Bodies", *Annalen der Physik*, num. 17, vol. 10, pp. 891.

Einstein, Albert. 1905. "On the Motion – Required by the Molecular Kinetic Theory of Heat – of Small Particles Suspended in a Stationary Liquid", *Annalen der Physik*, num. 17, vol. 8, pp. 549.