

LA EVOLUCIÓN DE LOS CONCEPTOS DE ESPACIO
Y TIEMPO; UNA REFLEXIÓN SOBRE LAS IDEAS DE
NEWTON, MACH Y EINSTEIN

OSCAR LEONARDO ACEVEDO PABÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS HUMANAS
ESCUELA DE FILOSOFÍA
BUCARAMANGA
2006

LA EVOLUCIÓN DE LOS CONCEPTOS DE ESPACIO
Y TIEMPO; UNA REFLEXIÓN SOBRE LAS IDEAS DE
NEWTON, MACH Y EINSTEIN

OSCAR LEONARDO ACEVEDO PABÓN

MONOGRAFÍA DE GRADO PARA OPTAR
AL TÍTULO DE FILÓSOFO

Director:
DR. FAVIO E. CALA VITERY

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS HUMANAS
ESCUELA DE FILOSOFÍA
BUCARAMANGA
2006

*Con gran orgullo dedico esta monografía:
a mis padres
Nelsy Pabón Díaz y
Leonardo Acevedo Duarte;
a toda mi familia,
... a mis amigos.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos aquéllos que, en mayor o menor medida, contribuyeron a la realización de este trabajo. Principalmente doy gracias a mis padres, por ese gran impulso que me dieron; así como a toda mi familia; todos lo cuales han demostrado una gran fe en mí.

A mi alma mater, la Universidad Industrial de Santander y a su Escuela de Filosofía.

Al profesor Favio E. Cala Vitery, por haber aceptado ser el director de este humilde trabajo. También a la profesora María Elvira Martínez por la colaboración prestada.

También agradezco a mis calificadores Pedro Antonio García y Alonso Silva, los cuales me dieron ese aliento definitivo para concluir con esta etapa de mi formación académica; a ellos les debo su comprensión y su crítica pertinente.

A todos mis compañeros de la universidad, con quienes tuve el gusto de compartir este proceso formativo. Me llevo de todos ellos esa diversidad de puntos de vista y ese espíritu de debate vivo y enriquecedor.

Finalmente agradezco a todos mis amigos, esos que siempre creyeron en mí y estuvieron ahí para apoyarme.

TÍTULO: LA EVOLUCIÓN DE LOS CONCEPTOS DE ESPACIO Y TIEMPO;
UNA REFLEXIÓN SOBRE LAS IDEAS DE NEWTON, MACH Y EINSTEIN*.

AUTOR : Acevedo Pabón, Oscar Leonardo**.

PALABRAS CLAVES: Sustancialismo, Relacionismo, Espacio-Tiempo, Movimiento Inercial.

DESCRIPCIÓN: En este trabajo se presenta un análisis crítico de la evolución de los conceptos de espacio y tiempo a través del pensamiento de tres grandes científicos y pensadores que fueron protagonistas en la historia de estas ideas: Isaac Newton, Ernst Mach y Albert Einstein. La reflexión se concentra específicamente en la dicotomía que surge ante la posibilidad de pensar estos conceptos ya sea como entidades existentes por sí mismas (sustancialismo), o como existentes sólo en cuanto relaciones entre objetos materiales (relacionismo). El trabajo se desenvuelve mediante una exposición en orden cronológico que se centra fundamentalmente en la reflexión crítica así como en el discernimiento de las posiciones filosóficas que subyacen a los conceptos físicos involucrados. Se logra entonces dar una visión sintética del cambio ocurrido en las ideas sobre el espacio-tiempo y el contexto filosófico en el que se dio. El objetivo ha sido perfilar un diálogo entre filosofía y ciencia donde se demuestra una interrelación fructífera para el desarrollo intelectual humano.

Se logra esclarecer algunos problemas interpretativos de la teoría clásica newtoniana, la teoría especial de la relatividad y la teoría general de la relatividad; sobre todo la manera como se explica el movimiento inercial. En la discusión, se prueba que es posible trazar un hilo conductor en la evolución de los conceptos de espacio y tiempo, aunque también se contrastan las grandes transformaciones ocurridas por el advenimiento de nuevas teorías y hechos experimentales.

* Monografía de Grado

** Facultad de Ciencias Humanas, Escuela de Filosofía, Favio Ernesto Cala Vitery (Director).

TITLE: THE EVOLUTION OF THE CONCEPTS OF SPACE AND TIME; A REFLECTION ABOUT THE IDEAS OF NEWTON, MACH, AND EINSTEIN*.

AUTHOR: Acevedo Pabón, Oscar Leonardo**.

KEY WORDS: Substantivalism, Relationalism, Space-Time, Inertial Motion.

DESCRIPTION: In this work we present a critical analysis on the evolution of the concepts of space and time through the thoughts of three great scientists and thinkers which were main protagonists in the history of these ideas: Isaac Newton, Ernst Mach and Albert Einstein. The reflection is centered specifically on the dichotomy arising from the possibility of thinking these concepts whether as entities existing by themselves (substantivalism), or as realities only as relations between material objects (relationalism). The work is developed by means of a chronologically ordered account which is mainly focused on the critical reflection as well as on the designation of the philosophical positions underlying the physical concepts involved. Hence, we are able to provide a synthetic approach to the change occurred to the ideas concerning space-time and the philosophical context in which it happened. The aim has been to shape a dialogue between science and philosophy where it is shown a fruitful relation to human intellectual development. We provide a clarification of some interpretative problems of Newton's classical theory, the special theory of relativity, and the general theory of relativity; above all, lights are thrown on how the inertial motion is explained. Along the discussion, we prove that it is possible to outline a thread in the evolution of the concepts of space and time, though we also show contrasts due to the great transformations occurred because of the advent of new theories and experimental facts.

* Senior monograph.

** Facultad de Ciencias Humanas, Escuela de Filosofía, Favio Ernesto Cala Vitery (Director).

Contenido

| | |
|---|----|
| Introducción | 1 |
| 1. El espacio y el tiempo absolutos newtonianos | 6 |
| 2. Mach y los detractores de Newton | 16 |
| 3. La relatividad especial de Einstein | 28 |
| 4. La relatividad general de Einstein | 43 |
| Conclusión | 53 |
| Bibliografía | 56 |

Introducción

*The objective world simply is, it does not happen. Only to the gaze of my consciousness, crawling upward along the life line of my body, does a section of this world come to life as a fleeting image in space which continuously change in time*¹.

Basado en los valiosos trabajos de investigadores como Galileo, Copérnico, Tycho Brae y Kepler; sobre hombros de gigantes, tal como él mismo se expresó, Newton publicaba en 1686 su obra cumbre que levantaba la ciencia mecánica, la ciencia del movimiento local, sobre un sólido sistema de conceptos y principios. Entre sus logros más sobresalientes estaba la explicación de los movimientos de los graves terrestres al igual que las revoluciones celestes a partir de la misma fuerza de gravitación. La estructura teórica resultante, con su largo alcance y su unidad eminente, eventualmente sería vista de manera paradigmática como modelo egregio de una teoría matemática sobre la naturaleza.

No obstante los grandes triunfos, desde la misma época en que fue formulada la teoría surgieron fuertes objeciones a varios de los conceptos que ella contenía. Estas discusiones giraban en torno a temas tratados desde hacía tiempo, pero la época de los *Principia* era testigo de un auge de este debate del que Newton era sólo uno de sus mayores protagonistas. Otros grandes pensadores involucrados eran Descartes, Huygens o Leibniz; todos los cuales merecen también el crédito de ser gestores de la ciencia moderna. Entre los conceptos de la teoría newtoniana que entraban en controversia figuran especialmente las ideas de espacio y tiempo absolutos; ideas bastante relevantes si se tiene en cuenta que la ciencia mecánica se podría definir toscamente como el estudio del cambio o la permanencia de los cuerpos en un lugar del espacio a través del tiempo (movimiento local), así como el de las causas y principios que rigen ese cambio o esa permanencia. Newton, que estaba interesado en que su teoría estudiase los fenómenos en su realidad más cierta y matemática, vio la necesidad de dotar de existencia y significado *per se* a los lugares y los instantes en los que se desarrolla el movimiento (su objeto de estudio) para que éste heredara de aquéllos su carácter absoluto y así evitar la contingencia y carácter accidental del movimiento relativo, éste siempre condicionado

¹Weyl H. (1922) *Space-Time-Matter*. Dover. New York. 1952. p. 217.

a los fenómenos materiales. Con los ojos puestos sobre el movimiento absoluto, su sistema parecía enfocarse en el más alto grado de realidad, abriendo así paso a la filosofía natural. Sin embargo, podría decirse que dicha estrategia entraba directamente en conflicto con otros grandes principios filosóficos que el mismo Newton pretendía seguir; entre ellos, la determinación de ceñirse lo más fielmente a los fenómenos y las hipótesis que de ellos se pudieran inducir, evitando extender la discusión más allá de la misma experiencia con vanas especulaciones; principio que se suele llamar mediante las propias palabras del físico inglés: “*hypotheses non fingo*”. Por otro lado, los detractores contemporáneos de Newton encontraron absurda la idea de un ‘movimiento verdadero’, que no se refiriese a las relaciones que guardan los cuerpos entre sí, y por tal razón criticaron fuertemente la idea de un espacio y un tiempo que, en cuanto referentes del movimiento antes mencionado, tendrían que existir independientemente de la materia. A esta última concepción, la newtoniana, se le suele denominar *sustancialismo* del espacio y el tiempo; mientras que la tesis que plantea la realidad del espacio y el tiempo sólo a través de relaciones entre cuerpos materiales se le conoce como *relacionismo*².

El debate en torno a los conceptos de espacio y tiempo absolutos trascendió a la muerte de Newton y alcanzó un punto crucial dentro de lo que se conoce como el debate Leibniz-Clarke (Alexander, 1984), el cual es famoso por ser una de las series epistolares con mayor riqueza en el flujo de ideas tanto científicas como filosóficas. Si bien los argumentos de Leibniz fueron agudos y perspicaces, estos no fueron suficientes para evitar que la enorme influencia de Newton diera el consenso mayoritario a favor del sustancialismo durante los siguientes doscientos años posteriores a la publicación de su teoría. Pueden destacarse, de todas maneras, unos pocos pero fuertes opositores que siguieron la línea del relacionismo de Leibniz, entre ellos George Berkeley. Ya a finales del siglo XIX, surgió otra atmósfera en torno a la aceptación de las ideas newtonianas y se empezaron a plantear fuertes críticas. Sin duda, una de las de mayor alcance fue la de Ernst Mach, cuya aguda postura relacionista fue de influencia decisiva en los posteriores trabajos de otro de las grandes físicos de la historia: Albert Einstein. Las dos teorías de la relatividad de este último, la especial (TER) y la general (TGR), revolucionaron radicalmente los conceptos que se tenían hasta entonces de espacio y tiempo; y este gran vuelco tiene en parte su germen en el despertar que le dio el criticismo de Mach al joven Einstein para enfrentarse al pesado lastre de la autoridad newtoniana. El creador de la TGR no pocas veces reconoció abiertamente la inspiración recibida por Mach, tanto así que, de alguna manera, su preocupación por responder a buen término a las objeciones de Mach lo llevó varias veces a entrar en conflicto con la interpretación de sus propias teorías.

²No vale la pena discutir aquí acerca de esta terminología u otra como lo sería la voz equivalente a la inglesa *substantialism*.

Las teorías propuestas por Einstein fueron de tal novedad y profundidad que incluso hoy en día presentan no pocas dificultades interpretativas. Entre las grandes cuestiones, el viejo debate en torno a la substancialidad del espacio y el tiempo se ha reavivado en vistas de las posibles nuevas luces que TGR y TER pueden arrojar sobre el asunto. En particular, por ejemplo, no ha quedado todavía bien establecido si TGR exige una interpretación relacionista o si admite un punto de vista sustancialista. Se han realizado trabajos notables al respecto incluso dentro de la literatura completamente actual, de principios de este nuevo milenio. Esto ha llevado a muchos filósofos e historiadores de la ciencia a reexaminar el debate en sus diversas etapas y a reformular y criticar las ideas de los grandes protagonistas. No sobra decir que una de las mayores razones por las cuales semejantes trabajos son importantes es que no sólo pueden tener impacto dentro la historia y la filosofía de la física; sino que se espera que el desarrollo de estas cuestiones fundamentales determine vías de pensamiento decisivas para el futuro de la física misma, ya que ésta se encuentra desde hace un buen tiempo en una crisis y tensión constantes, en especial en torno a la tan anhelada unificación de los conceptos de la teoría cuántica y la microfísica con los de la gravitación universal.

Este trabajo se propone básicamente brindar una revisión de la evolución de los conceptos de espacio y tiempo apuntando directamente a tres de sus más grandes protagonistas ya mencionados: Newton, Mach y Einstein. Frente al gran caudal de material que pudiera surgir de un proyecto tan ambicioso, es preciso mencionar algunas pautas que lo delimiten a la extensión propia de un escrito como este. Ante todo, debe ser resaltado que se hará mención únicamente de los conceptos y argumentos que tengan un carácter crucial; limitación un tanto ambigua, pero que pretende indicar que se buscará una exposición que logre simultáneamente la coherencia y un mínimo grado de completitud. Si se logra transmitir el espíritu general de este apasionante tema, con un buen grado de precisión conceptual y con los matices más pertinentes, el objetivo principal de este escrito se puede dar por cumplido. Igualmente, no se pretende entrar dentro de las diversas controversias a fondo, adscribiéndose radicalmente a una tesis en particular y justificando profundamente dicha adherencia. La labor de interpretación global es lo suficientemente problemática y sutil como para que se añadan a este problema general la gran cantidad de problemas más específicos involucrados, cada uno de los cuales pudiese dar pie a un trabajo que fácilmente requeriría una extensión mucho mayor que la de la presente monografía. Cabe entonces aclarar que no deben esperarse radicales novedades en esta monografía; acaso, sí, un nuevo punto vista acerca de tesis que son ya casi lugares comunes. Sin embargo, esta monografía tiene dentro de sus fundamentos trabajos bastante recientes, lo que revela cierta frescura en la problemática que no se puede desdeñar.

Ahora bien, desde sus primeros planteamientos, la pregunta acerca de la naturaleza del espacio y el tiempo ha estado cargada de hondas cuestiones filosóficas; fundamentalmente dentro del plano ontológico, pero también, desde que entró al contexto de la moderna ciencia de la naturaleza, han aflorado en ella profundos desarrollos epistemológicos. En la época de Newton, el tema se hallaba perfectamente enmarcado dentro del amplio campo conocido como *filosofía natural*; asunto que para los ojos actuales podría dar con ambivalencias, ya que dentro de la filosofía natural newtoniana se encuentran profundamente entremezcladas dos áreas supuestamente bien diferenciadas en la actualidad. Por un lado estaría la ciencia de la naturaleza, que sólo buscaría la aprehensión en lenguaje matemático de los fenómenos físicos. Por el otro lado estaría la reflexión especulativa acerca de estos fenómenos físicos y los resultados de esta ciencia, es decir, una filosofía de la física. Dicha diferenciación no es para nada carente de sentido, pues delimita muy bien el plano científico y el extra-científico; todo lo cual no indica que la búsqueda de conexiones pertinentes entre estos dos niveles de análisis deba ser considerada como infructuosa o tal vez nociva. Incluso para el mismo Mach, quien poseía una marcada postura positivista³, los problemas conceptuales de la física no pocas veces merecieron el nombre de disquisiciones filosóficas. La situación actual es aun más favorable respecto a la posibilidad de diálogo entre estos dos niveles, pues se ha reconocido en la física contemporánea un sinnúmero de resultados que requieren de una reflexión profunda; además, dado que los progresos científicos parecen por sí mismos acercarse más a la ‘realidad de las cosas’, se ha comenzado a ampliar lo que debería entenderse como explicación científica, de tal manera que no deba limitarse a una función puramente generalizante. En definitiva, toda tensión exagerada entre filosofía y ciencia de la naturaleza ha demostrado ser nada menos que improductiva, y por ende perjudicial para el progreso intelectual humano.

Justificada ya la pertinencia de un trabajo donde se mezclan problemas que atañen tanto a la física como a la filosofía, es preciso hacer unos comentarios acerca de la metodología empleada en este escrito, con vistas a que éste merezca el título de una monografía en filosofía. El acento no se pondrá entonces en una exposición detallada (posiblemente muy técnica) de las teorías y conceptos físicos, pues no se pretende escribir explícitamente sobre física. A pesar de esto, la conceptualización será tan profunda y clara como lo permita el lenguaje natural y el propio de la disciplina filosófica; lo que demuestra que un ejercicio de traducción es condición necesaria para el feliz cumplimiento de los objetivos de este escrito. De otra parte, tampoco se hará énfasis en los detalles históricos dentro de los cuales se desar-

³El conocimiento de la naturaleza se basa en la simple conexión de sensaciones. Lo cual implica un énfasis en la diferenciación de los niveles antes descritos.

rolló el tema, pues tampoco se pretende hacer un trabajo de historia de la ciencia. Sin embargo, el orden expositivo seguirá hasta cierto punto un orden cronológico, dado que la introducción de objeciones demasiado anacrónicas impediría dar justicia a las ideas de determinado pensador. El énfasis se hará entonces en las ideas y en los argumentos con respecto al espacio y al tiempo, a partir de los cuales se buscará el desarrollo de la reflexión crítica, terreno propio de la filosofía; aunque ha de aclararse que el objeto de reflexión aquí involucra asuntos de la ciencia física, por lo que es del todo normal que se aluda a experiencias naturales y a ciertos conceptos matemáticos usados para representarlas. Finalmente, y como última estrategia metodológica, se procurará indicar las relaciones de los argumentos analizados con la epistemología y la ontología defendidas por los pensadores, siempre que esto sea pertinente, con el fin de esclarecer los fundamentos de los planteamientos.

Capítulo 1

El espacio y el tiempo absolutos newtonianos

La monumental obra de Newton, los *Principios matemáticos de filosofía natural* (Newton, 1686)¹, refleja ya desde su título que en ella hay mucho más que un cúmulo de resultados referentes a la ciencia matemática de la naturaleza; ésta también pretende ser todo un canon de principios sobre los cuales se debe ‘filosofar’ (según las palabras del propio Newton) acerca de los fenómenos. No es pues extraño que al final de la obra se encuentre una breve parte titulada *Reglas para filosofar*² donde explica brevemente los principios de su filosofía experimental. Sin embargo, como buen gestor de la ciencia moderna, Newton ha buscado siempre llevar sus deducciones únicamente hasta el punto que los fenómenos lo exijan. En un pasaje del *Escolio general* de los *Principia*, Newton expone esta postura con gran claridad:

... yo no imagino hipótesis. Pues, lo que no se deduce de los fenómenos, ha de ser llamado *Hipótesis*; y las hipótesis, bien metafísicas, bien físicas, o de cualidades ocultas, o mecánicas, no tienen lugar dentro de

¹A menos que se indique lo contrario, las citas de Newton se referirán a esta obra

²Brevemente estas son:

- I No deben admitirse más causas de las cosas naturales que aquellas que sean verdaderas y suficientes para explicar los fenómenos.
- II Por ello, en tanto sea posible, hay que asignar las mismas causas a los efectos naturales del mismo género.
- III Han de considerarse cualidades de todos los cuerpos aquellas que no pueden aumentar ni disminuir y que afectan a todos los cuerpos sobre los cuales es posible hacer experimentos
- IV Las proposiciones obtenidas por inducción a partir de los fenómenos, han de ser tenidas, en filosofía experimental, por verdaderas exacta o muy aproximadamente, hasta que aparezcan otros fenómenos que las hagan o más exactas o expuestas a excepciones.

la *Filosofía experimental*. En esta filosofía las proposiciones se deducen de los fenómenos, y se convierten en generales por inducción.

Una postura por lo demás válida, que desde entonces ha venido funcionando como estandarte y fundamento de la ciencia experimental moderna. Newton puede no haber sido el primero en plantearla, pero ha sido uno de los más grandes difusores y expositores de la misma. Pese a su insistencia constante en ceñirse a tal principio, puede argumentarse que Newton estaba bien consciente de que los fenómenos no le eran suficientes para la formulación de su teoría natural. Sus propias reglas para filosofar podrían considerarse una excepción, pues ellas son más reglas para el pensamiento que regularidades descubiertas en los fenómenos. Todo esto indica que de alguna manera debe aceptarse que el pensamiento hipotético tiene un lugar en el sistema newtoniano. Pero ante esto debe hacerse la salvedad que Newton siempre trató de reducir el alcance de la especulación al mínimo; prueba de esto es que Newton considera pertinente señalar que su *regla para filosofar IV* está formulada para evitar que las hipótesis supriman el argumento de inducción, por lo que el fenómeno experimental debe primar siempre sobre la especulación teórica.

Por otro lado, buena parte del *Escolio general* es una alusión a la manera como Newton entiende a Dios dentro de su sistema del mundo. En la época de Newton, donde la reflexión acerca de la naturaleza abarcaba toda suerte de especulaciones, incluso la misma teología podría verse involucrada. Newton esboza un Dios que es un ser necesariamente existente, que rige todas las cosas con su voluntad y que sin embargo no es nada corpóreo; ya que no se puede sentir, ni ver, ni oír, ni percibir por sentido alguno. También pertenece a la esencia divina el ser poseedor absoluto de toda verdad, de una manera que es imposible de imaginar para los humanos dado que es imposible que Dios perciba de la misma forma que lo hacemos nosotros. *Como el ciego no tiene idea de los colores, de igual modo nosotros no tenemos idea de los modos con los que Dios sapientísimo siente y entiende todas las cosas*³, escribe el físico inglés. Resulta pues curioso que en el mismo lugar donde se habla de atenerse fielmente a la experiencia, se hable con tanta vehemencia de una realidad que es infinitamente más cierta que cualquier realidad corpórea, pero que de la cual no se puede tener experiencia directa alguna. Los fenómenos, no obstante, son para Newton una demostración suprema de la perfección y el poder divinos; por esto es preciso hablar de Dios incluso en filosofía experimental, pues esta representa una oportunidad inigualable de acercarse a la inteligencia divina a través de su creación. De esto se concluye que para Newton es posible, y más bien necesaria, la existencia de una estructura más cierta y perfecta que subyace en todos los fenómenos. Además no hay, a los ojos de Newton, una contradicción al hablar de estas estructuras, pues su realidad está supuestamente

³*Escolio general*, libro 3ro. de los *Principia* (Newton 1686).

manifiesta en los fenómenos. Sin embargo, el ojo contemporáneo, con su perspectiva mucho más laica, no deja de encontrar al respecto cierta tensión, ya que en el fondo se está hablando de algo de lo que no se puede dar cuenta directamente con el experimento, por lo que su pertinencia para la ciencia experimental bien podría ponerse en entredicho. Pronto se verá que los conceptos de espacio y tiempo absolutos surgen en la obra de Newton haciendo salvedades similares, pues estos en analogía a la existencia divina, no basan su realidad directamente en lo corpóreo, antes bien, ellos le anteceden.

Los conceptos de espacio y tiempo no se definen realmente dentro de los *Principia* sino que estos se discuten a través de un *Escolio*⁴ después de las *Definiciones*, al inicio de la obra. Newton da por sentado que las palabras ‘tiempo’, ‘espacio’, ‘lugar’ y ‘movimiento’ son bien conocidas por todos y la explicación básica de lo que significan no le parece necesaria. Lo que sí parece necesitar Newton es una profunda diferenciación en lo que se debe entender por estos conceptos a nivel de la ciencia matemática de la naturaleza, en contraste con el manejo cotidiano que se tiene de los mismos. Newton encontrará en el primer nivel conceptos absolutos, verdaderos y matemáticos; mientras que en el segundo nivel sólo habrá concepciones relativas, aparentes y comunes.

Con respecto al tiempo absoluto, Newton lo esboza como una duración en sí misma, de flujo constante, imperturbable y sin relación a nada externo. El espacio absoluto es igualmente imperturbable y tampoco tiene relación con nada externo a él, pero también es por su parte inmóvil y similar en todas sus partes. Al lado de sus conceptos absolutos, Newton coloca el uso relativo y común de los mismos. El tiempo relativo será entonces una medida sensible y externa con respecto al movimiento y cambio de los cuerpos. En la práctica, se usa para medir el tiempo relativo en lugar del tiempo verdadero; pero las medidas de aquél pueden no ser exactas e iguales. Un ejemplo de tiempo relativo es el día, que se mide a partir del movimiento de rotación de la Tierra; éste se supone que es de igual duración siempre, aunque los astrónomos saben que se le deben hacer pequeñas correcciones para empatarlo con el tiempo cósmico. El espacio relativo es la medida movible de los espacios absolutos a través de los cuerpos que ocupan un lugar, éste igualmente es posible que no sea exacto o igual, aunque para sus efectos prácticos se supone inamovible. La Tierra también es un ejemplo típico de espacio relativo; suponemos que el espacio recorrido por un cuerpo es la magnitud que se logra al compararlo con las dimensiones terrestres, pero en verdad, dado que la Tierra se mueve a gran velocidad por el espacio, el auténtico espacio recorrido suele ser mucho mayor.

⁴El análisis que viene sobre los conceptos de espacio y tiempo absolutos de Newton proviene enteramente de esta sección de los *Principia*.

Las partes del espacio que ocupa un cuerpo las define Newton como lugares y el lugar del todo no puede ser otra cosa que la suma de los lugares de las partes. Finalmente, el movimiento absoluto se define como el paso de un cuerpo de un lugar absoluto a otro lugar absoluto, mientras que el movimiento relativo involucra respectivamente lugares relativos. Si un hombre camina sobre un barco, entonces tiene un movimiento relativo con respecto al barco; pero dado que el barco puede estar moviéndose respecto a la Tierra, entonces el movimiento relativo del hombre respecto a la Tierra se debe en parte debido al movimiento del barco y en parte a su propio movimiento. La Tierra también se está moviendo en el espacio absoluto y el movimiento absoluto del hombre deberá deberse en parte también al movimiento de la Tierra. De esto puede deducirse que los movimientos relativos no suelen ser medidas exactas del movimiento absoluto.

Newton también especifica que los tiempos y lugares absolutos son su propia duración y lugar a la vez que tienen y son por sí mismos su medida exacta y matemática. Con esto Newton replica que sería absurdo suponerlos alterables, pues sería como sacarlos de sí mismos. La perspectiva newtoniana visualiza a los cuerpos situados en orden dentro del espacio absoluto y sucediéndose en orden durante el tiempo absoluto. Refiriéndose específicamente a los lugares absolutos, Newton afirma que suponer móvil el lugar primario de las cosas sería absurdo. Este argumento, aunque es mencionado brevemente, parece dar una primera justificación profunda de la necesidad de los conceptos de espacio y tiempo absolutos. El proyecto científico newtoniano es construir una ciencia matemática. Por lo tanto, el dar un fundamento exacto a las magnitudes empleadas, parece en ello imprescindible, pues si se les representa relativas y móviles pareciese que para dar cuenta de ellas habría que referirse a unas previas y así *ad infinitum*, e incluso habría que modificarlas constantemente. Una representación de esta índole sería sin duda improcedente. Cualquiera que haya trabajado con problemas teóricos en mecánica clásica reconocerá que la representación de un marco espacial inmóvil y la de un parámetro temporal continuo e igual en sí mismo, son de extrema utilidad a la hora de visualizar los problemas. Pero en este punto debe aclararse que una cosa es la tesis de la posibilidad, pertinencia o incluso la necesidad de tal representación y otra muy distinta es la tesis de su substancialidad, es decir, que ésta representación refleja las propiedades de un ente externo, real y distinguible de los otros. Esta diferenciación es fundamental, y se volverá a ella más de una vez a lo largo de esta monografía.

No cabe duda que Newton tenía razones distintas a la simple compatibilidad con los fenómenos para postular sus conceptos de espacio y tiempo. Incluso, se podría decir que dichas razones extra-empíricas (metafísicas) constituían un móvil

principal para dicha postulación. Existen intérpretes que sostienen que dentro de las más grandes razones entraban algunas de orden teológico (Másmela 1986). Las ideas newtonianas fueron al parecer influenciadas por un pensador perteneciente a la escuela neoplatónica de Cambridge: Henri More, quien tenía profundas inclinaciones anti-cartesianistas⁵. Para Descartes, la idea fundamental que subyacía a la de un cuerpo material era la extensión, lo que traía como corolario que en la física cartesiana se hacía equivalente la idea de materia y la de espacio, donde no podría haber extensión alguna por fuera de la materialidad. More contrapuso diciendo que la idea de espacio no habría de vincularse directamente a la materia sino que éste debía ser pensado como la síntesis de toda la absoluta potencialidad del mundo material. Por tanto, el espacio era de alguna manera una condición sin la cual no era posible comprender la materia. Dado que el espacio constituía un especie de causa previa a toda existencia material, More debió darle un estatus ontológico al espacio hasta el punto de dotarlo de cierta condición de necesidad, condición que sólo podría justificarse a partir de la más real necesidad de todas: la existencia divina. More concluyó entonces que el espacio debía ser algo necesario en la mente divina, a manera de un atributo, si bien no existente por sí (algo que sólo puede concedérsele a Dios), el espacio compartiría ciertas propiedades similares con la divinidad debido a su papel primario en el orden causal de la existencia corpórea. Por esto no es de extrañarse que ciertos predicados son igualmente aplicados a Dios y al espacio absoluto; entre ellos el ser uno, eterno, inmóvil, simple, etc (Con respecto al tiempo, existe una equiparación muy similar). Newton parece haber tenido cavilaciones similares a las de More; ya puede verse en el mismo *Escolio general* de los *Principia* que Newton opina, con More, que el espacio y el tiempo son el marco propio de la potencia divina sobre la materialidad:

Dura siempre [Dios] y está presente en todo lugar, y existiendo siempre y en todo lugar, constituye a la duración y al espacio. Puesto que cada partícula de espacio existe *siempre*, y cada momento de duración está en *algún lugar*, ciertamente el constructor y señor de todas las cosas no será *nunca, ningún lugar*. [...] Dios es uno y el mismo dios siempre y en todo lugar. Es omnipotente no sólo *virtualmente* sino *sustancialmente*: pues lo virtual no puede subsistir sin la substancia. En él se hallan contenidas y se mueven todas las cosas, pero sin mutua interferencia. Dios nada sufre por el movimiento de los cuerpos: éstos no experimentan resistencia alguna por la omnipresencia de Dios. [...] De donde también es todo él [Dios] semejante a sí mismo. . .

La analogía con todas las aclaraciones referentes al espacio y el tiempo ‘verdaderos’ en el primer *Escolio* es patente. No resulta pues improbable que las ideas

⁵Los lineamientos generales de las ideas Descartes y More han sido extraídos del artículo de Másmela.

teológicas de Newton influyeran en los criterios que emplearía a la hora de formular los cimientos de su teoría científica.

Como crítica adicional a Descartes, More replicaría que la idea cartesiana de materia como *res extensa* conducía inevitablemente al ateísmo, ya que haría posible pensar la materia y su extensión como una idea clara e independiente para la cual no habría necesidad de recurrir a la idea de Dios como causa última⁶. Descartes no podría encontrar dificultad alguna a la hora de describir los fenómenos naturales ya que él sobrentendía la extensión en la materialidad (y en general el mundo sensible) dando por sentada una supuesta simplicidad cuando se usan conceptos mecánicos tales como lugar, movimiento, etc. Para Newton, heredero de More, el espacio constituía el marco fundamental en el que se desarrollan todos los fenómenos de la naturaleza. Desde la época newtoniana se empezó a ser consciente de que a la hora de tratar el problema del movimiento éste podría desplegarse en dos interrogantes básicos: qué se mueve (la materia) y el marco en el que se da ese movimiento (el espacio y el tiempo). Constituía entonces un verdadero escollo para Newton el poder definir con precisión el marco sobre el cual iba a desplegar sus leyes naturales y por tal razón se propuso esclarecer lo que debería entenderse por Espacio y por Tiempo.

A propósito de la materia, la idea newtoniana de la misma es otra gran razón para encontrar divergencias con respecto al pensamiento cartesiano. La *Definición 1* de los *Principia*, la de cantidad de materia, demuestra que Newton era un atomista arraigado, ya que dentro de la explicación de este primer concepto se concibe el enrarecimiento o la condensación de los cuerpos a través de una representación atomista. Ahora bien, es una clásica objeción al atomismo, el hecho de que éste supone la existencia del vacío, pues éste sería lo que separa un átomo de otro. Dado que, como separación, el vacío debería tener el atributo de la extensión; es natural que para Descartes, para quien la extensión y la materialidad eran equivalentes, el concepto de vacío no podría ser nada menos que absurdo⁷, pues lo vacío resultaría siendo, al final, un cuerpo. Newton no tendría problema con el vacío, pues los lugares absolutos, que son extensos mas no materiales, bien podrían dar cuenta de ese vacío siempre que no estén ocupados por cuerpo (átomo) alguno. Por otro lado, la insistencia cartesiana en que es dudoso pensar en otro atributo de la corporeidad distinto de la extensión, raya notoriamente con el espíritu de la *regla para filosofar III* de Newton; pues en ella se admite con tranquilidad que toda cualidad que se encuentre en todos los cuerpos experimentables debe ser vista como un atributo propio de la corporeidad. Dado que la visión

⁶Puede recalcar que un argumento similar ha sobrevivido hasta la actualidad: aunque en el contexto de la teoría de la relatividad, William Craig parece requerir dentro de su teología la existencia del espacio y tiempo absolutos (Balashov et. al. 2003).

⁷Véase, p.e., Descartes, *Principios de la Filosofía*, II §4-7.

newtoniana de materia es mucho más rica, es de esperarse que ésta sea vista como algo distinto a la extensión y a la duración. Newton opta por concebir al espacio y al tiempo como algo previo a los cuerpos, por lo que, a la hora de hablar del estado de un cuerpo y para poder expresar los cambios que ocurren en éste, le es necesario decir dónde se encuentran los cuerpos y sus partes en cada instante, o sea, debe dar cuenta de los lugares espaciales y temporales de cada uno de ellos. Por esto Newton necesita especificar sus conceptos espacio-temporales de una forma distinta a toda presencia material y completamente independiente de ella, de ahí que dotarlos de carácter absoluto sea algo inminente.

No obstante, al margen de sus inclinaciones metafísicas, Newton era muy consciente de que la única forma de hacer válidos sus conceptos de espacio y tiempo absolutos, dentro del marco de la filosofía experimental, era que éstos tuvieran cierta repercusión sensible. Newton sabía muy bien que era ilógico medir un espacio o un tiempo absoluto directamente; ya que ellos, por definición, no hacían referencia a nada sensible. En cambio, se planteó la posibilidad, en la última parte del *Escolio*, de *develar* de alguna manera un movimiento absoluto. Dado que el movimiento absoluto involucra la concepción de espacio y de tiempo absolutos, éstos estarían de alguna manera justificados, incluso hasta el punto de su substantialidad física, al estar involucrados en un fenómeno sensible⁸. Newton propone entonces mostrar los movimientos absolutos, y diferenciarlos de los relativos, ya sea a partir de sus propiedades, causas y efectos; pronto reconocerá que existen serias dificultades para tal empresa⁹.

Como propiedades del movimiento absoluto se plantea, en primer lugar, la transitividad de que si dos cuerpos se encuentran en reposo absoluto, estos se encuentran en reposo relativo entre sí. Igualmente, cualquier movimiento relativo de un cuerpo respecto a otro en reposo absoluto será una medida exacta de su movimiento absoluto, además que ésta sería igual a la medida del movimiento respecto a cualquier otro cuerpo en reposo absoluto. Ya se ha visto que si, en cambio, el movimiento de un cuerpo se refiriese a otro en movimiento absoluto, este movimiento relativo no sería medida exacta de su movimiento absoluto. Es pues evidente que un cuerpo (y en especial un conjunto de cuerpos) que se hallase en reposo absoluto sería un punto de referencia privilegiado desde el cual, al medir movimientos relativos, se lograría obtener con exactitud el movimiento absoluto. Pero Newton reconoce que este cuerpo pudiera no existir y, una objeción mucho más grave es que, aunque existiera, cabe preguntarse cómo reconoceríamos que este cuerpo está efectivamente en reposo absoluto; puesto que puede mostrarse que todo con-

⁸Conclusión lógica discutible. Podría ser el caso en que se defina un movimiento absoluto sin referencia a los conceptos de espacio y tiempo absolutos.

⁹En la discusión que prosigue se vuelve la mirada de nuevo al *Escolio* del inicio de los *Principia*.

junto de cuerpos, con reposo relativo entre sí aunque moviéndose ellos todos con respecto al espacio absoluto, brindaría las mismas propiedades relativas que las del conjunto de cuerpos en reposo absoluto.

No hay pues ningún avance en las propiedades para la distinción entre movimientos verdaderos y aparentes. Newton continúa entonces discutiendo las causas, que dentro de su teoría no son otra cosa que las fuerzas. El movimiento verdadero de un cuerpo sólo puede ser generado o alterado a partir de una fuerza sobre dicho cuerpo; en cambio, para generar o alterar el movimiento relativo, esto no es necesariamente así, pues en este caso bastaría con aplicar una fuerza sobre el cuerpo desde el cual se está refiriendo el movimiento. De igual manera, toda fuerza genera un cambio en el movimiento absoluto de un cuerpo, mientras que esto tampoco es necesario en el movimiento relativo: sería suficiente con aplicar al cuerpo desde el cual se está describiendo el movimiento la fuerza necesaria para que se conserve el reposo relativo. Después de esto, Newton no insiste más con respecto a las fuerzas y existe una buena razón para esto. Las fuerzas, en la teoría newtoniana, se manifiestan a través de aceleraciones (cambios en el estado de movimiento) según su famosa segunda ley. Pero las aceleraciones medibles son siempre relativas. Si un cuerpo está en aceleración absoluta, parte de las fuerzas que se revelen a través de él no serán más que *fuerzas ficticias*. Con lo cual se muestra que el análisis de las fuerzas no revela mucho acerca del movimiento absoluto, antes bien, sería el reposo absoluto de un cuerpo el que garantiza la observación de fuerzas reales.

Newton prosigue a hablar de los efectos y como efecto fundamental postula las fuerzas centrífugas que se generan en el movimiento circular. Dicha elección no es de ninguna manera gratuita. Las fuerzas centrífugas son un tipo de fuerzas que se conocen actualmente como *fuerzas inerciales*¹⁰, las cuales pueden interpretarse en mecánica clásica como una manifestación de que el cuerpo de referencia usado está acelerado. Si se eligieran movimientos uniformes, el análisis sería desafortunado por causa de la *relatividad galileana*¹¹, pues todas las leyes del movimiento, y por ende los resultados de los experimentos, son los mismos ya sea si se refieren a un cuerpo en reposo absoluto o ya sea si refieren respecto a otro cuerpo que se mueve con movimiento uniforme (sin rotación alguna) respecto del primero. Si, por el contrario, el otro cuerpo de referencia tiene alguna aceleración, por ejemplo la debida a una rotación, se observará una diferencia en el comportamiento de los sistemas físicos. Es por esto que Newton propone un experimento, sobre el cual afirma que él mismo lo ha realizado, de una cubeta de agua en rotación.

¹⁰Se entenderá el anacronismo de usar terminología moderna, pero esto hace más fácil la redacción.

¹¹La cual Newton estableciera, obviamente no con este nombre, en el *Corolario V* después de sus tres leyes. La denominación de relatividad galileana adquirirá su sentido dentro del contexto de la teoría de Einstein.

Este célebre argumento fue de vital importancia para las posteriores discusiones acerca del movimiento absoluto. Históricamente fue leído como una justificación del movimiento absoluto, aunque una lectura más exacta parece indicar que era una arremetida contra la teoría cartesiana de los vórtices (Laymon 1978).

El argumento de Newton se puede parafrasear a grandes rasgos como sigue: Piénsese en una cubeta en la cual se ha introducido agua, la cuál está inicialmente en reposo colgando de una cuerda que se mantiene fuertemente retorcida. Al soltar el sistema, la torsión hará que la cubeta comience a rotar mientras que, por el momento, el agua permanece quieta y con una superficie plana [Situación 1]. Luego, la cubeta va transmitiéndole su movimiento al agua hasta que ésta rota a la misma velocidad que aquella, pero ahora el agua posee una superficie cóncava [Situación 2]. Posteriormente la cubeta se detiene, pero el agua persevera en su rotación y continúa teniendo una superficie cóncava [Situación 3]. Finalmente, el agua también se detiene y su superficie vuelve a ser plana [Situación 4]. Existen entonces cuatro situaciones; sin embargo, desde el punto de vista del movimiento relativo entre la cubeta y el agua, dos deberían ser equivalentes por su reposo relativo (Situaciones 2 y 4) mientras que las otras dos sólo se distinguen por el sentido de rotación relativa (Situaciones 1 y 3). De cualquier forma, el movimiento relativo resulta insuficiente para explicar por qué el agua tiene una superficie plana en ciertas situaciones (1 y 4), mientras que en otras la tiene curva (2 y 3). Newton concluye que este efecto, el de la concavidad de la superficie, sólo ocurre cuando la rotación se refiere al espacio absoluto, donde aparecen las fuerzas centrífugas reales; una rotación relativa mostrará estos efectos únicamente si participa de una rotación absoluta. El fenómeno de la inercia es pues el efecto que Newton postularía como su justificación del espacio absoluto. Al lado del experimento de la cubeta, Newton también propone otro razonamiento, un poco más ideal, de dos esferas rotantes unidas por una cuerda flotando en el espacio. A diferencia del anterior, este argumento sí parece ir directamente a la cuestión de determinar movimientos verdaderos. Newton propone de nuevo a la inercia como fenómeno diferenciador y en este caso postula a la tensión de la cuerda como la manifestación de la fuerza centrífuga. Pero además, en esta situación se propone un método para cuantificar y especificar la dirección de la rotación absoluta: aplicando fuerzas iguales y opuestas sobre cada cara de la esfera y observando si la tensión aumenta o disminuye. Newton recalca que *... así podríamos hallar tanto la cantidad como la determinación de este movimiento circular, y ello incluso en un inmenso vacío, donde no hubiera nada externo y sensible con qué comparar los globos.*

Antes de continuar con las objeciones a las ideas newtonianas, cabe hacer una última reflexión acerca de estos conceptos de espacio y tiempos absolutos. Se ha

visto que existía una buena cantidad de razones para que Newton desarrollara estos conceptos. Pero, de todas maneras, no queda muy claro cómo Newton admitió la necesidad de aducir a algo de lo que no se puede tener experiencia directa después de haberse propuesto su máxima de no imaginar hipótesis. ¿Cómo es que siempre fue tan cauteloso, por ejemplo, al mostrarse reacio a explicar el origen de la gravedad, esa acción a distancia que los fenómenos tan misteriosamente revelaban; mientras que reconoció como argumento válido la existencia de entes, tampoco manifiestos en la experiencia, como la explicación afortunada de la inercia? Pues de la inercia no resulta directamente como consecuencia la necesidad de admitir la presencia de un movimiento absoluto y mucho menos que ello implique aceptar un espacio y un tiempo absolutos. Sin embargo, puede concedérsele a Newton que su concepto de espacio absoluto explica este hecho particular. Podría abogarse en favor de Newton que él lo único que ha hecho es emplear un procedimiento muy común en la ciencia física, tanto clásica como contemporánea: *elaborar consecuencias matemáticas de las suposiciones relativas a posibles condiciones físicas, sin tener que discutir la realidad física de tales condiciones en las primeras etapas de la investigación* (Cohen 1981). Newton ha pedido que se suponga primero que sus conceptos son ciertos, elabora luego una deducción teórica que es aplicable a un hecho concreto; como consecuencia se pretende que han quedado justificados los conceptos iniciales. Pero la afirmación de la substancialidad de estas entidades, que no pueden ser percibidas directamente, parece ya algo excesivo, es como si Newton estuviera multiplicando las causas, hasta llegar a algunas ocultas, en contradicción con su *Regla para filosofar I*. Una objeción epistemológica de este tipo aparecerá una y otra vez a lo largo de la historia de los conceptos de espacio y tiempo.

Capítulo 2

Mach y los detractores de Newton

Desde el mismo momento de la publicación de los *Principia*, Newton encontró fuertes detractores en contra de su concepción de espacio y tiempo absolutos. Con referencia a este tema en particular, un punto de vista generalizado es considerar a Leibniz como el contendor contemporáneo de Newton más sobresaliente, designándolo como un defensor de la tesis relacionista oponiéndose al sustancialismo newtoniano. La disputa entre estas tesis terminó registrándose, a manera de textos clásicos, mediante la correspondencia que mantuvo Leibniz con uno de los discípulos de Newton: Samuel Clarke. No se registran al respecto comunicaciones extensas directas entre Newton y Leibniz, pero existe un buen grado de certeza de que Newton le habría ayudado a Clarke a preparar sus respuestas. Por esto y otras razones, puede considerarse que Clarke fue un fiel eco de las ideas newtonianas, siendo que el debate continuó aun después de la muerte de Newton. Dado que lo esencial de las ideas newtonianas ya ha sido expuesto en el capítulo anterior, es preciso ahora esbozar el punto de vista de Leibniz y, en especial, mostrar sus argumentos en contra de la concepción newtoniana.

Leibniz mantuvo una argumentación algo alejada de la referencia directa a los fenómenos; en sus refutaciones dio siempre gran relevancia a la fundamentación metafísica y teológica. Con frecuencia Leibniz replicó contra Clarke a partir de un principio metafísico el cual él consideraba todo un axioma: *el principio de razón suficiente* (PRS). Leibniz aseveraba que este principio no es necesario en discusiones matemáticas, pues, según él, el principio lógico de identidad bastaría para ello; sin embargo, para extender el análisis a la filosofía natural, dicho axioma era imprescindible. El principio reza básicamente como: nada sucede si no existe una razón por la cual deba ocurrir así y no de otra manera¹. Leibniz cita como uno de los primeros grandes ejemplos de aplicación del PRS en la filosofía natural a la

¹(Alexander 1984), 2da. carta de Leibniz §1.

deducción de Arquímedes de la estática de una palanca, puesto que una balanza con cargas equivalentes en cada uno de sus brazos no tiene razón alguna para inclinarse hacia uno u otro lado. Al lado del PRS, Leibniz pone otro principio práctico para la filosofía natural, el principio de identidad de los indiscernibles (*principium identitatis indiscernibilium*, PII)²: no hay dos cosas particularmente idénticas que no se pudieran discernir, sino tan sólo cosas fundamentalmente distintas; proposición casi a manera de corolario del PRS, ya que, si no se pueden distinguir, no existe razón para considerarlas distintas, cuando más sería llamar a la misma cosa con dos nombres diferentes.

Armado con sus axiomas, Leibniz propone ante todo su concepción de espacio y de tiempo. Espacio y tiempo son entonces algo meramente relativo, éste es el orden de las cosas en su sucesión mientras que aquél es el orden de las cosas en la simultaneidad³. Ellos son simplemente un orden, o sea, ciertas relaciones entre los cuerpos materiales. Toda substancialidad del espacio o el tiempo radica en que con ellos se expresa un atributo del mundo material, y si existen, es sólo a través de la materia. Puede verse que el orden ontológico es radicalmente opuesto al newtoniano. Para Newton, el espacio y el tiempo son condición de existencia y concepción de la materia. Para Leibniz, éstos sólo existen y se conciben a través de relaciones materiales. Sin embargo, Leibniz coincide con Newton en entender la *idea* de espacio y de tiempo como la absoluta potencialidad de la materia. Entonces, para esclarecer esta idea, Leibniz habla de cómo se llega a la *abstracción* del espacio⁴. Entonces se aclara que la abstracción de un espacio inmóvil y homogéneo surge cuando un cuerpo coexistente cambia de posición con respecto a una multitud de otros coexistentes, con lo que se dice que ha cambiado de *lugar*, y si otro cuerpo ocupa el puesto del primero (siempre con referencia a otra gran multitud), entonces se dice que éste ocupó el lugar de aquél. Y siempre que se abstraiga un número suficiente de lugares hasta el punto de comprender una gran variedad de sitios y configuraciones distintas, entonces, a esta totalidad, se le llamará *espacio*. Leibniz prosigue comparando esta abstracción de espacio con una idealidad de relaciones de parentesco, cuya relación básica consistiría en el ser descendiente o antecesor directo y la única magnitud sería el número de generaciones. Dicha abstracción sería útil para representar la genealogía de una persona, Leibniz incluso afirma que en dicha representación se podrían expresar otras relaciones, pues, si supusiera la metempsicosis, el mismo individuo podría ocupar varias líneas generacionales indicando quién es reencarnación de quién. Leibniz insiste, sin embargo, que ... *esos sitios, líneas y espacios genealógicos*,

²Íd., 4ta. carta de Leibniz §4-6.

³Cfr. Íd., 3ra. carta de Leibniz §4.

⁴Íd., 5ta. carta de Leibniz §47.

*aunque expresaran verdades reales, no serían más que cosas ideales*⁵. Dado que éste análisis pretende ser una analogía con respecto al espacio y al tiempo, se aprecia que Leibniz puede abstraer la cuantificabilidad y homogeneidad espacio-temporal, tal como lo hace Newton; pero esto lo hace a través de las ideas, y, tal como él dice, aunque éstas ideas expresen verdades reales (del mundo físico), esto no implica que los espacios que la componen tengan una existencia substancial. En otra parte se lee a Leibniz decir: *Pero si no hubiera criaturas, el espacio y el tiempo estarían sólo en las ideas de Dios*⁶.

Con miras en refutar el concepto de espacio absoluto newtoniano, Leibniz propone sus famosos argumentos de las traslaciones⁷. Piénsese por ejemplo que todo el universo es trasladado a lo largo del espacio absoluto. Observacionalmente todo sigue igual ya que las posiciones relativas de los cuerpos han permanecido inalteradas, no existe un sólo fenómeno que demuestre que se trata de situaciones distintas. De forma análoga, piénsese que cierta secuencia de eventos cósmicos no comienza en determinado instante del tiempo absoluto sino algunos minutos antes; la historia universal seguirá siendo la misma ya que la sucesión de los eventos no ha sido alterada y no hay posibilidad alguna de distinción. Semejantes traslaciones sólo son pensables a través de una concepción sustancialista. Lo siguiente que hace Leibniz es mostrar que estas traslaciones violan tanto PRS como PII. Por un lado, dado que los puntos del espacio y el tiempo absolutos son todos iguales entre sí, es completamente irrelevante cuál se elija para colocar el primer cuerpo o el primer instante, siempre que el resto de elementos sean colocados guardando las relaciones adecuadas. Por esto, es imposible que exista una razón por la cual Dios haya elegido que el mundo se ubicara de esta manera y no de otra. Mejor, desprovisto de su carga teológica, es imposible que haya una razón por la cual el universo esté en este y no otro lugar o tiempo absolutos. Además, dado que sus efectos reales son los mismos, estas situaciones son indiscernibles fenomenicamente, por lo que no pueden considerarse diferentes; así que también se contradice PII. En estos argumentos se muestra una peculiar relación entre PRS y PII: una conexión teológica. Una violación de PII sería como multiplicar las criaturas de una forma superflua por lo que, aplicando PRS a la creación divina, esto traería como consecuencia el absurdo de que Dios obra sin razón. El argumento a través de PII es mucho más mundano, pues este evita que la eventualidad de las diversas traslaciones resulte en un multiplicidad metafísica innecesaria, sin relación a los fenómenos, principio equiparable a las *reglas para pensar I y II* de Newton.

Dentro de las réplicas que tuvo Clarke ante los argumentos de Leibniz, una fue que

⁵Ibíd.

⁶Id., 4ta. carta de Leibniz §41.

⁷De ellos se hace mención varias veces en la serie epistolar. Una podría ser la 3ra. carta §5-6.

Leibniz parecía tener en muy poca estima la omnipotencia de Dios y la absoluta libertad de su voluntad. Pertenería al libre albedrío divino elegir ésta y no otra disposición universal. A esto Leibniz repuso que él sostiene también que Dios tiene todo el poder de elegir, pues lo sustenta sobre su razón de elegir con su infinita sabiduría, y es que es la fatalidad ciega, o la necesidad carente de razón, lo que se debe evitar pensar⁸. Clarke contrapuso posteriormente que Leibniz tenía en muy baja estima la sabiduría divina, al intentar comprenderla con su limitada razón humana. Newton, en el *Escolio general* muestra unas palabras que se oponen también a la postura de Leibniz: *De la ciega necesidad metafísica, que es también la misma siempre y en todo lugar, no surge ninguna variación de las cosas. Toda la variedad de las cosas, establecidas según los lugares y los tiempos, solamente pudo originarse de las ideas y voluntad de un ente necesariamente existente*. Parece que Leibniz no alcanzó a dar su última palabra en este punto, pues la muerte le sobrevino.

Otra de las réplicas de Clarke fue el mencionar que Leibniz, en el argumento de sus traslaciones, habló de alguna manera de dos puntos del espacio que son equivalentes (igualmente los habría del tiempo); lo que contradiría a PII. Leibniz entonces aclaró que dos partes de espacio y de tiempo, por sí mismas, son tan sólo entes ideales; que si él hablaba de estas dos como entes separados era más a menos como lo hacen los matemáticos, cuando razonan por reducción al absurdo para demostrar la unicidad de algo. El método básicamente es suponer que existen dos objetos diferentes y luego demostrar que resultan ser idénticos⁹.

Dentro del debate surgió al parecer una objeción propuesta por Clarke a la que parece que Leibniz no pudo contestar satisfactoriamente. Entre algunos de los que posteriormente sostuvieron dicha objeción, tiene renombre Kant, quien en su temprano trabajo, *Del primer principio de la diferencia de lo circundante en el espacio*, lo revivió de una manera que se haría famosa. Esta objeción tiene que ver con la posibilidad de obtener una imagen del espacio, en la que se intercambien, por ejemplo, la izquierda con la derecha. Leibniz consideraba que inversiones de tal tipo tenían la misma carga metafísica superflua que las traslaciones antes mencionadas; pues las relaciones de distancia y ángulo se conservaban. Sin embargo, el ejemplo canónico de que esto no es así lo propuso Kant con las dos manos humanas: si de ellas se supone que ambas guardan las mismas relaciones métricas de distancia y ángulo entre sus partes, entonces se les podría designar como indiscernibles desde el punto de Leibniz; sin embargo, es bien sabido que las manos no pueden hacerse coincidir, el guante derecho no sirve para cubrir el izquierdo. Kant, entre otros, concluyó de esta objeción que la postura relacionista era insostenible,

⁸Ibíd., §7.

⁹Cfr. Íd., 5ta. carta §28.

pues era incapaz de dar cuenta de ese fenómeno; incluso hay autores actuales que llegan a reverberar tal opinión (Gloy 1992). En verdad, el único error de Leibniz fue haber tenido un concepto demasiado limitado de lo que debería ser una relación espacial. Las orientaciones se pueden notar entre los cuerpos casi con la misma facilidad que las distancias o los ángulos. Es combinatoria elemental saber que la relación aRb no implica de ninguna manera la relación bRa , la reflexividad no es de ninguna manera algo inherente a una relación. Por otro lado, las relaciones no deben limitarse a dos elementos, pues las hay ternarias, cuaternarias, etc. Cualquier conjunto $\{A, B, C\}$ de puntos no colineales en el espacio con los que se defina un plano sirve para designar una izquierda y una derecha; uno y sólo uno de los dos semiespacios verá en sentido positivo la conexión de los puntos en forma cíclica A-B-C-A, el otro la verá A-C-B-A. Esta simple realidad ha sido útil siempre en ciencias físicas; por ejemplo, en química caracteriza la isomería óptica, y entre las partículas elementales se sabe que ésta es la clave para distinguir un neutrino de un antineutrino.

Las tesis de Leibniz fueron fuertes en un buen grado, hasta el punto que él merece, desde el punto de vista moderno, el título de padre del relacionismo. Se trata de una postura que parece estar más acorde con los conceptos fenoménicos de espacio y tiempo, ya que su punto de partida consiste precisamente en que toda distinción ulterior carece de significado pues no podría traducirse en una diferencia observable. No obstante, la crítica leibniziana no se desarrolló lo suficiente para dar cuenta del experimento de la cubeta de Newton. Sus contestaciones siempre se basaron en traslaciones uniformes y, cuando mucho, logró solamente demostrar la redundancia implícita en la relatividad galileana. Leibniz no poseía una contrapartida conceptual para explicar la inercia, algo que Newton sí hacía. Leibniz aducía a una *equivalencia de las hipótesis*, refiriéndose a que cualquier cuerpo debería poderse suponer en reposo para luego referir todo movimiento respecto a él. En cierta forma derrotado, Leibniz escribe respecto al experimento de la cubeta:

Newton ha reconocido la equivalencia de las hipótesis en el caso de movimientos rectilíneos; pero él cree, con respecto a los movimientos circulares, que la tendencia de los cuerpos en rotación a separarse del centro o del eje de rotación nos permite reconocer su movimiento absoluto. Mas tengo razones para creer que no hay excepciones para la ley general de equivalencia. (Carta a Huygens, 22 de Dic. de 1694.)

Existe un último detalle referente a las ideas de Leibniz que se necesita aclarar. Hasta el momento parece haberse admitido una cierta equivalencia entre el relacionismo y la negación del movimiento absoluto. Pero, como pudiera sorprender, Leibniz admitía de cierta manera un movimiento absoluto. En su quinta carta a Clarke, §53, Leibniz escribe:

Sin embargo, yo aseguro que hay una diferencia entre un verdadero movimiento absoluto de un cuerpo y un mero cambio relativo de su situación con respecto a otro cuerpo. Pues cuando la causa inmediata del cambio está en el cuerpo, tal cuerpo está verdaderamente en movimiento, y entonces la situación de los otros cuerpos con respecto al primero cambiará consecuentemente, aunque la causa del cambio no se encuentre en ellos.

De esto se deduce que es posible ser relacionista y aún admitir una suerte de movimiento absoluto. Que el relacionismo tenga esa posibilidad ha sido de gran importancia a la hora de interpretar la TGR de Einstein. Por el momento, baste decir que Leibniz no dejó muy en claro de qué manera se sabría que la causa directa del movimiento de un cuerpo se encuentra en él mismo.

Fue el físico vienés Ernst Mach quien dio un paso más adelante en la tradición relacionista y lo llevó a postular una hipótesis muy interesante sobre los principios de la mecánica. En su *Desarrollo histórico-crítico de la mecánica* (Mach 1883, para abreviar: DHCM), Mach desarrolló una fuerte crítica a Newton que llegó a responder al problema de la cubeta. El contexto científico de los tiempos de Mach era muy diferente al de la época newtoniana; no en vano habrían pasado dos siglos, el de las luces y el de la revolución industrial, en los que ocurrieron grandes cambios tanto en la ciencia natural como en la cultura que la rodeaba. El alto contenido teológico, el cual pudo evidenciarse al discutir las ideas tanto de Newton como de Leibniz, ya había desaparecido de la discusión científica. Mach mismo señala que, en el campo de la ciencia mecánica, el investigador que dio inicio rotundo a esta actitud mucho más laica¹⁰ fue Lagrange con su *Mecánica Analítica*. Hubiese sido casi absurdo que en ese lapso de doscientos años no hubiera habido avances en la teoría del movimiento local. Sin embargo, a pesar de la importancia capital de los trabajos de Hamilton, Lagrange, Euler y muchos otros científicos que separan la teoría mecánica de la época de Mach de los propios trabajos de Newton, dichos avances no consistieron tanto en una revisión crítica de la teoría newtoniana sino en una expansión y formalización de la misma. Lo que sí debe reconocerse a estos investigadores es que la *mecánica clásica*, tal como la conocemos hoy en día, es entendida mucho más a través del trabajo de ellos que de las obras newtonianas. La época de Mach es un instante en la historia donde la investigación en física comienza a cambiar. El final del siglo XIX no sólo se caracteriza por una mayor diferenciación entre las investigaciones en ciencia natural y los interrogantes de índole metafísica, sino que también fue testigo de una actitud mucho más crítica hacia los conceptos y hechos científicos. El excesivo entusiasmo de los enciclopedistas del siglo XVIII, para quienes la ciencia terminaría por dar una visión completa y cierta del mundo, se había desvanecido. Para Mach y

¹⁰Mach, Op. cit., Cap. IV-2, §5.

algunos de sus contemporáneos, la conciencia de que las teorías científicas tienen siempre un carácter provisorio empezó a tomar mucho más fuerza. Al respecto el físico vienés escribe:

La ciencia natural no se presenta con la pretensión de ser una concepción del mundo *acabada*, sino con la conciencia de elaborar una futura concepción del mundo. La filosofía más elevada de un investigador de la naturaleza, debe consistir en *tolerar* una concepción incompleta, y preferirla a una aparentemente cerrada pero insuficiente.¹¹.

Con esta actitud crítica hacia la ciencia mecánica, más una crisis relacionada con otras áreas de la física que para entonces habían alcanzado una madurez considerable (en especial la teoría electromagnética), se había formado el terreno propicio para que los viejos conceptos de espacio y tiempo absolutos se enfrentaran a profundas revisiones.

Una de las más conocidas críticas de Mach a Newton se da en un apartado de su de DHCM titulado *Las ideas de Newton de espacio, tiempo y movimiento*¹². Después de citar algunos fragmentos del ya discutido *Escolio* respecto al tiempo, Mach comienza sus objeciones con una rotunda apelación epistemológica. Newton, dice Mach, pareciera que no fuera *leal* a su idea de atenerse a los *hechos*, como si estuviera aún bajo la influencia de la filosofía medieval. El físico austriaco prosigue describiendo cómo se forma la idea del tiempo y por qué éste pudiera confundirse con algo necesario para que ocurra el cambio en la naturaleza. Mach señala entonces la manera práctica como se determina el tiempo: si algo varía con el tiempo, no quiere decir otra cosa que algo varía con respecto a otra cosa. El tiempo no es la medida propia de la variación de las cosas sino más bien una abstracción a la que se llega a través de dicho cambio. Si se habla de movimiento uniforme es porque cambios iguales en una cosa *A* (p.e. el camino recorrido por un cuerpo) suceden a la par con cambios iguales en una cosa *B* (p.e. las oscilaciones de un péndulo o los grados que gira la Tierra). El problema radica que en muchas ocasiones las conclusiones acerca de la rata de cambio de *A* a partir del objeto B_1 son las mismas que a partir del objeto B_2 , B_3 , etc., hasta el punto que se llega a creer que es irrelevante el que exista un tal cuerpo B_i y entonces se piense en el tiempo como algo que fluye por sí solo y en el que se da el movimiento de *A*. Mach recalca que todas las cosas en el universo están conectadas, pero esta conexión es lo suficientemente laxa como para que se pueda considerar que, hasta cierto punto, existen fenómenos independientes. El concepto de tiempo reside en esa flexibilidad. Mach desarrolla un llamativo argumento con la experiencia sensible que justifica esa impresión de que hay un tiempo que fluye irreversible e

¹¹Ibíd., §9.

¹²Ibíd., Cap. II-6.

invariablemente:

Sólo un número muy reducido de cambios en el universo depende de nuestra directa voluntad. Ciertos movimientos de nuestro cuerpo y todo lo que podamos conectar con ellos sería lo único que podríamos hacer depender inequívocamente de nosotros. Si en verdad todo el cosmos estuviera conectado de igual manera, tendríamos siempre la plena conciencia de que el cambio y por ende el tiempo es una relación entre las cosas; pero, como en la realidad hay un sinnúmero de eventos que escapan a nuestro control, el flujo del tiempo se nos presenta como algo irrevocable, algo completamente externo¹³.

Después de cuestionar el concepto de tiempo, la crítica de Mach se extiende a los conceptos de espacio y movimiento, donde se vuelve a citar a Newton y se reproduce el argumento de la cubeta casi en su totalidad. La primera objeción posterior se centra en aseverar rotundamente que todos los conceptos mecánicos: masas, fuerzas, velocidades, aceleraciones, etc., son relativos y que no hay ninguna definición de lo absoluto de la cual se pueda extraer una ventaja intelectual. Mach ya se habría ocupado de denunciar una falencia en el concepto newtoniano de masa como cantidad de materia¹⁴, pues no introducía nada fenoménico sobre el cual representarlo. Entre los cambios conceptuales para la mecánica propuestos por Mach está el situar al concepto de masa como una abstracción de las ideas que surgen de la experiencia de la ley de acción y reacción, dos cuerpos tendrán masa igual si al interactuar se comunican entre sí aceleraciones de igual magnitud. Esta definición va a la par con la proposición de Mach de que el concepto de fuerza auténtico y experimentable sólo se encuentre en las experiencias de la segunda ley y por consiguiente en las aceleraciones. Estas aclaraciones tienen mucha relación con la concepción machiana de lo que es la ciencia y su *principio de economía del pensamiento*. El proyecto científico humano es para Mach una empresa que pretende economizar esfuerzos. Las teorías experimentales son una condensación de los hechos orientada a que las nuevas generaciones no vean necesidad de repetir todas las experiencias anteriores, así como que puedan visualizar y razonar sobre

¹³En las líneas siguientes Mach continuará hablando sobre la irreversibilidad del tiempo y entonces introducirá el tema de la segunda ley de la termodinámica. Una consecuencia famosa de esta ley es que los eventos del pasado son distintos a los futuros (p.e. las diferencias de temperatura tienden a disminuir en el futuro). Cuando se compara la memoria con las percepciones presentes se puede hacer un contraste entre lo que se siente y lo que se recuerda. Con esto se da la sensación de flujo temporal en una dirección, en cuanto que el contenido de la memoria cercana se distingue de la experiencia presente a través de los mismos cambios regulares. En estos párrafos de DHCM se plantea también una sorprendente idea para la cosmología: el universo como su propio reloj y la entropía cósmica como su medida. Todas estas ideas físicas son de suma importancia para las teorías modernas del tiempo pero, dado que involucran conceptos de física térmica, comenzar a discutir las implicaría entrar en problemas bastante alejados de los que nos ocupan.

¹⁴Ibíd., Cap. II-5.

la naturaleza con mayor facilidad y soltura. Igualmente, las ciencias formales como la matemática están orientadas a ahorrar trabajo condensando a través de prácticos teoremas los razonamientos, cálculos y deducciones que podrían tomar mucho tiempo de otra manera. *La ciencia misma puede considerarse un problema de mínimo, que consiste en la representación más completa de los hechos con el menor esfuerzo mental*¹⁵. Desde dicha posición epistemológica, Mach cuestiona radicalmente el que Newton postule distinciones que no conllevan a ningún efecto observable. Si lo relativo es lo único experimentable, añadir a ello un concepto paralelo y absoluto es simplemente innecesario, *pura metafísica ociosa*, que va en contradicción del objetivo general de minimizar esfuerzos. Es por esto que Mach insiste en que el concepto de espacio y el de movimiento deben limitarse a su sentido relativo. Con esto en mente, Mach desarrolla el concepto de espacio a partir de argumentos similares al del tiempo así como los que usó Leibniz. Mach explica el surgimiento de la abstracción del espacio a partir de la experiencia en la que se analiza la situación de un cuerpo K con respecto a la situación de muchos otros cuerpos A_1, A_2 , etc. La generalización ocurre cuando parece que la elección de un A_i fuera irrelevante para definir correctamente la situación de K , hasta el punto de creer que K está en un lugar en sí mismo. Ese ha sido el error que ha cometido Newton en el análisis del experimento de la cubeta: a Newton se le ha olvidado el resto del universo, esos cuerpos A_i respecto a los cuales Newton se está imaginando el movimiento de la cubeta, aunque los abstraiga. Lo que Mach replica es que Newton lo único que ha demostrado con su argumento es que la rotación relativa del agua respecto a la cubeta no causa ninguna concavidad en la superficie del agua, mientras que una rotación relativa del agua respecto a la Tierra y los demás astros sí que la causa. Fortaleciendo un poco el argumento más allá de las líneas de Mach, se puede señalar que el concepto de espacio absoluto newtoniano diría que si fuera el universo, y no el agua, el que estuviera rotando respecto al espacio absoluto, entonces no habría concavidad en la superficie del agua, a pesar de que también habría una rotación relativa entre el agua y el universo. Ante semejante salvedad, Mach hubiese replicado que nadie está autorizado a extender sus especulaciones más allá de la experiencia, pues una extensión de ese estilo no tiene valor práctico. Dentro del marco de la experiencia lo único que se conocen son rotaciones relativas, así que un enunciado que distinga una rotación de un objeto en el universo, de la de un universo rotando en torno a un cuerpo, carece de sentido:

[...] los movimientos en el universo son relativos, lo mismo se trate de la concepción de Ptolomeo que la de Copérnico. Ambas concepciones son igualmente *exactas*, sólo que la última es más simple y *más práctica*. El sistema del mundo no nos es dado *dos veces*, una con la Tierra en reposo y otra con la Tierra en movimiento, sino sólo *una*

¹⁵Ibíd., Cap. IV-4, §6.

vez con sus movimientos relativos sólo determinados en forma relativa. Nosotros no podemos decir cómo serían las cosas si la Tierra no girara. En cambio, podemos interpretar de diversas maneras el caso que se nos ha dado¹⁶.

Es por esta distinción innecesaria entre movimientos que Mach acusa a Newton de no atenerse a los hechos y, de paso, a sus propios principios filosóficos.

Aunque la crítica de Mach es muy certera a la hora de refutar el argumento de la cubeta, de esta no se deduce ninguna alternativa directa para explicar el fenómeno. La teoría de Newton lo explica, pero a través de la *ficción* del espacio absoluto. Dentro del siglo XIX, la respuesta ante este interrogante se mantuvo alrededor de justificar empíricamente un *sistema de referencia inercial*¹⁷. Cuando se trata de formular las leyes de Newton desde un punto de vista experimental, éstas adolecen de una falta de referente empírico adecuado sobre el cual enunciarlas, dado que toda magnitud mecánica sólo puede ser medida relativamente. Así, por ejemplo, la primera ley reza que en ausencia de fuerzas un cuerpo persevera en su estado de movimiento. La pregunta natural es: ¿Movimiento respecto a qué? Si se pudiera hallar un sistema físico (observable), desde el cual realizar medidas tanto espaciales como temporales, y dentro del cual las leyes de Newton pudiesen ser enunciadas (Sistema de referencia inercial), el experimento de la cubeta sería parte de las consecuencias de dichas leyes. De esta manera se podrían *salvar las apariencias*, a partir de enunciados cuyo contenido es netamente empírico, ya que no se hablaría de aceleración absoluta sino tan sólo de aceleración con respecto al sistema inercial. En realidad, debido a la relatividad galileana, no se encontraría un único sistema inercial, sino toda una familia de ellos, cada uno moviéndose uniformemente respecto al otro. Por ejemplo, un sistema inercial pudiera ser el sistema astronómico de las estrellas fijas o una adecuada corrección del mismo. Ludwig Lange fue uno de los que trataron de definir esta familia empírica de sistemas inerciales. Lange se basó en un análisis de Carl Neumann en donde se descubre que dada la ley de inercia un cuerpo libre funcionaría adecuadamente como un reloj, pues cada vez que recorra cierta unidad de distancia puede suponerse que ha pasado una unidad de tiempo. En realidad, Lange descubrió que era necesario tener tres cuerpos libres cuyo movimiento relativo parte de un mismo punto para definir un sistema inercial. James Thomson llegó a una definición de índole parecida pero basándose en la segunda ley de Newton. Puede decirse que las leyes de Newton, en cuanto están formuladas para describir al mundo físico real, suponen ya la existencia de un sistema inercial, por lo que la pregunta sobre

¹⁶Ibíd., Cap. II-6, §5.

¹⁷Véase DiSalle 2002 para este análisis. Tal parece que Mach no fue del todo ajeno a una justificación de ese tipo. En especial, Mach considera fructíferos los trabajos de Lange (Cfr. DHCM, Cap. II-6 §10).

cuál sistema debería usarse está mal formulada, ya que las mismas leyes definen tal sistema.

La alternativa de hallar la familia empírica de sistemas inerciales resuelve el problema de la cubeta de Newton, al menos desde el punto de vista puramente instrumental de enunciar la explicación respecto a datos observables. Una vez hallado el sistema de referencia empíricamente, se podrá decir que la causa de la concavidad de la superficie del agua es la rotación relativa a dicho sistema. No se hace mención a nada inobservable, es sólo la correlación de un fenómeno (rotación respecto a un sistema de referencia empírico) con otro fenómeno (concavidad de la superficie del agua). Sin embargo, si se quiere dar una interpretación más fuerte a los argumentos de Mach, esta solución no recoge todo el poder de la crítica a Newton en DHCM. Una manera más radical de entender la crítica de Mach es que él está reclamando por una nueva mecánica en la que todos los fenómenos físicos, incluso los efectos inerciales, se deban tan sólo a la presencia de los cuerpos en el universo y sus relaciones. Es una forma de insistir en que Mach apeló siempre a que todo en el universo estaría relacionado. No bastará con decir que en determinado sistema de referencia se esperan ciertos efectos inerciales; sino se deberá deducir (explicar) a partir de las relaciones materiales estos efectos.

Semejante visión es radicalmente diferente y requiere en verdad de una formulación de la mecánica totalmente distinta. El más célebre de los intentos de responder a las exigencias de Mach fuertemente entendidas ha sido el de Albert Einstein y su formulación de la Teoría General de la Relatividad (TGR). Sin embargo, dicha empresa se realizó desde una perspectiva radicalmente distinta, puesto que fue precedida por la Teoría Especial de la Relatividad (TER). Las ideas de Einstein serán tratadas en el siguiente capítulo. Por el momento, debe anotarse que el intento de Einstein por responder a Mach no fue el único. Muchos investigadores, incluso el mismo Mach, intentaron la formulación de una teoría que predijera los mismos resultados que la de Newton pero que se formulara únicamente a partir de parámetros relacionales. La verdad es que una tal teoría sí se llegó a formular. Barbour y Bertotti¹⁸, en las décadas de 1970 y 1980, lograron formular una mecánica clásica relacional que virtualmente tiene el mismo poder predictivo que la newtoniana. Si esta teoría hubiera surgido en la época newtoniana, tal vez los conceptos de espacio y tiempo absolutos no hubieron trascendido en la historia y el relacionismo podría estar extensamente difundido actualmente. Sin embargo, dicha teoría apareció 300 años después, incluso casi un siglo después de que se hubiera demostrado que la teoría newtoniana era incapaz de explicar ciertos fenómenos y tuviera que ser reemplazada por las teorías de la física contemporánea. De todas

¹⁸Pueden encontrarse referencias sobre los trabajos de estos investigadores en Cala 2006 y en Huggett et. al. 2006

maneras, los resultados de Barbour y Bertotti no son fútiles. Entre sus grandes logros se encuentra el poder definir una escala temporal tal que el universo sea su propio reloj; además, dentro de dicha teoría, la superficie del agua en la cubeta también se curva, y la causa de ello es efectivamente la rotación relativa a todos los otros cuerpos circundantes. Una dificultad inherente a una teoría como la de Barbour y Bertotti es que en ella se requiere postular ciertos modelos cosmológicos para explicar los fenómenos, pues ahora todo movimiento debe ligarse al universo entero. Esto no presenta problemas siempre y cuando las premisas del modelo se funden en las observaciones del universo *tal como nos es dado*.

Capítulo 3

La relatividad especial de Einstein

En 1905, Einstein publicó cinco famosos artículos donde se exponían ideas que lo llevarían a ser uno de los físicos más influyentes de todas las épocas. Por el profundo alcance de estos artículos, ese año es conocido como el *año milagroso* de Einstein y ha sido tan celebrado que el año 2005, en conmemoración del centenario del gran año, fue declarado por la UNESCO como el año internacional de la física. Uno de estos trabajos lleva el título de *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento* (Einstein 1905), y en éste el físico alemán sentaría las bases de lo que se conoce como teoría especial de la relatividad (TER). Esta teoría socavaría muchas de las concepciones más arraigadas de espacio y de tiempo, por lo que una discusión de sus resultados principales es imprescindible.

Tal como el mismo artículo de Einstein lo indica, el contexto en el que se vio la necesidad de formular TER fue el de la electrodinámica. Los trabajos de Maxwell a finales del siglo XIX habían dado a esta área de la física un aspecto completo y entre sus resultados más destacables estaba el hecho de ser capaz de explicar teóricamente la luz como una onda electromagnética. Se trata de una de las mayores unificaciones en la física; desde ese momento, el campo de la óptica y el de los fenómenos electromagnéticos deberían ser considerados como uno solo. La naturaleza ondulatoria de la luz, en oposición al punto de vista corpuscular newtoniano, había sido demostrada ya a principios de siglo, con los trabajos de Young, Fresnel y otros. Desde ese momento, se comenzó a postular la existencia de un medio en el cual se transmitiera la luz, a la manera como los medios elásticos propagan las ondas acústicas. Este medio fue el *éter luminífero*. Después de los trabajos de Maxwell, era una consecuencia natural que se considerara al éter como el medio de transmisión de toda onda electromagnética, incluida la luz visible. Sin embargo, dicha sustancia sublime tenía características muy peculiares con respecto a la materia ordinaria: no parecía ser ponderable, atravesaba todos los cuerpos

sin ofrecer rozamiento y la única interacción con el mundo material ordinario eran las fuerzas generadas por sus perturbaciones (¡que no sus desplazamientos!), es decir, el campo electromagnético. Pese a todo esto, el uso de este concepto fue en constante aumento durante todo el siglo XIX; cada vez más, los fenómenos ópticos, y posteriormente los electromagnéticos, fueron visualizados a través de esta sustancia sutil. La relación del éter y el problema del espacio absoluto se hizo patente cuando se propuso que el éter habría de estar en reposo respecto al espacio, una consecuencia natural si se piensa que ningún cuerpo material podría ser capaz de arrastrar al éter consigo. Esto daba pie a una manera de determinar el movimiento absoluto de un sistema de referencia. Piénsese por ejemplo en el aire: si un sistema de referencia se mueve con respecto a él (por ejemplo un hombre encima de un tren moviéndose respecto a la tierra en un día sin viento), no solo sentirá un viento de arrastre causado por el aire, también observará que el sonido viaja a distinta velocidad dependiendo de si la dirección es en sentido directo o contrario al movimiento del tren. Si el hombre trata de gritarle a alguien que está encima de uno de los vagones de adelante, el sonido tardará más en llegar, tendrá menos frecuencia y se escuchará con menor intensidad que si se le gritara a alguien a igual distancia encima de uno de los vagones traseros. Es más, si el tren estuviera viajando a velocidades supersónicas, sería imposible hacerle llegar a alguien de la parte delantera del tren un mensaje mediante un sonido que viajase a través de este aire en movimiento. Al igual que en un tren en movimiento siente al aire en movimiento, un sistema de referencia moviéndose respecto al éter debería sentir un *viento de éter*, cuyos efectos (los cuales son en esencia los mismos que fácilmente se observan en el aire) permitirían definir el estado de movimiento absoluto del sistema. La única diferencia profunda entre el caso y del éter es que la luz viaja cerca de un millón de veces más rápido que el sonido, así que estos efectos serían mucho más difíciles de detectar. Suponiendo que el Sol está prácticamente en reposo absoluto, la Tierra llegaría a tener una velocidad absoluta de unos 30km/s ; sin embargo, esto es diez mil veces menor que la velocidad de la luz. No obstante, los experimentos en óptica, incluso desde el siglo XIX, son capaces de brindar la precisión suficiente para analizar la presencia o no de estos efectos. Era un hecho afortunado para la teoría electromagnética el que estuviese empata-da con la óptica, pues los experimentos puramente electromagnéticos difícilmente alcanzarían tales precisiones. Los resultados experimentales en busca del viento de éter siempre fueron negativos, no se encontró manera de demostrar empíricamente la velocidad absoluta de la Tierra. Existía entonces una contradicción entre la experiencia física y los conceptos que se habían formulado acerca de la transmisión de la luz y su relación con el espacio.

Ahora bien, ¿Qué significa todo esto y cuál es su relación con la relatividad del movimiento y el problema del espacio absoluto? Es aquí donde se puede apreciar

la enorme agudeza de Einstein, al ser capaz de encajar estas cuestiones hasta dar una solución coherente y a la vez asombrosa. En su artículo de 1905, Einstein aclara que la teoría electromagnética sufre también de un problema interpretativo a la hora de analizar sus fenómenos en sistemas de referencia en movimiento. Entonces apela al típico experimento del imán y la espira. Es un hecho conocido como inducción magnética el fenómeno de que si un imán atraviesa una espira conductora (piénsese como un aro de alambre) moviéndose relativamente respecto a él, *induce* una corriente eléctrica en la espira. El problema que resalta Einstein es que la explicación de por qué sucede esto depende de qué objeto se considera en reposo, si el imán o la espira. Si el imán se considera en reposo lo que ocurre es que las cargas en la espira se mueven respecto al campo magnético del imán causando una fuerza que las obligará a moverse y por tanto se generará corriente. Si se considera la espira en reposo, entonces el campo magnético sobre la espira será variable, lo que produce un campo eléctrico que será el responsable de una *fuerza electromotriz* sobre las cargas. ¿Qué causa entonces el movimiento, un campo eléctrico o uno magnético? Además, existe otra observación: a pesar del carácter tan diferente de las explicaciones resulta que el objeto observable (la corriente inducida) es el mismo en ambos casos como si se tratase de una mágica coincidencia. ¿Cómo justificar esta dualidad de explicaciones cuando en realidad se trata del mismo y único hecho empírico? Una igualdad de resultados como ésta, en donde no importa si son descritos respecto a uno u otro sistema de referencia, es lo que insita a Einstein a hablar de su *primer principio especial de la relatividad* (PER1) que establece que las leyes físicas, y por ende los efectos observables, deben ser las mismas sean descritas a partir de un sistema de referencia inercial o a partir de otro moviéndose uniformemente respecto al primero.

Sobre sistemas inerciales ya se ha hablado en el anterior capítulo y, como bien se sabe, la relatividad galileana incluía un principio similar a PER1 pero limitándose al caso de las leyes mecánicas newtonianas. Debido a esto pudiera parecer que no se ha hallado nada nuevo. Por esto se debe enfatizar que Einstein en PER1 no está teniendo tanto en mente las leyes newtonianas, sino el electromagnetismo de Maxwell. Su principio PER1 y el análisis del experimento del imán y la espira hacen que Einstein concluya que los campos magnéticos y eléctricos no son en realidad aspectos separados de los fenómenos, sino que estos apuntan a un solo fenómeno: el campo electromagnético. La separación entre componente eléctrica y magnética resulta pues algo relativo al sistema inercial que se usa para describir la situación. Tal parece que Einstein estuvo siete años meditando acerca de estas cuestiones (Norton 2004b), e inicialmente se enfrentó a ellas tratando de empatar las ecuaciones de Maxwell con la relatividad galileana. En mecánica newtoniana, el principio de relatividad no se limita a constatar la equivalencia entre sistemas inerciales; dado que en él se supone la validez de las leyes y conceptos de New-

ton, la relatividad clásica obliga a que las magnitudes mecánicas relativas a un sistema inercial *se transformen* de determinada manera cuando se miden respecto a otro sistema inercial. Desde el punto de vista matemático-formal, estas reglas, conocidas como *transformaciones de Galileo*, definen el conjunto total de cambios que pueden ser hechos sobre las mediciones físicas básicas de tal forma que las ecuaciones de Newton no cambien. Como el cambio entre sistemas de referencia inerciales debe, en principio, conservar las leyes (ecuaciones) newtonianas, cada uno de estos cambios debería estar representado en una transformación de Galileo¹.

Todo cuadraba bien entre transformaciones de Galileo y leyes de Newton, pues en el fondo eran éstas, con sus simetrías, las que definían a aquéllas. El problema estaba al tratar de aplicar las mismas transformaciones de Galileo a las ecuaciones de Maxwell. Algo no estaba bien. Si se usaban dos ecuaciones de Maxwell para encontrar los valores del campo electromagnético en un sistema inercial a partir de otro, se obtenían ciertas magnitudes; pero si se usaban las otras dos ecuaciones, se hallaba un resultado totalmente distinto. En definitiva, si se suponía cierto PER1, las ecuaciones de Maxwell no eran compatibles con las de Newton. Una opción habría sido modificar el electromagnetismo para que estuviera en consonancia con la mecánica clásica, pero ésta demostró ser infructuosa. Habría que admitir mejor la validez de la electrodinámica. Y es que de la aplicación conjunta de las cuatro ecuaciones de Maxwell se deduce un resultado: la velocidad de la luz en el vacío es una constante universal. Y es en este punto donde la discusión se integra con lo antes descrito respecto a la imposibilidad de hallar movimiento respecto al éter: si las ecuaciones de Maxwell son ciertas y también lo es PER1, entonces es de esperarse que no se perciba ningún viento de éter, ya que la luz no se puede mover con mayor o menor velocidad según la dirección o el estado de movimiento del sistema. Einstein decidió postular la constancia de la velocidad de la luz en el vacío como su *segundo principio especial de la relatividad* (PER2), englobando con esto tanto los resultados experimentales como el resultado teórico de Maxwell. Einstein demostraría que suponiendo PER1 y PER2, más otras consideraciones, se podría hallar el conjunto de transformaciones que dejan invariantes las ecuaciones de Maxwell. En realidad, estas transformaciones ya habían sido halladas por Lorentz mediante su *teorema de estados correspondientes*, en honor al cual llevan su nombre. Einstein también hallaría la forma en que deben ser corregidas las leyes de Newton para dar cuenta de sus postulados, modificaciones que

¹De hecho, si no sólo se tiene en cuenta la posibilidad de traslación uniforme entre dos cuerpos de referencia, sino también la opción de definir las orientaciones de diferente manera (no existe una “derecha” absoluta) o variar el punto de origen en el espacio (otro cuerpo en reposo respecto al primero) o el tiempo; entonces se tiene el conjunto total de las transformaciones de Galileo, o grupo de simetría de las leyes de Newton. Estas transformaciones resumen todas las formas en que Leibniz habría demostrado sin problema su equivalencia de las hipótesis.

ya también se habían imaginado. Lo verdaderamente original de Einstein fue la manera como planteó la cuestión y respondió a la pregunta ¿Cómo es posible que exista una señal cuya velocidad no cambie con el movimiento del observador?, pues en realidad se espera que si uno trata de moverse en la misma dirección en la que se transmite la señal uno la “vería” más lenta. ¿Dónde reside el error en dicho análisis? Einstein responderá que el error ha sido el admitir un concepto tácitamente. Un concepto que tanto Newton, Leibniz y Mach daban por absoluto y el cual determinaba esencialmente la manera como se representaban al tiempo y al espacio: la simultaneidad.

Leibniz definía al espacio como el orden de las cosas en su simultaneidad mientras que el tiempo era el orden en su sucesión. Antes de estudiar las ideas de Einstein, es necesario acercarse más a los conceptos relativistas cambiando este lenguaje de discusión. La descripción separada entre puntos o relaciones espaciales e instantes o relaciones temporales asume ya ciertas posturas acerca de la simultaneidad que deberán ser abandonadas. Es más conveniente usar la descripción de los fenómenos a partir del concepto de evento, o punto *espacio-temporal*, el cual implica que cuando se habla de un fenómeno se debe referir únicamente en su pura instantaneidad y a la vez en su pura localidad. Con esto debe entenderse que al decir que algo sucede en su forma elemental (evento), no se puede permitir un significado implícito de separación, sea temporal o espacial. Si se hace abstracción de que las personas son en verdad cuerpos extensos y que siempre se requiere de un intervalo de tiempo para realizar acciones, uno podría decir que “Juan parpadeó” y “Pedro tosió” son enunciados que describen eventos, siempre que se atienda a la unicidad tanto de la persona como del acto (propiedad de todo punto). Por el contrario, enunciados como “Juan parpadeó cuando Pedro tosió” o “Juan parpadeó y luego Pedro tosió” no podrían ser vistos como eventos. En realidad, cada uno de estos enunciados expresa una particular *relación entre eventos*, el segundo expresa la relación de *sucesión* mientras que el primero expresa el concepto que nos ocupa: la relación de simultaneidad². Cuando se habla de simultaneidad absoluta se está indicando la idea de que, dados dos eventos distintos a y b , existe siempre un criterio universal para decir que ellos son simultáneos o no. Es por esto que la simultaneidad absoluta asume que el concepto de relaciones puramente espaciales está bien definido, puesto que éstas son básicamente relaciones entre eventos simultáneos. Igualmente, la relación puramente temporal estaría bien definida entre dos conjuntos distintos de eventos simultáneos, donde surgiría entonces la relación de sucesión. Si se elimina la simultaneidad absoluta, ya no se puede hablar tan distintamente de relaciones espaciales y relaciones temporales, y es por esto que

²De hecho, la simultaneidad es una *relación de equivalencia* entre eventos. En matemáticas, se conoce como relación de equivalencia a toda relación binaria aRb que sea: simétrica [$\forall a : aRa$], reflexiva [$\forall a, b : aRb \Leftrightarrow bRa$] y transitiva [$\forall a, b, c : aRb \wedge bRc \Rightarrow aRc$]. El tipo de relaciones como la sucesión se conocen como de *orden estricto*: antisimétricas, antirreflexivas y transitivas.

se prefiere hablar de relaciones espacio-temporales.

Einstein reconoce que el concepto de simultaneidad es muy útil a la hora de describir los fenómenos y todo sistema de referencia debería contener una definición del mismo. En vez de asumir, como siempre se había hecho, que la simultaneidad es algo evidente por sí mismo, Einstein se propone *definir convencionalmente* lo que un físico debe entender por simultaneidad, es decir, un procedimiento por el cual se sabría cuándo dos sucesos son simultáneos. Entonces Einstein supone dos observadores A y B que están sobre un sistema rígido, tal que ellos están seguros de que están en reposo relativo entre sí pero separados cierta distancia. Cada observador tiene un reloj idéntico al del otro (cuando son comparados los relojes, el uno con el otro, no se atrasan ni adelantan). A quiere saber cuándo un suceso b ha ocurrido en las inmediaciones de B y para eso quiere que el instante en el que él ubica el evento t_{bA} sea el mismo que indica B [$t_{bA} = t_{bB}$]. Esto se lograría si A y B lograsen definir ambos y de igual manera qué sucesos son simultáneos para ellos, en especial que cuando el reloj de A indique t_A el reloj de B estará indicando simultáneamente un tiempo $t_B = t_A$. Esto sólo lo pueden hacer si tienen una forma de comunicarse entre sí mediante señales. Dado que en PER2 se hace alusión directa a un tipo de señal (la luz), es natural que Einstein defina la simultaneidad a partir de señales lumínicas. Einstein dirá que estos observadores tendrán relojes sincronizados entre sí siempre que al mandar A una señal luminosa hacia B en el momento que A mide un tiempo t_A , luego que al llegar a B se refleje inmediatamente y se registre allí el tiempo t_B , y después que la señal luminosa regrese a A midiéndose finalmente un tiempo t'_A , se satisfaga la relación: $t_B - t_A = t'_A - t_B$ ³. Einstein se imagina entonces un sistema de referencia como un conjunto de observadores unidos entre sí por barras rígidas cuyos relojes han sido sincronizados como ya se ha descrito. Dos eventos serán simultáneos si los observadores inmediatos a estos eventos están sincronizados y registran el mismo instante de tiempo en sus relojes. Nótese que los relojes también servirían para medir distancias espaciales, pues dado PER2 y siendo c la velocidad de la luz, se dirá que la distancia entre dos eventos m y n será $\Delta x_{m,n} = c|t_m - t_n|$, con los tiempos medidos por el reloj del observador que presencié directamente los eventos⁴.

³Esta definición se basa en parte en PER2 y en parte en la suposición de que el espacio es *isotrópico*, es decir, que debe ser equivalente el que la luz viaje de A hasta B o en el camino inverso. La definición está apelando a la noción intuitiva: la luz debe tardar el mismo tiempo en ir de A hasta B como viceversa. La definición se conoce como *sincronía estándar* y se expresa con frecuencia diciendo que para A la reflexión en B debió ocurrir en un tiempo $t_B = \frac{t'_A + t_A}{2}$.

⁴Se ve que la distancia espacial no es más que el camino que debería recorrer la luz para ir desde el observador que vio un evento hasta llegar al que vio el otro. Esta distancia puede variar de un sistema de referencia a otro. El resultado relativista conocido como *contracción de la longitud* es consecuencia directa de esta manera de definir la distancia.

La relatividad de la simultaneidad se hace patente cuando se suponen dos sistemas de referencia inerciales, con una velocidad uniforme v entre ellos. El ejemplo más sencillo es suponer dos observadores E y F que viajan sobre un tren rígido en la parte delantera y trasera respectivamente, e imaginar que se produce un destello repentino en la mitad del tren. Ocurrirá entonces que, según el sistema sobre el tren, el evento e (en el que la luz del destello llega a E) y el evento f (en el que la luz llega a F) serán simultáneos. Sin embargo, un sistema anclado sobre la tierra no pensará lo mismo, pues pensará que el evento f ocurrió antes que el e en cuanto el movimiento de F fue al encuentro con la luz del destello mientras que E se alejaba de la misma. En cuanto las definiciones de distancia espacial y temporal se hacen a partir de la simultaneidad, una vez entendida ésta no debería asombrar los otros dos efectos cinemáticos⁵ notables en TER al pasar de un sistema de referencia a otro: la *dilatación del tiempo* (un proceso parece tomar más tiempo en un cuerpo en movimiento que en uno en reposo) y la *contracción de la longitud* (los objetos en movimiento parecen ser más cortos en la dirección en que se mueven). Entre los resultados dinámicos de TER más importantes baste mencionar el agrupamiento de la masa y la energía en un solo concepto, expresado por la célebre ecuación $E = mc^2$; y la imposibilidad de acelerar todo cuerpo masivo hasta o por encima de la velocidad de la luz (carácter limítrofe de c). La razón por la cual esta multitud de fenómenos no se había hecho evidente en épocas anteriores a la de Einstein es que la velocidad de la luz es tan grande que las correcciones que TER hace sobre la mecánica clásica, o sea, en las experiencias ordinarias, es mínima. La luz se transmite tan rápido que nos hace pensar que cuando vemos algo es porque acaba de ocurrir, haciéndonos confundir la indubitabilidad de la simultaneidad local (percepción directa) con la simultaneidad absoluta.

Antes de continuar con las diferentes interpretaciones de TER, vale la pena estudiar la metodología usada por Einstein en el desarrollo de esta teoría. Einstein es bien conocido por ser un físico que no se limitó a pensar sobre los problemas puntuales de su disciplina; en muchas ocasiones mencionó su gran interés por los problemas filosóficos y en especial los de la epistemología⁶. Para el caso particular de TER, Einstein afirmó deberle a Mach y a Hume el impulso suficiente para enfrentarse a un concepto tan arraigado como lo es el de la simultaneidad absoluta. Sin embargo, este impulso no parece haber provenido de algún contenido particular en las ideas sobre el tiempo de Hume o Mach, sino más bien del rechazo general que estos pensadores demostraron hacia la instauración definitiva de los conceptos en la mente humana como si se tratase de necesidades del pensamiento⁷. Einstein

⁵Por efectos cinemáticos se conocen aquéllos que sólo se refieren a relaciones espaciotemporales sin tener que hablar de interacciones entre cuerpos ni masas (efectos dinámicos).

⁶Véase Howard 2004.

⁷Véase Norton 2004b.

consideraba que una de las virtudes más grandes que podría tener un científico es su independencia de pensamiento. Como apología a la investigación histórica y filosófica acerca de la ciencia, Einstein escribe en una carta a Thorton, un joven filósofo de la ciencia⁸:

Coincido completamente con usted sobre la importancia y el valor educativo de la metodología así como de la historia y la filosofía de la ciencia. Mucha gente hoy —incluso científicos profesionales— parece, a mi modo de ver, como el que ha visto miles de árboles pero jamás ha visto un bosque. Un conocimiento acerca del trasfondo histórico y filosófico da ese tipo de independencia respecto a los prejuicios como los que afectan a esta generación de científicos. Esta independencia creada por la perspicacia filosófica es —en mi opinión— la marca de distinción entre un mero artesano o especialista y un verdadero buscador de la verdad.

Es claro el por qué Einstein admiraría la perspectiva histórico-crítica de Mach y el empeño de éste en liberar a la ciencia de cargas conceptuales contraproducentes. Sin embargo, es preciso hacer una distinción entre la visión que tenía Einstein de la ciencia y la profesada por Mach. La insistencia en fundar los conceptos sólidamente sobre los fenómenos en vez de formularlos a través de especulaciones y necesidades absolutas es una característica que comparten ambos científicos, y es prácticamente la influencia filosófica del uno sobre el otro. Einstein, al igual que Mach, pone como juez máximo a la experiencia. Pero Einstein entendió la relación entre teoría y experiencia de una manera distinta, basándose en una especie de *holismo* de la teoría⁹. Esta característica se aprecia mejor en la discusión que tuvo Einstein con dos intérpretes contemporáneos suyos, Reichenbach y Schlick, con referencia al papel de las convenciones en la teoría científica. Schlick y Reichenbach aseveraban, siguiendo la línea del empirismo lógico, que el papel de las convenciones en ciencia se limita a lo que se conoce como *definiciones coordinativas*¹⁰. El proceso de coordinación radica en que los conceptos en ciencias físicas, a diferencia de los conceptos lógico-matemáticos, no sólo requieren ser referidos entre sí (definición de un concepto mediante conceptos), sino que también algunos requieren ser referidos a la experiencia (conceptos coordinados). Idealmente, los conceptos coordinados deberían ser obtenidos unívocamente a partir de los fenómenos naturales, pero debido a la excesiva libertad que existe para armar esquemas mentales de los fenómenos se debe primero hacer algunas definiciones coordinativas de manera arbitraria, sobre las cuales se podrán fundar los otros conceptos así como las proposiciones científicas. Una vez dadas las definiciones coordinativas, el resto de la investigación se limita a obtener la teoría inductivamente de acuerdo con

⁸Cita extraída de Howard 2004.

⁹Ibíd.

¹⁰La explicación se basa en Reichenbach 1927, Cap. I §4.

los fenómenos, en un proceso completamente determinado sin dar lugar a arbitrariedad alguna. Einstein se opuso rotundamente a esa visión de la ciencia y una de sus principales razones fue que en ella se dejaba muy poco campo para la creatividad científica. El investigador solo tendría libertad sobre los conceptos primarios de su teoría y el resto sería impuesto por la naturaleza. Tal visión rayaba con la visión de Einstein de que las teorías eran *creaciones libres del espíritu humano*. En segundo lugar, existe un fuerte argumento de Einstein que lo separa tanto como del empirismo lógico como de la filosofía kantiana. Las proposiciones científicas para Einstein sólo tienen sentido dentro de una teoría como un todo, por lo que no cabe hablar de conceptos ni de afirmaciones aisladas que se vinculen directamente con los fenómenos. Por ejemplo, la segunda ley de Newton es a la vez una proposición y una definición de fuerza. Si una teoría exitosa consta de los elementos A, B, C y D, es absurdo decir que el elemento D es arbitrario mientras que todos los demás están condicionados por la experiencia. Einstein está de acuerdo con Reichenbach en que existe un amplio margen de *indeterminación de la teoría por parte del experimento*¹¹ y que por tal razón es absurdo esperar que la experiencia niegue o afirme por sí sola al elemento D aislado¹²; pero esto no se debe a que D sea necesariamente una definición coordinativa. Toda teoría física aceptable debe ser capaz de dar cuenta de los fenómenos y si en algún momento entra en contradicción con ellos será la teoría, toda ella, la que habrá sido falseada. Por lo que en tal lugar, cualquier teoría rival que sí sea capaz de dar cuenta de la experiencia y satisfaga los criterios científicos entrará, ella toda también, a conformar los conceptos y proposiciones aceptados. Un argumento similar valdría para un concepto *a priori* kantiano. Suponer que el elemento C es *a priori* mientras que los demás A, B y D están condicionados por la experiencia es una gran arbitrariedad puesto que éste sólo tiene sentido físico en conjunción con los otros por lo que cualquiera de los otros también merecería el estatus de ser anterior a la experiencia. Además, semejante doctrina de lo *a priori* sería el asentamiento obstinado de un concepto sobre el pensamiento científico que constituiría un obstáculo para la libertad intelectual del investigador.

La anterior discusión de las ideas epistemológicas de Einstein es útil para entender el carácter convencional del concepto de simultaneidad tal como se presenta en TER. Entre los intérpretes de la teoría, se despertó un acalorado debate cuando

¹¹Es decir, que el conjunto de experiencias sensibles es incapaz de definir de manera única una teoría que los envuelva.

¹²El ejemplo de la segunda ley de Newton así lo confirma. En TER puede escribirse una ecuación idéntica a la newtoniana (A saberse $F = ma$, fuerza igual a masa por aceleración). Sin embargo, los tres términos que en ella aparecen tienen significados muy distintos para cada teoría. TER no es compatible con la mecánica clásica desde el punto de vista experimental, *ergo* la segunda ley de Newton no puede ser negada o afirmada experimentalmente si sólo se refiere a ella misma.

Reichenbach, al clasificar la definición de sincronía estándar como coordinativa, afirmara que en realidad Einstein hubiera podido elegir entre cualquier ecuación de la forma $t_B = \epsilon(t'_A + t_A)/2$ con $0 < \epsilon < 1$, dado que la única condición que debe satisfacer una definición de simultaneidad es que ésta relacione dos eventos *indeterminados en el orden de la sucesión*¹³.

Para esclarecer esta afirmación de Reichenbach hay que precisar algunos conceptos relativistas. Es un resultado de TER, gracias al carácter limítrofe de la velocidad de la luz, que toda *línea de mundo* de una partícula masiva¹⁴ conserva el orden temporal entre sus eventos. En lenguaje menos técnico significa que si un mismo cuerpo recorre en su historia un evento A y luego uno B , entonces esta relación de sucesión se mantiene para todos los sistemas de referencia inerciales. O sea, la sucesión, a diferencia de la simultaneidad, es *absoluta* (prefiérase decir invariante) en TER. Hay un paralelo muy estrecho entre el carácter absoluto (prefiérase decir invariante) de la sucesión y el concepto de causalidad: si un evento A se considera causa de B entonces B debe suceder a A y nunca a la inversa, la invarianza de la sucesión asegura que para ningún sistema inercial la causa sea vista como efecto y viceversa. Para hablar de la relación de sucesión en TER se suele hablar de tipos de intervalos entre eventos (en especial después del trabajo de Minkowski). Un intervalo no es más que un par de eventos. Todo intervalo que consista de eventos que pudieran estar conectados mediante una línea de mundo, de tal forma que o uno sea el sucesor del otro o viceversa, se llama *del tipo tiempo*. Si en cambio, para ir de un evento al otro la única señal posible, por ser la más rápida, es la luz, el intervalo se llama *del tipo luz*. Los intervalos tipo luz, como los tipo tiempo, pueden ser considerados como relacionados a través de la sucesión. Existe, sin embargo, un tercer tipo de intervalo, el *tipo espacio*, que no puede estar relacionado mediante el orden de la sucesión dado que para conectarlos se requeriría que una señal viajara más rápido que la luz. En principio, no se debería poder conectar causalmente dos eventos separados por un intervalo del tipo espacio. El tipo de intervalo, sea tipo tiempo, luz o espacio, se conserva con las transformaciones de

¹³Reichenbach 1927, Cap. II §19.

¹⁴Es decir, la serie de eventos que describen el movimiento de una partícula con masa en reposo distinta de cero. Esta aclaración puede parecer confusa pero, a lo que alude, es a un corpúsculo de masa ponderable que pueda constituir momentáneamente un sistema de referencia inercial en el que ésta misma parezca estar en reposo. Las señales que viajan a la velocidad de la luz nunca podrían constituir un sistema de referencia como ese pues ellas mismas, por definición, deben estar moviéndose a una velocidad c cualquiera sea el sistema inercial. Las líneas de mundo de partículas masivas pueden entenderse entonces como la serie de eventos que pudiera recorrer el origen de un sistema de referencia cualquiera. Las líneas de mundo no siempre se pueden asociar completamente a un sistema inercial (el cuerpo que las define podría tener aceleraciones) pero cada evento que las constituye sumado a la velocidad del cuerpo en dicho instante podría definir uno (*tangentes* a la línea de mundo), es por esta razón que se dice que el sistema inercial se define sólo en forma instantánea.

Lorentz, al igual que el orden en la sucesión; hecho que, como se ha dicho, asegura la consistencia del orden causal. Debido a las propiedades formales (conceptuales) de la relación de sucesión y la relación de simultaneidad, se sabe que estas son incompatibles: dos sucesos simultáneos no pueden ser sucesivos y viceversa. Dado que los únicos intervalos que no pueden considerarse como sucesivos son los tipo espacio, sólo este último tipo de intervalo puede contener una relación de simultaneidad. Es una diferencia radical entre la concepción clásica y TER que en ésta última no exista una única manera de definir la simultaneidad, la región del espacio tiempo que respecto a un evento forma intervalos tipo espacio es demasiado amplia, dos eventos cualesquiera que la luz no pudiese conectar podrían ser considerados simultáneos. Es esto último lo que quiere decir Reichenbach cuando afirma que en TER hay un amplio margen para definir simultaneidad entre dos eventos si se atiende únicamente a que ellos deben estar indeterminados según el orden sucesivo. En comparación, la mecánica clásica no consideraba la posibilidad de dicha indeterminación puesto que suponía la simultaneidad absoluta y a la vez la posibilidad de una *acción a distancia*, en la que dos eventos simultáneos estarían conectados instantáneamente mediante una interacción que viaja a una velocidad infinita. La relación temporal en la concepción pre-relativista es un *orden total*: para un par de eventos, o uno es el sucesor del otro, o es a la inversa, o son simultáneos. En la relatividad el orden temporal es un *orden parcial*: para un par de eventos, o están bajo la relación de sucesión invariante tal que sea o uno o el otro el sucesor, o están indeterminados según la sucesión separados por un intervalo tipo espacio teniendo la posibilidad de ser declarados simultáneos¹⁵.

Dado que cualquier evento separado según un intervalo tipo espacio puede ser considerado simultáneo¹⁶, Reichenbach diría que la definición de sincronía estándar y por ende, la de simultaneidad, era puramente convencional aunque gozaría de *simplicidad descriptiva*. En vez de entrar en el áspero debate de si al final esta definición es convencional (Véase Janis 1998), bastaría disolver esta controversia con las mismas ideas epistemológicas de Einstein según las cuales, si hay algo convencional en TER no es sólo su concepto de simultaneidad sino, hasta cierto punto, su teoría entera. Una justificación de esa definición debería tener como base TER como un todo atendiendo a la manera como relaciona sus conceptos. Entre

¹⁵Cabe anotar que una vez definida la simultaneidad en un sistema de referencia todo el espacio-tiempo adquiere un orden sucesivo. Esto ocurre porque la relación de simultaneidad divide todo el espacio-tiempo en conjuntos de eventos coexistentes entre sí (planos de simultaneidad) sobre los que es posible decir si un conjunto sucede al otro o viceversa. Pero la sucesión que allí se define para el caso de intervalos tipo-espacio es simplemente relativa. Habrá otro sistema de referencia que discrepe. Es pues evidente que la exigencia de que el orden temporal sea total está en consonancia con la exigencia de la simultaneidad absoluta.

¹⁶La desigualdad que Reichenbach pone sobre ϵ en la definición de sincronía indica justamente la invarianza de la sucesión. En A se está seguro de que el regreso de la luz es posterior a su partida así como de que el momento de reflexión debe encontrarse entre estos dos intervalos.

las ventajas más grandes de esta teoría es que coincide con una de las ideas más fuertes que tenemos de lo que debería ser un concepto de velocidad: un cuerpo va a la misma velocidad si recorre distancias iguales en tiempos iguales (Janssen [17]).

En mi opinión, la visión holista de Einstein de las teorías científicas no sólo funciona para enfrentar el debate de las convenciones sino también para indicar la manera como se deben leer las teorías científicas, en especial las teorías de la física contemporánea. En los primeros años que sucedieron a la formulación de TER, no fueron pocos los que la negaron basados en los resultados contra-intuitivos de la misma¹⁷. La visión de lo *a priori* y la de las definiciones coordinativas pudieran servir de arma de defensa contra la revisión conceptual exigida por una teoría científica mediante los siguientes argumentos: Por un lado, si se apela a lo *a priori*, se diría que las teorías contemporáneas son ininteligibles para la mente humana porque violan sus conceptos básicos, éstas son cuando mucho un aparato teórico abstracto que logra organizar los fenómenos sin tener capacidad explicativa profunda. Por otro lado, si se apela a las definiciones coordinativas, los resultados de una teoría se desdeñarían como simple consecuencia de la forma arbitraria como se establecieron instrumentalmente ciertos conceptos. En el caso de la simultaneidad, se podría argumentar, desde cualquiera de los dos lados, que su definición en TER ha sido un simple estratagema: para el defensor de lo *a priori* no tiene nada que ver con el concepto de tiempo en sí, para el empirista lógico el concepto de tiempo está tan libremente indeterminado por la experiencia que no debería tomarse en serio ninguna de sus definiciones. Ambas visiones servirían como un aliciente para perseverar en el prejuicio tradicional de la simultaneidad absoluta a pesar de TER¹⁸. Einstein se opondría a semejantes excusas. En una suerte de realismo científico, Einstein insistirá en que si la teoría se ha formado una imagen del mundo y se considera exitosa entonces esta imagen debe tomarse muy en serio como la más vigente (válida) línea de pensamiento que tiene el hombre para acercarse a la realidad¹⁹. Apelar a las ideas humanas más arraigadas para negar los conceptos de una teoría es pues una medida falaz. Por lo demás, ninguna teoría científica ha negado la experiencia cotidiana humana; ha sido siempre una exigencia para toda teoría el que deba ser capaz de elaborar una explicación de las experiencias corrientes. Esta exigencia tomó en la física contemporánea la forma

¹⁷Esta objeción suele hacerse incluso hoy en día, así que el conjunto de referencias sería extensísimo. Cito dos ejemplos a la mano encontrados en la compilación editada por Altaya sobre *La teoría de la relatividad*, Col. Grandes obras del pensamiento. Barcelona. 1993. William F. Magie y Louis Trechard More son citados ahí como el ejemplo de esta respuesta natural ante la dificultad de admitir los resultados de una teoría novedosa.

¹⁸Con esto no se está queriendo decir que el empirismo lógico o el neo-kantismo defiendan necesariamente el prejuicio de la simultaneidad absoluta. Esta crítica vale sólo como una indicación del ‘peligro’ que podría representar su visión de la ciencia para la reflexión filosófica.

¹⁹Véase Howard 2002.

de un *principio de correspondencia*. Dado que la mecánica clásica probó ser lo suficientemente cercana a la experiencia corriente, las principales teorías físicas contemporáneas (la teoría cuántica y las teorías de la relatividad) se han sentido obligadas a deducir que, en las condiciones cotidianas, sus predicciones convergen con las predicciones clásicas.

TER es un paréntesis especial en la historia de los conceptos de espacio y tiempo que se ha venido dibujando a lo largo de esta monografía. Esto se evidencia en que, hasta el momento, no se ha hecho mención de si esta teoría apunta a favor del relacionismo o del sustancialismo. El orden expositivo podría sugerir que TER favorece al relacionismo si se atiende a que ha eliminado una serie de conceptos absolutos: la simultaneidad, diferencia entre campo eléctrico y magnético, etc. En el próximo capítulo se verá que tal conclusión es demasiado apresurada. Lo que sí se puede deducir de lo que se ha dicho hasta ahora, es que TER cambiará en forma definitiva el debate que se había tenido hasta el momento, ya que los conceptos tradicionales han quedado obsoletos o, por lo menos, demasiado distorsionados. Newton, Leibniz y Mach tenían una visión de materia y una perspectiva de lo que es una relación espacio-temporal que no es sostenible después de TER. Entre las consecuencias puntuales está el que de ahora en adelante el análisis se hará básicamente en el lenguaje de los eventos sin puntualizar demasiado en el espacio y en el tiempo. Hablar de espacio-tiempo no debe confundirse con la afirmación de que en TER los conceptos de espacio y de tiempo se han mezclado y se han hecho indistinguibles en una suerte de espacio tetradimensional. Esto contradiría la experiencia directa del hombre en el que la percepción de ambos conceptos está muy bien diferenciada. Con el análisis precedente acerca de los tres tipos de intervalos entre eventos se espera haber mostrado que la diferencia entre espacio y tiempo se conserva en TER aunque de una forma distinta. La relatividad de la simultaneidad ha mostrado que no se puede definir con unicidad las relaciones puramente espaciales entre eventos. Además, el número reducido de los eventos que pueden ser vistos como sucesivos también modifica el margen de aplicabilidad del concepto de tiempo como sucesión. Finalmente, los efectos de la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud demuestran que hay que ser muy cuidadoso a la hora de pensar que la medida de una separación o la de un intervalo temporal deba ser siempre la misma independientemente del sistema de referencia. Estos últimos resultados pueden considerarse como relativos a las propiedades métricas del espacio-tiempo en cuanto involucran efectivamente magnitudes como distancias e intervalos. Los resultados que sólo se refieren a relaciones y a estructuras generales, al margen de las magnitudes en concreto, como la estructura de la sucesión, suelen ser considerados como pertenecientes a las propiedades topológi-

cas del espacio-tiempo²⁰. Esta diferencia entre propiedades métricas y topológicas será útil en el siguiente capítulo.

Otro cambio importante después del análisis de TER es la aparición de las teorías de campos como la electrodinámica. La entidad física conocida como campo entró en la ciencia natural durante el siglo XIX y después de este no pudo ser ignorada. Los campos, a diferencia de la materia, no tienden a estar localizados, sino que se distribuyen extensamente por el espacio. Ellos se manifiestan experimentalmente mediante la interacción con la materia siendo capaces de generar fuerzas y transportar tanto energía como cantidad de movimiento. La necesidad del concepto de campo viene de notar que la interacción electromagnética entre dos cuerpos no se da mediante una simple acción a distancia como la gravedad newtoniana sino que se transmite con una velocidad finita (la de la luz). Esto significa que los cambios ocurridos en el cuerpo interactuante sólo se van manifestando paulatinamente para los cuerpos más cercanos y así hasta los cuerpos más lejanos. El concepto de campo es el que da cuenta de este progreso gradual definiendo en qué puntos del espacio se deberían estar manifestado determinadas perturbaciones del cuerpo. El concepto de campo electromagnético es en parte responsable de que se requiera hablar de eventos, pues el valor del campo en un punto espacio-temporal es sin duda un evento y este depende tan sólo de los eventos inmediatos que los circundan (su inmediato pasado sumado a su inmediata vecindad). Por último debe resaltarse que la relación relativista entre materia y energía obliga a repensar lo que se entiende por *mundo material*. Los campos en general poseen energía y de esta manera ellos deberían ser considerados como parte de la materia. Pero un hecho curioso es que toda materia interactúa mediante la gravedad. La teoría newtoniana de la gravitación admite una formulación mediante un campo gravitacional, pero éste, a diferencia del electromagnético, posee una velocidad infinita de transmisión. Esto planteaba una dicotomía entre fuerzas de contacto (velocidad finita de transmisión, electromagnética) y fuerzas a distancia (velocidad infinita, gravitación). Incluso antes de la formulación de TER se planteaba la posibilidad de que la velocidad de transmisión de la gravedad no fuera infinita, el mismo Mach en DHCM habla sobre esto (Cap. II-3, §3). A pesar de todo, durante un buen tiempo no salió a la luz ninguna teoría de la gravitación

²⁰La topología es la rama de la matemática que mayor empuje tuvo en el siglo XX, siglo que también la vio nacer. La diferencia radical entre topología y geometría es que aquélla analiza propiedades estructurales de los espacios al margen de las magnitudes geométricas y el fenómeno de congruencia. El ejemplo típico que se pone es que las superficies de un huevo, una esfera y una pera son esencialmente lo mismo desde el punto de vista topológico aunque no desde el punto de vista geométrico. Los puntos en ellas están conectados de igual manera. Por el contrario, la superficie de una rosquilla (y la topológicamente equivalente de un pocillo de un asa) tiene propiedades estructurales que la hacen distinta a la esfera incluso desde el punto de vista topológico. La topología suele citarse también como prueba de que no toda la matemática trata directamente con números.

exitosa y alternativa. La auténtica alternativa ocurrió después de TER y fue formulada por el mismo Einstein. Esta, la teoría general de la relatividad, sería una formulación relativista de la gravitación pero sus alcances serían mucho mayores; en ella, el fenómeno de la inercia tendrá un lugar crucial aunque insospechado.

Capítulo 4

La relatividad general de Einstein

¿Puede considerarse el espacio-tiempo de TER como una entidad independiente de la materia, o mejor, de los eventos? Por un lado, es cierto que éste hereda de la mecánica clásica tal como fue concebida en el siglo XIX el concepto de sistema de referencia inercial como aquél en el que las leyes mecánicas, y en general las leyes físicas, toman determinada forma. Los sistemas inerciales, así fueron concebidos, explican sus fenómenos siempre a través de movimientos relativos, aunque también establecen todo un conjunto de sistemas equivalentes entre sí. Las transformaciones de Lorentz, aunque diferentes en forma numérica que las de Galileo, recogen el mismo tipo de simetrías: los movimientos uniformes y las rotaciones y traslaciones rígidas. Por lo tanto, puede decirse que los mismos argumentos de desplazamientos de Leibniz serían válidos para TER. ¿Resuelve entonces la idea de los sistemas inerciales el problema a favor del relacionismo? Ya se sabe que desde un punto de vista ligero de la crítica de Mach esto es así en cuanto todos los enunciados relacionan únicamente magnitudes relativas. ¡Pero estas magnitudes relativas están condicionadas a un tipo especial de cuerpos de referencia! Ante esta salvedad ha llegado el momento de explicar una forma de sustancialismo, *el sustancialismo sofisticado*¹, que parece eliminar por completo el argumento de los desplazamientos de Leibniz. Estas ideas fueron desarrolladas mucho después de la formulación de TER, ya a finales del siglo XX, pero son de gran importancia a la hora de interpretar tanto el espacio-tiempo de la mecánica clásica de finales de siglo XIX como el de TER.

Según el sustancialista sofisticado la teoría newtoniana debería entenderse dentro de un trasfondo conocido como el *espacio-tiempo neo-newtoniano*. La propiedad principal que tiene este concepto es que en él existen todas las estructuras que definen la aceleración absoluta pero en cambio no se considera como situaciones sustancialmente distintas dos representaciones del espacio-tiempo que estén vincu-

¹El análisis de este concepto se basa en las referencias de Cala 2006 (pp. 28-30) y Huggett et. al. 2006.

ladas mediante una transformación de Galileo. El espacio-tiempo neo-newtoniano puede visualizarse como un conjunto bien definido de *líneas rectas* o líneas de movimiento inercial² que en este caso serían de movimiento rectilíneo uniforme. Éstas líneas definen un orden de puntos básicos (eventos espacio-temporales en sí mismos) sobre el cual se desarrollarán los eventos materiales reales. En el caso de la mecánica newtoniana, el sistema de eventos será tal se podrá definir un conjunto absoluto de eventos simultáneos (hiperplano de simultaneidad) cuyo ordenamiento espacial es equivalente al que visualizaría Newton en su espacio absoluto. Este conjunto de líneas o espacio-tiempo tiene una estructura inercial³ que permite definir la aceleración absoluta a partir de la desviación con relación a las geodésicas. Debido a que las transformaciones de Galileo conservan las líneas rectas como rectas y el paralelismo entre ellas, cuando se aplica una u otra descripción particular lo único que se está haciendo es llamar la misma estructura mediante un conjunto distinto de etiquetas. Esta es la diferencia esencial entre el sistema de eventos neo-newtoniano y el espacio absoluto tradicional: este último afirma la identidad de los puntos del espacio conservada a través de las traslaciones, aquél sólo afirmará la conservación de la estructura inercial. El sustancialista sofisticado sostendrá que su espacio-tiempo neo-newtoniano existe independientemente de toda materia o campo y dictamina la manera como éstos han de moverse e interactuar; pero, debido a que la substancialidad se sostiene sobre la conexión afín, ya no se postularan velocidades absolutas (eliminando la fuerza de las objeciones de Leibniz) pero sí aceleraciones absolutas (cargando toda la fuerza del argumento de la cubeta de Newton). El sustancialista sofisticado revierte entonces la relatividad galileana a su favor mostrando que la existencia y comportamiento relativo de los sistemas de referencia inerciales reales no son más que la prueba directa de la estructura de eventos subyacente neo-newtoniana.

No es difícil pensar una crítica equivalente para TER. Basándose en la representación geométrica de Minkowski (Véase [21]) donde el espacio tiempo es imaginado a través de un continuo tetradimensional, se podrá aprovechar que en TER la ley de inercia también existe y que con ella se pueden definir las respectivas geodésicas. El sistema general de eventos ya sería distinto en cuanto no existiría para cada uno un plano absoluto de simultaneidad sino todo el conjunto de eventos cuya distancia espacio-temporal es del tipo espacio. Las líneas inerciales recorrerán tan sólo regiones donde es posible la relación de sucesión⁴ y con ellas las transformaciones

²Para ir incorporando lenguaje de la TGR puede ya decirse que estas líneas son llamadas *geodésicas*.

³En lenguaje TGR: *conexión afín*.

⁴El borde de estas regiones, delimitado por puntos en intervalos tipo luz, se conoce como *cono de luz*. Se dice que los intervalos tipo tiempo están al interior del cono de luz, para los que se permiten conexiones a través de líneas inerciales. Por una razón similar, la parte exterior al cono se conoce como *región prohibida*.

de Lorentz conservarán sólo los invariantes pertinentes: líneas paralelas se convertirán en líneas paralelas, las rectas en rectas, los conos de luz en conos de luz y las regiones prohibidas seguirán siendo prohibidas a falta de conexión mediante líneas inerciales. De esta manera, TER, al basar su explicación de la inercia a partir de una familia de sistemas inerciales como los de la mecánica clásica, adolecerá de los mismo defectos.

Parece que tanto TER como la teoría newtoniana tienen problemas con la inercia, y es que ambas son capaces de definir cantidades absolutas de aceleración. Sin embargo, existe una diferencia muy interesante entre los efectos inerciales observados entre una y otra⁵: en TER los efectos inerciales no son sólo de carácter dinámico, sino también cinemático. Los fenómenos de contracción de la longitud y la dilatación del tiempo permiten distinguir aceleraciones absolutas en formas que son imposibles para la teoría newtoniana. Piénsese en un sistema rotante R en movimiento circular uniforme respecto a un sistema inercial O de TER. Si se ponen dos relojes en R a distancias distintas del centro, la dilatación del tiempo nos dice que el reloj más alejado del eje (R_1) comenzará a atrasarse respecto al más cercano (R_2). Esto puede concluirse a través de un análisis de comparación de estos relojes en R y los relojes ubicados en O . Como el reloj R_1 se mueve con mayor velocidad que R_2 con relación a O , sobre aquél el efecto de dilatación del tiempo respecto a O será mayor y, dado que todos los relojes sobre O sí están correctamente sincronizados, esto implica que R_1 se atrase respecto a R_2 . La contracción de la longitud también mostrará resultados muy interesantes: si se está ubicado sobre el sistema rotante R y si se usa una barra de medir para medir el diámetro de un círculo y luego su perímetro, la contracción de la longitud dirá que respecto a O la barra de medir no se contraerá mientras se mide el diámetro porque la orientación es perpendicular a la del movimiento de R ; en cambio, al medir el perímetro, sí habrá contracción por que la orientación es paralela al movimiento. Como las longitudes están bien calibradas en O , donde no hay diferencia en la orientación, puede deducirse que la razón entre el perímetro y el diámetro medida en R no será π sino un número mayor; en contradicción con la geometría euclidiana. En general, lo que sucede en TER es que las relaciones espacio-temporales de un cuerpo rígido dependen unívocamente de su estado de aceleración respecto a un sistema inercial. Si se siguiera con una lectura ligera de la crítica de Mach al experimento de la cubeta, se podría decir que TER resuelve mejor el problema a partir de los sistemas inerciales que la misma teoría newtoniana; pues en ella no se tendría que apelar al sistema de las estrellas fijas para justificar los efectos de inercia sino bastaría con la diferencia observable de ciertas relaciones espacio-temporales en la cubeta misma las cuales dependen de

⁵Este análisis parece haber sido propuesto inicialmente por Dorling. *Brit. J. Phil. Sci.* **29** (1978): 311-323.

su rotación relativa al sistema inercial. Si se siguiera una conexión inocente en que una apariencia explica a otra entonces la correlación entre efectos inerciales y concavidad de la superficie del agua sería la solución al problema.

Una solución del tipo antes mencionado nunca satisfizo a Einstein; al menos algo así se puede decir de la manera como Einstein justifica su nueva teoría en su artículo de 1916 *Los fundamentos de la teoría general de la relatividad*. En vez del dilema de la cubeta de Newton, Einstein reproduce ahí un argumento sobre dos esferas, cuya versión primitiva pudo haber leído en Mach⁶ ya que en el mismo artículo lo menciona como el gran precursor de la problemática. En estas líneas se manifiesta el germen de TGR:

Dos cuerpos fluidos de igual tamaño y naturaleza flotan libremente por el espacio a tan gran distancia uno del otro y de todas las otras masas que sólo es necesario tener en cuenta aquéllas fuerzas gravitacionales entre diferentes partes del mismo cuerpo. Supóngase la distancia entre los dos cuerpos invariable y que en ninguno de los cuerpos hay movimientos relativos entre sus partes. Pero sea que cada masa, juzgada por un observador en reposo con respecto a la otra masa, rota con velocidad angular constante alrededor de la línea que une las dos masas. Este es un movimiento relativo de los dos cuerpos que puede verificarse. Ahora imagínese que cada uno de los cuerpos ha sido estudiado con instrumentos de medición en reposo respecto a él mismo, y que se ha probado que la superficie de S_1 es una esfera mientras que la de S_2 es un elipsoide de revolución. Sobre lo cual uno se pregunta —Cuál es la razón para esta diferencia entre dos cuerpos? Ninguna respuesta puede ser admitida como epistemológicamente satisfactoria*, a menos que la razón sea un *hecho observable de la experiencia*. La ley de causalidad no tiene significado como enunciado sobre el mundo de la experiencia, excepto cuando *hechos observables* aparecen en últimas como causas y efectos.

La mecánica newtoniana no da una respuesta satisfactoria a esta pregunta. Ella se pronuncia como sigue: —Las leyes de la mecánica aplican para el espacio R_1 , respecto al cual el cuerpo S_1 está en reposo, pero no para el espacio R_2 , respecto al cual el cuerpo S_2 está en reposo. Pero el espacio privilegiado R_1 de Galileo, introducido así, es una mera *causa facticia*, y no algo que pueda ser observado.[. . .] Por lo tanto la causa debe estribar *por fuera* de este sistema. Tenemos que aceptar que las leyes generales del movimiento, las cuales en particular determinan

⁶DHCM, Cap. II-10, §4.

*Desde luego que una respuesta puede ser satisfactoria desde el punto de vista de la epistemología y aún ser inadecuada físicamente, si ésta entra en conflicto con otras experiencias.

la forma de S_1 y S_2 , deben ser tales que el comportamiento de S_1 y S_2 está parcialmente determinada, en aspectos bastante esenciales, por las masas distantes que no hemos considerado en nuestro sistema. [...] De todos los espacios imaginables R_1 , R_2 , etc., cualquiera sea el movimiento relativo entre uno y otro, no existe ninguno que pueda ser visto como privilegiado *a priori* sin que se reviva la objeción epistemológica antes mencionada. *Las leyes de la física deben ser de naturaleza tal que ellas aplican para sistemas de referencia en cualquier tipo de movimiento.*

El último enunciado en cursiva se conoce como *principio general de relatividad* (PGR) que recoge todo el espíritu de la equivalencia de las hipótesis de Leibniz. La respuesta de Einstein al problema de las rotaciones, tal como se ve, no será justificar un efecto inercial correlacionándolo con otro (Algo que se podría hacer con TER); sino buscando que éstos encuentren su origen en las demás masas del universo⁷ y además eliminando cualquier sistema privilegiado de referencia (PGR). El proyecto de Mach y PGR son dos condiciones muy distintas entre sí y debe ser resaltado de inmediato: el primero buscaría justificar la inercia a través de las masas distantes, mientras que el segundo buscaría que los fenómenos inerciales, como los demás hechos físicos, se ‘relativizaran’ hasta el punto de que fuera irrelevante el sistema de referencia desde el cual se describen. Einstein se inclinó más por el segundo principio, aunque guardando la esperanza de satisfacer también el primero.

La formulación de TGR partió inicialmente de un hecho muy conocido desde la época de Galileo. Es un hecho notorio que, eliminado el rozamiento del aire, todos los cuerpos caen a la Tierra con la misma aceleración y llegan al suelo simultáneamente si son arrojados desde igual altura. Desde el punto de vista de la mecánica clásica se trataba de una coincidencia entre dos ecuaciones formuladas por Newton: la masa en la segunda ley [$F = m_i a$] que llamaremos *masa inercial*, resulta siempre siendo proporcional, o igual según el sistema de medidas, a la masa en la ley de gravitación universal [$F_g = Gm_g M/r^2$] (*masa gravitacional*). Cada uno de estos conceptos muestra maneras diferentes de medir la masa y sin embargo usualmente se han tenido por iguales. Este resultado experimental podría designarse como el *principio de equivalencia*; sin embargo, Einstein debería repensarlo varias veces hasta que adquiriera una forma que le ayudara a formular su TGR⁸. La segunda manera como Einstein vio el principio ayuda a comprender mejor su relación con PGR: un observador que está en un ascensor al cual se le han

⁷Esta lectura fuerte del proyecto de Mach será una primera visión de lo que Einstein llamaría *principio de Mach*: la estructura inercial del espacio-tiempo es causada por la materia contenida en él. Este principio tomará diferentes formas a medida que progrese el trabajo sobre TGR.

⁸Esta historia es extraída de Janssen [17].

reventado los cables que lo sostenían, sentirá la misma sensación de ingravidez que un astronauta en órbita o incluso uno vagando por el espacio vacío. Además, si alguien está en una caja cerrada y siente una fuerza de atracción hacia una de las caras y puede ponerse de pie de igual forma que lo hace usualmente en la tierra, tendría dos conclusiones igualmente válidas: (1) se encuentra bajo el influjo de la gravedad terrestre, (2) está en el espacio vacío pero alguien está acelerando la caja uniformemente en la dirección que el percibe como arriba. La causa de esto es que tanto el peso de los cuerpos como las fuerzas ficticias inerciales producen la misma aceleración sobre todos los cuerpos por igual. La inercia y la gravedad parecen estar relacionados y sugieren que los movimientos acelerados de sistemas no inerciales pudieran ser interpretados como campos gravitacionales o tal vez a la inversa. TER, como se vio antes, ofrece algunos efectos cinemáticos cuando se trata de movimientos acelerados. Si se extendiese el principio de equivalencia, se esperaría que el campo gravitacional también mostrara efectos similares. Esto de hecho es así, tanto que estos fenómenos son una base experimental para confirmar TGR. Por ejemplo, los relojes de lugares más altos de un campo gravitacional marchan más rápido que los de abajo, lo que explica el corrimiento hacia el rojo del espectro de estrellas masivas. Sin pasar a detalles, también se puede mencionar que tanto en los sistemas no inerciales como en presencia de gravedad la luz se puede *doblar*, es decir, no anda en línea recta. Y por último, un caso que ya se analizó cuando se descubrió un círculo con una razón perímetro-diámetro mayor que π : el espacio-tiempo puede *curvarse* sea en campos gravitacionales o en sistemas no inerciales⁹.

A pesar de todos estos hechos, el desarrollo conceptual del principio de equivalencia todavía no era suficiente para Einstein como para basar una teoría sobre él. El siguiente paso fue profundizar en la idea de que para cada evento, siempre es posible buscar el movimiento acelerado adecuado de tal manera que la percepción

⁹Esto de la curvatura de un espacio merece una pequeña explicación. Uno de los descubrimientos más importantes en la matemática del siglo XIX fue el descubrimiento de geometrías no euclidianas que socavaron la idea de que el espacio euclidiano era una especie de necesidad del pensamiento. Los trabajos de Riemann fueron un elemento unificador en torno a lo que se conocería como *geometría diferencial*, disciplina que estudia los espacios curvos en general. El mejor ejemplo de espacio curvo es la superficie de nuestro planeta. Todo cartógrafo sabe que debido a la curvatura de la Tierra es imposible reproducir fielmente en el papel áreas del mundo considerablemente grandes, algunas distancias, áreas y ángulos aparecerán fuertemente distorsionados. Un mapamundi rectangular, con el ecuador dividiéndolo horizontalmente por la mitad, contendrá el craso error de que representará a los polos como un segmento recto del mismo tamaño que el ecuador, cuando en verdad los polos deberían ser simples puntos. En términos de curvatura, una esfera y un plano no son equivalentes. Tampoco los son desde el punto de vista topológico: es posible dar la vuelta al mundo si se tiene los medios de seguir una *línea recta* (he aquí el lugar auténtico de la palabra ‘geodésica’); y si el universo tridimensional también fuera esférico, un viaje interestelar ‘rectilíneo’ terminaría igualmente en el punto de partida.

del campo gravitacional desaparece momentáneamente. Todo sistema que *cae libremente*, es decir, que se deja al abandono únicamente del campo gravitacional, describirá esa sensación ingravida que hace que los experimentos que se realicen en él tengan todas las características de un sistema inercial. En relatividad general, las trayectorias de esos posibles sistemas inerciales serán las geodésicas y estarán determinadas mediante un objeto matemático conocido como conexión afín $\Gamma_{\mu\nu}^{\sigma}$. La conexión afín define el conjunto total de trayectorias que serían percibidas localmente como un sistema inercial (familia de sistemas inerciales) y a la vez es capaz de medir el grado de desvío respecto a esa familia de sistemas de tal manera que siempre se puede saber localmente el grado de movimiento no inercial que se tiene. El principio de equivalencia ya está en su forma más madura y expresa simplemente que la existencia de un campo gravitacional es meramente relativa, ya que siempre se puede encontrar una manera local de eliminar sus efectos. Además, Einstein también halló que el principio de equivalencia revela que el fenómeno de la inercia y el fenómeno gravitacional están unidos en una entidad conocida como el campo inercial-gravitacional. Lo último que debe resaltarse en esta breve e incompleta descripción de los conceptos de un espacio-tiempo curvo es que cuando se dice que el sistema inercial es sólo local se refiere a que sólo puede considerarse inercial alrededor de un solo evento (Por lo que dicho carácter inercial no puede ni durar mucho ni extenderse mucho). Todas las superficies curvas lo suficientemente lisas ofrecen una escala de dimensiones en las que parecen ser planas (el planeta Tierra ilustra también esto). El concepto de un espacio de puntos que parece localmente plano es lo que se conoce como *variedad*, y es la entidad geométrica fundamental de la que se ocupa la geometría diferencial. El espacio-tiempo puede considerarse como una variedad si se supone el principio de equivalencia y se entiende que *planidad local* significa justamente que un sistema de referencia conformado por un pequeño número de eventos cercanos se comporta como un sistema de referencia inercial a la manera como TER lo expone. La posibilidad de la curvatura evita que esta planidad pueda extenderse en general a todo el espacio-tiempo de TGR. La conclusión importante es que la concepción del espacio-tiempo como una variedad es una manera abstracta y relativamente compleja desde el punto de vista matemático de plantear el principio de equivalencia.

Una variedad M por sí sola es un sistema de puntos matemáticos abstracto que puede ser descrito mediante un sistema de coordenadas cualquiera (X^{μ}). Ésta, por sí sola, no funciona como referente para hablar del espacio-tiempo. Junto con la variedad se define la métrica ($g_{\mu\nu}$) que establece el conjunto de relaciones espacio-temporales entre puntos de la variedad. La métrica no sólo absorbe la estructura inercial y la gravitacional sino que recoge todo aspecto geométrico (las propiedades topológicas son más bien impuestas por la variedad). Dado todo esto,

no es de extrañarse que la métrica esté estrechamente relacionada con la conexión afín pues son las relaciones métricas las que definen lo que puede ser considerado recto o curvo y por ende las geodésicas. Es esta conjunción de variedad y métrica la que define en TGR una estructura espacio-temporal en la cual toda relación formal entre puntos tiene traducción fenoménica en la relación medible entre eventos físicos. Envuelto en esta proliferación de conceptos, Einstein creyó que con la búsqueda de la *covarianza general* en sus ecuaciones lograría responder a PGR. La covarianza general es la búsqueda de escribir las ecuaciones de tal forma que siguieran siendo las mismas después de cualquier transformación de coordenadas $\bar{X}^\mu = \bar{X}^\mu(X^\nu)$ y para eso se utiliza el lenguaje de los *tensores*¹⁰. La manera como Einstein pensaba conectar la covarianza general con TGR era considerando que el paso de la descripción de un proceso a partir de un cuerpo de referencia a la descripción a partir de otro es equivalente a una transformación de coordenadas sobre la variedad (Esta equivalencia, sin embargo, no resultó siendo cierta).

Inspirado en gran medida por Mach, Einstein imaginó que su teoría debía ser una relación entre la estructura geométrico-inercial-gravitacional $g_{\mu\nu}$ y la materia del universo. Este segundo término, el de la materia, se condensó en un tensor de energía-momento $T_{\mu\nu}$, en el cual no sólo se recoge toda la materia estelar y la ordinaria, también está la energía propia del campo electromagnético y la posibilidad de añadir otros campos correspondientes a otras interacciones¹¹. Después de este largo análisis, TGR llegaría por fin a su formulación, desde luego mediante una ecuación covariante:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -8\pi GT_{\mu\nu}, \quad (4.1)$$

la cual para nuestro objetivo debe leerse tan sólo como una relación entre la métrica (en especial la curvatura asociada a ella) o estructura geométrica-inercial-gravitacional a la izquierda y la materia-energía a la derecha. En ellas el principio de Mach parece satisfacerse ya que los fenómenos inerciales (izquierda) se vinculan a la materia (derecha); sin embargo, todavía hay objeciones que hacer al respecto.

El problema de interpretar TGR no es de ninguna manera sencillo. En los últimos párrafos se ha hecho un parco intento por ilustrar algunos de sus conceptos y es

¹⁰Con respecto a los tensores baste decir que ellos son entes matemáticos definidos de tal forma que una ecuación escrita a través de ellos se hace automáticamente covariante.

¹¹La física actual conoce, además de la gravitación y el electromagnetismo, otras dos interacciones: la nuclear (más precisamente la *Cromodinámica*) que mantiene unidos a los núcleos atómicos pese a la repulsión eléctrica de los protones; y la débil, responsable de ciertos decaimientos entre partículas elementales. Estas formas de interacción encuentran su marco propio en la teoría cuántica de campos (QFT), una especie de combinación entre mecánica cuántica y TER. El electromagnetismo también ha sido integrado a QFT. El gran problema de unificación en la física contemporánea radica en la integración de la gravedad con las otras tres interacciones. TGR es por el momento la teoría de la gravedad y esta no se ha hecho compatible con QFT.

evidente que el alto grado de abstracción de esta teoría es un pesado obstáculo para cualquier filósofo de la ciencia que quiera analizarla. A pesar del aspecto reducido de 4.1, puede mencionarse que TGR es capaz de un despliegue tal que buena parte de la cosmología contemporánea se funda en ella. Es una teoría llena de sutilezas. Por esta razón, en vez de tratar de pasar por la plétora de preguntas que en ella se encontrarían, camino imposible para el nivel de este escrito, es preciso ahorrar pasos y enunciar el conjunto más importante de críticas que podrían hacerse a TGR, según el contexto que nos ocupa¹²:

1. No es equivalente la covarianza general a PGR. La manera como está enunciada la teoría implica la existencia de geodésicas y por lo tanto siempre es posible hablar del grado de diferencia entre una caída libre y una aceleración respecto a la misma. En definitiva, TGR define siempre localmente una aceleración absoluta en tanto que se mide respecto a la estructura inercial y no a la materia (el sustancialismo sofisticado aplica). Las geodésicas son sin duda movimientos privilegiados así que no resulta equivalente la elección de un cuerpo u otro a la hora de determinar movimientos, tal como PGR lo suponía.
2. Las ecuaciones de Einstein tienen solución aun cuando $T_{\mu\nu} = 0$, indicando que en ella puede existir el espacio-tiempo sin la presencia de la materia. Desde un punto de vista relacional se esperaría que suponer ausencia de materia causase alguna impropiedad o absurdo que hiciera imposible la existencia del espacio-tiempo.
3. Para definir la forma del tensor de energía-momento se requiere suponer cierta forma general de la métrica. Lo que supondría que siempre es necesario hacer una consideración espacial antes de poder ‘ubicar’ a la materia.
4. En muchas ocasiones se usa la *planidad asintótica* o la condición que en el infinito el espacio-tiempo es plano. Como si los sistemas tuvieran que estar inmersos en un espacio inercial.
5. TGR no logra explicar el problema con toda la fuerza que la crítica de Mach esperaba. Existe al parecer un arrastre de la materia por los efectos inerciales (que produciría una rotación inducida) pero este arrastre no es total. Los efectos inerciales no dependen únicamente de la materia (hay una especie de acción del espacio-tiempo sobre sí mismo) y por tal razón el principio de Mach falla.

Existe sin embargo, un argumento que fue enunciado por el mismo Einstein el cual rebate al sustancialismo, al menos el más tradicional. Este se conoce como

¹²Para una verdadera discusión sobre la interpretación TGR debería consultarse una de las referencias centrales de esta monografía: Cala 2006.

el *argumento del agujero* y fue enunciado por Einstein en un momento en el que no se hallaba capaz de encontrar sus ecuaciones covariantes de campo¹³. Ante esa frustración, Einstein intentó mostrar que la covarianza general llegaría a un absurdo. Para esto supuso una variedad que se aplicaba sobre un conjunto de materia en la cual había una zona de eventos en donde sólo hay vacío (el agujero). Einstein supone una solución de las ecuaciones a todo este conjunto de eventos con un sistema de coordenadas X^μ . Luego supone otro conjunto de coordenadas \bar{X}^μ que sólo difiere en que las geodésicas están distorsionadas respecto al primer conjunto de coordenadas únicamente dentro del agujero y después de un instante t (Si se supone la posibilidad de desdoblar el espacio en una dirección temporal y que las geodésicas empalman perfectamente en la frontera del agujero). Cada una de las soluciones da la métrica en función de sus coordenadas y la relación entre las dos funciones viene definida mediante una única transformación de coordenadas entre ellas. El punto importante en este argumento es que, dado que el agujero esta vacío, existe una tercera solución que aplica a cada punto: en este caso ocurre la misma función que aplicaba para las \bar{X}^μ $\bar{g}(\bar{X})$ pero ahora aplicada a las X^μ : $[\bar{g}(X)]$. El resultado es que el mismo punto de la variedad más el mismo sistema de coordenadas tiene dos soluciones diferentes de la métrica. Lo que significaría que la teoría covariante sería indeterminista (La estructura espacio-temporal de la variedad no está específicamente determinada por la historia de la distribución de materia antes del instante t). Einstein después corregiría esta conclusión y observaría que lo que en realidad se supuso mal fue suponer que la variedad tenía un grado de realidad por sí misma. Al observar las relaciones entre eventos descrita por la primera y por la tercera solución, Einstein descubrió que a la misma intersección de geodésicas correspondía el mismo valor de la métrica: sólo las intersecciones entre geodésicas tiene un valor real (No la variedad por sí sola, *etiquetada* tan sólo por las coordenadas). En términos más concisos significaría que la única posibilidad real de ubicar una relación espacio-temporal es a través de eventos físicos individuales. Einstein consideró que esto es la eliminación del último remanente de la idea de un espacio sustancial independiente de los fenómenos puesto que sólo a través de los eventos físicos propios (no los abstractos de la variedad) pueden definirse auténticas relaciones espacio-temporales. Este resultado indicaría que TGR es relacional en lo que se refiere a eventos y al espacio-tiempo¹⁴. Sin embargo, la existencia absoluta de aceleraciones respecto a la geodésicas dejaría a TGR en una situación muy peculiar: sería relacionista respecto al espacio-tiempo pero absolutista con respecto al movimiento, al menos en lo que concierne a las aceleraciones.

¹³Para ser precisos, el argumento que aquí se expone es una versión mucho más moderna (Véase al respecto Norton 1999) que revivió las ideas de Einstein en el debate actual relacionismo-sustancialismo.

¹⁴Hay que aclarar que el sustancialismo sofisticado sobrevive incluso al argumento del agujero; por lo que esta conclusión es discutible.

Conclusión

Cuando se revisa la interpretación final de que TGR es una teoría relacionista del espacio-tiempo mientras que a su vez define cantidades absolutas de movimiento, el paralelo con la postura de Leibniz se hace patente. Pero semejante parangón ignora toda la cantidad de diferencias entre los dos autores: la doctrina de la simultaneidad absoluta es una de las más grandes. Observando esta posibilidad de un enorme anacronismo, recientemente se ha formulado la conclusión de que no debería trazarse un debate entre relacionismo y sustancialismo a lo largo de la historia, ya que los conceptos han tenido tantos cambios que no puede definirse una línea continua de seguidores del “movimiento o espacio relativo” o del “movimiento o espacio absoluto”¹⁵. Dicha crítica es válida hasta cierto punto pero lo que no se puede negar es que a lo largo de la historia hubo un hilo de discusión de donde se pueden hacer valiosas analogías.

Aunque en el punto de partida Newton definiera el movimiento absoluto respecto al espacio absoluto puede notarse que ninguno de los opositores a este primer sustancialismo negó la existencia de un movimiento que pudiera ser considerado especial. Desde el movimiento con origen en el mismo cuerpo de Leibniz, pasando por el movimiento respecto a las estrellas fijas de Mach y las desviaciones de la geodésicas en TGR se puede argumentar que hubo formas particulares de movimiento que considerar. La pregunta que surgiría entonces es cómo empatar la noción de un movimiento absoluto sin referirlo al espacio absoluto. ¿Sería, después de todo, un movimiento respecto a qué? Para el caso de TGR existe una posible solución (Cala 2006). A diferencia de todas las propuestas anteriores, TGR tiene dentro de la parte que corresponde al espacio-tiempo (la métrica) conceptos que de alguna manera también se pueden considerar materiales. En cuanto $g_{\mu\nu}$ es efectivamente un *campo* este es capaz de transportar energía. Una manera común de expresar TGR es que la materia le dice al espacio-tiempo como curvarse mientras que el espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse. Pero, si se quisiera ser más fiel a los conceptos, puede verse al espacio-tiempo también como materia (ya que el mismo transporta energía). Las soluciones de las ecuaciones de Einstein en ausencia del tensor de energía-momento no serían vistas como del espacio-tiempo

¹⁵Rynasiewicz R. *Phil. of Sci.* **67** (2000): 70-93.

vacío sino la manera como el espacio-tiempo se curva a sí mismo. La gravedad, el fenómeno por cuyos orígenes ocultos Newton nunca se aventuró a especular, ha resultado estar unida conceptualmente al espacio-tiempo, replanteando la manera como debemos entenderlo. Un salto como este, en el que se dicta que todo es materia, sea la métrica o sean la demás formas de materia y energía, va mucho mejor con la tesis relacionista que con la sustancialista. Es el núcleo de la visión relacionista el proponer la visión de un universo material auto-contenido. El escollo principal con el que choca esta visión del universo es que hasta ahora no se han encontrado expresiones adecuadas para expresar la densidad de energía del campo $g_{\mu\nu}$.

Por otro lado, TGR es una teoría de campos que viajan a velocidad finita. La acción por contacto es su entorno por lo que la propuesta machiana y leibniziana está un tanto gastada. Einstein no puede vincular la materia distante con un cuerpo sino a través del campo inercial-gravitacional o incluso el electromagnético. Los efectos inerciales, al modo de ver de que todo es materia y el principio de acción por contacto, son el resultado de la interacción con el campo métrico inmediato al cuerpo. La superficie del agua de la cubeta de Newton se curvará de acuerdo al campo métrico que la circunda y su relación con las estrellas lejanas está demasiado mediada. El concepto tradicional de relación entre cuerpos debe pues abandonarse. El universo completamente conexo imaginado por Mach ahora se desvanece por causa del concepto de región prohibida visto por primera vez en TER: para todo suceso existe una infinidad de eventos que no podrán guardar relación con el primero¹⁶. La eliminación de la simultaneidad absoluta obliga a redefinir el relacionismo.

A pesar de ser presentada como la teoría más avanzada del espacio-tiempo, TGR no está exenta de ser considerada como transitoria. Los fracasos que se han tenido a la hora de hacerla coordinar con la teoría cuántica han motivado la búsqueda de un reemplazo. Otro grave problema de TGR es que su conexión con los experimentos es ardua y sinuosa. Muchos cuerpos celestes son tan poco masivos que la ley de gravitación de Newton es suficiente para explicar sus movimientos. TGR es un tipo de teoría que tiene un grado de abstracción bastante alto pero que no lleva todavía un gran número de hechos que la asienten por completo. Debido a esta asimetría, ciertos autores la han visto con sospecha y piensan que ha pasado más allá de los fenómenos (Brillouin 1970). En parte, la crítica a TGR funciona desde

¹⁶La otra gran teoría mecánica al lado de TGR, la mecánica cuántica, no parece coincidir en esta absoluta localidad de las relaciones entre eventos. El problema del *enredamiento cuántico*, es uno de los mayores traspiés en la unificación conceptual de las dos teorías. Einstein fue un conocido adversario de la interpretación ortodoxa de la teoría cuántica, teoría que él siempre vio como necesariamente incompleta. La no localidad es sin duda parte central de la crítica de Einstein a la cuántica.

el punto de vista metodológico ya que los principios en los que se basa están más del lado de ideas estéticas o epistemológicas de la forma que deberían tener las leyes físicas y no de regularidades experimentales. La metodología contrasta con la línea de pensamiento mucho más anclada en los experimentos de TER. Einstein demostró con TGR su visión de una ciencia como creación del espíritu humano y como profunda elaboración teórica. Einstein confió siempre en la armonía y simplicidad de la naturaleza para regular los fenómenos. Las ecuaciones de TGR no sólo tendrían que ser covariantes sino también lo más simples posibles. En una de sus obras autobiográficas Einstein escribe:

Según nuestra experiencia estamos autorizados a pensar que la Naturaleza es la realización de lo matemáticamente más simple. Creo que a través de una construcción matemática pura es posible hallar los conceptos y las relaciones que iluminen una comprensión de la Naturaleza. Los conceptos usables matemáticamente pueden estar próximos a la experiencia, pero en ningún caso pueden deducirse de ella. Está claro que la experiencia es el único criterio que tiene la Física para determinar la utilidad de una construcción matemática. De algún modo creo que es cierto que a través del pensamiento puede comprenderse la realidad, tal como lo soñaron los antiguos. (Einstein 1931, p. 158)

La época presente contiene este espíritu del físico teórico bastante difundido. La inocente idea machiana de usar conceptos vinculables fácilmente a la experiencia ordinaria ya no una máxima generalizada, aunque todavía hay muchos que abogan por ella. Muchos desarrollos actuales se desarrollan en sistemas deductivos muy elaborados. La dificultad que dejan para los que quieren estar a la par con sus cambios en el ámbito conceptual no es pequeña. Ante esa perplejidad nunca estará de más mirar retrospectivamente para tratar de entender mejor lo que está ocurriendo.

Quien conozca la evolución completa del desarrollo científico, juzgará el significado de un movimiento científico actual de una manera naturalmente más independiente y exacta de aquél que, por tener limitado su juicio al período de tiempo en el que vive, sólo pueda basarse en la dirección momentánea que ha tomado ese movimiento¹⁷.

¹⁷Mach, DHCM, Introducción §4.

Bibliografía

- [1] Alexander, H. G. (ed., 1984) *The Leibniz-Clarke Correspondence (1717)*. Barnes and Noble. Nueva York.
- [2] Balashov Y. and Janssen M. (2003). *Brit. J. Phil. Sci.* **54** (2003), 327-346.
- [3] Brillouin, L. (1970) *Relativity reexamined*. Academic Press, Nueva York.
- [4] Cala, F. E. (2004) *La relatividad del movimiento o la eliminación de los sistemas inerciales; sobre lo que Mach dijo y lo que Einstein hizo*. UIS. Bucaramanga.
- [5] Cala, F. E. (2006) *De la relatividad de la inercia a la geometrodinámica intrínseca: una interpretación relacional del espacio-tiempo*. Tesis doctoral Universidad Autónoma de Barcelona.
- [6] Cohen, I.B. (1981) *La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas*. Trad. de C. Solís Santos (1983). Alianza Editorial. Madrid.
- [7] DiSalle, R. (2002) *Space and Time: Inertial Frames*. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Spring, 2002. <http://plato.stanford.edu/entries/spacetime-iframe/>.
- [8] Einstein, A. (1905) *On the Electrodynamics of Moving Bodies*. Trad. por Methuen and Company: *The principle of relativity* (1923). Dover. Nueva York. 1952.
- [9] Einstein, A. (1916) *The Foundation of the General Theory of Relativity*. Trad. por Methuen and Company: *The principle of relativity* (1923). Dover. Nueva York. 1952.
- [10] Einstein, A. (1920) *Relativity: the Special and General Theory*. Trad. de Robert W. Lawson (1924). Project Gutenberg Literary Archive Foundation. 2005.
- [11] Einstein, A. (1923) *Sidelights on Relativity*. Project Gutenberg Literary Archive Foundation. 2005.

- [12] Einstein, A. (1931) *Mi visión del mundo*. Trad. Sara Gallardo y Marianne Bücke. Ed. Tusquets. Barcelona. 1980.
- [13] Gloy, K. (1992) *La controversia Newton-Leibniz*. Trad. de Carlos Emel Rendón (1992). Revista de estudios de filosofía de U. de Antioquia No. 7.
- [14] Hugget N. and Hoefer C. (2006) *Absolute and Relational Theories of Space and Motion*. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Summer, 2006.
<http://plato.stanford.edu/entries/spacetime-theories/>.
- [15] Howard, D. A. (2004) *Einstein's Philosophy of Science*. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Winter, 2004.
<http://plato.stanford.edu/entries/einstein-philsce/>.
- [16] Janis, A. (1998) *Conventionality of Simultaneity*. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Summer, 1998.
<http://plato.stanford.edu/entries/spacetime-convensimul/>
- [17] Janssen, M. *Relativity*. To appear in: Maryanne Cline Horowitz et al., eds. *Dictionary of the History of Ideas*. New York: Charles Scribner's Sons. In preparation.
- [18] Laymon, R. (1978) *Newton's Bucket Experiment*, *Journal of the History of Philosophy*, **16**, pp. 399-413.
- [19] Mach, E. (1883) *Desarrollo histórico-crítico de la mecánica*. Trad. de José Babini. Ed. Espasa. Buenos Aires. 1949.
- [20] Másmela, C. (1986) *El concepto de espacio en Newton y Kant*. Rev. U. de Antioquia No. 208.
- [21] Minkowski, H. (1908) *Space and Time*. Trad. por Methuen and Company: *The principle of relativity* (1923). Dover. Nueva York. 1952.
- [22] Newton, I. (1686) *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Trad. de A. Motte (1729). University of California Press. Berkeley. 1960.
- [23] Norton, J. D. (1999) *The Hole Argument*. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Spring, 1999.
<http://plato.stanford.edu/entries/spacetime-holearg/>.
- [24] Norton, J. D. (2004a) *Einstein's Special Theory of Relativity and the Problems in the Electrodynamics of Moving Bodies that Led him to it*. Cambridge Companion to Einstein. Cambridge University Press.
- [25] Norton, J. D. (2004b) *How Hume and Mach Helped Einstein Find Special Relativity*. <http://www.pitt.edu/~jdnorton>. University of Pittsburgh.

- [26] Reichenbach, H. (1927) *The Philosophy of Space and Time*. Trad. de Maria Reichenbach y John Freund (1956). Dover. Nueva York. 1958.
- [27] Thuillier, P. (1988) *De Arquímedes a Einstein*. Trad. de Amalia Correa. Ediciones del Prado. Madrid. 1995. Tomo II, pp. 500-531.