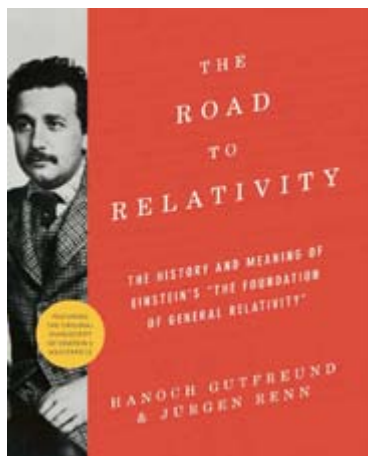


RELATIVITY: THE SPECIAL AND THE GENERAL THEORY (100TH ANNIVERSARY EDITION).

Albert Einstein. Princeton University Press, 2015.



THE ROAD TO RELATIVITY: THE HISTORY AND MEANING OF EINSTEIN'S «THE FOUNDATION OF GENERAL RELATIVITY» FEATURING THE ORIGINAL MANUSCRIPT OF EINSTEIN'S MASTERPIECE.

Hanoch Gutfreund y Jürgen Renn. Princeton University Press, 2015.

Centenario de la relatividad general

Cómo presentaban la teoría el propio Einstein y otros científicos

No hace tanto, los relativistas eran pocos y a menudo autodidactas. La relatividad general tenía todavía el estigma de ser esotérica, sin objeto y, la verdad, muy difícil. Había lugares donde se podían encontrar cursos de doctorado especializados, pero, en general, si a uno le interesaban lo más mínimo los universos en expansión y los agujeros negros, tenía que valerse de sus propios medios. Eso me pasó a mí.

Estudié ingeniería y no disfruté mucho. Pero durante el curso de electromagnetismo descubrí el mundo de la relatividad especial de Albert Einstein. Las matemáticas eran seductoras. Las paradojas dejaban atónito. Y me dispuso para aprender su teoría general de la relatividad, según la cual la fuerza gravitacional no es sino el curvarse y deformarse del espaciotiempo, que responde a la presencia de energía y masa. Para entender este punto de vista revolucionario, tuve que buscar el libro adecuado, algo que me guiase a través de las complejidades de la geometría riemanniana, que revoca las reglas de la geometría euclídea que aprendemos en el colegio. Pero tenía que entender, además, la física: la curvatura de la luz y la órbita de Mercurio.

Un libro destacaba: el de divulgación del propio Einstein, *Sobre la relatividad*

especial y general. Se publicó en Alemania en 1916, tras el fundacional artículo de Einstein de 1915 sobre la teoría general de la relatividad, y se tradujo al inglés en 1920. En 2015 vemos la publicación de una edición especial en inglés para celebrar el centenario (*Relativity: The special and the general theory*), así como la de una versión anotada del manuscrito del artículo (*The road to relativity*), de Hanoch Gutfreund y Jürgen Renn.

Se suponía que *Sobre la relatividad*, el libro de Einstein, aunque comprensible para cualquiera, tenía las matemáticas suficientes para que el lector más formado llegase al meollo de sus ideas. En realidad exhibe muy pocas ecuaciones; resulta así menos explicativo y más ilustrativo. Pero palabras hay muchas, sin duda. Einstein se puso la tarea de explicar los conceptos e ideas en que se basa su teoría mediante situaciones de la vida cotidiana, como trenes que se mueven sobre terraplenes y relojes a bordo y en tierra. Su prosa está atemperada con algunas consideraciones filosóficas; discute, por ejemplo, la suposición a priori de que existe el espacio vacío.

No sé si atreverme a decir que me pareció que la prosa no era elegante. Me cogió por sorpresa. Había leído algunos de los artículos que Einstein publicó en 1905, entre ellos el que formulaba la re-

latividad especial, y los tenía por joyas. *Sobre la relatividad*, en cambio, no era especialmente claro y sí un poco romo. Einstein anunciaba en la introducción que se iba a repetir con frecuencia, «sin prestar la menor atención a la elegancia de la presentación». Puede que ahí siguiese la máxima del físico Ludwig Boltzmann, quien precisó el concepto de entropía y declaró que las «cuestiones de elegancia hay que dejárselas al sastre y al zapatero». No obstante, el intento de Einstein de escribir de modo popular produce una sensación de franqueza, porque no esquivo las dificultades. Su teoría entera estaba, en cierta medida, en el libro, pero el tratamiento no parecía funcionar, y él lo sabía. Le comentó a un amigo, el ingeniero suizo-italiano Michele Besso, que el libro era «bastante acartonado». Años más tarde, bromearía diciéndole al físico polaco Leopold Infeld que la inscripción de la portada, «comúnmente comprensible», debería cambiarse por «comúnmente incomprensible».

Tras rendirme con Einstein, busqué qué más había y di con mucho donde elegir. En cuanto Einstein sacó su teoría, otros la tomaron e hicieron suya. Arthur Eddington, el astrónomo británico que midió la curvatura de la luz en 1919 durante una expedición para observar un eclipse, escribió en 1923 un tratado matemático sobre la teoría del espaciotiempo, bellamente elaborado. Erwin Schrödinger, uno de los padres de la física cuántica, presentó en 1950 su versión, más conceptual, en *La estructura del espaciotiempo*. La reservada personalidad de otro pionero cuántico, Paul Dirac, se refleja en las notas de su disertación sobre la teoría: menos de setenta páginas publicadas en 1975 como *La teoría general de la relatividad*. Euforia y creatividad brotan de las 1200 páginas de la gigantesca *Gravitación*, obra de 1973 de John Archibald Wheeler y sus discípulos Charles Misner y Kip Thorne. No sabía con cuál quedarme.

Aunque nunca me valí de él, el libro de Einstein seguiría presentándose en mi vida. Como siento una inclinación por las librerías de viejo, he ido encontrando traducciones, cada una con su propia historia. La versión francesa se debió primero a Jeanne Rouvière, protegida del matemático y político Emile Borel, y luego la amplió Maurice Solovine, amigo de Einstein. El matemático Tullio Levi-Civita, cuya obra influyó mucho en que Einstein se viese atraído por la geometría riemanniana, recomendó a un ingeniero, Giuseppe Luigi Calisse, para que lo tradujese al italiano. De la traducción al

ruso se encargó el lógico y filósofo judío Gregorius Itelson, que vivía en Berlín y murió en 1926 a consecuencia de la paliza que le dio una turba antisemita.

Hoy, el libro de Einstein es una curiosidad histórica. No creo que nadie lo lea todavía de la manera que él pretendía. Ha habido tantos intentos de divulgar la teoría, de especialistas y de periodistas, que cualquiera podrá encontrar un libro que sea de su gusto. Y en el siglo que

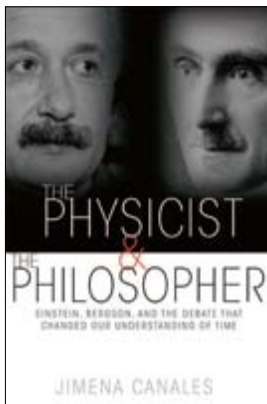
ha pasado desde su publicación hemos aprendido mucho: un libro de divulgación sobre la relatividad tendrá hoy que hablar del universo en expansión y de la gran explosión, de los agujeros negros y de las singularidades. Estas exóticas predicciones de la relatividad general, de las que Einstein desconfió en un principio, han robado toda la atención.

Sin embargo, aún puedo verle alguna magia fugitiva a *Sobre la relatividad*,

pese a su tono «acartonado». Nos evoca a Einstein como el oráculo que presenta una teoría al mundo, una de las teorías más revolucionarias y profundas de todos los tiempos.

—Pedro Ferreira
Universidad de Oxford

Reseña original publicada en *Nature*, vol. 520, págs. 621-622, 2015. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015



**THE PHYSICIST AND THE PHILOSOPHER.
EINSTEIN, BERGSON, AND THE DEBATE THAT
CHANGED OUR UNDERSTANDING OF TIME.**

Jimena Canales. Princeton University Press,
Princeton, 2015.

Ciencia y filosofía, ¿un diálogo de sordos?

*El tiempo de Einstein y el Tiempo
de Bergson*

En el centenario de la publicación de la teoría de la relatividad general, el físico Albert Einstein vuelve a las portadas. Documentales, exposiciones y libros le atribuyen haber ligado inseparablemente el tiempo y el espacio, superando la concepción newtoniana de la gravitación. Una revolución que convirtió a Einstein en un icono pop del genio científico y que está en la base de la astrofísica y cosmología modernas. La cosa parecería merecer el máximo reconocimiento a la labor científica, el premio Nobel. Sin embargo, no fue así.

En 1921 Einstein obtuvo el Nobel por su artículo de 1905 sobre el efecto fotoeléctrico, pero no por las teorías de la relatividad especial y general. El presidente del jurado sueco atribuyó explícitamente tal decisión a las dudas vertidas por el filósofo francés Henri Bergson sobre la científicidad de las conclusiones que Einstein extraía acerca del tiempo. Para Bergson, la decisión del jurado suponía la aceptación pública por los popes de la física de que la filosofía tenía un terreno propio que la física no podía ocupar. Todo un éxito, teniendo en cuenta que la institución no considera premiable a la filosofía (en 1928 el propio Bergson obtuvo el Nobel... de literatura).

Como explica Jimena Canales en su libro sobre el debate Einstein-Bergson, la

victoria de Bergson fue pírrica y contribuyó a su propio descrédito y progresivo olvido en proporción inversa a la que crecían la fama y el prestigio de Einstein. Paralelamente, el prestigio de la ciencia ha eclipsado en estos últimos cien años al de la filosofía académica iniciada por Platón. Pero ¿cuáles eran las objeciones de Bergson y qué significado pueden tener en nuestros días?

The physicist and the philosopher reconstruye al detalle el contexto del debate que el físico y el filósofo mantuvieron en París el 6 de abril de 1922. Einstein, y tras él muchos comentaristas, reconstruyó la posición de Bergson como producto de su supuesta falta de conocimientos físicos y matemáticos. Pero, como demuestra Canales, Bergson estudió y entendió las ecuaciones de Einstein, sobre todo las de la relatividad especial, y las aceptó, aunque solo para determinadas condiciones. Lo que el francés objetaba era la extrapolación de las ecuaciones relativistas a terrenos ajenos a la física, en especial a la idea de simultaneidad. En *Duración y simultaneidad*, publicado al poco del debate de París, Bergson recurrió a las mayúsculas para explicar que lo que no admitía era el secuestro de la idea filosófica de Tiempo por el concepto físico de tiempo.

Para Einstein, la simultaneidad se establecía objetivamente por la coordinación entre dos relojes. Cualquier otra aproximación era subjetiva y psicológica y, por tanto, ilusoria, como según él lo era la propia flecha del tiempo. Para Bergson, en cambio, existían determinaciones biológicas, psicológicas e históricas que el concepto físico no podía contener ni reducir. Si el sujeto observador del tren y el sujeto observador del andén eran de carne y hueso, no responderían a las ecuaciones relativistas. Una filosofía del tiempo debía tener en cuenta no solo el concepto físico, sino los resultados de otras disciplinas. Para Einstein, el único concepto objetivable era el físico y la tarea del filósofo era amoldar otras concepciones del tiempo a los nuevos resultados relativistas. Desde entonces, el debate sobre las relaciones entre la ciencia y la filosofía se repite periódicamente. La filosofía parece destinada o bien a glosar y divulgar nuevos resultados científicos o a perderse en especulaciones metafísicas de espaldas a la ciencia. ¿Hay salida a este diálogo de sordos? [Véase «Física y filosofía», por Francisco José Soler Gil; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2013.]

Canales propone dar un paso atrás y estudiar la historia de esta oposición y los contextos en los que surgió. En su relato, la oposición misma se disuelve, no sirve para dar cuenta de la masa de fenómenos en liza y parte de presupuestos falsos. Para empezar, no hay una Ciencia con mayúsculas cuyos resultados estén unificados. Tampoco «la filosofía» existe como tal, sino que hay múltiples sistemas de ideas incompatibles entre sí. Los conceptos científicos y las ideas filosóficas forman una trama inseparable. *The physicist and the philosopher* es una historia no maniquea de la dicotomía de las dos culturas, del «¿eres de ciencias o de letras?». La profesora de la Universidad de Illinois, licenciada en física en México y doctora en historia por Harvard, es la persona indicada para la

tarea. Su primer libro (*A tenth of a second*, 2009) también analizaba las transformaciones de la idea de tiempo en diversas disciplinas científicas y técnicas a finales del siglo XIX y principios del XX. Y ha dedicado numerosos artículos a las conexiones entre innovaciones tecnológicas e ideológicas, algunos disponibles en español.

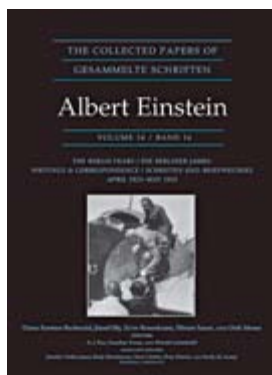
En esta ocasión, a lo largo de más de 400 páginas escritas con contundente claridad y elegancia, Canales nos introduce por los entresijos del debate, sus precedentes y sus consecuencias. La primera parte traza las líneas del campo de batalla e introduce al lector en la complejidad de las posiciones; y no solo respecto al problema del tiempo, puesto que los dos personajes provenían de tradiciones educativas, cien-

tíficas y políticas muy distintas. La segunda parte del libro, la más larga, profundiza en los contextos científicos, sociológicos, ideológicos e incluso religiosos del debate y en su inmensa repercusión. Nos recuerda Canales que físicos de la talla de Poincaré, Lorentz o Michelson estaban más cerca de Bergson, mientras que filósofos como Russell se inclinaban por la posición de Einstein. En *La filosofía de Bertrand Russell*, Javier Pérez Jara ha situado admirablemente la posición de Russell sobre este tema en el conjunto de su sistema. La tercera parte del libro de Canales es, sin duda, la más original. Indaga en los cambios tecnológicos que, de un modo u otro, intervinieron en el debate: relojes, telégrafos, radio, cinematógrafos y otros

muchos nuevos aparatos que obligaban a revisar conceptos e ideas tradicionales y ante los que Einstein y Bergson reaccionaron de manera a veces sorprendentemente similar.

A pesar de los años transcurridos y los importantes desarrollos ocurridos desde entonces, somos herederos del debate entre Einstein y Bergson. Tanto en lo concerniente al concepto científico-categorial de tiempo y la idea filosófica de Tiempo, como en lo relativo a la formulación de la pregunta sobre el diálogo entre ciencia y filosofía. Una pregunta que, como repite la autora, suele estar mal planteada.

—Lino Camprubí
*Instituto Max Planck
 para la Historia de las Ciencias, Berlín*



ALBERT EINSTEIN. VOLUME 14. THE BERLIN YEARS: WRITINGS & CORRESPONDENCE, APRIL 1923-MAY 1925.

Dirigido por Diana Kormos Buchwald, József Illy, Ze'ev Rosenkranz, Tilman Sauer y Osik Moses. Princeton University Press, Princeton, 2015.

Einstein

Primeras reflexiones sobre la relatividad

El siglo XX fue testigo privilegiado de las dos revoluciones más importantes que haya conocido la explicación física del mundo: la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Solo una mente excepcional pudo percatarse de la constitución profunda de la naturaleza y poner cimientos roqueños de ambas. Aconteció en el año 1905. En el legado se incluían nociones de espacio y tiempo, de materia y energía, que disuenan con nuestra experiencia diaria.

A los dieciséis años, Einstein soñaba ya con cazar la luz. Razonaba que, si corría más deprisa que ella, la luz se le ofrecería como un patrón ondulatorio de campos eléctricos y magnéticos congelados en el tiempo; pero algo así no presentaba visos de existir. Diez años más tarde, el sueño tomó cuerpo en la teoría especial de la relatividad, que prohíbe captar la luz, supera la concepción clásica de espacio y tiempo y echa los cimientos de la física moderna.

Entre marzo y septiembre de 1905, Einstein escribió cinco artículos en *Anna-*

len der Physik que ejercieron una influencia determinante en la física posterior. A partir de consideraciones entrópicas, argumentaba que la luz constaba de cuantos; disertaba sobre la determinación de las dimensiones moleculares; expuso su teoría del movimiento browniano; avanzó la teoría de la relatividad especial e introdujo la derivación de $m = E/c^2$.

El movimiento browniano, descubierto en 1828, remite al movimiento aleatorio de partículas en suspensión. Los cálculos de Einstein aportaron la prueba más directa y el fenómeno fue confirmado experimentalmente en 1908 por Perrin. Einstein abordó el efecto fotoeléctrico a través de la naturaleza de la radiación electromagnética en el contexto de las ecuaciones de Maxwell. Supuso que la energía lumínica se transmitía en paquetes discretos, los cuantos de Planck. En 1905, los físicos creían que el espacio constituía un gran marco en el que se desarrollaba el relato del universo y que el tiempo unía a todos los actores en un mismo compás. Al

negar todo ello, la relatividad especial sustituía un espacio y un tiempo entendidos como entidades distintas en una sola entidad, el espaciotiempo. Combinada con la mecánica cuántica, la teoría especial de la relatividad ayudaba a explicar la estabilidad de la materia (requiere incluso la existencia de antimateria).

Einstein fue aplaudido como el nuevo Copérnico. Si el astrónomo polaco nos sacó del centro del universo para alojarnos en la periferia, Einstein revolucionó nuestros conceptos de espacio y tiempo. Pasaron más de cien años hasta que la idea de Copérnico de un universo centrado en el Sol calara en la cultura general. No hemos de extrañarnos, pues, de que las nociones einsteinianas de espacio y tiempo no acaben de integrarse en nuestra manera habitual de pensar. Seguimos viviendo en un mundo newtoniano. Percibimos todavía el espacio como una suerte de cuadro en cuyo interior vivimos y nos movemos.

El concepto fundamental de la relatividad de Einstein era que los observadores en movimiento podían considerarse a sí mismos en reposo. Primero exploró esa noción en el caso del movimiento uniforme. Los observadores que se mueven en línea recta a velocidad constante se someterán a las mismas leyes de la física. Los observadores en movimiento relativo no estarán de acuerdo en la simultaneidad de los acontecimientos; discreparán a propósito de la longitud de los objetos en la dirección de movimiento y sobre las velocidades de los relojes. Nada puede moverse más deprisa que la velocidad de la luz. Energía y masa son equivalentes. La materia es energía hecha manifiesta.

Cinco años después de que escribiera su primer artículo sobre la relatividad, los astrónomos comenzaron a debatir las implicaciones de la misma en la gravitación y en la mecánica newtoniana. En 1911, Einstein publicó nuevos cálculos, basados en el principio de equivalencia, prediciendo ciertos efectos astronómicos mensurables. Los tests de tales predicciones se apoyaban en técnicas refinadas de fotografía astronómica y espectrografía.

Einstein extendió su principio de relatividad a movimientos acelerados y terminó con una teoría de la gravitación radicalmente diferente de la propuesta por Newton. La energía-masa distorsiona el espaciotiempo. Los planetas se mueven en órbitas a lo largo de trayectorias curvas bajo la influencia de cualquier fuerza. Einstein publicó su teoría general de la relatividad en 1915, en los días negros de la Primera Guerra Mundial. Contenía tres predicciones, todas ellas de carácter astronómico. Una explicaba con nitidez la anomalía persistente de la órbita medida de Mercurio. Las otras dos eran el corrimiento al rojo de líneas espectrales emitidas por grandes cuerpos gravitantes y la desviación de la trayectoria de la luz en un campo gravitatorio, que se dejaba observar como un desplazamiento centrífugo de las estrellas en la vecindad del Sol en eclipse. Muy pronto los astrónomos verificaron la predicción de la desviación de la luz. Su anuncio catapultó a Einstein y su teoría a la cúspide de la fama mundial. En pocos años, los astrónomos mostraron que el tercer efecto existía en el Sol.

En 1921 le concedieron el Nobel de física por el trabajo de 1905 «Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz», el efecto fotoeléctrico, donde cuestionaba la teoría ondulatoria de la luz y sugería que podía entenderse también como un conjunto de partículas, lo que abrió las puertas al mundo de la física cuántica. La fama internacional de Einstein realzó la valoración de la ciencia alemana. Deliberadamente aprovecha su popularidad para difundir causas políticas (sionistas) y promover el conocimiento científico, que él reputa inextricablemente unidos, como en el caso de la fundación de la Universidad Hebrea de Jerusalén. La política, razona, no debe inmiscuirse en asuntos de la ciencia, ni los individuos son responsables de la acción del Estado.

Las epístolas reflejan el estado de la ciencia. Repárese en su relación con Hermann Weyl o con Hendrik A. Lorentz. Al

primero le envía las pruebas del artículo sobre la función hamiltoniana generalizada, ponderando la versión que da. Con motivo del septuagésimo cumpleaños del segundo le escribe (15 julio de 1923): «Me encuentro profundamente vinculado a usted, mi maestro en asuntos de ciencia, cuyos pasos he seguido y conducen al factor más importante de mi vida. Y no solo en ciencia, sino también en asuntos humanos, en los que usted es un modelo ideal».

Pero el volumen incluye, entre otros ensayos, la conferencia sobre «Ideas y problemas fundamentales de la teoría de la relatividad», dictada en julio de 1923 en Gotenburgo, una primera valoración de sus ideas innovadoras. El desarrollo entero de la teoría, afirma, gira en torno a la cuestión de si existen o no en la naturaleza dos estados de movimiento físicamente distintos. Otro tema clave es el postulado de realidad de conceptos y distinciones.

Ambos aspectos nos resultan cristalinos si los aplicamos a un caso particular: la mecánica clásica. En primer lugar, observamos que, en cada punto ocupado por materia, existe un estadio privilegiado de movimiento, a saber, el movimiento de la materia en el punto observado. Pero el problema empieza con la cuestión de si existen estados de movimiento físicamente preferidos con respecto a regiones extensas. Para Einstein solo podemos pensar en el movimiento como movimiento relativo entre cuerpos. En mecánica, cuando uno habla de movimiento per se, está hablando de movimiento con respecto a un sistema de coordenadas. Esta interpretación no se ajusta al postulado de realidad, aun cuando el sistema de coordenadas se considere un mero constructo mental. En física experimental, el sistema de coordenadas corresponde siempre a un cuerpo rígido. Se parte, además, del supuesto de que tales cuerpos rígidos permiten ser orientados al resto de los cuerpos, como los cuerpos de la geometría euclídea.

La teoría especial de la relatividad es una adaptación de los fundamentos de la física a la electrodinámica de Maxwell-Lorentz. De la física que le precedió toma la idea de validez de la geometría euclídea para las posiciones posibles de cuerpos rígidos, el marco inercial y la ley de inercia. Da por válido, para la física entera, el principio de equivalencia de los marcos inerciales en la formulación de las leyes de la naturaleza (principio de relatividad especial). De la electrodinámica de Maxwell y Lorentz toma el postulado de la

constancia de la velocidad de la luz en un vacío (principio de luz).

Las leyes de transformación para las coordenadas de espacio y de tiempo para la transición de un marco inercial a otro, las así llamadas transformaciones de Lorentz, vienen inequívocamente determinadas por esas definiciones y las hipótesis inherentes en el supuesto de que se encuentren libres de contradicción. El contenido físico inmediato de estas transformaciones descansa en el efecto del movimiento en relación con el marco inercial utilizado en forma de cuerpo rígido (contracción de Lorentz) y descansa también sobre la velocidad de los relojes. De acuerdo con el principio especial de la relatividad, las leyes de la naturaleza han de ser covariantes con respecto a las transformaciones de Lorentz; la teoría aporta, pues, un criterio para las leyes generales de la naturaleza. En particular, conduce a una modificación de la ley newtoniana del movimiento de un punto, en la que la velocidad de la luz en el vacío figura como velocidad limitante; y conduce a la idea de una igualdad esencial entre energía y masa inercial.

La teoría especial de la relatividad comportó avances sustanciales. Reconcilió la mecánica con la electrodinámica. Redujo el número de hipótesis de esta última mutuamente independientes. Potenció el esclarecimiento epistemológico de los conceptos fundamentales. Unificó las leyes del momento y de la conservación de la energía. Demostró la unidad esencial de masa y energía. Con todo, no resulta plenamente satisfactoria, aparte de los problemas cuánticos.

Newton reconocía ya que la ley de inercia era insatisfactoria. A los cuerpos materiales observables los hacía responsables del comportamiento gravitatorio de un punto material, pero no señalaba ninguna causa material del comportamiento inercial del punto material, sino que ofrecía solo una causa ficticia de ello. Eso no era lógicamente recusable, pero resultaba insatisfactorio. Por ese motivo, Mach reclamaba una modificación de la ley de inercia, de suerte que la inercia se concibiera como resistencia a la aceleración por cuerpos entre sí y no frente a un espacio. Esta interpretación comporta la esperanza de que los cuerpos acelerados posean una acción acelerada concordante sobre otros cuerpos (inducción de aceleración). La relatividad general elimina la separación entre efectos inerciales y efectos gravitatorios.

—Luis Alonso