

Notas sobre el Concepto de Espacio Absoluto: Newton y Einstein

ELIA NATHAN BRAVO

PHILOSOPHIÆ NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA.

AUCTORE
ISAACO NEWTONO, EQ. AGR.

Editio tertia aucta & emendata.

LONDINI:

Apud GULIELMUM & JOHANNEM STAMPEL, Regiæ Societatis typographos.
MDCCLXXVI.

In the original, the words and punctuation marks
PHILOSOPHIÆ NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA are printed in red

Uno de los conceptos newtonianos más problemáticos es el de espacio (y tiempo) absoluto. En torno a él se han sostenido posiciones muy diversas y aún contradictorias. Así, frecuentemente se ha sostenido que el concepto de espacio absoluto no juega ningún papel dentro de la física matemática de Newton, y que su única función es metafísico-teológica, consistente en el intento de explicar cómo puede actuar Dios sobre los objetos materiales (18 pp. 201-3). Cabe destacar que esta posición descansa sobre el supuesto de que la filosofía y la ciencia, aún en la época de Newton, son empresas autónomas, que no influyen la una en la otra. Este supuesto es bastante explícito en la siguiente afirmación de Smart: "Newton sostuvo teorías absolu-

tas del espacio y el tiempo concepciones metafísicas que son estrictamente irrelevantes para su teoría dinámica. Lo que importa en la teoría dinámica no es la noción de espacio absoluto sino la de sistema inercial". Y como Mach y otros han mostrado, la noción de sistema inercial se puede analizar desde el punto de vista de una teoría relacional del espacio (17 p. 507). O sea, la noción operativa en la física newtoniana es la de sistema inercial, y ésta se puede interpretar filosóficamente apelando o bien a una teoría absolutista, o bien, a una teoría relacional del espacio, interpretación que no implica, en modo alguno, una alteración en la teoría física misma. Por otra parte, algunos autores han sostenido la posición contradictoria a la anterior, aunque mantienen el supuesto de la autonomía entre filosofía y ciencia. Así, Grünbaum sostiene que "aunque Newton (así como también sus amigos Clarke y Locke) estuvieron expuestos a las enseñanzas metafísicas de More, fue la fuerza de consideraciones puramente físicas lo que persuadió a Newton: él funda convincentemente su caso en la posibilidad de distinguir el movimiento absoluto del relativo mediante las 'propiedades, causas, y efectos' del primero" (7 p. 533). O sea, lo que este autor sostiene es que las razones de Newton para sostener que el espacio es absoluto son físicas y no metafísicas o teológicas, y por ende, la noción de espacio absoluto es puramente física. Finalmente, en esta discusión también nos encontramos en un término medio, el cual está representado por la posición de Koyré: "El descubrimiento newtoniano del carácter absoluto de la rotación —a diferencia de la traslación rectilínea— constituye una confirmación decisiva de su concepción de espacio; la hace accesible a nuestro conocimiento empírico, y sin quitarle su función y status metafísico, le asegura un rol y un lugar como un concepto fundamental de la ciencia". (10 p. 168). Así, una tercera posición consiste en considerar que el concepto newtoniano de espacio absolu-

to tiene a la vez una función metafísico-teológica y una función científica. A esta posición nos suscribimos, y uno de nuestros objetivos en este trabajo será el de mostrar la corrección de ella.

Considero que las razones primordiales por las cuales el concepto de espacio absoluto newtoniano ha admitido tan diversas interpretaciones son las siguientes tres:

1) No es claro, en modo alguno, cual es la función científica que desempeña el concepto de espacio absoluto. Esto se debe en parte a que hoy día no contamos con un catálogo lo suficientemente variado y preciso de las diversas funciones que pueden tener los conceptos científicos, y en parte porque el concepto de espacio absoluto cumple a la vez varias de estas funciones (p. ya en las citas anteriores se ha relacionado a este concepto con el de movimiento absoluto de rotación y el de sistema inercial), y a veces, de manera implícita.

2) Como concepto filosófico tampoco es un concepto claro dado que hay diversas maneras de conceptualizar a la filosofía. (a) A veces, la filosofía parece tan sólo ofrecer una interpretación de afirmaciones científicas y tal que no es estrictamente relevante a el contenido de la teoría en cuestión; así, la interpretación metafísico-teológica de Newton del espacio absoluto como atributo de Dios no es relevante a su mecánica en tanto que se puede dejar de lado esta interpretación filosófica sin que se altere el contenido (ie. las leyes) de su mecánica (como de hecho sucedió históricamente). (b) Otras veces, las tesis filosóficas son tales que dan lugar a (en el sentido de ser la motivación de y de avalar intelectualmente a) programas de investigación científica; por ejemplo, las tesis filosóficas relativas opuestas al espacio absoluto newtoniano, de Leibniz y Mach-Einstein están propuestas también como tesis susceptibles a la discusión empírica en tanto que alteran el contenido de la mecánica newtoniana, dando lugar a nuevos programas de investigación física. Finalmente, (c) a veces, si bien la filosofía interviene como interpretación de afirmaciones científicas, no relevante al contenido de la teoría (ie, que no altera las leyes de la teoría), no por ello deja de pertenecer a la teoría; dado que la función de dicha interpretación es la de aclarar o precisar conceptualmente el sentido de una afirmación científica. Así, la interpretación newtoniana de la rotación como un movimiento absoluto, o sea, como un movimiento que ocurre respecto del espacio vacío, es una interpretación filosófica que tiene por objeto aclarar o explicar conceptualmente en qué radica la diferencia entre la rotación

(o más generalmente, la aceleración), y el movimiento uniforme.

Destaquemos que las problemáticas (1) y (2) se deben al hecho de que el concepto de espacio absoluto es un concepto "altamente teórico" de la física, o sea, un concepto que no forma parte de ninguna ley de la teoría, pero que, sin embargo, contribuye a "darle sentido" o "especificar" a la teoría, y por lo cual su función científica no es muy clara, y también por la cual se relaciona fácilmente con tesis filosóficas, o sea, con cuestiones altamente racionales o conceptuales.

3) El término "absoluto", al igual que los términos relacionados con el de "relacional" y "relativo" tienen varios sentidos, que no siempre se han especificado, generando con ello confusión.

Lo que haré en este trabajo será tratar la problemática (1), o sea, trataré de aclarar cuales son las funciones científicas del concepto newtoniano de espacio absoluto dado que hoy día es la problemática menos aclarada; en cambio, la función metafísico-teológica ha sido mejor estudiada.¹ Para ello tomaré en cuenta tanto afirmaciones de Newton como a la teoría einsteniana de la relatividad (la cual nos permitirá sacar a luz ciertas funciones del concepto de espacio absoluto implícitas en la mecánica newtoniana). Igualmente, para aclarar dichas funciones será necesario especificar algunos de los distintos sentidos de "absoluto". Finalmente, destacaré qué de filosófico-científico tiene el concepto newtoniano de espacio absoluto en los lugares en que resulta relevante, sin tratarlo como un tema separado.

I

Antes de estudiar las razones de Newton para postular un espacio absoluto, demos una breve caracterización de los principales conceptos de la discusión.

La tesis fundamental de una teoría *absolutista* del espacio (como la de Newton) es que el espacio es una entidad o substancia que existe por sí misma, independientemente de la existencia y propiedades de los objetos materiales. Aunque esta tesis es ontológica, se la puede especificar de la siguiente manera, y que la hace susceptible de ser discutida apelando a datos científicos: el decir que el espacio es una entidad es decir que el espacio tiene un conjunto de propiedades o una estructura propia, que es independiente de la existencia y propiedades de los objetos materiales (¹ Cv, nota a 36-48, p. 120; ¹⁶ p. 161). Entre las propiedades que se ha sostenido que tiene el espacio están, por ejemplo, propiedades electromagnéticas (como la de

que el espacio vacío es un mal conductor, su permeabilidad magnética es de 4×10^{-7} henrys por metro, etc.), propiedades dinámicas (como la de ser penetrable, ser incapaz de actuar, tener partes que no pueden ser separadas una de la otra por ningún tipo de fuerza, estar absolutamente fijo), propiedades geométricas (como la de ser infinito o finito continuo o no, la de ser curvo o plano, la de tener una métrica euclídea o no-euclídea, la de ser tri-dimensional, etc.) (87 pp. 13-4). Finalmente, para una posición absolutista, si bien el espacio es independiente de los objetos materiales, guarda una relación con éstos: es la arena o contenidos en donde se encuentran localizados los cuerpos y en donde se mueven (ie, los cuerpos tienen una posición dada por ocupar un lugar particular en el espacio).

En oposición a la teoría absolutista, está la teoría *relacional* del espacio, para la cual el espacio no es más que el conjunto de relaciones espaciales que guardan entre sí los objetos materiales. En palabras de Leibniz:

Sostengo que el espacio es algo meramente relativo, como el tiempo; sostengo que es un orden de coexistencias, así como el tiempo es un orden de sucesiones. Pues el espacio denota, en términos de posibilidad, un orden de cosas que existen al mismo tiempo, consideradas como existiendo juntas; sin preguntarse acerca de su manera de existir. Y cuando muchas cosas son vistas juntas, uno percibe entre ellas ese orden de cosas. (¹ L. III., 4, p. 25-6).

Para una posición *relacional*, a diferencia de la absolutista, "cualesquiera enunciados que pretendan asignarle propiedad o propiedades al espacio se han de reconstruir como enunciados que asignan relaciones a pares o grupos de pedazos de materia". (8 p. 5). Así, p. j., el decir que el espacio existe es tan sólo decir que algo se encuentra a una cierta distancia de algo otro.

Destaquemos que el espacio del que se discute en la ciencia natural es el espacio físico, o sea, el espacio donde suceden los fenómenos naturales (⁹ p. 128). El espacio físico no es el espacio perceptual (ie. visual, motor, factil), dado que éste es subjetivo. El espacio físico tampoco es el espacio que estudia la geometría dado que el espacio es abstracto o puramente conceptual y está definido de distintas maneras por los axiomas de las distintas geometrías. Dado que las teorías absolutistas y relacionales se debaten acerca del *status* ontológico del espacio real o existente, el deba-

te es en torno al espacio físico, el cual es estudiado por la física.

Una de las razones fundamentales y obvias por las cuales la física requiere del concepto de espacio (y lugar) es porque el movimiento (que es el objeto de estudio de la física, o más precisamente, de la mecánica) ocurre en el espacio. Para precisar, con Descartes se explicitó el hecho de que para la física clásica por "movimiento" se entiende locomoción, o cambio de lugar. O sea, el movimiento no es un proceso interno a un cuerpo (como lo sería para Aristóteles), sino un cambio de relaciones espaciales. Por ello, el movimiento es siempre 'relativo': un cuerpo se mueve *en relación a*, o *con respecto a* un lugar, o a otros objetos que se consideran en reposo. Es crucial para nuestra discusión destacar que la afirmación de que el movimiento es 'relativo', no implica una teoría relacional del espacio, ni impide trazar una dis-

tinción, como lo hace Newton, entre movimiento absoluto y relativo (o más precisamente, relacional; empero, para conservar los términos clásicos, usaremos "relativo" sin comillas para referirnos al sentido newtoniano, que a continuación especificamos, y usaremos dicho término con comilla simple para referirnos al sentido especificado arriba, i.e. "relativo" significa con respecto a). En efecto, un movimiento es absoluto cuando es con respecto a el espacio absoluto (i.e. cuando el cuerpo cambia de lugar y por lugar se entiende un punto o posición en el espacio absoluto); y un movimiento es relativo cuando es con respecto a un marco de referencia *material*. Ahora bien, si todo movimiento fuese relativo (i.e. un cambio de relaciones espaciales entre un cuerpo y un conjunto de cuerpos que se toman como marco de referencia material) entonces parecería que la teoría más adecuada del

espacio sería la relacional; en cambio, la creencia de que hay movimientos absolutos parecería implicar una teoría absolutista del espacio —"parecería" porque, como veremos, se pueden dar distintas definiciones de movimiento absoluto. En síntesis, y como primera aproximación, todo movimiento es 'relativo', pero podemos distinguir entre movimiento absoluto y relativo, y, correspondientemente, entre espacio absoluto y relativo.

Veamos ahora las razones explícitas que Newton dió para sostener la existencia del espacio absoluto. Como veremos, estas razones se fundan en los requerimientos conceptuales de una teoría del movimiento, i.e. pertenecen al campo de los fundamentos conceptuales de la mecánica.

El espacio relativo se caracteriza ontológicamente por ser un conjunto de relaciones espaciales determinadas por los objetos materiales



En los *Principia* la noción de espacio absoluto aparece en el *Scholium* que sigue a las Definiciones y que antecede a los Axiomas o Leyes del Movimiento. Las tesis fundamentales que aparecen en el *Scholium* son las siguientes: 1) "El espacio absoluto (o verdadero o matemático (cf. ¹² Sch. I, p. 6), considerado en su propia naturaleza, sin relación a algo externo, permanece siempre similar e inmovible. El espacio relativo es alguna dimensión o medida movable del espacio absoluto; y que nuestros sentidos determinan por su posición respecto de los cuerpos". (¹², Sch. I), p. 6). O sea, por 'espacio absoluto' se entiende una entidad que tiene una existencia y un conjunto de propiedades (tales como la de permanecer similar e inmovible) propias, i.e. que no dependen de la existencia y/o propiedades de otras entidades. En cambio el espacio relativo se caracteriza ontológicamente por ser un conjunto de relaciones espaciales determinadas por los objetos materiales; y dado que los objetos materiales pueden moverse (p.e. el conjunto de todos los cuerpos celestes podría moverse), el espacio determinado por ellos igualmente puede moverse. 2) El lugar es aquella parte del espacio que un cuerpo ocupa, y según sea el espacio, el lugar puede ser absoluto o relativo. (¹², Sch. III, p. 6). 3) El movimiento *absoluto* o *real* es la translación de un cuerpo de un lugar absoluto a otro, y el movimiento *relativo*, la translación de un lugar relativo a otro. (¹², Sch. IV, p. 7). Para comprender mejor este punto recuérdese que el movi-

miento relativo (a un marco de referencia *material*) de un cuerpo no se puede considerar como un movimiento *real* porque los mismos efectos se presentarían si consideramos que es el marco de referencia material el que se mueve relativamente a el cuerpo en cuestión. Por ejemplo desde un punto de vista cinemático, no podemos decir que la Tierra se mueve *realmente* porque los mismos efectos (como la sucesión del día y la noche) se producirían si supusiésemos que son los cielos los que se mueven y la Tierra está estacionaria. Nótese que en el movimiento relativo, si bien hay un cambio de relaciones espaciales y por ende un movimiento, no podemos decir que es uno de los cuerpos el que realmente se mueve porque igualmente podemos considerar (ya que los efectos son los mismos) que es el otro cuerpo el que se mueve. En cambio, el movimiento absoluto de un cuerpo es aquel que tenemos que considerarlo como real porque el considerar que el cuerpo está en reposo y que es otro (u otros) el que se mueve no produce los mismos efectos. Lo que Newton propone es que este movimiento absoluto, ie. real, sólo se puede conceptualizar como un movimiento que ocurre respecto del espacio absoluto (el cual está realmente en reposo porque es inamovible). Aunque abundaremos sobre esta idea en el punto 5, destacamos aquí que una de las razones de Newton para introducir los términos de movimiento y espacio absoluto era la de conceptualizar cierto tipo de movimientos que se conciben como reales, en contraposición a los movimientos relativos. Así pues, uno de los sentidos primordiales de "absoluto" es real. 4) Una vez definidos los términos básicos, veamos qué razones da Newton para postular la existencia de un espacio absoluto (ie, existente por sí mismo) que es similar e inamovible.

Newton no da ninguna razón explícita en favor de la existencia de el espacio absoluto similar (ie. homogéneo), aunque nosotros podemos decir que la razón implícita es que el espacio absoluto tiene una estructura euclídea, y la geometría euclideana sólo versa sobre espacios homogéneos.

El argumento que da Newton en favor de la existencia de un espacio absoluto inamovible es el siguiente:

a) Como vimos, por movimientos se entiende cambio de lugares.

b) Los lugares o partes del espacio no pueden moverse ya que es absurdo pensar que un lugar puede cambiar de lugar, o sea, que un lugar se salga de su lugar (12, Sch, IV, p. 8) —en efecto, un lugar se define o individúa por la posición y orden que guarda respecto de otros

lugares, y consecuentemente no puede cambiar su posición sin dejar de ser ese lugar (13, p. 136); y (ii) si los lugares se moviesen, el movimiento no quedaría bien determinado cuantitativamente porque la distancia entre el lugar de origen y el lugar de llegada habría cambiado durante el transcurso del movimiento (o en otros términos, el movimiento relativo no puede considerarse real porque según se lo refiera a uno u otro marco de referencia material, marcos que a su vez pueden estar en movimiento relativo entre sí, la determinación cuantitativa de dicho movimiento relativo varía). Así, el espacio (o conjunto de lugares) debe ser inamovible.

c) El espacio relativo, o sea el espacio determinado por los objetos materiales, (ya sea en la versión leibniziana, según la cual el espacio no es más que el conjunto de relaciones espaciales entre los cuerpos, o en la versión cartesiana, para la cual el conjunto de todos los cuerpos se identifican con el espacio, ie. los cuerpos no son más que partes del espacio), es un espacio móvil, precisamente porque los cuerpos son móviles. Por ende, el espacio que es inamovible tiene que ser el espacio absoluto, ie. el espacio cuya existencia y propiedades es independiente de los cuerpos.

Es claro, y para Newton lo era ya que sostiene que "en las disquisiciones filosóficas, debemos abstraernos de nuestros sentidos, y considerar las cosas en sí mismas, distintas de lo que son tan sólo medidas sensibles de ellas (12, Sch. IV, p. 8), que el argumento expuesto es puramente filosófico, ya que las razones que se aducen en favor de la postulación de un espacio absoluto inamovible son razones conceptuales basadas en el significado de "lugar", "cuerpo" y "movimiento". Ahora bien, esto genera un grave problema ya que, si bien hay fuertes razones filosóficas para postular un espacio absoluto, el hecho de que el espacio absoluto sea inobservable parece implicar que esta noción es bastante inútil para la física. En palabras de Newton, "Pero porque las partes del espacio (absoluto) no pueden ser vistas, o distinguidas la una de la otra por medio de nuestros sentidos, por tanto, en lugar de ellas usamos medidas sensibles de ellas. (. . .) Y así, en vez de lugares y movimientos absolutos, usamos los relativos; sin que esto presente inconveniente alguno para las cuestiones cotidianas" (12, Sch, IV, p. 8). Empero, frente a esta encrucijada Newton logra encontrar una solución admirable: aunque el espacio absoluto sea inobservable, hay datos científicos que requieren para su correcta interpretación de la noción de espacio absoluto, y por lo cual esta noción debe formar

parte del aparato conceptual de la física. El dato científico en cuestión es la existencia de movimientos absolutos.

3) Examinaremos ahora el argumento científico newtoniano en favor de la postulación del espacio absoluto. Newton afirma que "podemos distinguir el reposo y movimiento, absoluto y relativo, uno del otro por sus propiedades, causas y efectos". (12, Sch. IV, p. 8). Consideramos sólo el argumento de los efectos, por ser el más importante; este argumento consiste en establecer las siguientes dos afirmaciones: (i) existen movimientos que son absolutos y (ii) el movimiento absoluto debe entenderse como movimiento que ocurre con respecto al espacio absoluto (16, p. 202).

Examinemos la primera afirmación. Para probar que hay movimientos absolutos, Newton apela a dos experimentos, el de la cubeta con agua y el de las esferas rotantes, que son experimentos sobre movimientos de rotación, los cuales son un tipo de movimiento acelerado.

El experimento de la cubeta consiste en colgar una cubeta con agua de una cuerda que está torcida, de tal forma que en el momento de soltar la cubeta, la cuerda al desenrollarse, causa que la cubeta tenga un movimiento circular o rotatorio. Al principio del movimiento circular de la cubeta, la superficie del agua estará plana, como lo estaba antes de que la cubeta comenzara a moverse; pero posteriormente, el movimiento rotatorio de la cubeta se comunicará al agua, y este movimiento rotatorio del agua ocasiona que lentamente el agua comience a alejarse del centro y a ascender por los lados de la cubeta, formando una figura cóncava. "Este ascenso del agua muestra su tendencia (*endeavour*) a alejarse del eje de su movimiento; y el movimiento circular verdadero y absoluto del agua, que aquí es directamente contrario al (movimiento) relativo, llega a ser conocido, y puede ser medido por esta tendencia. (. . .) Y por tanto, esta tendencia no depende de ninguna traslación del agua con respecto a los cuerpos vecinos, no puede definirse el movimiento circular real por medio de dicha traslación. Sólo hay un movimiento circular verdadero de un cuerpo que gira, y que corresponde a un sólo poder de tender a alejarse de su eje de movimiento, como su efecto propio y adecuado; pero los movimientos relativos, en uno y el mismo cuerpo, son innumerables, de acuerdo con las varias relaciones que (el cuerpo) guarda con los cuerpos externos, y al igual que otras relaciones, carecen por completo de efectos reales" (12, Sch, IV, pp. 10-11).

Así, el experimento de la cubeta muestra que el movimiento circular del

agua es absoluto ya que:

1) Observamos que el agua tiende a alejarse del eje de su movimiento, tomando su superficie una forma cóncava, o sea, observamos que sobre el agua opera una fuerza centrífuga.

2) La fuerza centrífuga sólo puede entenderse como el efecto de un movimiento rotatorio real (ya que, por la segunda ley, el movimiento rotatorio está producido por una fuerza centrípeta, y por la tercera ley, la reacción a dicha fuerza centrípeta es la aparición de una fuerza centrífuga, y por la cual, la existencia de una fuerza centrífuga implica la existencia de un movimiento rotatorio que realmente está ocurriendo).

3) Además, este movimiento rotatorio real, que causa la fuerza centrífuga, debe entenderse como un movimiento absoluto, y no como relativo. En efecto, el movimiento del agua no puede ser relativo porque: (i) La fuerza centrífuga aparece cuando no hay ningún movimiento relativo entre el agua y la cubeta, o sea, la fuerza centrífuga aparece cuando el agua está girando al igual que la cubeta; en cambio, cuando sí hay un movimiento relativo entre el agua y la cubeta, porque la cubeta gira y el agua no, no opera la fuerza centrífuga, como puede notarse por el hecho de que la superficie del agua está plana. Y (ii) el movimiento relativo de un cuerpo varía según con cual objeto externo se lo relacione, mientras que el movimiento del agua se puede determinar de una manera única, y sin tener que relacionar el movimiento del agua con algún cuerpo externo, ya que a partir de la determinación cuantitativa de la fuerza centrífuga se puede inferir matemáticamente la medida del movimiento circular del agua. Así el movimiento del agua no es relativo, sino absoluto, o sea, un movimiento independiente de la existencia de otros cuerpos. El movimiento del agua también es absoluto en el sentido de real, como vimos en 2).

En síntesis, el argumento de Newton es que de la existencia de un efecto, las fuerzas centrífugas, debemos inferir la existencia de su causa que es un movimiento absoluto, o sea, un movimiento real y un movimiento que ocurre independientemente de otros cuerpos (cf. 1, C. IV, 13, p. 48).

Haremos dos comentarios a la interpretación newtoniana de este experimento. En primer lugar, estrictamente hablando, lo que demuestra este experimento es tan sólo que el movimiento del agua es independiente de la existencia y/o acción causal de los cuerpos *circundantes* o *vecinos*, y no de todos los cuerpos en general. (Aunque por supuesto, para que esta objeción sea realmente

crucial habría que demostrar de qué cuerpos sí depende el movimiento del agua y/o la fuerza centrífuga). En segundo lugar, de acuerdo con la misma física clásica, el que tan sólo aparezca una fuerza centrífuga, y el que de la determinación cuantitativa de ésta se pueda inferir la cantidad del movimiento circular del agua, considerando a ésta como la única medida, o la medida verdadera, del movimiento, presupone que el experimento de la cubeta ocurre dentro de un marco de referencia inercial, o sea, el movimiento del agua no es, en sentido radical absoluto, independiente de cualquier marco de referencia con el cual relacionemos dicho movimiento, ya que la determinación cuantitativa de dicho movimiento variará si es que el marco de referencia fuese acelerado. Lo que este comentario aclara es que, en virtud de que la física clásica es sólo válida para marcos inerciales de referencia (cf. sección II), el término "movimiento absoluto" significa movimiento (determinado cuantitativamente) que es independiente de cualquier marco inercial de referencia (ie. el mismo para todo marco inercial), pero no movimiento que es independiente de cualquier marco de referencia material. Esta aclaración se refiere sólo al problema de la medida del movimiento, pero no al hecho de que ocurre un movimiento. En efecto, en cualquier marco de referencia en que se sitúe el experimento de la cubeta, la aparición de alguna fuerza centrífuga será ocasionada por el movimiento del agua. Es por ello que "movimiento (en sentido de traslación, y no como la medida de ésta) absoluto" significa indiferentemente, movimiento independiente de otros cuerpos o marcos de referencia o movimiento real.

El experimento imaginario de las esferas rotantes consiste en pensar en dos esferas conectadas por medio de una cuerda y que rotan en el vacío en torno a su centro común de gravedad; esta rotación produce una fuerza centrífuga que hace que el cordón se tense, de tal forma que a partir de la tensión de la cuerda, podemos descubrir la fuerza centrífuga, y a partir de ésta computar la cantidad de movimiento circular. "Y así podríamos encontrar tanto la cantidad como la determinación de este movimiento circular, aún en un inmenso vacío, donde no hubiese nada externo o sensible con respecto al cual las esferas se pudiesen comparar". (12, Sch. IV, p. 12).

De nuevo, este experimento prueba que el movimiento rotativo es un movimiento absoluto, ie. un movimiento independiente de otros cuerpos y real, porque la presencia de la fuerza centrí-

fuga sólo se puede explicar como causada por un movimiento rotatorio real, el cual, además, por ser determinable cuantitativamente a partir de la determinación de la fuerza centrífuga, se ha de considerar como un movimiento independiente de la existencia y/o acción causal de cualesquiera otros cuerpos —recuérdese, además, que porque este experimento sucede en el vacío, no puede interpretarse el movimiento de las esferas como relativo.

La argumentación de Newton aquí parece ser un tanto circular, ya que lo que quiere probar es que el movimiento rotatorio es un movimiento independiente de cualesquiera otros cuerpos, pero en el experimento de las esferas, por ser un experimento ideal, se *asume* que en el *vacío*, ie. sin que exista ningún otro cuerpo, las esferas girarán y se presentará una fuerza centrípeta. Así, si bien con este experimento Newton aparentemente logró establecer que el movimiento rotatorio o circular es absoluto en el sentido de ser independiente de la existencia y/o acción causal de cualesquiera otros cuerpos, y no sólo de los cuerpos vecinos (como en el primer experimento), esto lo hace a costa de un argumento circular. Por otra parte, a este experimento también se aplica el segundo comentario, sobre el significado de absoluto, que hicimos al experimento de la cubeta.

Newton aparentemente logró establecer que el movimiento rotatorio o circular es absoluto en el sentido de ser independiente de la existencia y/o acción causal de cualesquiera otros cuerpos. . .

Una vez establecido que el movimiento circular es un movimiento absoluto real e independiente de otros cuerpos, el segundo paso en la argumentación newtoniana consiste en mostrar que el movimiento absoluto es un movimiento que se da con respecto al espacio vacío. La razón implícita en Newton para hacer esta última afirmación es que, si bien el movimiento absoluto es un movimiento que ocurre independientemente de la existencia de otros cuerpos, sin embargo, el movimiento tiene que darse con respecto a algo, o en relación con algo (recuérdese que Newton comparte con sus coéteanos la convicción filosófica o conceptual, de que todo movimiento, por consistir en un cambio de relaciones espaciales, es 'relativo' (cf. p. 5), y dado que este algo no pueden ser los otros objetos materiales, entonces tiene que ser el espacio, un espacio entendido como



puede darse el caso de un movimiento "absoluto" porque está causado por una fuerza interna, pero, dada la concepción de Leibniz, no sin movimiento, porque no ocurre en relación con otros cuerpos —tal sería el caso si todo el universo estuviese rotando.

Berkeley tomó la misma línea argumentativa de Leibniz, pero en vez de sostener que el movimiento "absoluto" o real está causado por una fuerza interna, sostuvo que estaba causado por una fuerza externa. A Berkeley se le puede objetar que (a) dicha fuerza externa no siempre es directamente observable, y por ende, no puede ser utilizada para determinar la existencia de un movimiento "absoluto", y (b) hay movimientos absolutos (en el sentido de que hay fuerzas centrífugas presentes) pero que no son causados por una fuerza externa —p, un disco que gira presenta fuerzas centrífugas, pero su movimiento circular puede deberse a que se conserva el momento angular y no a la aplicación de una fuerza que conserva dicho movimiento. (16, p. 193).

Planck y Einstein en Berlín, junio 28 de 1929. Max Planck (1858-1947), Albert Einstein (1879-1955).

entidad independiente de los objetos materiales, o sea, el espacio absoluto. Así, la afirmación de que el movimiento absoluto es un movimiento que ocurre en (o respecto de) el espacio absoluto se funda en la tesis filosófica de que todo movimiento es 'relativo' (8, p. 24).

Las principales críticas que históricamente se han hecho a este argumento newtoniano son las de Leibniz, Berkeley y Mach.

Leibniz atacó la primer tesis del argumento newtoniano sosteniendo que si bien hay una distinción entre movimiento relativo y absoluto, éste último no se ha de interpretar como absoluto en el sentido newtoniano, i.e. como independiente de otros cuerpos, ni como un movimiento que ocurre en relación con el espacio vacío: "hay una diferencia entre el movimiento absoluto verdadero de un cuerpo y el mero cambio relativo de su situación con respecto a otro cuerpo. Pues cuando la causa inme-

diata del cambio (que para Leibniz es la *vis viva*, fuerza motriz o energía cinética) se encuentra en el cuerpo, ese cuerpo está verdaderamente en movimiento". (1, L. V. 53, p. 74). O sea, para Leibniz si bien todos los movimientos son relativos, son con respecto a otros cuerpos, de algunos de estos movimientos se puede decir que son "absolutos", reales o que verdaderamente ocurren (sin que se pueda considerar que es más bien el otro cuerpo el que se mueve mientras que el cuerpo en cuestión permanece inmóvil) en tanto que están producidos por una causa o fuerza interna. A esta idea de Leibniz se le puede objetar lo siguiente: (a) dicha fuerza interna no es directamente observable, y por tanto, no puede utilizarse para establecer que hay un movimiento "absoluto" o real; (b) Leibniz no da ningún argumento, como debería, para establecer que hay una relación causal entre la fuerza interna y la fuerza centrífuga; (c)

Mach también intentó desarrollar una teoría relacional del espacio y del movimiento. La idea de Mach es que sostener, como Newton, que las fuerzas centrífugas son causadas por un movimiento que ocurre en relación al espacio absoluto significa sostener que es el espacio absoluto el que causa el que dichas fuerzas se presenten —en verdad, varios autores han entendido así la tesis de Newton (2, pp. 107-8; 4, p. 56; 14, Einstein, "Notas Autobiográficas", p. 101; 16, p. 200). Considero que Newton no pudo haber sostenido que el espacio absoluto causa dichas fuerzas ya que para él el espacio absoluto es pasivo, o sea, que no actúa sobre los objetos materiales (13, p. 145). Trataremos de aclarar por qué Mach y otros han dado una interpretación tan extraña de Newton.

Un posible argumento por el cual Mach pudo haber sostenido que para la física clásica es el espacio absoluto el que causa la aparición de las fuerzas centrífugas es el siguiente: no basta decir que es el movimiento acelerado el que causa las fuerzas centrífugas, o en general, las fuerzas inerciales,² porque de lo que se trata, precisamente, es explicar por qué para la física clásica el movimiento acelerado va necesariamente aso-

ciado con fuerzas inerciales (de tal forma que en muchos casos la única manera de determinar que hay un movimiento acelerado es constatar la presencia de fuerzas inerciales) mientras que el movimiento inercial no genera fuerzas inerciales. La posible explicación, consistente en decir que las fuerzas inerciales son la reacción (tercera ley) a la aplicación de una fuerza que produce la aceleración (segunda ley), no es correcta, ya que hay casos en que se presentan fuerzas inerciales pues el movimiento acelerado se mantiene no por la acción de una fuerza sino por la conservación del momento angular —tal es el caso del movimiento rotatorio de la Tierra. Otra posible explicación sería el decir que las fuerzas inerciales son la manifestación de la inercia o resistencia al cambio de estado, i.e. resistencia a la aceleración (3, p. 76); esto es tan sólo una pseudo explicación, porque lo que se pregunta, precisamente, es por qué para la física clásica los cuerpos presentan resistencia al cambio de estado o aceleración pero no al movimiento uniforme rectilíneo. Por lo cual queda la alternativa de que es el espacio absoluto, con respecto al cual ocurre el movimiento acelerado, el que causa la presencia de las fuerzas inerciales.

Mach considera que apelar a entidades no-observables como el espacio absoluto para explicar los fenómenos no es un procedimiento científico legítimo —recuérdase que Mach es empirista. Por otra parte, nos dice Einstein, "Mach conjetura que en una teoría verdaderamente racional la inercia (i.e. las fuerzas inerciales) tendría que depender de la interacción de las masas, como ocurría precisamente con las demás fuerzas de Newton" (14, Einstein, "Notas Autobiográficas", p. 101). O sea, Mach, con el fin de sostener una teoría racional del espacio y el movimiento (por ser un empirista), y con el fin de sistematizar la teoría newtoniana, sostiene que las fuerzas inerciales se han de explicar de la misma manera que se explican otras fuerzas (como p.e. la gravedad) en la teoría newtoniana, o sea, como el resultado de la interacción entre masas. Las masas relevantes para la explicación de las fuerzas inerciales son la masa o cuerpo que se mueve aceleradamente y las estrellas fijas (Mach selecciona las estrellas fijas porque éstas constituyen un marco de referencia inercial, y porque, dado que su idea era que es el conjunto total de la masa existente en el universo lo que genera las fuerzas inerciales (3, p. 85), y dado que en las estrellas fijas se da la mayor aglomeración de masas del universo (4, p. 110), las estrellas fijas pueden servir para ser aquello con respecto a lo cual ocurre todo movimiento

acelerado). Así, lo que hace Mach es sustituir el espacio absoluto newtoniano por un sistema inercial privilegiado que es el de las estrellas fijas, y sostiene que las fuerzas inerciales se explican como el resultado de la interacción causal entre las estrellas fijas y el cuerpo que se mueve aceleradamente, y por lo cual el movimiento acelerado, que es tan relativo como el inercial (i.e. no es absoluto en sentido newtoniano), se ha de entender como un movimiento que ocurre con respecto a las estrellas fijas (2, p. 110-1).

Dada esta concepción, Mach interpreta el experimento de la cubeta como un experimento que tan sólo muestra que los objetos vecinos al agua no afectan la fuerza centrífuga, pero éste no demuestra que las estrellas fijas no causen la fuerza centrífuga. El experimento ideal de las esferas rotantes lo considera inválido porque presupone exactamente lo que tiene que demostrarse, o sea, presupone que en el vacío se presentarán fuerzas centrífugas.

El problema principal con la concepción de Mach es que aunque está propuesta como una teoría alternativa de la Newtoniana, de hecho, no es una teoría, sino tan sólo la idea general o la clave para desarrollar una teoría alternativa (5, p. 299). En efecto, Mach nunca determinó cuantitativamente cómo la interacción entre masas genera la fuerza centrífuga y las otras fuerzas inerciales. (16, p. 201).

Para terminar, cabe destacar que la noción de espacio absoluto, tal y como la introduce Newton en el *Scholium*, no es una noción que tenga por función explicar causalmente nada (en contra de la interpretación machiana), ya que, entre otras razones, el espacio absoluto es pasivo para Newton. La función que cumple en el *Scholium* es puramente conceptual, ya que consiste en aclarar cual es el marco de referencia del movimiento acelerado, o sea, del movimiento absoluto, aclaración que resulta necesaria porque se concibe de movimiento como 'relativo'. O sea, lo que hace Newton es interpretar el dato científico de la existencia de movimientos acelerados (que a diferencia de los inerciales, causan fuerzas inerciales) utilizando los términos altamente teóricos y quasifilosóficos de "relativo", "movimiento absoluto" y "espacio absoluto".

Qué tan cruciales para, o no eliminables de, la teoría newtoniana son éstos términos altamente teóricos depende de cómo se conciba lo que es una teoría científica. Si se la concibe estáticamente, como un mero conjunto de leyes que sirven para describir y predecir hechos, pues ciertamente son eliminables estos conceptos ya que su función es solamente

de interpretar o aclarar conceptualmente a dichas leyes. Empero, si una teoría científica se la concibe como algo que es usado y algo que se genera y desarrolla históricamente, entonces no son eliminables dichos conceptos altamente teóricos. En efecto, dichos conceptos pertenecen a los fundamentos conceptuales de la mecánica, o sea, la función de dichos conceptos es aclarar y precisar qué es lo que la teoría afirma —así, el considerar al movimiento como algo 'relativo' nos hace ver que el movimiento del que trata la física clásica está entendido como un mero cambio de relaciones espaciales, y, por tanto, se puede dar un tratamiento matematizado exhaustivo del movimiento; el decir que algunos movimientos son absolutos precisa que los efectos de la aceleración son independientes de los objetos que rodean al cuerpo que se mueve, e independientes del marco de referencia (inercial); y el introducir el concepto de espacio absoluto aclara con respecto a qué ocurre el movimiento acelerado.

II

Hemos visto que en el *Scholium* a las Definiciones, Newton, introduce el concepto de espacio absoluto con el fin de especificar con respecto a qué ocurre el movimiento acelerado. Sin embargo, el concepto de espacio absoluto cumple otra función, un tanto implícita, y que es la de especificar el marco de referencia con respecto al cual resultan verdaderas las leyes de la mecánica. En efecto, el hecho de que el *Scholium* esté inmediatamente antes de la enunciación de las leyes del movimiento, parece indicar que Newton le confería esta función al concepto de espacio absoluto.

Las leyes de la mecánica no son verdaderas referidas a cualquier marco de referencia. Por ejemplo, la ley de inercia establece que un cuerpo sobre el cual no actúa ninguna fuerza externa permanece en su estado de reposo o de movimiento uniforme rectilíneo. Pero el que un movimiento sea o no rectilíneo depende del marco o sistema de referencia desde el cual se lo observa —de tal forma que el movimiento de un cuerpo en la Tierra, que observado desde la Tierra nos parece rectilíneo, observado desde el Sol no será rectilíneo, ya que la Tierra se está moviendo circularmente. O bien, considérese la segunda ley ($F = ma$). De acuerdo con ella, un cuerpo que cae a la Tierra, debería caer verticalmente, pero esto no sucede de hecho porque la Tierra es un sistema de referencia que está en rotación: las fuerzas de Coriolis, producidas por la rotación, hacen que el cuerpo se desvíe lateralmente un poquí-

to de su trayectoria vertical.

Las leyes de la mecánica newtoniana son verdaderas referidas a un sistema que está realmente en reposo, ya que respecto de él, la trayectoria observada es la trayectoria real (dado que no está influida por el movimiento del sistema desde el cual se la observa), y ya que en dicho sistema, por no moverse aceleradamente, no actúan fuerzas inerciales. Claramente, dicho sistema realmente en reposo es el espacio absoluto, y no puede ser un sistema material determinado porque siempre es posible descubrir que sí estaba en movimiento.

Sin embargo, para efectos *prácticos* (ie. para explicar la física newtoniana a los fenómenos naturales), no se puede considerar al espacio absoluto como el marco de referencia, ya que éste es inobservable. Lo que de hecho se hace es usar como marcos o sistemas de referencia a los llamados sistemas inerciales o galileanos.

Un marco inercial o galileano es un sistema de coordenadas material que está en reposo o en movimiento uniforme rectilíneo. También se lo puede definir como un marco dentro del cual cualquier cuerpo, sobre el cual no actúa ninguna fuerza externa neta se mantiene en un estado de reposo o de movimiento uniforme rectilíneo. Finalmente, otra definición equivalente es la de que es un marco en el cual no se presentan fuerzas inerciales. Ahora bien, hay un número indefinido de sistemas inerciales: dado un sistema inercial, cualquier sistema (o conjunto de cuerpos) que se mueva uniforme y rectilíneamente o esté en reposo relativo al sistema dado, será también un sistema inercial. La razón de esto está dada por el principio dinámico de relatividad, que establece que mediante experimentos mecánicos llevados a cabo dentro de un sistema no es posible determinar si dicho sistema se mueve uniforme y rectilíneamente o está en reposo, o sea, que todos los fenómenos mecánicos ocurren de la misma manera, ya sea que estén en un sistema que se mueve o que esté en reposo. Este principio de la relatividad, a su vez, es consecuencia de la ley de inercia, que afirma la equivalencia del movimiento uniforme rectilíneo y el reposo.

No todo sistema es inercial, ya que hay sistemas acelerados. Un sistema acelerado se caracteriza por el hecho de que en él operan fuerzas inerciales —así, p. ej., si se coloca un cuerpo sobre un disco que gira, el cuerpo, (si es que sobre él no actúan ninguna fuerza externa neta), no permanecerá en reposo, sino que saldrá disparado en sentido contrario al eje de rotación (por la acción de la fuerza centrífuga), y de lo cual se infiere que el

disco es un sistema acelerado.

Las leyes de la mecánica clásica sólo son verdaderas si se las aplica a sistemas inerciales; para explicar los fenómenos mecánicos que ocurren en un sistema acelerado es necesario utilizar no sólo estas leyes sino también añadir la existencia de fuerzas inerciales —así, el leve desplazamiento lateral de la caída libre en la Tierra se explica por las fuerzas de Coriolis. Otra manera típica de enunciar esta idea es decir que las leyes mecánicas adquieren su forma más simple, o sea, la forma en que fueron enunciadas por Newton, cuando se las refiere a sistemas inerciales, y en cambio cuando se las refiere a sistemas acelerados son más complejas porque toman en cuenta la existencia de fuerzas inerciales (3, p. 77; 4, p. 107; 16, p. 210). Una tercera manera, más técnica de enunciar esta idea es decir que las leyes de la mecánica son invariantes con respecto a las transformaciones de Galileo (3, p. 74). Las transformaciones de Galileo son ecuaciones que nos permiten calcular la posición y velocidad de un cuerpo en un sistema inercial S' a partir de la posición y velocidad que dicho cuerpo tiene con respecto a otro sistema inercial S , tal que S' se mueve uniforme y rectilíneamente con respecto a S . El decir que las leyes de la mecánica son invariantes (o que son verdaderas) quiere decir que a partir de ellas se obtiene el mismo resultado cuantitativo ya sea que el movimiento así determinado cuantitativamente se lo refiera a uno u a otro sistema inercial.

Para la mecánica clásica el marco de referencia *observable* son los sistemas inerciales, los cuales son distintos a los sistemas acelerados. . .

El hecho de que las leyes de la mecánica newtoniana sean invariantes (o sean verdaderas) con respecto a cualquier sistema inercial se debe a que la aceleración es invariante (37, p. 75), y a que las leyes de la mecánica newtoniana versan sobre la aceleración. En efecto, con respecto a distintos sistemas inerciales en movimiento uniforme y rectilíneo unos respecto de los otros, la posición y velocidad de un cuerpo varía (así, la velocidad a la que camina un hombre sobre un barco que se mueve en el mar es distinta ya sea que el movimiento del hombre se lo refiera al barco o al mar); sin embargo, a pesar de que la velocidad varíe con respecto a los distintos marcos inerciales, esto no sucede con la aceleración ya que lo que ésta representa es la cantidad en que varía la velocidad en el tiempo (de tal forma que la variación en la velo-

cidad, ie. la aceleración, es la misma si respecto de S , la velocidad instantánea de un cuerpo en t_1 , t_2 y t_3 es 10 km/hr, 30 km/hr, a la velocidad que tendría dicho cuerpo referido otro marco inercial S' en t_1 , t_2 y t_3 y que sería 15 km/hr, 25 km/hr, 35 km/hr si es lo que S' se mueve relativamente a S a 5 km/hr). O sea, la velocidad es relativa a un marco inercial, ya que varía según el marco al que se la refiera, mientras que la aceleración es invariante o no relativa o absoluta (ie. la misma independientemente de a qué marco inercial en particular se la refiera).

En síntesis, hemos visto que para la mecánica clásica el marco de referencia *observable* son los sistemas inerciales, los cuales son distintos a los sistemas acelerados ya que en ellos no se presentan fuerzas inerciales, y que es respecto a ellos que las leyes de la mecánica resultan verdaderas.

Apelando al concepto de sistema inercial, Max Born ha sostenido que las ecuaciones newtonianas del movimiento contradicen su tesis del espacio absoluto en cierta manera, ya que "existen ciertos sistemas equivalentes de referencia en movimiento relativo, cada uno de los cuales puede considerarse con la misma justificación como absolutamente en reposo. El espacio de Newton es por ende absoluto sólo en un sentido restringido". (3, p. 3). La idea de Born es que el principio de relatividad implica que si los sistemas inerciales S y S' están en movimiento relativo uno respecto del otro, entonces se puede considerar que S se mueve en relación a S' , que está en reposo, o bien igualmente se puede considerar que S' es el que se mueve y que S está en reposo; y esto contradice a la tesis de que hay un sistema particular, el espacio absoluto, que está absolutamente en reposo, o sea, que no puede ser considerado como estando en movimiento relativo a otros sistemas (3, pp. 69-70). Este argumento de Born en contra del espacio absoluto sólo sería válido en caso de que pudiéramos considerar al espacio absoluto como un sistema inercial más, aunque privilegiado; pero claramente, dentro de la mecánica newtoniana esto no es posible ya que, por definición, el espacio absoluto es algo independiente del mundo material e inobservable, es algo que es uno, y que es la arena en que acontece todo fenómeno físico, y algo absolutamente inmovible, mientras que los sistemas inerciales, dada su definición, no cumplen con estas características. Ahora bien, lo que lleva a Born a considerar al espacio absoluto a la par que un sistema inercial es su adhesión a un principio empirista según el cual no debe haber en la física nociones que no sean verificables empí-

ricamente (3, pp. 3 y 69). Empero, lo que hace con ello Born es introducir una concepción epistemológica opuesta a la concepción newtoniana. En efecto, aún cuando Born y Newton son empíricos, entienden de manera muy distinta en qué consiste esta posición. Para Born, "Un concepto se refiere a una realidad física sólo cuando hay algo que podemos afirmar por medio de una medición y que corresponde a él en el mundo de los fenómenos". (3, pp. 69-70), de tal forma que, para que en principio pueda ser legítimo el concepto de espacio absoluto, éste tendría que ser correlacionado con algo fenoménico, ie. algún sistema inercial (pero, como hemos visto, por el principio de relatividad, no hay ningún sistema inercial privilegiado). En cambio, para Newton, que hace filosofía natural, "en las disquisiciones filosóficas, debemos abstraernos de nuestros sentidos, y considerar las cosas en sí mismas, distintas a lo que son tan sólo medidas sensibles de ellas". (12, Sch, IV, p. 8, subrayado mio). O sea, para Newton, el empirismo solamente significa que se tenga algún tipo de evidencia empírica para una entidad que puede ser bastante distinta, aún ontológicamente, de aquello que es empíricamente observable; por ejemplo, la evidencia empírica de que las aceleraciones producen fuerzas inerciales es evidencia para la tesis filosófico-científica de que la aceleración es absoluta y, por ende, es un movimiento que ocurre con respecto al espacio vacío. Así pues, para que la crítica de Born sea válida, hay que aceptar el supuesto epistemológico en que se funda, y que es distinto al empirismo newtoniano.

Otros autores, menos categóricos que Born, han sugerido que la noción de espacio absoluto puede ser sustituida por la de sistema inercial (de forma tal que movimiento "absoluto" significa movimiento invariante con respecto a cualquier sistema inercial) (17, p. 507). Si bien es cierto que la noción de sistema inercial es más ventajosa que la de espacio absoluto en tanto que se refiere a algo empírico y observable, lo cierto es que hacer tal sustitución parecería imposibilitar la respuesta a la pregunta ¿qué es lo que determina que un marco sea inercial o acelerado? Si cuenta uno con el concepto de espacio absoluto, uno puede responder que la diferencia entre estos dos tipos de marcos es intrínseca a los marcos, ie. no causada por influencias externas a los marcos, y se la puede explicar diciendo que ésta se debe a que los marcos inerciales están en reposo o se mueven uniforme y rectilíneamente con respecto al espacio absoluto mientras que los marcos acelerados se

mueven aceleradamente con respecto al espacio absoluto y es esto lo que ocasiona la aparición de fuerzas inerciales en dichos marcos (4, p. 109). Sin embargo, realmente no es indispensable la noción de espacio absoluto para responder a esta pregunta, ya que, utilizando las ideas de Mach, se puede sostener que la diferencia entre los marcos se debe a influencias externas, a saber, a la distribución en gran escala de la materia del universo, de tal forma que es el movimiento inercial o acelerado de los marcos con respecto a las estrellas fijas lo que determina que en ellos se presenten o no fuerzas inerciales (4, p. 110; 17, p. 508) —empero, recuérdese que el problema que presenta esta hipótesis de Mach es *a posteriori* y consiste en desarrollar una teoría que la avale.

A nivel conceptual resulta clara y elegante una presentación de la mecánica clásica en términos de espacio absoluto. En efecto se podría decir que las leyes de la mecánica son verdaderas respecto del espacio absoluto, pero como éste es inobservable, en la práctica se usan los sistemas inerciales (que teóricamente se definen como aquellos que se mueven uniforme y rectilíneamente o están en reposo con respecto al espacio absoluto). En cambio, si sólo se cuenta con la noción de sistema inercial, la presentación de la mecánica clásica resultaría un tanto circular ya que para definir el marco de referencia (a saber, los sistemas inerciales) para las leyes de la mecánica, hay que utilizar algunas de dichas leyes o principios (p. j. la ley de inercia y el principio de relatividad, o el principio de Mach, pero en tanto que esté comprobado empíricamente y por lo cual resultará parte de la teoría).

Para terminar, quisiera destacar que el enfocar la noción de espacio absoluto desde la perspectiva del problema del marco de referencia para las leyes de la mecánica no presenta un cambio fundamental con respecto al enfoque en términos del problema del marco de referencia del movimiento. En efecto, en ambos casos lo que está en juego es la distinción fundamental de la mecánica clásica entre movimiento inercial, o velocidad, y aceleración, distinción que Newton quiso conceptualizar en términos de espacio absoluto.

III

El concepto de espacio absoluto cumple otra función, un tanto implícita, aunque fundamental, en la física clásica, y que es la de constituir la base teórica para las mediciones espaciales (9, p. 321), o sea, el concepto de espacio absoluto newtoniano cumple la función de especificar

la geometría métrica (ie. la geometría que estudia las relaciones matemáticas entre distancias) que se ha de utilizar en la física. Dado que esta función resulta más clara o explícita si se compara la física newtoniana con la teoría de la relatividad, examinaremos esta última teoría también —lo cual requiere que hablemos no sólo del espacio sino también del tiempo.

La afirmación newtoniana de que el espacio y el tiempo son absolutos significa dos cosas:

1) El espacio es absoluto en el sentido de que es una entidad cuya estructura es independiente o no es afectada por la materia. La estructura matemática del espacio para Newton es la de ser homogéneo (ie. similar en todas partes) e isotrópico (ie. todas las direcciones son similares), la de su tridimensionalidad y tener una métrica euclideana (ie. el cálculo de distancias utiliza el teorema de Pitágoras, etc.). El tiempo es absoluto en el sentido de ser una entidad cuya estructura no está afectada por la materia; dicha estructura matemática es la de ser unidimensional, continuo y unidireccional.

2) El espacio es absoluto en el sentido de que un intervalo espacial determinado entre dos cuerpos es el mismo independientemente de cual sea el marco de referencia desde el cual se lo mida (5, p. 290) (ya que, lo que se estaría midiendo, supuestamente es un intervalo en el espacio absoluto en el sentido 1). El tiempo es absoluto en el sentido de que un intervalo espacial particular entre los fenómenos es el mismo independientemente de cual sea el marco desde el que se lo mide. O bien, el tiempo es absoluto en el sentido de que si dos eventos cualesquiera son simultáneos medidos desde un marco de referencia determinado, resultarán también simultáneos medidos desde cualquier otro marco de referencia (6, p. 30).

La teoría especial de la relatividad ha mostrado la falsedad del sentido 2 de espacio y tiempos absolutos (ie. como intervalos independientes del marco de referencia), y parcialmente, la falsedad del sentido 1 (ya que para esta teoría no existen dos entidades, espacio y tiempo, sino sólo una, el espacio-tiempo). La teoría general de la relatividad, según algunos autores, ha puesto en duda el sentido 1 de absoluto, en tanto que muestra que la métrica del espacio-tiempo depende de la existencia y distribución de la materia; ciertamente, si esta crítica fuese válida, sería la objeción más fuerte posible a la existencia de un espacio-tiempo absoluto, ya que mostraría que no hay tal entidad independiente, ie. con una estructura propia, porque la es-

estructura geométrica del universo es tan sólo el resultado causal de la existencia y distribución de la materia. Pasemos pues a examinar estas teorías.

Considero que una de las tesis implícitas más importantes en la mecánica newtoniana, y que la teoría especial de la relatividad saca a luz, es que los conceptos de espacio y tiempo absolutos en el sentido (2) —ie. como distancias y tiempos absolutos— tienen por función la de fundar o ser los presupuestos de las transformaciones galileanas y el teorema de la adición de velocidades. Las transformaciones galileanas son cruciales para la mecánica clásica porque, como vimos, las leyes de ésta son invariantes sólo bajo las transformaciones galileanas (que es una manera técnica y precisa de decir que las leyes de la mecánica clásica son verdaderas para cualquier sistema inercial). Examinemos pues las ideas pertinentes para este punto de la teoría especial de la relatividad (teoría que, a diferencia de la general, sólo es válida o verdadera para sistemas inerciales de referencia).

Einstein considera que la mecánica newtoniana ha de ser sustituida por la teoría especial de la relatividad si es que se ha de resolver la incompatibilidad entre los dos enunciados de la constancia de la velocidad de la luz, y de la relatividad.

La ley de la constancia de la luz afirma que en el vacío la luz viaja a 300,000 km/seg. Einstein considera a esta ley como una "ley general de la naturaleza" (6, p. 18) o como uno de los principios fundamentales de la relatividad especial (6, p. 48) porque es una ley que es consecuencia necesaria de la teoría electromagnética de Maxwell, Faraday y Lorentz (6, p. 19). Lo que esto quiere decir es que esta ley de la constancia de la velocidad de la luz no es tan sólo empírica (ie. comprobada experimentalmente) sino que tiene una justificación teórica; y por otra parte, que Einstein va a usar la teoría electromagnética como punto de partida para construir una física no fundada en la mecánica newtoniana (la cual es incompatible con la teoría electromagnética) (14, Einstein, "Notas Autobiográficas", p. 100).

El principio (restringido o especial) de la relatividad afirma que toda ley de la física (ie. mecánica y electrodinámica) es válida para cualquier sistema inercial.

Unidos estos dos enunciados, lo que se afirma es que, en referencia a cualquier sistema inercial, ya sea que se lo considere en reposo o en movimiento uniforme rectilíneo, la luz viajará en el vacío a la velocidad de 300,000 km/seg. Nos referimos a esta afirmación como el

principio de la constancia de la velocidad de la luz.

Einstein sostiene que los enunciados de la constancia de la luz y el de la relatividad son incompatibles porque de acuerdo con el teorema de la adición de velocidades de la mecánica clásica, cuando se quiere determinar la velocidad que un cuerpo tiene en un sistema inercial S' , a partir de la velocidad w que tiene en S , y tal que S' se mueve relativamente a S con velocidad v , hay que sumar w y v . Usando este teorema, al determinar la velocidad de la luz en S' a partir de la velocidad c (ie. 300,000 km/seg.) que tiene en S , y tal que S' se mueve relativamente a S con velocidad v , resultará que en S' la velocidad de la luz es igual a $C + v$, o sea, la velocidad de la luz será mayor o menor que c ; pero este resultado contradice el principio de la relatividad, según el cual la velocidad de la luz es c en cualquier sistema inercial (6, pp. 18-19). Para resolver esta contradicción, nos dice Einstein, se puede negar alguno de los dos enunciados —opción que no es deseable porque son principios muy firmes; o bien, se pueden revisar nuestras nociones tradicionales o newtonianas de espacio y tiempo— alternativa que él toma (6, p. 19).

Einstein da dos explicaciones de la relación que hay entre el principio de la constancia de la velocidad de la luz y las nociones de espacio y tiempo, una de las cuales es conceptual, y la otra es matemática (e incluye el teorema clásico de la adición de velocidades).

Examinaremos primero la relación conceptual. La tesis que establece Einstein es que el hecho de que si la velocidad de la luz es finita implica que las nociones de distancia, intervalo temporal y simultaneidad son relativas a un marco de referencia inercial, o dicho en otros términos, las nociones de distancia, intervalo temporal y simultaneidad absolutas o newtonianas implican que la velocidad de la luz es infinita (4, p. 161). Einstein saca a luz esta tesis mediante su famoso ejemplo imaginario del tren.

Para que el ejemplo del tren sirva para demostrar la relatividad de la distancia y el tiempo hay que notar que Einstein maneja una *definición operacional* de éstas, o sea, la distancia y el tiempo que son relativos están definidos en términos de las operaciones físicas que hay que llevar a cabo para determinar un intervalo espacial o un caso de simultaneidad de eventos (2, pp. 78 y 106; 6, p. 22) (la noción temporal fundamental es la de simultaneidad porque determinar el tiempo de un evento consiste en determinar que el evento fue simultáneo con cierta posición de las manecillas del reloj (14, Einstein, "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento",

p. 63), y la determinación de un intervalo temporal se hace determinando el tiempo que separa a los tiempos en que acontecieron los dos eventos entre los que se da el intervalo temporal) —asi, Einstein, a diferencia de Newton, identifica espacio y tiempo, en el sentido de distancias y tiempos, con las medidas sensibles de éstos. La definición operacional de simultaneidad es que dos eventos *separados espacialmente* son simultáneos cuando las señales (luminosas, sonoras, etc.) que emiten llegan a la vez al punto medio de la distancia que los separa. Nótese que el problema de la simultaneidad no surge cuando los dos eventos están espacialmente cercanos, pues el observador, que es parte del mismo sistema inercial que los eventos, puede observar si ocurren o no a la vez, y saber así si son o no simultáneos (4, p. 170). La definición operacional de distancia es que el intervalo espacial entre 2 cuerpos o entre dos marcas en un mismo cuerpo se mide observando el espacio entre dos marcas de una vara de medir y que son coincidentes en el mismo momento con las anteriores.

El ejemplo del tren consiste en suponer que un tren muy largo se mueve con velocidad uniforme v , a lo largo de un terraplén en reposo, y que dos rayos caen en los lugares A y B , tales que el punto medio entre ellos es M con respecto al terraplén y M' con respecto al tren:

La pregunta es si los rayos que caen en A y B caen simultáneamente. Supongamos que un observador parado en M observa en el mismo momento las señales luminosas que emiten los rayos, y por tanto concluye que ocurren simultáneamente. En cambio, para un observador sentado en el punto M' del tren, y tal que M' coincide con M en el momento en que ocurren los rayos (según el juicio del observador en M), el rayo B caerá antes que el rayo A , dado que la luz emitida por los rayos tarda tiempo en llegar al punto M' , por tener la luz una velocidad finita, y mientras está avanzando el rayo luminoso, el tren también está moviéndose, de tal forma que avanza hacia el rayo emitido en B , mientras que se aleja del rayo emitido en A , y por lo cual el observador en el tren verá primero la luz emitida desde B y después la que viene de A . (6, pp. 25-6; 2, p. 59). Nótese que si la luz viajara a velocidad infinita, en el momento en que acontecen los rayos, la luz que ellos emiten se distribuiría inmediatamente a todo lo largo del intervalo AB , de forma tal que el observador en M' los vería ocurrir simultáneamente, como lo hace el observador en M , pero como la luz

viaja a velocidad finita, el movimiento del tren hace que un rayo luminoso llegue antes que el otro. Ahorabien, no se puede considerar que realmente los rayos ocurrieron simultáneamente porque así se lo observa desde el marco del terraplén, que es un marco en reposo, y que la no-simultaneidad con respecto al tren se debe a una distorsión introducida por el movimiento del tren, ya que el tren y el terraplén son por hipótesis sistemas inerciales y, por ende, por el principio de relatividad, igualmente se puede considerar que es el tren el que está en reposo y el terraplén el que se mueve.

La relatividad de la simultaneidad implica la relatividad de las distancias

Lo que este ejemplo demuestra es que para distintos sistemas inerciales en movimiento relativo unos respecto de otros la simultaneidad varía, y por ende, que la simultaneidad es *relativa*, o sea, que siempre hay que referir a un marco de referencia determinado el juicio acerca de la simultaneidad o no entre dos eventos espacialmente separados. En palabras de Einstein, "Todo cuerpo de referencia (sistema de coordenadas) tiene su propio tiempo particular; a menos que se nos diga cual es el cuerpo de referencia al cual se refiere el enunciado sobre el tiempo, no hay ningún significado en un enunciado acerca del tiempo en que ocurre un evento". (6, p. 26). Esta tesis de la relatividad de la simultaneidad entre eventos espacialmente separados es la contraria a la tesis newtoniana del tiempo absoluto (según la cual dos eventos son simultáneos independientemente del marco inercial al cual se los refiera), y como hemos visto, se funda en (i) una definición operacional de simultaneidad y en (ii) el hecho de que la luz viaja a velocidad finita.

La relatividad de la simultaneidad implica la relatividad de las distancias. Se dice que dos puntos en un cuerpo están a una distancia de un metro cuando *simultáneamente* los dos puntos coinciden con los extremos de una regla de un metro. Pero si el cuerpo se encuentra en movimiento relativo al observador, la distancia que éste mida será distinta a la distancia que mida un observador en reposo con respecto al cuerpo, ya que lo que es simultáneo para el primer observador no lo es para el segundo, y viceversa. (3, p. 246; 4, p. 171; 15, p. 47). Por ende, las distancias son relativas a los marcos inerciales de referencia en los cuales se mide.

Hemos visto así que el carácter finito de la velocidad de la luz implica que las



Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716).

nociones de distancia y tiempo son relativas a un marco de referencia. Esto muestra que en la teoría newtoniana, las nociones de distancia y tiempo absolutos (ie. independientes de cualquier marco inercial) cumplían la función de implicar o requerir que al menos algunas velocidades fuesen infinitas, ya sea la velocidad de la luz o de cualquier otro fenómeno que pudiese funcionar como señal —y de hecho, la física newtoniana asumió que la velocidad de la luz y la de la gravedad o atracción son infinitas.

Vimos arriba que el motivo por el cual Einstein emprende un exámen de las nociones de simultaneidad y distancia es para resolver la contradicción entre la ley de la velocidad constante de la luz y el principio de la relatividad. La solución *conceptual* a esta contradicción, ie. la posibilidad de afirmar que la velocidad de la luz es absoluta, o sea la misma para todo marco inercial, es la siguiente. Es posible pensar que la velocidad de la luz sea la misma para *cualquier* sistema (inercial) de referencia, ya sea que esté en reposo o en movimiento, si es que se miden de distinta manera las distancias y los tiempos (ie. el mismo intervalo espacial o temporal tiene distinta magnitud para cada sistema inercial distinto), y por lo cual puede resultar que la división entre la distancia y el tiempo den siempre el mismo resultado, *c*, para cualquier sistema inercial. O sea, para hacer absoluta la velocidad de la luz (ie.

la misma para todo marco inercial) hay que relativizar las distancias y los tiempos a cada marco inercial, con el fin de que la división de ellos dé siempre *c*. Hemos visto con el ejemplo einsteniano del tren que dado el supuesto de la velocidad finita de la luz, la distancia y el tiempo de hecho son relativos a cada marco inercial.

Si bien esta explicación conceptual de la posibilidad de absolutizar la velocidad de la luz, relativizando las distancias y los tiempos, es muy aclaradora, sin embargo, no nos ofrece el aparato matemático adecuado para lidiar cuantitativamente con las nuevas nociones de espacio y tiempo relativos. Veamos brevemente la solución matemática einsteniana a la contradicción entre la ley de la constancia de la luz y el principio de relatividad, ie. la posibilidad matemática de absolutizar la velocidad de la luz.

Einstein sostiene que la contradicción desaparece si para la conversión de las coordenadas espaciales y temporales de un sistema inercial a otro se utilizan las transformaciones de Lorentz, en vez de las galileanas de la mecánica newtoniana. (Einstein, "Notas Autobiográficas", 14, p. 103); transformaciones que a su vez implican una ley de composición de velocidades distinta al teorema newtoniano o clásico de la adición de velocidades (3, p. 265) —recuérdese que era este teorema clásico el que generaba la contradicción en cuestión.

Las ecuaciones de Maxwell, que describen los fenómenos electromagnéticos, sólo son verdaderas para todo marco de referencia inercial si es que para calcular las coordenadas espaciales y temporales de un cuerpo en un sistema inercial *S* a partir de las coordenadas que tiene en *S'* se utilizan una serie de ecuaciones llamadas transformaciones de Lorentz. (15, p. 53). O en otros términos, las ecuaciones de Maxwell sólo resultan invariantes bajo las transformaciones de Lorentz (2, p. 79; 4, p. 136; Einstein, "Notas Autobiográficas", 14, p. 104). Dado que, como vimos arriba, la constancia de la velocidad de la luz es una consecuencia necesaria de las ecuaciones de Maxwell, es claro que las transformaciones de Lorentz, al garantizar la verdad de las ecuaciones de Maxwell en todo sistema inercial, garantizarán también que la velocidad de la luz sea la misma en todo sistema inercial. Así, son las transformaciones de Lorentz las que garantizan que la velocidad de la luz sea absoluta; o sea, Einstein resuelve matemáticamente la contradicción entre la ley de la constancia de la luz y el principio de relatividad sustituyendo las transformaciones galileanas (y el teorema clásico de la adición de velocidades)

por las transformaciones de Lorentz (y consecuentemente, otro teorema de composición de velocidades) (Einstein, "Notas Autobiográficas", 14, p. 103).

Vimos arriba que Einstein proponía hacer absoluta la velocidad de la luz sustituyendo las distancias y tiempos absolutos de la mecánica newtoniana por distancias y tiempos relativos. Esta relación conceptual se encuentra retomada matemáticamente en las transformaciones de Lorentz, ya que la aplicación de éstas da por resultado el que las medidas de distancia y tiempos se vean afectadas por el movimiento relativo de los marcos de referencia inerciales. En efecto, si aplicamos las transformaciones de Lorentz para calcular la distancia que tiene una vara en S' (sistema inercial en movimiento relativo a S) resultará que esa distancia es menor que la que tiene dicha vara medida con respecto a S , o sea, las distancias se "contraen" medidas desde los sistemas en movimiento; pero como el movimiento entre S y S' es relativo, igualmente se puede considerar que S' está en reposo y S en movimiento relativo a S' , y en este caso la aplicación de las transformaciones de Lorentz da por resultado el que la vara tenga una menor distancia con respecto a S que con respecto a S' (3, pp. 247-8). Así, el uso de las transformaciones de Lorentz da por resultado el que las distancias sean relativas a los sistemas inerciales de referencia; y dichas transformaciones permiten calcular cuantitativamente la magnitud de la contracción de las distancias con respecto a marcos inerciales en movimiento. Igualmente, el uso de las transformaciones de Lorentz da por resultado el que los tiempos sean relativos a los marcos inerciales, ya que en referencia a los sistemas inerciales en movimiento los tiempos se dilatan (o sea, los relojes se atrasan) en magnitudes determinadas calculables a partir de dichas transformaciones.

Destaquemos aquí que si bien las transformaciones de Lorentz se obtienen a partir de las ecuaciones de la electrodinámica, lo que hace Einstein es sostener que las transformaciones de Lorentz han de aplicarse no sólo en la electrodinámica, sino también en la mecánica (4, p. 145; 9, p. 331), con lo cual (i) Einstein sustituye la mecánica newtoniana por una teoría de la relatividad fundada en la electrodinámica (Einstein, "Notas Autobiográficas", 14, p. 100; 6, p. 84), y (ii) las nociones de distancia y tiempo se tornan relativas no sólo en la teoría electrodinámica, sino en toda la física.

Estos desarrollos matemáticos de Einstein sacan a luz el que las transformaciones galileanas y el teorema clásico de la adición de velocidades de la mecá-

nica newtoniana están fundados en distancias y tiempos absolutos (ie. en intervalos espaciales y temporales que tienen la misma magnitud con respecto a cualquier sistema inercial) (6, p. 30; 4, p. 161). En efecto, las transformaciones galileanas son las siguientes:

Sea S' un sistema o conjunto de coordenadas inercial en movimiento uniforme y rectilíneo relativo a S con velocidad v , y en el sentido del eje x , entonces las coordenadas en un punto P con respecto a S' se calculan a partir de las coordenadas de P en S de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$x' = x - vt, y' = y, z' = z, t' = t \quad (3, p. 71)$$

Lo que la fórmula $x' = x - vt$ nos dice es que se calculará la posición de P para S' sustrayendo a la posición que P tiene en S la distancia que ha recorrido el sistema S' durante cierto tiempo y dada cierta velocidad. Obviamente, esta adición de distancias sólo es posible si se presupone que las distancias son absolutas, o sea, que los intervalos espaciales conservan la misma magnitud ya sea que se los refiera a S o a S' . Igualmente, para las transformaciones galileanas los tiempos son absolutos en tanto que el movimiento no los afecta, como puede apreciarse por el hecho de que $t' = t$. En cambio, en las transformaciones de Lorentz, en donde no se presupone que las distancias y los tiempos son absolutos, se incluye la velocidad de la luz³, c , ya que, como hemos visto, es ésta la que relativiza las distancias y tiempos a los marcos:

$$x' = \frac{x - vt}{1 - \frac{v^2}{c^2}}, y' = y, z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (3, p. 236)$$

(Cabe notar que para velocidades bajas en relación a c , las transformaciones de Lorentz dan los mismos resultados que las galileanas. (4, p. 136).

El teorema clásico de la adición de velocidades también presupone las nociones de distancias y tiempos absolutos ya que si lo que dice este teorema es que $u = w + v$ (donde u es la velocidad de un cuerpo respecto de S' ; w , la velocidad relativa de S' y w la velocidad de ese cuerpo respecto de S), dicho teorema presupone que los espacios y tiempos en ambos sistemas inerciales S y S' tienen la misma magnitud, o sea, que se puede usar el mismo sistema de medidas en

ambos sistemas, y por lo cual se pueden adicionar sin más las velocidades, o sean, los productos de las divisiones entre tiempos y espacios.

Para resumir lo expuesto hasta aquí, la teoría especial de la relatividad saca a luz el hecho de que en la teoría newtoniana las nociones de distancia y tiempo absolutos, si cumplen una función fundamental, ya que, por una parte, requieren que algunos procesos naturales ocurran con velocidad infinita, y por otra parte, y crucialmente, son nociones presupuestas por las transformaciones galileanas (y por el teorema clásico de adición de velocidades), las cuales son esenciales a la mecánica newtoniana porque son ellas las que hacen posible que resulten válidas las leyes de dicha mecánica para cualquier marco inercial de referencia.

Preguntemos ahora qué nos puede decir la teoría especial de la relatividad con respecto a el espacio y el tiempo entendidos como entidades que contienen o que son la arena en la cual ocurren los fenómenos espaciales y temporales. Para esto, recordemos que para la relatividad especial las distancias y tiempos son relativos al movimiento, lo cual significa que no se cuenta con un sistema de mediciones espaciales y temporales común a todos los marcos inerciales de referencia. Sin embargo, la situación no es desesperada, ya que Einstein y Minkowski encontraron que hay una manera de medir la separación entre dos objetos, denominada "intervalo einsteiniano entre dos eventos", tal que dicho intervalo es el mismo para todo marco inercial de referencia (4, p. 102; 15, p. 39). Lo fundamental de este intervalo es que está especificado por cuatro números, tres de los cuales representan coordenadas espaciales, y el otro la coordenada temporal; pero, cuáles de estos números representan coordenadas espaciales y cuál una coordenada temporal depende de cuál es el marco inercial de referencia particular para el cual se quiere distinguir los cuatro números del intervalo en 3 coordenadas espaciales y una temporal (9, p. 322). Así pues, si bien para la relatividad especial los intervalos espaciales y los temporales son relativos al marco inercial de referencia, los intervalos einsteinianos *espacio-temporales* no son relativos a los marcos inerciales de referencia, sino los mismos para todo marco inercial, ie. son absolutos.

Los intervalos einsteinianos son intervalos entre puntos del espacio-tiempo de Minkowski. El espacio-tiempo de Minkowski es una multiplicidad diferenciable de cuatro dimensiones con una métrica pseudo-euclídea determinada por la definición del intervalo einsteiniano

(⁵, p. 292; ⁹, p. 332). O sea, lo que hace Einstein es sustituir el espacio, con una estructura euclídea, y el tiempo, con una estructura continua representable por la recta de los números reales, por otro aparato matemático, el espacio-tiempo de Minkowski, cuya estructura métrica es pseudo-euclídea. Nótese que el espacio-tiempo de Minkowski no es la simple conjunción del espacio y tiempo clásicos, ya que no sólo la métrica cambia sino también la descripción de los intervalos: para la concepción clásica, el intervalo espacial y el temporal son absolutos, mientras que para el espacio-tiempo de Minkowski los anteriores resultan relativos y lo único absoluto son los intervalos espacio-temporales entre dos puntos de dicho espacio-tiempo.

Dado que los intervalos espaciales y temporales de la mecánica newtoniana son relativos para la teoría especial de la relatividad, también para esta teoría hay que dar una interpretación relacional del espacio y el tiempo newtonianos, entendidos éstos como estructuras caracterizables matemáticamente, ya que el sistema de medición al que dan lugar varía con el movimiento de los marcos inerciales de referencia.

Preguntemos ahora si el espacio-tiempo de Minkowski es relativo o absoluto, o sea, si ha de concebirse como el conjunto de todas las relaciones espacio-temporales que generan los cuerpos o masas entre sí, o si ha de concebirse como una entidad con existencia propia en tanto que su estructura no está determinada por la materia, o por cualquier evento que ocurra en él. Podemos decir que la interpretación más adecuada es la de considerar al espacio-tiempo de Minkowski como absoluto, ya que su estructura métrica no está determinada por ningún suceso físico (⁴, p. 102; ⁵, p. 294; ¹⁶, p. 206). En efecto, el espacio-tiempo de Minkowski da lugar a un sistema de medidas único —el intervalo einsteiniano— que puede aplicarse en cualquier marco inercial de referencia independiente del movimiento de éste o de la distribución de masas dentro de un marco de referencia o en el universo; y es por ello que dicho espacio-tiempo se ha de considerar como una entidad cuya estructura métrica es independiente de los sucesos que en ella ocurran, i.e., como absolutos.

Alguien podría objetar a esto que lo que Einstein muestra es que la velocidad finita y constante de la luz es la que determina que el espacio-tiempo tenga la estructura que tiene (i.e. la descrita por la teoría de Minkowski), o sea, que son ciertos fenómenos físicos los que determinan la estructura del espacio-tiempo, y por ende que el espacio-tiempo no es lo

absoluto, i.e. no es una entidad cuya estructura sea independiente de los eventos físicos. Frente a esta objeción debemos aclarar que el hecho de que se usen ciertos datos de una teoría física para determinar cuál es la geometría del espacio o espacio-tiempo es una cuestión distinta a la cuestión ontológica de si el espacio o espacio-tiempo es absoluto o relacional. En efecto, dada la existencia de varias geometrías (euclídeas y no-euclídeas), el problema respecto de cual de éstas describe el espacio real (y no sólo el matemático), es un problema físico: una vez que se han establecido correspondencias entre los términos geométricos (p.j. línea recta, sistema de coordenadas, etc.) y ciertos hechos físicos, es la teoría física la que puede descubrir cual de las geometrías es la verdadera, o sea, es la que describe la estructura espacial o espacio-temporal del universo. Empero, esto no necesariamente quiere decir que son los fenómenos físicos los que *determinan* que el espacio o espacio-tiempo tengan cierta estructura, sino tan sólo que, dado el hecho de que el espacio o espacio-tiempo son inobservables, y dada la existencia de varias geometrías alternativas, el *descubrimiento* de cual es la geometría del espacio real se torna en un problema empírico, o sea, en un problema donde hay que investigar las propiedades espaciales o espacio-temporales de los eventos materiales. Ahora bien, una vez determinada así la estructura geométrica del espacio-tiempo, cabe preguntarse si el espacio-tiempo es absoluto o relacional. El dato crucial, al menos si uno quiere utilizar los resultados de las teorías científicas, para resolver esta pregunta es el de si intervienen o no variables que refieren a fenómenos físicos en la descripción matemática del espacio-tiempo. Dado que no intervienen dichas variables en la teoría especial de la relatividad (o más específicamente, en la teoría de Minkowski que ésta utiliza), generalmente se ha dado una interpretación absolutista del espacio-tiempo de dicha teoría, por resultar esta la más natural o menos forzada. En cambio, en la teoría general de la relatividad parecería ser que para determinar matemáticamente la métrica del espacio-tiempo hay que tomar en cuenta la distribución de la materia-energía en el universo, y por lo tanto, es esta teoría la que ofrece una mayor evidencia en favor de una interpretación relacional del espacio-tiempo. Veamos pues, brevemente, lo que la relatividad general dice sobre este punto.

La teoría general de la relatividad se caracteriza por extender el principio de relatividad a todos los marcos de referencia, ya sean inerciales o no; o dicho en otros términos, se caracteriza porque

las leyes de esta teoría son válidas para cualquier marco de referencia (y no sólo para los marcos inerciales, como en el caso de la relatividad especial) (², p. 113; ⁴, p. 105; ⁶, p. 68; ¹⁶, p. 211).

Einstein sostuvo que "De acuerdo con la teoría general de la relatividad, las propiedades geométricas del espacio no son independientes, sino que están determinadas por la materia". (⁶, p. 113). O sea, Einstein considera que la relatividad general satisfacía el principio de Mach, que Einstein lo interpretó como el principio de que la métrica del espacio-tiempo está completamente determinada por la distribución de la materia energía⁴ (⁵, p. 301; ⁷, p. 527).

La manera en que la materia-energía determina la métrica del espacio-tiempo es a través de los campos gravitatorios. La distribución de la materia-energía en una cierta región determina el que exista en esta región un campo gravitatorio específico, y éste, a su vez, se exhibe en, o se identifica con la métrica del espacio tiempo (⁹, p. 335; ¹⁶, pp. 72 y 215). Esta idea está expresada matemáticamente en el hecho de que la métrica del espacio tiempo en cierta región se determina por medio de las ecuaciones einsteinianas del campo gravitatorio, que son ecuaciones diferenciales que relacionan la función gravitatoria en dicha región con el tensor de esfuerzo de energía que describe la distribución de la masa-energía a través de la región (siendo la función gravitatoria la que determina la métrica del espacio-tiempo en esa región) (⁵, p. 294; ⁷, p. 527; ¹⁶, p. 215). Es de notarse que, dado que el campo gravitatorio varía en una misma región, la métrica del espacio-tiempo en esa región también varía (⁵, p. 293; ¹⁶, p. 228), o sea, el espacio-tiempo de la relatividad general no es homogéneo.

La idea einsteiniana de que el campo gravitatorio en cierta región se exhibe o identifica con la métrica del espacio-tiempo significa que en vez de explicar los movimientos como el resultado de la acción del campo gravitatorio, se explicarán como debidos al hecho de que el espacio-tiempo en esa región exhibe una determinada métrica. Por ejemplo, en vez de explicar el movimiento orbital de un planeta como causado por la atracción gravitacional que el sol ejerce sobre el planeta, se dirá que este movimiento tiene ciertas propiedades (como el ser elíptico, acelerado, etc.) por ocurrir en una región espacio-temporal que tiene cierta métrica (⁹, p. 326) —para entender mejor esta última afirmación, piénsese en un objeto que se mueve dentro de una esfera: su movimiento será necesariamente circular porque el objeto se mueve en un espacio curvo. La razón

por la cual Einstein buscó representar geoméricamente el campo gravitatorio (ie. identificar el campo gravitatorio con la métrica del espacio-tiempo) es la siguiente. Recuérdese que en el caso de la teoría especial de la relatividad, Einstein logró extender el principio de relatividad para incluir la teoría electrodinámica haciendo que las medidas espaciales y temporales fuesen afectadas por el movimiento de los marcos inerciales de referencia. En el caso de la teoría general va a utilizar la misma estrategia: para lograr que las leyes de la física sean válidas para marcos inerciales y para marcos acelerados de referencia, hay que hacer que el sistema de medidas espacio-temporales (ie. la métrica del espacio-tiempo) se vea afectado por el movimiento acelerado. Ahora bien, dado que uno de los supuestos fundamentales de la teoría general es que hay una equivalencia local entre los marcos acelerados y los campos gravitatorios (ie. generan los mismos efectos) (6, p. 68), en vez de hacer que el sistema de medidas espacio-temporal dependa de, y varíe de una manera definida con respecto a los marcos acelerados, lo hace con respecto a los campos gravitatorios.

El campo gravitatorio afecta de la siguiente manera la métrica del espacio-tiempo. Donde no hay campos gravitatorios (ie. lejos de los objetos masivos), la geometría métrica de dicha región es la geometría pseudo-euclídeana de Minkowski (ie. es la geometría de la teoría espacial), que es una geometría plana (ie. la luz se propaga en líneas rectas que se comportan de acuerdo a los axiomas de Euclides). En cambio, en las regiones donde hay un campo gravitatorio generado por la presencia de la materia, el espacio-tiempo se vuelve curvo (o sea, que la luz no se propaga en línea recta), con lo cual el espacio-tiempo en esa región deja de ser euclídeo y se lo puede describir adecuadamente con la geometría de Reiman (2, p. 113; 16, p. 62). La manera específica en que la presencia de la materia determina la "curvatura" del espacio-tiempo está dada por las ecuaciones einsteinianas del campo gravitatorio.

Algunos autores (cf. 5, pp. 287 y 314; 7, p. 527; 17, p. 506) han considerado que la teoría general de la relatividad implica que el espacio-tiempo no es absoluto, no tiene una existencia independiente, sino relacional, porque la curvatura de las distintas porciones del espacio-tiempo está producida por la cantidad y distribución de la materia-energía en esas porciones. Sin embargo, otros autores han dado buenas razones para sostener que el espacio-tiempo de la teoría general es absoluto. La razón principal (para otras razones cf. 16, pp. 212-31

consiste en establecer que la distribución de la masa-energía no logra determinar por completo la métrica del espacio-tiempo, y que por ende, ha de considerarse que la teoría general prueba que la presencia de la masa-energía, ie. el campo gravitatorio, tan sólo modifica la estructura métrica del espacio tiempo. La presencia de la masa-energía no determina por completo la métrica del espacio-tiempo por las siguientes dos razones. En primer lugar, las ecuaciones einsteinianas del campo gravitatorio, dada cierta distribución de la masa-energía, son compatibles con varias estructuras métricas del espacio-tiempo; para seleccionar a una sola de ellas se requiere imponer condiciones límite al infinito, que usualmente consisten en que el espacio-tiempo en regiones muy lejanas a cualquier masa es del tipo de Minkowski (7, p. 527; 16, pp. 215-6). En segundo lugar, aún cuando Einstein modificó (1916) las ecuaciones de campo para evitar el que su solución requiriese imponer condiciones límite, estas nuevas ecuaciones, al igual que las anteriores, daban por resultado el que el espacio-tiempo tuviera una métrica definida en regiones carentes de materia (7, p. 528). Estas dos razones muestran que la métrica del espacio-tiempo no está determinada *por completo* por la masa-energía, como pretendería un relacionista (como Mach), sino que más bien parecería que el espacio-tiempo tiene una estructura métrica propia (y que es la que tiene en las regiones carentes de materia), aunque esta estructura se ve afectada o modificada por la presencia de la materia. Esto significa que el espacio-tiempo de la teoría general es absoluto, ie. tiene una estructura propia, pero que, a diferencia del espacio o espacio-tiempo de las teorías newtoniana y relatividad especial, el espacio-tiempo guarda ciertas relaciones causales con la materia.

Lo que hemos querido demostrar con el examen de algunos aspectos de las teorías especial y general de la relatividad es que tiene un sentido muy claro el decir que el espacio (o espacio-tiempo) es absoluto: quiere decir que tiene una estructura geométrica independiente de la existencia y características de la materia. Esto, a su vez, tradicionalmente se ha considerado que implica que el espacio es una entidad (sentido ontológico de "absoluto") ya que lo más natural es considerar que dicha estructura tiene que ser estructura de algo —o sea, el paso de la determinación de una estructura autónoma a la existencia de una entidad presupone la tesis filosófica (típica de las posiciones "substancialistas") de que toda propiedad característica o estructura lo es de una entidad (cf. 1, E.,

v., nota a 36-48, p. 120). En cambio, lo que la teoría relacional del espacio afirma, si es que pretende ser una tesis filosófica susceptible de tener pruebas empíricas, o más precisamente, científicas, a su favor, es que el espacio no es una entidad porque la estructura está determinada por la materia, o sea, el espacio es tan sólo el conjunto de aquellas relaciones especiales que la materia produce (ie. el espacio no es sino un efecto de la materia). Dadas estas definiciones, no existe hasta hoy día ninguna teoría científica en la que el espacio resulte claramente relacional.

Conclusión

Hemos visto que el concepto de espacio absoluto tiene dos funciones dentro de la física newtoniana.

La primera de ellas pertenece al campo de la fundamentación conceptual de la mecánica y consiste en explicar la relación a qué ocurre el movimiento absoluto. Newton postuló la existencia del movimiento absoluto a partir del dato científico de que hay una conjunción constante entre movimientos acelerados y fuerzas inerciales. Destacamos que hay en el argumento newtoniano una serie de interpretaciones, algunas de ellas fundadas en tesis filosóficas. Estas son (i) la afirmación de que es el movimiento acelerado el que *causa* las fuerzas inerciales; (ii) esto se interpreta como significando que el movimiento acelerado es real e independiente de la materia, o sea, que es absoluto; (iii) dado que todo movimiento es 'relativo' (tesis filosófica), el movimiento absoluto debe de ser con respecto a algo absolutamente inmóvil e independiente de la materia, o sea, debe ser con respecto al espacio absoluto (entidad que se postula a partir de la ciencia filosófica de que toda estructura (definida en este caso por las propiedades de ser absolutamente inmóvil e independiente de la materia) lo es de alguna entidad).

Examinamos varias contrapropuestas relacionales al espacio absoluto, y cuyo propósito era dar una interpretación del movimiento acelerado tal que no lo hiciese absoluto. La contrapuesta más interesante es la de Mach, pero en tanto que ésta implica una mecánica distinta a la newtoniana, que no se ha desarrollado aún, dicha contrapuesta no está hoy día bien fundada.

Examinamos la tesis relacional de que se puede sustituir el espacio absoluto por los marcos inerciales de referencia, con respecto al campo de aplicación válida de las leyes newtonianas, y encontramos que dicha tesis no resulta aceptable en tanto no permite dar una

explicación conceptual de la diferencia entre marcos inerciales y marcos acelerados de referencia.

A partir del examen de la teoría especial de la relatividad, encontramos que el concepto de espacio absoluto cumple una función explicitadora de ciertos aspectos matemáticos cruciales para la física clásica. Esta consiste en que el decir que el espacio absoluto, i.e. que la estructura geométrica, o más precisamente, la métrica del espacio, es independiente de la materia, implica que los intervalos espaciales (y los temporales) son absolutos, i.e. los mismos para todo marco de referencia. Esta absolutidad de las distancias (y tiempos) está presupuesta por las transformaciones galileanas y el teorema clásico de la adición de velocidades, que son el aparato matemático que permite afirmar la invariancia (o validez) de las leyes newtonianas para cualquier sistema inercial.

A partir del examen del espacio-tiempo en la teoría especial y general de la relatividad encontramos que lo que significa afirmar que el espacio (o espacio-tiempo) es absoluto es que el espacio es una entidad con una estructura geométrica no determinada por la materia o por los fenómenos físicos, de tal forma que sostener que el espacio es relacional consistiría en demostrar que la estructura geométrica que lo caracteriza está determinada por los fenómenos físicos —demostración que no parece realmente dar la teoría general einsteiniana.

Lo que hemos querido mostrar en este trabajo es que el concepto de espacio absoluto tiene un sentido muy claro, y que es un concepto que de hecho cumple al menos dos funciones dentro de la física: una pertenece al campo de los fundamentos conceptuales de la mecánica y que consiste en (a) aclarar conceptualmente la distinción entre movimiento inercial y acelerado y (b) en determinar cuál es el marco para el cual son válidas las leyes newtonianas; y la otra función aclara ciertos aspectos matemáticos, a saber, explícita que la geometría métrica que se usa en la física es independiente de los eventos físicos.

Notas

- 1 El sentido metafísico-teológico del concepto de espacio absoluto aparece en el Scholium General de los *Principia* y en algunas de las "Queries" de la *Optica*. También aparece, de manera muy clara y explícita, en la Correspondencia entre Leibniz y Clarke, donde Clarke representa la posición newtoniana. El sentido metafísico del concepto de espacio absoluto ha sido expuesto magistralmente por Koyré, 10, 11.
La idea básica de Newton es que el espacio debe ser absoluto, i.e. una entidad que existe independientemente de la ma-

teria, porque sólo así es pensable un espacio vacío, el cual se requiere para pensar en la existencia de átomos y fuerzas de acción a distancia. Esta tríada de conceptos —espacio absoluto, átomos y fuerzas de acción a distancia— a su vez remite a una concepción particular de Dios. Dios, ante todo, es omnipotente; y por tanto, necesita gobernar constantemente el mundo que creó —gobierno que puede ser ordinario, a través de las fuerzas de acción a distancia, o extraordinario, reformando el mundo. Para ejercer su dominio sobre el mundo, Dios necesita estar constantemente presente en el mundo; Dios es omnipresente al mundo en tanto que el espacio es un atributo, o un "efecto emanativo" de Dios, idea a la que alude Newton al sostener que el espacio es como el *sensorium* (i.e. el lugar de la sensación) de Dios. Este espacio, atributo o efecto de Dios, es absoluto en tanto que es tan infinito y eterno como Dios. (Para un mayor desarrollo, cf. los textos mencionados arriba y E. Nathan, "Newton and the controversy sobre el materialismo" por publicarse en las *Memorias del Tercer Coloquio Nacional de Filosofía*).

- 2 Todo movimiento acelerado (que puede ser lineal, en caso de que la velocidad no sea uniforme sino que cambia constantemente, o circular, en caso de que sea la dirección la que cambia constantemente) produce fuerzas. En el caso de la aceleración lineal se producen fuerzas como las que experimenta un pasajero de un tren que arranca o frena súbitamente (16, p. 184). En el caso de la aceleración circular, o rotación, dicho movimiento genera fuerzas centrífugas (que jalan hacia afuera el objeto que se mueve) y fuerzas de Coriolis (que operan lateralmente sobre el objeto que se mueve; p.j. las fuerzas de Coriolis generan el movimiento ciclónico y anticiclónico de nuestra atmósfera) (18, p. 190). A estas fuerzas que son el resultado o efecto de los movimientos acelerados, se las llama fuerzas inerciales o aparentes; lo característico de ellas es que son el efecto de un movimiento acelerado y no el resultado de la interacción de las partes o masas del sistema que se mueve (18, p. 210).
- 3 La teoría especial de la relatividad ha sido criticada por basar los conceptos de espacio y tiempo en la ley de propagación de la luz. Frente a esta crítica, Einstein sostuvo que "Con el fin de darle un significado físico al concepto de tiempo, se requiere apelar a procesos de algún tipo para poder establecer relaciones entre distintos lugares. Es inmaterial qué tipo de procesos uno escoja para dicha definición del tiempo. (...) Sin embargo, es ventajoso, para la teoría, escoger sólo aquellos procesos respecto de los cuales sabemos algo de cierto. Esto se cumple para la propagación de la luz en el vacío en un grado mayor que para cualquier otro proceso que pueda ser considerado". (citado en 2, pp. 182-3). Así, para establecer vía un argumento conceptual que la distancia y el tiempo son nociones relativas, se requieren tan sólo que los procesos naturales que pueden funcionar como transmisores de señales, ocurren a velocidades finitas, como vimos en el ejemplo einsteiniano del tren. Ahora bien, la idea de Einstein es que todos los procesos naturales ocurren con velocidad finita; en particular, considera que la teoría electrodinámica de Maxwell y Faraday demuestra que toda acción a distancia se propaga con una velocidad finita (8, p. 48). Por otra parte, para desarrollar un aparato matemático es indispensable deter-

minar cuál es la velocidad finita que se ha de tomar en consideración; Einstein escogió la velocidad de la luz, no sólo por ser ésta "conocida con certeza" (i.e. bien fundada experimental y teóricamente), ya que la ley de la velocidad constante de la luz es parte de la teoría electromagnética, y ésta ofrecía resultados interesantes y generalizables, y porque la luz es la señal que más rápido se propaga en el vacío (Grunbaum, "La génesis de la teoría especial de la relatividad", 14, p. 120).

- 4 Vimos en la Sección I que la tesis de Mach es que las fuerzas inerciales están determinadas por la distribución de la materia. La razón por la cual Einstein pudo interpretar esta tesis como el principio de que la métrica del espacio-tiempo está determinada por la distribución de la materia-energía es que para la teoría general de la relatividad, la métrica del espacio-tiempo va a determinar los efectos inerciales del movimiento de un cuerpo (18, p. 219), y dado que dicha métrica está determinada por la distribución de la materia-energía, resulta que es ésta la que determina en última instancia los efectos inerciales.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Alexander, H. G. (ed.) *The Leibniz-Clarke Correspondence*. Barnes & Noble, 1978.
- 2 Bernstein, J. *Einstein*. Glasgow: Fontana, 1980.
- 3 Born, M. *Einstein's Theory of Relativity*. Nueva York: Dover Publications, Inc. 1965.
- 4 d'Abro, A. *The Evolution of Scientific Thought, from Newton to Einstein*. 2a. ed. Nueva York: Dover Publications, Inc. 1960.
- 5 Earman, J. "Who's afraid of Absolute Space?", *Australasian Journal of Philosophy*, vol. 48, No. 3, Dic. 1970.
- 6 Einstein, A. *Relativity, the Special and General Theory*. Nueva York: Crown Publishers, Inc. 1961.
- 7 Grunbaum, A. "The Philosophical Retention of Absolute Space in Einstein's General Theory of Relativity", *Phil. Review*, Vol. 66, 1957.
- 8 Hinckfuss, I. *The Existence of Space and Time*. Oxford: Clarendon Press, 1975.
- 9 Hobson, E. W. *The Domain of Natural Science*. Nueva York: Doun Publications, Inc. 1968.
- 10 Koyré, A. *From the Closed World to the Infinite Universe*. Baltimore: John Hopkins University Press. 1957.
- 11 Koyré, A. *Newtonian Studies*. The University of Chicago Press. 1965.
- 12 Newton, I. *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Tr. de Motta y Cajalí. Berkeley: University of California Press. 1962.
- 13 Newton, I. *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton*. Ed. por A. R. Hall y M. B. Hall. Cambridge University Press. 1962.
- 14 Pearce, L. (ed.) *La teoría de la relatividad*. Madrid: Alianza Editorial. 1981.
- 15 Russell, B. *The ABC of Relativity*. Nueva York: Mentor Book. 1959.
- 16 Sklar, L. *Space, Time and Space Time*. Berkeley: University of California Press. 1977.
- 17 Smart, J. J. C. "Space" en *Encyclopedia of Philosophy*, ed. por Edwards, Vol. 7. Nueva York: The Macmillan Co. 1967.
- 18 Snow, A. J. *Matter and Gravity in Newton's Physical Philosophy*, Nueva York: Arno Press. 1975.