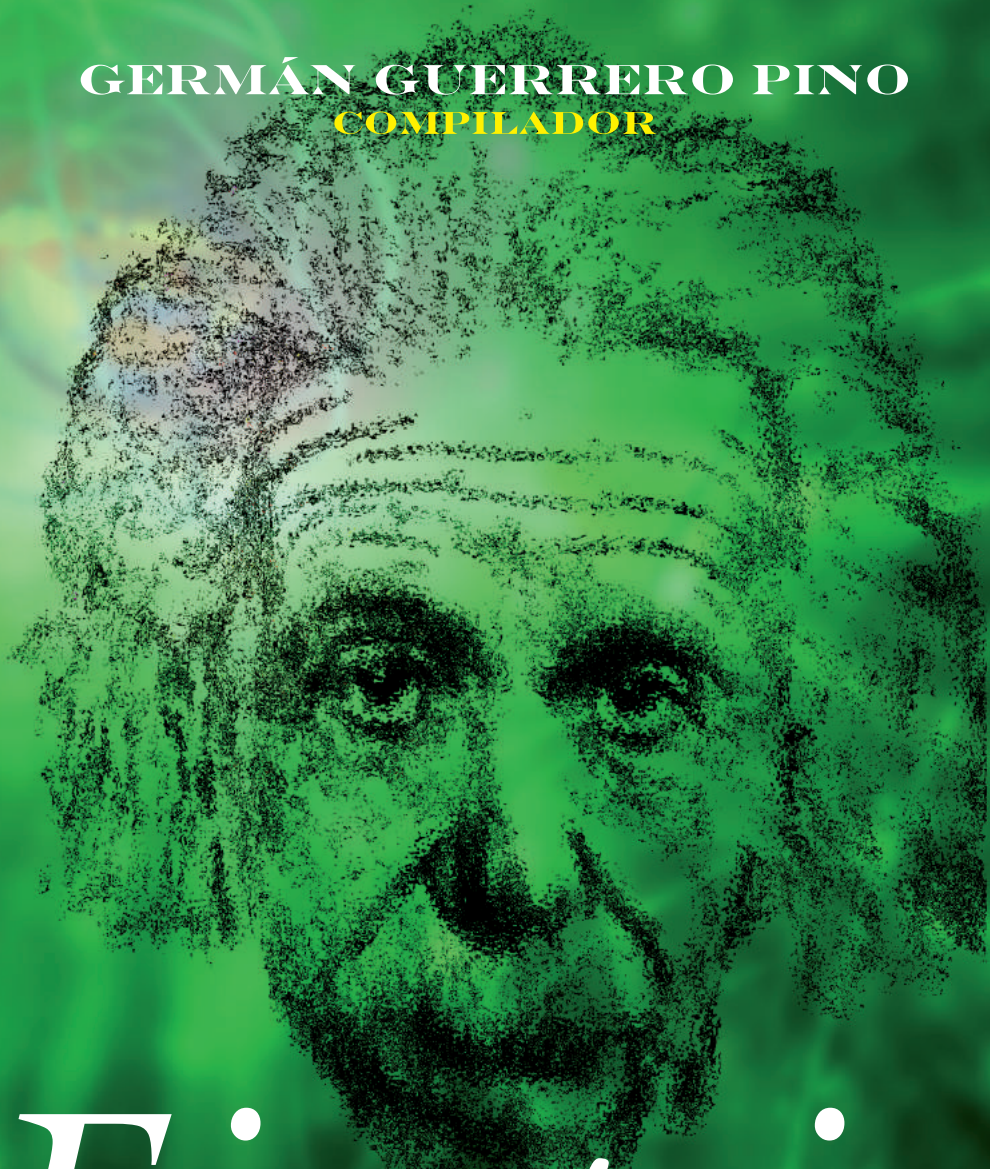


GERMÁN GUERRERO PINO  
COMPILADOR



# *Einstein*

**CIENTÍFICO Y FILÓSOFO**



Universidad  
del Valle

Programa  editorial

# **Einstein: científico y filósofo**



Colección Humanidades  
Filosofía

El título del libro, *Einstein: científico y filósofo*, delimita muy bien el sentido de la presente obra y de sus distintas contribuciones: presentar a los amables lectores la manera *sui generis* y fecunda como se complementan el trabajo científico y la reflexión filosófica en la producción intelectual y creativa de Albert Einstein. Es bien sabido del número importante de contribuciones de Einstein en las ciencias físicas a comienzos del siglo XX y lo significativas que fueron, y lo siguen siendo, por contener nuevos puntos de vista sobre la forma de encarar el estudio de la naturaleza física y el conocimiento científico, en particular, la creatividad científica. Einstein es un digno ejemplo donde ciencia y filosofía confluyen de manera fértil, sin que una esté supeditada a la otra. Con las gráficas y elocuentes palabras del propio Einstein: “en tiempos como el presente, cuando la experiencia nos compele a buscar una nueva y más sólida fundamentación, el físico no puede simplemente entregar al filósofo la contemplación crítica de los fundamentos teóricos, porque nadie mejor que él puede explicar con mayor acierto dónde le aprieta el zapato”.

La compilación consta de doce artículos de doce destacados profesores, la mayoría de ellos con un reconocido prestigio internacional: Favio E. Cala, Carlos A. Cardona, Juan C. Granada, Germán Guerrero, Décio Krause, Regino Martínez, Héctor A. Múnera, Gonzalo Munévar, Michel Paty, Luis G. Pedraza, Andrés Rivadulla y Ángel E. Romero.

El libro hace aportes importantes en física teórica, historia general de la física e historia de la física en Colombia, pero sobretudo en filosofía de la ciencia (filosofía de la física). Así que esperamos que la presente compilación sea un impulso más para el desarrollo de la filosofía de la ciencia en nuestro país, que se encuentra en estado de consolidación. Pero dicho esto, hay que subrayar que la pertinencia del libro es tanto local como internacional en estos distintos campos del saber, los cuales se complementan entre sí.



**Germán Guerrero Pino**

Compilador

# **Einstein: científico y filósofo**



Colección Humanidades  
Filosofía

Guerrero Pino, Germán

Einstein : científico y filósofo / Germán Guerrero Pino. -- Cali : Editorial Universidad del Valle, 2010.

411 p. ; 24 cm. -- (Colección Artes y Humanidades)

ISBN 978-958-670-835-7

1. Einstein, Albert, 1879-1955 - Crítica e interpretación 2. Relatividad (Física) 3. Teoría del conocimiento científico 4. Filosofía de la ciencia

I. Tít. II. Serie.

530.01 cd 21 ed.

A1270839

CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango

## Universidad del Valle Programa Editorial

Título: *Einstein: científico y filósofo*

Compilador: Germán Guerrero Pino

ISBN: 978-958-670-835-7

ISBN PDF: 978-958-765-618-3

DOI: 10.25100/peu.74

Colección: Humanidades - Filosofía

**Primera Edición Impresa octubre 2010**

**Edición Digital febrero 2018**

Rector de la Universidad del Valle: Édgar Varela Barrios

Vicerrector de Investigaciones: Javier Medina Vásquez

Director del Programa Editorial: Francisco Ramírez Potes

© Universidad del Valle

© Germán Guerrero Pino

Diagramación: Unidad de Artes Gráficas de la Facultad de Humanidades

Este libro, o parte de él, no puede ser reproducido por ningún medio sin autorización escrita de la Universidad del Valle.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión del autor y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad del Valle, ni genera responsabilidad frente a terceros. El autor es el responsable del respeto a los derechos de autor y del material contenido en la publicación (fotografías, ilustraciones, tablas, etc.), razón por la cual la Universidad no puede asumir ninguna responsabilidad en caso de omisiones o errores.

Cali, Colombia, febrero de 2018

## CONTENIDO

Prólogo	7
Inercia con fuentes materiales o la eliminación de los sistemas inerciales: sobre lo propuesto por Mach y lo hecho por Einstein <i>Favio Ernesto Cala Vitery</i>	11
Teoría especial de la relatividad y conocimiento <i>a priori</i> <i>Carlos Alberto Cardona Suárez</i>	31
Génesis de la teoría general de la relatividad <i>Juan Carlos Granada E.</i>	67
La realidad del espacio físico: entre teoría y experiencia <i>Germán Guerrero Pino</i>	83
¿Pueden ser separables las entidades indiscernibles? Ensayo sobre posibles consecuencias de una posición de Einstein frente a la indiscernibilidad <i>Décio Krause</i>	121
Acerca de la masa y su tratamiento dado por Einstein y Garavito <i>Regino Martínez-Chavanz</i>	141
El experimento de Michelson-Morley y el segundo postulado de Einstein: inextricablemente unidos <i>Héctor A. Múnera</i>	245

Einstein y el límite de la velocidad de la luz <i>Gonzalo Munévar</i>	291
Einstein 1905: inteligibilidad racional y creación científica <i>Michel Paty</i>	309
El punto físico como límite de la experiencia geométrica en cuatro experimentos de pensamiento <i>Luis Gerardo Pedraza Saavedra</i>	333
Albert Einstein y la filosofía actual de la ciencia <i>Andrés Rivadulla</i>	365
La perspectiva relativista del mundo físico en el siglo XVIII. Los aportes de L. Euler <i>Ángel E. Romero</i>	383

## PRÓLOGO

Este libro data de finales de 2005, cuando me encontraba con los inestimables colegas Michel Paty y Regino Martínez celebrando lo exitoso que había sido el *Simposio internacional “Einstein: científico, filósofo y humanista. Centenario de una visión del mundo”*, que se realizó del 28 de noviembre al 2 de diciembre de ese año, con el apoyo de la Facultad de Ciencias, el Instituto de Educación y Pedagogía, la Facultad de Humanidades y el Departamento de Filosofía de la Universidad del Valle.

En aquella ocasión, los profesores Paty y Martínez me propusieron el proyecto de elaborar un libro sobre Einstein a partir de las memorias del simposio que se habían publicado en cd-rom, pues consideraban que allí había un material valioso, de excelente calidad académica. El proyecto se alargó en el tiempo porque vimos, en un primer momento, la necesidad de mejorar el material seleccionado de las memorias. Así, por ejemplo, la conferencia del profesor Paty, que estaba en francés, se tradujo al español, y los artículos de los profesores Cala, Granada, Múnera y el mío mismo fueron revisados y ampliados significativamente. Por otra parte, los profesores Krause, Martínez y Pedraza, que habían participado en el simposio, decidieron elaborar nuevos artículos para el libro. Finalmente, entretanto se concretaban estos artículos, se invitó a colaborar a otros colegas, con quienes no habíamos contado en el simposio, y es así como los profesores Cardona, Munévar, Rivadulla y Romero se unieron al proyecto.

Sea esta la oportunidad para agradecer a todos ellos por el esmero que han puesto en la elaboración de las contribuciones, la paciencia que



han tenido durante el prolongado tiempo que llevó contar con todos los artículos y el cuidado de los detalles en el proceso de edición y publicación del libro.

El título del libro delimita muy bien el sentido de la presente obra y de sus distintas contribuciones: presentar a los amables lectores la manera sui generis y fecunda como se complementan el trabajo científico y la reflexión filosófica en la producción intelectual y creativa de Albert Einstein. Hans Reichenbach, con quien Einstein discutió en distintas ocasiones sobre los fundamentos de la teoría de la relatividad, resalta muy bien esta peculiaridad de su trabajo cuando dice: “Einstein no es un matemático formal, ocupado sólo en desarrollar teorías matemáticas. Por el contrario, piensa analíticamente, esto es, se preocupa de aclarar el significado de los conceptos. Las matemáticas sólo constituyen, para él, un medio de expresar un proceso intuitivo –un proceso que se origina en fuentes inconscientes y para el cual el lenguaje formal representa meramente la estructura. Es un raro don de la fortuna encontrar reunidos, en una sola mente, una intuición filosófica y un talento para las matemáticas y la física. Sólo una mente que combinase estos rasgos podía crear la teoría de la relatividad” (“Estado actual de la discusión sobre la relatividad”, 1921).

Es bien sabido del número importante de contribuciones de Einstein en las ciencias físicas a comienzos del siglo XX y lo significativas que fueron, y lo siguen siendo, por contener nuevos puntos de vista sobre la forma de encarar el estudio de la naturaleza física y el conocimiento científico, en particular, la creatividad científica. Einstein es un digno ejemplo donde ciencia y filosofía confluyen de manera fértil, sin que una esté supeditada a la otra. Con las gráficas y elocuentes palabras del propio Einstein: “en tiempos como el presente, cuando la experiencia nos compele a buscar una nueva y más sólida fundamentación, el físico no puede simplemente entregar al filósofo la contemplación crítica de los fundamentos teóricos, porque nadie mejor que él puede explicar con mayor acierto dónde le aprieta el zapato” (“Física y Realidad”, marzo de 1936).

Para organizar el contenido del libro recurrí a un criterio un tanto simplista, por orden alfabético de la primera letra del primer apellido del colaborador, pues me fue imposible agrupar los distintos artículos en subtemas; aunque, desde luego, en cada uno de ellos sobresale el tratamiento de cuestiones específicas de la física en su respectivo contexto filosófico.

El libro hace aportes importantes en física teórica, historia general de la física e historia de la física en Colombia, pero sobre todo en filosofía de la ciencia (filosofía de la física). Así que esperamos que la presente

compilación sea un impulso más para el desarrollo de la filosofía de la ciencia en nuestro país, que se encuentra en estado de consolidación. Pero dicho esto, hay que subrayar que la pertinencia del libro es tanto local como internacional en estos distintos campos del saber, los cuales se complementan entre sí.

Quisiera terminar agradeciendo al Departamento de Filosofía de la Universidad del Valle por el apoyo académico que me ha brindado durante estos años de preparación del libro y al profesor Víctor Hugo Dueñas, director del Programa Editorial de la Universidad del Valle, por su apoyo comprometido en la concreción de este proyecto y por los cuidados en la edición y publicación del libro.

*Germán Guerrero Pino*  
Cali, agosto de 2010

**PÁGINA EN BLANCO  
EN LA EDICIÓN IMPRESA**

# INERCIA CON FUENTES MATERIALES O LA ELIMINACIÓN DE LOS SISTEMAS INERCIALES: SOBRE LO PROPUESTO POR MACH Y LO HECHO POR EINSTEIN\*

*Favio Ernesto Cala Vitery*<sup>†</sup>

## Resumen

Según Ernst Mach, el movimiento absoluto es una noción mal establecida, epistemológicamente objetable. Siguiendo a Mach, Einstein intentó eliminar el movimiento absoluto de la dinámica clásica para implementar la *relatividad del movimiento entre cuerpos materiales*. Pero, mientras Mach pensaba que para ello era preciso derivar la dinámica y la inercia a partir del conjunto de interacciones que relacionan a las partes materiales del universo en su conjunto, Einstein convirtió el problema de la relatividad del movimiento, en el problema de la eliminación de los sistemas de referencia privilegiados (inerciales). Se distingue lo que el primero proyectó de lo que el segundo, finalmente, hizo.

---

\* El presente artículo es una versión ampliada y revisada del texto de la conferencia que ofrecí, con el título “La relatividad del movimiento o la eliminación de los sistemas inerciales; sobre lo que Mach dijo y lo que Einstein hizo”, en el *Simposio Internacional “Einstein: científico, filósofo y humanista. Centenario de una visión del mundo”*, Universidad del Valle, noviembre de 2005, y que fue publicada en las memorias del evento en CD-ROM, Unidad de Artes Gráficas, Facultad de Humanidades, 2005, Cali-Colombia.

<sup>†</sup> Director del Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano.  
Correo electrónico: favio.cala@utadeo.edu.co

## INTRODUCCIÓN

En 1883, Ernst Mach (1837-1916) publicó su *Science of Mechanics*. El libro, como buena parte del conjunto del pensamiento de Mach, no tardaría en ejercer influencia entre sus contemporáneos y herederos intelectuales. Esto porque, en éste, además de pretender una clara exposición retrospectiva sobre los orígenes conceptuales de la mecánica, Mach dedicó especial atención a las nociones absolutas de espacio, tiempo y movimiento empleadas por Newton en sus *Principia*.

Sus agudas críticas le ubicaban en la tradición del largo periplo de discusiones al respecto inaugurado desde el nacimiento de la mecánica por el debate Newton- Leibniz (Alexander (ed.), 1956). Para Mach, el movimiento absoluto o, mejor, el movimiento con respecto al espacio absoluto no era más que un fantasma metafísico, un atavismo medieval que parecía recuperar las ilusorias esferas del cosmos Ptolemaico, y que por tanto había que desterrar del cuerpo de la mecánica. En su lugar, cualquier movimiento debía entenderse como movimiento relativo entre cuerpos materiales y, en la época, el candidato ideal para sustituir al invisible espacio absoluto no era otro que el conjunto de las distantes estrellas fijas.

En este contexto la ley de la inercia, con su cuerpo único abandonado en el vacío y dotado de una condición de movimiento sin la mediación de fuentes materiales aparentes tendría que entenderse, según Mach, como una ley condicionada y determinada por la interacción del cuerpo en cuestión con el conjunto material del universo. Lo mismo cabría esperar, en general, para la inercia de un cuerpo.

Esta sugestiva idea resonaría con especial insistencia en el fuero intelectual del joven Einstein hasta bien entrados los años de la Teoría General de la Relatividad (TGR).

Así, mientras Einstein daba forma a su inédita teoría de gravitación esperaba que ésta, además de extender el principio especial de la relatividad a sistemas de referencia no inerciales arbitrarios para cubrir todo tipo de movimientos relativos, satisficiera los requerimientos de Mach sobre las fuentes materiales de la inercia<sup>1</sup>.

En este escrito se intenta, siguiendo una línea histórica panorámica, distinguir en qué sentido Einstein proyectó fidedignamente la idea original de Mach de amarrar la estructura inercial a la material estelar. Para ello, en

---

<sup>1</sup> A esta conexión causal entre fuentes materiales e inercia Einstein terminaría bautizándola como el **Principio de Mach** (Einstein, 1918). Intentando ajustar las ecuaciones de campo al principio de Mach, Einstein sentó las bases de la cosmología relativista.

la siguiente sección, presento una breve reconstrucción de la bien conocida crítica de Mach al argumento canónico usado por Newton para defender la distinguibilidad del movimiento absoluto. Seguidamente argumento que la idea de Mach de sentar la dinámica en bases epistemológicamente consistentes, como la relatividad del movimiento entre cuerpos materiales, fue progresivamente convertida por Einstein en el proyecto de eliminar los sistemas de referencia inerciales en el contexto de una teoría de campo gravitatorio.

### EL VASO DE NEWTON

A mediados del siglo XIX, la mecánica de Newton se había erigido como el estandarte de la ciencia. Tras unificar la mecánica celeste y la mecánica terrestre, de mostrar la consonancia entre la física de los cielos y la física del suelo, el templo newtoniano, merced a sus más notables continuadores –citemos a Hamilton y a Lagrange– mostraba su acertado dominio del problema del movimiento. Empero, desde su temprana formulación geométrica, la mecánica de Newton no había sido exenta de reiteradas críticas por su distintiva adopción del movimiento absoluto. Nadie podía imaginar algún buen experimento para detectar el espacio absoluto y, a pesar de la invisibilidad de este soporte universal de los fenómenos, la mecánica parecía funcionar bastante bien.

Recordemos, a este propósito, que Newton defendió la existencia de un espacio absoluto depositario del movimiento absoluto y soporte de su filosofía natural del movimiento. Sin embargo, ya en el esolio a sus *Principia* advierte sobre las dificultades para justificar su existencia. Tiene que establecer la diferencia entre movimientos relativos o sensibles y movimientos absolutos o reales. Los movimientos relativos pueden definirse a partir de relaciones entre cuerpos materiales, observables, sensibles, pero el movimiento absoluto ha de referirse al espacio absoluto y éste es invisible, inmaterial e indetectable en sí mismo y con relación directa a los cuerpos. ¿Cómo, entonces, justificar su ontología? ¿Cómo defender su existencia?

Está claro que no puede hacerse por indagación directa; hay que apelar a efectos reales o absolutos del movimiento. Para Newton la clave está en la aceleración. Recurre a las consecuencias dinámicas del movimiento acelerado, ya que el movimiento más simple, el movimiento rectilíneo uniforme, está viciado desde el cuerpo de su dinámica para tal efecto. Resulta imposible distinguirlo del reposo absoluto o relativo.

Y es que el peculiar talante de la dinámica de Newton, sumado a su concepción del espacio (y el tiempo) absoluto hacen indistinguibles el movimiento rectilíneo uniforme relativo a un sistema de referencia inercial arbitrario, del hipotético movimiento rectilíneo, referido al espacio absoluto. No existen, según la mecánica newtoniana, diferencias dinámicas entre el movimiento uniforme relativo y el movimiento uniforme absoluto. A este nivel parece innecesario recurrir al movimiento absoluto para cualquier descripción cinemática del movimiento y a este nivel se situaron las críticas más conocidas de los adversarios de Newton. Pero, ¿Qué pasa con el movimiento no uniforme, con el movimiento acelerado? La agudeza de Newton pasó por ilustrar las consecuencias dinámicas, los efectos que diferencian al movimiento absoluto del movimiento relativo cuando éstos son referidos a sistemas de referencia acelerados. En parte por esto, para ilustrar su argumento, Newton se ha servido de un vaso en rotación y de una cuerda tensada por la rotación de dos esferas. Antes de discutir el experimento del vaso en rotación, leamos del escolio de los *Principia*, las razones del propio Newton en este sentido (Newton, 1686, p. 10)<sup>2</sup>:

Los efectos que distinguen al movimiento absoluto del relativo son las fuerzas de recesión con respecto al eje del movimiento circular. Porque no existen tales fuerzas en un movimiento circular puramente relativo, pero sí en un movimiento circular verdadero y absoluto. Estas son mayores o menores de acuerdo a la intensidad del movimiento.

Reparamos en el experimento del vaso porque sobre éste recaen las alusiones directas de Mach. Veamos: siguiendo a Newton, suponemos que de una cuerda en rotación pende un vaso lleno de agua. Las paredes del vaso comunican paulatinamente su rotación al agua, hasta que ésta alcanza la misma velocidad que aquellas. Sobre la superficie del agua, plana antes de la rotación, se observa un ahuecamiento. Las paredes del vaso y el contenido de agua giran, finalmente, al unísono alcanzando el reposo relativo. ¿Dónde reside el origen, la fuente del ahuecamiento? ¿Qué le justifica?

Este es el núcleo del argumento ofrecido por Newton. El reposo relativo entre el agua y su recipiente, aparentemente, obligan a remitir la fuente de la distorsión en la superficie líquida al contenedor absoluto, al espacio

---

<sup>2</sup> Por razones de precisión cronológica he procurado referenciar directamente los originales (ver referencias). En todos los casos la traducción al castellano es mía.

absoluto. Newton, con este experimento pretende mostrar que el agua tiene un movimiento, una rotación real con respecto al invisible espacio absoluto. Las fuerzas centrífugas, manifiestas en la superficie del agua dan cuenta del mismo<sup>3</sup>.

Con todo, la prueba de Newton, parece condenada por la invisibilidad del espacio absoluto. No convence a Leibniz, para quien el espacio absoluto no es una entidad substancial sino la configuración relativa entre cuerpos coexistentes. El movimiento se entiende, según él, como el orden sucesivo de dichas configuraciones. Su celebrada identidad de los indiscernibles no puede privilegiar un espacio absoluto invisible. Incluyo uno de los conocidos pasajes en que Leibniz intenta, rápidamente, pasar de la indiscernibilidad entre posiciones relativas equivalentes a la indiscernibilidad del movimiento como argumento central de su ataque a las nociones absolutas de Newton (en Alexander (ed.), 1956, p. 73):

Con el fin de probar que el espacio sin cuerpos es una realidad absoluta; el autor [Clarke] objetó, que un universo material finito podría moverse hacia adelante en el espacio. Yo respondí que no parece razonable pensar que el universo material deba ser finito; y, aunque debiéramos suponerlo finito no parece razonable que deba tener movimiento distinto al de la posición [relativa] entre sus partes, porque tal movimiento no produciría ningún cambio que pudiera ser observado.

Según Leibniz dado que un universo material moviéndose a una velocidad definida A, resulta indistinguible del mismo universo material moviéndose a una velocidad B, las dos situaciones físicas deberían –vía Principio de Identidad de los Indiscernibles– identificarse. Se trataría de dos formas de nombrar la misma situación física. Por el contrario, Newton, al afirmar la existencia del espacio absoluto, debería concluir que se trata de dos situaciones ontológicamente distintas aunque indistinguibles. Esto no dejó de incomodar a un buen número de detractores. La situación parece

---

<sup>3</sup> Aquí sigo la interpretación tradicional del experimento de Newton, (la asumida por Mach) según la cual este fue diseñado como un argumento decisivo contra la concepción relacional del movimiento (al estilo de Leibniz). Sin embargo, siguiendo a Koyre, Laymon plantea que este fue diseñado contra Descartes y que Newton pretendía mostrar que la concavidad del agua, al no depender de la traslación del agua con respecto a la materia de la vecindad inmediata, servía como refutación de la interpretación cartesiana del movimiento verdadero (filosófico). En este sentido el experimento de Newton pretendería mostrar que la dinámica que acaba de sentar permite una distinción clara entre movimiento absoluto y movimiento relativo. Véase Laymon, 1978.



desembocar en una suerte de redundancia ontológica al nivel cinemático de la física newtoniana<sup>4</sup>.

Tampoco Huygens, por ejemplo, parece convencido pues le resulta inaceptable un receptáculo de movimiento absoluto, sin que de éste pueda determinarse si su condición es de movimiento o de reposo. Argumentos semejantes son esbozados por el obispo Berkeley, para quien además el movimiento es relativo en su propia naturaleza y no puede concebirse sin que cuerpos correlacionados existan previamente. Para él, el movimiento absoluto es una idea abstracta. Casi literalmente Mach se pone a su costado y defiende la misma postura. En este sentido se refirió así (Mach, 1883, p. 280): “Nadie es competente para predicar sobre movimientos absolutos; estos son pura construcción mental que no puede producirse en la experiencia”.

De modo que, a grandes rasgos, las objeciones a la concepción absoluta del movimiento newtoniano parecen cimentarse en la siguiente peculiaridad de la teoría newtoniana: Las transformaciones de Galileo, bajo las cuales las leyes de la dinámica newtoniana preservan su forma, indican que el movimiento puede juzgarse indistintamente desde un sistema de referencia inercial arbitrario, con lo cual la referencia al espacio absoluto resulta innecesaria. Solamente las posiciones y las velocidades iniciales cambian de un sistema a otro. No hay, por lo tanto, razón para creer que exista el privilegiado sistema de referencia absoluto, el espacio absoluto, pues este no puede distinguirse de los demás.

A este nivel pareciera que Newton ha elegido esta distinción para bautizar el indistinguible sistema inercial predilecto de Dios. La discusión puede alargarse en esta dirección, pero aquí interesa más recalcar que la arbitrariedad en las constantes de integración (velocidad y posición inicial) sugiere la relativización de la velocidad y la posición de los cuerpos.

Pero el llamativo salto de la relatividad de posición a la relatividad del movimiento, insinuado por la relatividad de las velocidades, debe superar el escollo impuesto por la relativización de las aceleraciones y esta empresa, asumida en parte por Einstein, estuvo plagada de complicaciones sin que exista aún hoy un consenso claro sobre su desenlace.

En general Newton es criticado por privilegiar un sistema de referencia inercial sobre los demás aunque su propia dinámica –vía transformaciones de Galileo– haga imposible tal distinción. Pero ya se ha dicho que por ello recurre a sistemas de referencia acelerados; por esto un vaso en rotación

---

<sup>4</sup> En cualquier caso, en la representación Galileana o Neo-Newtoniana del espacio-tiempo newtoniano, el criterio de reposo absoluto es eliminado, reteniendo las familias o clases equivalentes de sistemas de referencia inerciales.

desde el cual se juzga la superficie del agua que contiene. Así que aunque ni Leibniz, ni Huygens, ni Berkeley, sean seducidos por el absolutismo de Newton, tampoco dan respuesta satisfactoria al desafío planteado por él desde su vaso en rotación.

Deberíamos, en respuesta, esperar de sus detractores algún tipo de justificación relativista o relacional para la fuerza centrífuga evidenciada en la concavidad de la superficie de agua. No es este el lugar para auscultar los elusivos argumentos de la mayoría de sus detractores, pero sí es el escenario adecuado para señalar que, a diferencia de los citados, Mach no elude la cuestión sobre el origen de las fuerzas centrífugas. Su respuesta es popular. La originalidad de la misma radica en que en ella, a diferencia de sus predecesores, no sólo intenta reducir los efectos dinámicos del movimiento a relaciones espaciales entre cuerpos materiales sino que, eludiendo lo que considera una abstracción del universo entero, conecta, en su pertinente discusión, el movimiento local a la materia del universo distante, acaso preludiando la conexión estructura inercial-materia de la TGR. Pero esto último más allá de ser la sugestiva razón que, a mi juicio, ha hecho de Mach una figura del pensamiento tan atractiva, es anticipar demasiado. Leamos lo que escribe en relación al desafío abierto por Newton con su vaso rotante (Mach, 1883, p. 284):

El experimento de Newton con el vaso de agua en rotación simplemente nos informa que la rotación relativa del agua con respecto a las paredes del vaso no produce ninguna fuerza centrífuga detectable, pero que tales fuerzas son producidas por su rotación relativa con respecto a la masa de la tierra y los otros cuerpos celestes.

Antes de reparar en la concisa respuesta de Mach al experimento del vaso de Newton, algunas observaciones tuyas respecto a la ley de la inercia resultan pertinentes por su tinte pre-relativista. No sobra tampoco insistir en que, según Mach, todo movimiento es relativo y sólo adquiere sentido si se juzga con relación a otros cuerpos.

Por esto la ley de la inercia resulta sospechosa, pues confiere una condición de movimiento rectilíneo a un cuerpo solitario en el universo, moviéndose en el espacio vacío sin relación a nada (material). Esta concepción es debida, según Mach, a la abstracción que hacemos del universo circundante; bien podría referirse la ley de la inercia a las estrellas fijadas a las esferas ptolemaicas y el espacio absoluto estar adherido a éstas. Todo esto es un atavismo imperdonable. Mach claramente señala (Mach, 1883, p. 286): “Cuando decimos que un cuerpo preserva inmodificada su

dirección y velocidad en el *espacio*, nuestra aserción no es más que una referencia abreviada al *universo entero*”.

Si bien la ley de la inercia se antoja como una conveniente descripción, una vez recuperado el universo entero que esta ignora, desde allí debe originarse su justificación.

Aunque su epistemología se incline hacia la descripción fenomenológica y económica del mundo físico, no parece contento con la forma en que la ley de la inercia de Newton salva las apariencias. Mach redime el estatus ontológico de la materia distante. En este contexto el interrogante abierto por las observaciones de Mach estaría relacionado con la correcta formulación de una teoría en que tal condición de movimiento (inercial) sea determinada por la materia total circundante, en función de algún tipo de interacción del cuerpo en cuestión con la distribución material total.

Ya en 1872, en su *History and Root of the Principle of the Conservation of Energy* advertía (Mach, 1872, p. 17): “¿Qué participación tiene cada masa en la determinación de la dirección y velocidad de la ley de la inercia?”

Esto para la ley de la inercia. Ahora bien, transitando en la misma dirección, es de esperar que, similarmente, cuando pasemos a movimientos no inerciales, los efectos de una aceleración absoluta, de una aceleración en el espacio (absoluto), con respecto a nada, tengan también su origen en cierto tipo de interacción con respecto a las fuentes materiales del universo.

La idea de Mach es que podemos explicar los efectos dinámicos de la aceleración absoluta en términos de aceleraciones relativas con respecto a la distribución total de materia. Concretamente, en su solución relativista al experimento del vaso, efectivamente propone que pueden justificarse los efectos dinámicos de una rotación absoluta (fuerza centrífuga) en términos de rotaciones relativas con respecto a la tierra y las estrellas. En este sentido lega a sus seguidores un desafío monumental (Mach, 1883, p. 284): “Los principios de la mecánica pueden, de hecho, ser concebidos en forma tal que las fuerzas centrífugas aparezcan incluso para rotaciones relativas”.

Estas palabras debieron resonar con insistencia entre los pensamientos de Einstein, pues al concebir su pretendida extensión del principio restringido de la relatividad para cubrir cualquier tipo de movimientos, daba por sentado que esto implicaba, de forma más o menos natural, la incorporación de las ideas de Mach sobre el origen de la inercia en el cuerpo de su nueva teoría de gravitación. Sobre esto discurre la siguiente sección.

De todas formas ha circulado una cierta ambigüedad en la interpretación de las observaciones de Mach sobre las flaquezas de las nociones de espacio, tiempo y movimiento absolutos. Ello como resultado de la tensión entre sus objeciones epistemológicas y las implicaciones ontológicas de su “solución” relacional o relativista al problema de la inercia.

Y es que su epistemología define a la ciencia como un sistema económico de relaciones que permiten describir la experiencia. La empresa científica, vista bajo este criterio, debería conformarse con salvar económicamente las apariencias y poco más, ya que al entrar en consideraciones de corte ontológico-interpretativo se correría el riesgo de permitir que nociones metafísicas se cuelen en nuestras teorías científicas. Desde esta óptica, quizás a Newton le hubiera bastado con no referirse al espacio absoluto como si se tratara de una entidad física real. Al fin y al cabo su dinámica parecía salvar las apariencias. Este tipo de lectura fenomenológica de corte instrumentalista fue –y sigue siendo– recogida por algunos filósofos positivistas que vieron –y ven– en Mach a su precursor. Pero, por otra parte, Mach reclamó una formulación alternativa de la inercia que, en el fondo, permitiría sustituir definitivamente la función dinámica del espacio en la estructura de la teoría. El mensaje resultante no era otro que, si se creía en la mecánica de Newton, había que creer también en la existencia física del espacio, ya que éste provee todo el soporte a la estructura inercial y las leyes del movimiento, de modo que la estrategia instrumental no funciona.

Si referimos, por ejemplo, la ley de la inercia a un conjunto de cuerpos materiales e intentamos no hablar del espacio, éstos cuerpos funcionan como rótulos para fijar empíricamente un sistema de coordenadas pero no explican el comportamiento dinámico de los cuerpos. Bien pueden los sistemas de referencia estar amarrados a las estrellas fijas pero éstas no causan la inercia. Al final tendríamos que aceptar que sigue siendo el espacio (con el tiempo) el soporte universal de las leyes de movimiento y la estrategia instrumental no serviría de nada. El asunto es sutil.

### MACH, EINSTEIN Y LA TGR

Es cierto que la influencia de Mach sobre el joven Einstein –seguramente la más importante– consintió en quebrantar su fe dogmática en la mecánica de Newton, en herir las nociones absolutas de espacio, tiempo y movimiento. Esto no es baladí.

Si se repara en que cuando Einstein labraba el terreno para su Teoría Especial de la Relatividad (TER), las transformaciones que conectan los

sistemas de referencia privilegiados, las transformaciones de Lorentz-Fitzgerald ya se habían definido, con su discutible interpretación; si también se repara en que por entonces Henri Poincaré ya vislumbraba una teoría en que la inercia de un cuerpo aumentaría con su velocidad y, sobre todo, si se señalan las dificultades para incorporar la electrodinámica de los cuerpos en movimiento de forma consistente en la mecánica clásica, se está tentado a pensar que la TER era una inminente necesidad histórica y que precisamente este quebranto en la fe hacia las nociones newtonianas era lo que se requería para que alguien se atreviera a interpretar las transformaciones de Lorentz-Fitzgerald como contracciones y dilataciones en el espacio y en el tiempo. Pero esto último, que fue lo que Einstein hizo, y lo que Mach cortejó con sus sendas críticas son cosas muy distintas. Este parece ser el sino del complicado derrotero epistemológico seguido por Einstein a tenor de la influencia de Mach. A nosotros nos ocupa la historia subsiguiente, la que relaciona las ideas de Mach con la Teoría General de la Relatividad (TGR) y puestos a buscar consecuencias se dirá que la influencia persiste y que para los años en que Einstein preparaba su bella teoría de gravitación esperaba que ésta satisficiera las ideas de Mach sobre la inercia.

Con su Relatividad Restringida, Einstein parecía haber resuelto el escollo de las monstruosas nociones absolutas señaladas por Mach<sup>5</sup>. Ahora había que satisfacer las ideas de él sobre la inercia. No en vano en la primera edición del siglo XX de su ya popular *Science of Mechanics*, Mach indicaba este camino (Mach, 1883, p. 290):

El número de relativistas ha crecido muy rápidamente... Probablemente muy pronto no habrá ningún defensor importante de la postura opuesta. Pero, si las inconcebibles hipótesis del espacio absoluto y del tiempo absoluto no pueden ser aceptadas, surge la pregunta: ¿De qué forma podemos dar a la ley de la inercia un significado inteligible?

Es justo advertir que buena parte de la notoriedad actual de Mach se debe a las reiteradas muestras de gratitud legadas por Einstein y al empeño puesto, por él, en satisfacer las ideas del primero. Sin embargo, entre lo dicho por Mach y lo entendido y hecho por Einstein, hay diferencias sustanciales, seguramente justificadas por los profundos cambios que la

---

<sup>5</sup> Digo que Einstein “parecía” haber resuelto el problema de la relativización del espacio y el tiempo porque en un sentido restringido así fue. Pero quedaba pendiente el asunto de la eliminación definitiva del espacio, o el espacio-tiempo en este caso, como una entidad cuya existencia física podía postularse con independencia de la ocurrencia de procesos materiales y para ello se requería una teoría en que la inercia no estuviera signada por la estructura del espacio-tiempo.

física, ejemplificada en la emblemática figura del propio Einstein, sufría entre los años ochentas del XIX –cuando Mach publicaba su *Mecánica*– el cambio de siglo –cuando Einstein debió leerle– y los años de la TGR– cuando todavía las ideas de Mach alimentan sus esfuerzos.

A fin de despejar, en lo posible, parte de este nebuloso episodio es preciso reparar sucintamente en las intenciones que pueden leerse en las palabras de Mach. A estas alturas es razonable afirmar que si de sus comentarios hubiera que proyectar alguna intención, o conjunto de intenciones que, en el contexto de la dinámica, merecieran el calificativo de Programa Machiano, no es atrevido pensar que éste apuntaría en el siguiente orden:

*Es preciso dar a la ley de la inercia una correcta formulación que, además de salvar las apariencias, responsabilice a las fuentes materiales por el comportamiento inercial de los cuerpos. En la misma línea argumental los efectos diferenciales debidos a cualquier tipo de movimiento absoluto han de justificarse en función de movimientos relativos con respecto a las fuentes materiales del universo.*

Desde luego, la principal contrariedad consiste en que Mach nunca llevó a buen concurso sus ideas, sólo en un brevísimo pasaje de su *History of Mechanics* recomienda una pista más específica sobre la ruta que debería seguir algún continuador de su programa. Sugiere algún tipo de suma de interacciones relativas a la materia estelar (Mach, 1883, p. 268). Posteriormente Einstein (1913-1915), al postular ecuaciones tensoriales de campo gravitatorio que amarran la estructura inercial ( $\Gamma$ ) y la métrica del espacio-tiempo ( $g$ ) a un tensor de energía-momento ( $T$ ) que da cuenta de la distribución de materia-energía a gran escala parece avanzar en cierta medida en esta dirección<sup>6</sup>. Pero es más ajustado decir que el camino transitado hasta allí diverge del perfilado por Mach.

En el pensamiento de Einstein las ideas de Mach parecen sostenerse como una especie de ideal científico más que como un consciente camino teórico. Lo digo porque, en primer lugar la ley de la inercia y su formulación *à la Mach* se ha evaporado, o acaso nunca fue contemplada en sus inquietudes fundamentales. En todo caso, esto no debería extrañarnos si se piensa que una teoría relativista *à la Mach* que pueda justificar los efectos diferenciales de los movimientos absolutos parece implicar la ley de la inercia en algún tipo de límite. Si se busca lo segundo, si se ataca

<sup>6</sup> Sigue siendo discutible la afirmación de que la TGR es una teoría machiana. El consenso más generalizado afirma que no lo es, aunque ciertos modelos del espacio-tiempo, en particular aquellos que son globalmente hiperbólicos, respetan la conexión materia-inercia en el sentido de Mach (Wheeler, 1964). Mi opinión es contraria. Véase Cala (2008).

el problema general, como en cierto sentido es el propósito de Einstein, se podría obtener lo primero. Buscando generalizar la relatividad del movimiento podría aparecer una noción de inercia epistemológicamente consistente.

Históricamente conviene resaltar que, en parte debido a la nueva profundidad con que el problema del movimiento y las leyes que le gobiernan había sido auscultado por Mach, la dudosa ley de la inercia cedía paso a concepciones epistemológicamente más aceptables. En particular L. Lange (1885) encausó sus esfuerzos hacia la obtención de una interpretación de la primera ley de Newton, en la que el peso interpretativo recaía en el sistema de coordenadas (el sistema inercial) al cual habría que referirla. Este sistema de coordenadas podía encontrarse con la ayuda de puntos materiales que le sirvieran de referencia<sup>7</sup>. Pero claro, esto dista mucho de satisfacer una relación inercia-materia estelar del talante anticipado por Mach, de modo que Seeliger (1895), el mismo Lange (1902) y otros, intentaron subsanar esta limitación. Ellos buscaron, entre otras cosas, la relación entre un sistema de coordenadas inercial apropiado y el sistema empírico de coordenadas astronómicas. Intentaron, en otras palabras, encontrar el conjunto empírico de familias de sistemas de referencia inerciales o, mejor, de sistemas de referencia privilegiados en los cuales la ley de la inercia y consecuentemente, la segunda ley fuesen físicamente aceptables<sup>8</sup>.

No es fácil atribuir una influencia concreta sobre Einstein a los trabajos de Lange y a los del creciente número de relativistas que con el cambio de siglo suscribieron sus creencias y sus esfuerzos en este sentido. Pero aunque Einstein vea en Mach al más genuino inspirador de su Teoría General de la Relatividad, está claro que el enfoque seguido por él fue coloreado por los novedosos planteamientos que sobre la ley de la inercia entretuvieron estos últimos. Porque, como ya se ha dicho, la cuestión sobre una ley de la inercia que satisfaga las ideas de Mach nunca fue

---

<sup>7</sup> Según la definición inicial de Lange, un sistema inercial es un sistema de coordenadas con respecto al cual tres partículas libres, proyectadas desde un mismo punto y moviéndose en direcciones coplanares, siguen líneas rectas avanzando distancias mutuamente proporcionales. En consecuencia, la ley de la Inercia postula que una cuarta partícula se mueve uniformemente con respecto a este sistema de coordenadas.

<sup>8</sup> Aunque estas estrategias de machianización de la inercia suponen un avance desde el punto de vista operativo, caen todas en la trampa instrumentalista ya que los puntos materiales involucrados en las novedosas definiciones de sistema inercial, cumplen todos una función pasiva. Son rótulos para referir las trayectorias inerciales y en ningún sentido cumplen la función dinámica de actuar como fuentes materiales de las fuerzas inerciales al estilo de las interacciones gravitatorias.

contemplada directamente por Einstein. En su lugar, en concordancia con lo dicho aquí, su atención se vio desplazada hacia los sistemas de referencia privilegiados. No sobra decir que éstos habían desempeñado un papel determinante en su Teoría Especial de la Relatividad (1905) y que, siguiendo este camino, por extensión, probarían su importancia en la gestación de la Teoría General de la Relatividad (1915) y en la lectura que Einstein hiciera de las observaciones de Mach.

De modo que cuando Mach sentenciaba que podía concebirse una dinámica en que incluso para rotaciones relativas las fuerzas centrífugas aparecieran, la insinuación pasaba por una suma de interacciones entre cuerpos materiales que permitiera despojar dichas fuerzas centrífugas, y en general las llamadas pseudo fuerzas debidas a movimientos no inerciales, de su interpretación absolutista. En suma, cualquier efecto dinámico, que en la mecánica clásica fuese interpretado como el resultado de una aceleración absoluta, cabría esperar que en una teoría al estilo de Mach fuese interpretado como causado por la sumatoria de interacciones relativas al conjunto de puntos materiales del universo que la dinámica newtoniana abstrae en favor del espacio absoluto. Y, aunque es bien cierto que Mach alcanzó a soslayar la posibilidad de que algún tipo de éter permee la acción inercial sobre los cuerpos, el tipo de interacciones que entretuvo siguió anclado en el esquema acostumbrado de la acción instantánea a distancia. Es más, se esperaba que esta fuerza fuera de origen gravitacional o correspondiera a una modificación apropiada para incluir la materia distante.

Einstein, por su parte, al plantearse previamente el problema ya canónico de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, había adoptado el tratamiento formal de la teoría de campos y esto lo ponía ya en otra perspectiva. La teoría de campos es una teoría local. El valor instantáneo de un campo está determinado por la estructura del campo en el pasado inmediato y en la vecindad más próxima. Fuentes distantes, como la materia de las estrellas fijas, podrían generar la inercia, pero su influencia llegaría con retardo debido a la propagación del campo a través del espacio intermedio. No sobra decir que fue precisamente un análisis juicioso de este `retardo' y sus implicaciones en la propagación de señales luminosas –del campo electromagnético– lo que le había llevado a proscribir la simultaneidad absoluta; criterio este fundamental para la vieja noción de acción a distancia.

El enfoque acogido por Einstein en relación a los sistemas de referencia privilegiados, en este contexto, no fue abierto explícitamente por Mach. Pero claro, había llovido mucho desde entonces y cuando



Einstein preparaba su TGR, las fuerzas a distancia, paradigmáticas del modelo newtoniano, empezaban a ceder paso, de la mano de la electrodinámica, a la noción de campo; el formalismo de la covariancia general (inventado por Ricci y Levi-Civita en 1901) estaba siendo incorporado por el propio Einstein en su nueva teoría de gravitación (TGR) y la ley de la inercia diluía su relevancia en favor de la cuestión de los sistemas de referencia privilegiados.

Estos sistemas de referencia privilegiados, los sistemas inerciales, habían probado su importancia en la TER. Al igual que en la mecánica newtoniana, éstos satisfacen un principio de relatividad. Einstein les definió como aquellos sistemas o marcos de referencia en que las leyes de Newton se cumplen o, de forma más general y por lo mismo más equívoca, como aquellos en que las leyes de la física toman su forma más simple. Esto conlleva a que los movimientos inerciales sean indistinguibles o a que las descripciones de un movimiento juzgado por distintos observadores inerciales sean equivalentes. Empero ni la mecánica clásica, ni la teoría especial de la relatividad admiten un principio de relatividad para sistemas de referencia acelerados (no inerciales). Esta es la principal dificultad que entraña una auténtica teoría general de la relatividad del movimiento. Por esto las tempranas objeciones de Leibniz a Newton se disiparon en terreno de nadie. Su identidad de los indiscernibles no podía extenderse arbitrariamente de sistemas de referencia inerciales a sistemas de referencia acelerados. El vaso de Newton, prácticamente invulnerable durante dos siglos como estandarte de este peculiar triunfo del movimiento absoluto en la mecánica clásica, encontró la primera oposición incisiva en las objeciones de Mach. Con todo, éstas no parecían insinuar una extensión del principio de relatividad, pero el daño estaba hecho y cuando Einstein, sin duda profundamente alentado por el que reconocería como el pensamiento más feliz de su vida –el principio de equivalencia– dirigía sus esfuerzos en este sentido, no pudo menos que recordar la inspiración cultivada desde las palabras de Mach.

Poco después de concebir su TER, Einstein ya contemplaba la extensión de su principio de relatividad restringido. En 1907, cerrando un artículo destinado a repasar su reciente teoría escribía (Einstein, 1907, p. 411): “¿Podría suponerse que el principio de la relatividad también es satisfecho por sistemas moviéndose relativamente entre sí con aceleración?”

Según él “esta pregunta debía ocurrírsele a cualquiera que hubiera seguido las aplicaciones del principio de la relatividad” (Einstein, 1907, p. 412).

Con el fuerte impulso recibido por el posterior descubrimiento del principio de equivalencia, la estética de la empresa debió resultarle irresistible<sup>9</sup>. Por entonces Einstein ya estaba inmerso en el problema de construir una teoría relativista de campo gravitatorio. Y para 1911, cuando trabajaba en su preliminar teoría escalar de gravitación, su enfoque no había cambiado y estaba claro. Al respecto escribió (Einstein, 1911, p. 898): “En tal enfoque uno no puede hablar de la aceleración absoluta del sistema de coordenadas de la misma forma que en la teoría especial de la relatividad uno no puede hablar de la velocidad absoluta del sistema”.

Lo que debe concluirse es que el sempiterno problema de la relatividad del movimiento había sido convertido por Einstein en el problema de la extensión del principio de relatividad o, equivalentemente, en el de la eliminación de los sistemas de referencia privilegiados. Años después, tras ver concluida su TGR (1915), cuando todavía creía que ésta entrañaba un principio general de relatividad para todo tipo de movimientos, daba por sentado que el rumbo trazado hasta allí había sido franqueado siguiendo las líneas insinuadas por Mach y que además ésta satisfacía las ideas de él sobre los orígenes de la inercia. No sorprende entonces que en 1916, en un extenso artículo destinado a repasar aspectos fundacionales de la teoría, dedicara especial atención a justificar la necesidad de extender el postulado de la relatividad. Einstein nos regala un pasaje tan ilustrativo como envolvente, en donde no puede dejar de recordar a Mach. En éste, el vaso de Newton ha sido sustituido por dos esferas en rotación relativa. Las ideas de Mach se envuelven en la particular interpretación de Einstein. Prefiero citar en extensión por la justa relevancia del texto (Einstein, 1916, p. 112-113):

En la mecánica clásica, al igual que en la teoría especial de la relatividad, existe un defecto epistemológico inherente, que quizás haya sido por primera vez señalado con claridad por **Ernst Mach**. Lo ilustraremos con el siguiente ejemplo: Dos cuerpos fluidos del mismo tamaño y naturaleza flotan libremente en el espacio a distancias tan grandes entre sí y con respecto a todas las demás masas, que sólo es necesario tener en cuenta las fuerzas gravitacionales que surgen de la interacción entre diferentes

---

<sup>9</sup> El principio de relatividad restringido afirmaba la equivalencia, inherente ya a la mecánica clásica, entre sistemas de referencia inerciales. El principio de equivalencia parecía extender esta condición estableciendo una ecuación entre sistemas de referencia uniformemente acelerados y campos gravitacionales homogéneos. Esto permite pensar ciertas aceleraciones –las debidas a un campo gravitacional homogéneo– como reposo, al igual que como podemos pensar movimientos inerciales como una forma de reposo. Que con esto se pueda vislumbrar la naturaleza gravitatoria de la inercia y, de paso, apuntar en la dirección de la eliminación de los sistemas de referencia privilegiados, dicho así tan ligeramente, parecía concordar con lo proyectado por Mach.

partes del mismo cuerpo. Suponga que la distancia entre los dos cuerpos es invariable, y que en ninguno de los cuerpos se presentan movimientos relativos de sus partes entre sí. Pero suponga que cada masa, al ser vista por un observador en reposo relativo a la otra masa, rota con velocidad angular constante con respecto a la línea que une a las masas. Este es un movimiento relativo de las dos masas verificable. Ahora imaginemos que cada uno de los cuerpos ha sido estudiado con instrumentos de medición en reposo relativo con respecto a los mismos, y que la superficie de  $S_1$  ha resultado esférica, mientras que la de  $S_2$  corresponde a un elipsoide de revolución. En consecuencia planteamos la siguiente pregunta: ¿Cuál es la razón para esta diferencia entre los dos cuerpos? Ninguna respuesta puede ser admitida como epistemológicamente satisfactoria,<sup>10</sup> a menos que la razón proporcionada sea un *hecho observable de la experiencia*. La ley de causalidad no tiene el significado de una sentencia del mundo de la experiencia, excepto cuando hechos observables aparecen finalmente como causas y efectos. La mecánica newtoniana no da una respuesta satisfactoria a esta cuestión. Se pronuncia de la siguiente manera: Las leyes de la mecánica se aplican al espacio  $R_1$ , con respecto al que el cuerpo  $S_1$  está en reposo, pero no se aplican al espacio  $R_2$ , con respecto al que el cuerpo  $S_2$  está en reposo. Pero el espacio privilegiado  $R_1$  de Galileo, introducido así, es meramente una causa facticia, y no una cosa que pueda ser observada. Está claro que la mecánica de Newton satisface apenas aparentemente el requerimiento de la causalidad, en el caso bajo consideración, dado que responsabiliza a la causa facticia  $R_1$  por las diferencias entre los cuerpos  $S_1$  y  $S_2$ . La única respuesta satisfactoria debería ser que el sistema físico consistente en  $S_1$  y  $S_2$  no revelara dentro de sí ninguna causa imaginable para referir el comportamiento desigual entre  $S_1$  y  $S_2$ . En consecuencia la causa debe residir fuera de este sistema. Tenemos que considerar que las leyes generales del movimiento, que en particular determinan la forma de  $S_1$  y  $S_2$ , deben ser tales que el comportamiento mecánico de  $S_1$  y  $S_2$  esté parcialmente condicionado, en aspectos bastante esenciales, por las masas distantes que tenemos en el sistema considerado. Estas masas distantes, y su movimiento relativo a  $S_1$  y  $S_2$ , deben en consecuencia ser tomadas como el asiento de las causas (que deben ser susceptibles de observación) del comportamiento desigual de los dos cuerpos  $S_1$  y  $S_2$ . Ellas asumen el papel de la causa facticia  $R_1$ . De todos los espacios imaginables  $R_1$ ,  $R_2$ , etc., en cualquier tipo de movimiento relativo entre sí, no existe ninguno al que debamos tomar como privilegiado a priori sin revivir la objeción epistemológica previamente mencionada. Las leyes de la física deben ser de una naturaleza que las haga aplicables a cualquier sistema de referencia en cualquier tipo de movimiento. Por esta vía debemos alcanzar una extensión del postulado de la relatividad.

---

<sup>10</sup> Desde luego, una respuesta puede ser satisfactoria desde el punto de vista de la epistemología, y sin embargo, resultar físicamente inadecuada si está en conflicto con otras experiencias. (Esta nota aclaratoria es de Einstein).

El párrafo anterior es ambiguo. Es cierto que la crítica de Mach apuntaba hacia la eliminación de  $R_1$  como causa de los efectos diferenciales entre las dos “esferas”. Propuso, en su lugar, la materia distante. La lógica de Mach parte desde las estrellas, desde la materia distante como fuente de los distintos efectos inerciales locales. Pero al inadmisibles monstruo metafísico que Mach vio en el espacio absoluto de Newton (causante de la concavidad en la superficie líquida del vaso rotante), indistinguible desde la misma mecánica de cualquier sistema de referencia inercial como  $R_1$  (causante de la deformación elipsoidal en la esfera de Einstein), habría que buscarle una justificación empírica soportada en la materia estelar. Mach seguramente renegaría del sistema de referencia inercial por su naturaleza privilegiada en sí misma y sin relación a nada (material). Por esto apuntó a las estrellas. Por esto también resultó inicialmente más lícito pensar en una derivación de la familia empírica de sistemas de referencia privilegiados. De modo que, siguiendo su derrotero, cabría esperar mejor que los efectos inerciales, como la aceleración centrífuga, fueran sustentados en función de una suma de interacciones originadas en movimientos relativos a la materia estelar distante, al universo en su conjunto. A cambio, Einstein, en lugar de buscar el asiento del comportamiento privilegiado de las leyes de la física en estos sistemas de referencia mediante interacciones relativas a la materia distante, intenta eliminar los sistemas de referencia privilegiados. Eliminarlos, en lugar de justificarlos empíricamente, parece un golpe de ingenio que el propio Mach no debió imaginar. El enfoque de Einstein se origina en las leyes que gobiernan el movimiento local de los cuerpos y la relación entre las mismas cuando se pasa de un sistema de referencia a otro. Después habrá que mirar a las estrellas. Su meta, ha insistido: extender el principio de relatividad para cubrir todo tipo de movimientos.

A pesar del feliz convencimiento inicial con que Einstein vio resueltas sus dudas y de la certeza que creyó abrazar con sus ecuaciones tensoriales de campo gravitatorio (1915), puede resultar objetable pensar que su Teoría General de la Relatividad entrañe un auténtico principio general de la relatividad de movimiento. En todo caso de ser así, los requerimientos de Mach sobre la inercia, aunque perseguidos por caminos distintos a los sugeridos por él, habrían sido satisfechos de un modo original y elegante, propio del genio de Einstein. Por el contrario: ¿Acaso en la TGR cualquier desviación en el espacio-tiempo de las líneas geodésicas no supone la admisión de un movimiento absoluto? ¿Acaso estas familias de líneas geodésicas no trazan las trayectorias inherentes a los sistemas de referencia privilegiados? Estas preguntas siembran dudas. Sin embargo el hecho de

que en esta teoría la estructura inercial ( $\Gamma$ ) esté determinada por la métrica del espacio-tiempo ( $g$ ) y que a su vez ésta dependa de la distribución total de materia contemplada en el tensor de energía-momento ( $T$ ), parece presagiar la posibilidad de que en cierta medida las insinuaciones relativistas que Mach ligara a la materia cósmica podrían ser satisfechas.

Estas consideraciones (y otras posteriormente acogidas por Einstein) le llevaron a intentar nuevas estrategias para ajustar sus ecuaciones de campo a los requerimientos de Mach sobre los orígenes de la inercia propiciando ulteriormente su definición definitiva del Principio de Mach. Esta historia merece atención, pero escapa al alcance de este escrito.

### CONCLUSIÓN

Hay que decir que la crítica de Mach, recibida de una forma tan comprometida por Einstein, nace de una epistemología empirista que pretendía limpiar la mecánica de lagunas metafísicas. Bien es cierto que Einstein, sobre todo en su juventud, antes de encausar el proyecto de la TGR, recibió el influjo de la filosofía anti-metafísica pregonada por Mach y materializada en el rechazo compartido hacia el invisible espacio absoluto.

Pero en parte tras el éxito de la TER, el latente empirismo que fundamenta la crítica de Mach, aunque presente, no parece ser la fuerza determinante que impulsa su pertinacia científica. Al contrario, este palidece al lado de la evidente inyección de confianza con que Einstein acoge sus intuiciones estéticas o, a pesar de Mach, metafísicas.

Por esto puede verse que Einstein recorre toda esta historia decantándose por su creciente compromiso estético, aquel que quisiera emparentar la verdad y la belleza con la unidad de la naturaleza. El principio de equivalencia puede juzgarse como la apología de esta filosofía. Y es que, sin ir más lejos, la equivalencia entre masa inercial y masa gravitacional permitió a Einstein vislumbrar la extensión de su principio de relatividad para intentar cubrir todo tipo de movimientos. Entonces lo que para Mach había sido una desagradable concesión metafísica de la mecánica clásica, a saber, sentar las bases de la inercia en un invisible espacio absoluto y no en la materia tangible, sirvió a Einstein para fortalecer y sostener su convicción en el proyecto de la TGR. La razón: según él, Ernst Mach había señalado el defecto epistemológico que supone el tratamiento privilegiado de la inercia en los marcos inerciales. Y aunque parezca cierto que para Mach hubiera podido ser un defecto epistemológico, cuando observa que

este tratamiento privilegiado no depende del sustrato fundamental de la realidad física mecanicista, es decir, de la materia, también se entiende que para Einstein el defecto compartido por la mecánica clásica y su TER, es un defecto de naturaleza fundamentalmente estética aunque insista en llamarlo de otro modo. A Einstein le molestaba la falta de simetría, el tratamiento desigual entre unos sistemas y otros. De no ser así; ¿Por que habría de disgustar tanto la existencia de sistemas privilegiados, siempre y cuando este privilegio dependiera de la distribución de materia? Einstein, insisto, fiel a su intuición, no se planteó en un comienzo el problema machiano de la relatividad de movimiento en esta dirección.

En su lugar optó por intentar eliminar los sistemas de referencia privilegiados y después intentó amarrar sus ecuaciones de movimiento a la estructura material del universo en su conjunto. El resultado fue una teoría de gravitación discutiblemente machiana.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, H.G. (ed.) (1956): *The Leibniz Clarke-Correspondance (1717)*, Manchester, Manchester University Press.
- Cala, F., Gómez, A., Ramos, J. (2007): “De la Relatividad de la Inercia al Universo Cerrado”, *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 31 (118), pp. 97-108.
- Cala, F. (2008): “Sobre la dinámica relacional del espacio-tiempo y la conservación de la energía en la Teoría General de la Relatividad”, *THEORIA: Revista de teoría, historia y fundamentos de la ciencia* 23 (62), pp. 175-793.
- Einstein, A. (1907): “Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen”, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 4, pp. 411-419.
- (1911): “Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes”, *Annalen der Physik* 35, 1911, pp. 898-908.
- (1916): “Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie”, *Annalen der Physik*, 49, (translation published in: *The Principle of Relativity*, collection of papers by A. Einstein et al., New York, Dover, 1952, pp. 111-164.
- (1918): “Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie”, *Annalen der Physik*, 55, pp. 241-244.
- Lange, L. (1885): “Über die wissenschaftliche Fassung der Galilei'schen Beharrungsgesetzes”, *Philosophische Studien* 20, pp. 266-297.
- Lange, L. (1902): “Das Inertialsystem vor dem Forum der Naturforschung”, *Philosophische Studien* 2, pp. 1-71.
- Laymon, R. (1978): “Newton's Bucket Experiment”, *Journal of the History of Philosophy* 16, pp. 399-413.
- Mach, E. (1872): *History and Root of the Principle of the Conservation of Energy*, Chicago: Illinois, Open Court, 1911.