

LA IDENTIDAD DE LAS PARTES DEL ESPACIO Y EL PROBLEMA DE LA INERCIA* †

Favio Ernesto Cala Vitery‡
Universidad Industrial de Santander (UIS)

RESUMEN

¿Es el espacio una entidad física real en toda regla o se trata simplemente de un conjunto de relaciones entre objetos materiales coexistentes? Esta pregunta sobre el estatus ontológico del espacio físico enfrentó a Leibniz y Newton. Mientras que Leibniz cuestionó la identidad de las partes del espacio, Newton pudo cargar a la tradición relacional originada en Leibniz con el problema de la inercia. La importancia de la estructura inercial en esta discusión fue reconocida por Mach y sus críticas fueron adoptadas como una especie de credo relacional por Einstein. De la mano de los protagonistas más destacados en este debate, se muestra que la identidad de las partes del espacio absoluto, frecuentemente discutida en artículos sobre el tema, es casi irrelevante al lado del problema del origen de la estructura inercial. Para esto incluyo una breve presentación de la representación neo-newtoniana de la dinámica clásica.

Palabras Clave: Espacio, sustancialismo, relacionismo, inercia, Mach.

ABSTRACT

Is space an entity in its own right or is it just a set of relations among coexisting material bodies? Leibniz and Newton argued along this line questioning the ontological status of physical space. While Leibniz was able to question the identity of the constituent points of space, Newton loaded relationism with the problem of inertia. The importance of inertial structure in this debate was recognized by Mach. His criticism of Newtonian absolute space became Einstein's relational credo. In this article, following the relevant participants of the debate, it is shown that the issue about the identity of the constituent points (parts) of space is practically irrelevant compared with the problem of the origin of inertial structure. Conveniently, I include a brief presentation of the neo-newtonian account of classical dynamics.

Key words: Space, substantivalism, relationism, inertia, Mach.

* **Recibido** Enero de 2006; **aprobado** Marzo de 2006.

† Este escrito hace parte de la investigación que vengo adelantando sobre interpretación del espaciotiempo en el contexto de la Teoría General de la Relatividad. Aquí se repasa el origen histórico de la discusión y se establecen los preceptos filosóficos que tensionan buena parte de la discusión actual.

‡ Deseo agradecer al doctor Carl Hofer del departamento de filosofía de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB), por su atenta lectura comentada de este artículo.

1. Introducción

En buena medida la física moderna debe su origen al esfuerzo consistente por encontrar la unidad formal a un problema singular. Se trata de lo que la filosofía natural, desde Aristóteles, entendía como el movimiento local. Antes de Newton, quienes se ocuparon de estudiar el movimiento local, que comprendía la caída de los graves, las órbitas planetarias y las trayectorias de proyectiles, buscaron expresar de una forma más o menos inteligible lo que significa que un cuerpo se mueva de un lugar a otro. En el fondo de la cuestión siempre estuvo latente la discusión sobre la naturaleza del espacio y el tiempo. Y esta cuestión de fondo nos sigue ocupando.

Discutiendo el asunto, Newton y Leibniz ya anticiparon que la ontología de la física es un territorio de delicada labranza. Dejaron documentada su discusión al respecto en la polémica epistolar entre Clarke, portavoz de Newton, y el propio Leibniz. La tradición recogió del enfrentamiento dos posiciones encontradas que pretendían responder a la siguiente cuestión: ¿Son el espacio y el tiempo entidades físicas reales en toda regla o simplemente un conjunto de relaciones entre cuerpos materiales?

La herencia reciente del debate original ha denominado *sustancialista* a la posición según la cual, siguiendo a Newton, el espacio es una entidad física que no debe su existencia a la presencia de objetos materiales y *relacionista* a la posición según la cual, siguiendo a Leibniz, el espacio no es otra cosa que el conjunto de relaciones entre objetos materiales coexistentes. Consideraciones similares sobre la naturaleza del tiempo son defendidas por los correspondientes costados del debate.

Entretanto, mientras que para el sustancialista el espacio puede ser considerado como una especie de contenedor o receptáculo para los objetos materiales y, en consecuencia, como el soporte universal de los fenómenos físicos, para el relacionista afirmar la sustancialidad (existencia) del espacio parece una concesión metafísica dañina o un mal truco de lenguaje. Para él, existen la materia y sus relaciones.

Del debate original (R-S) se acostumbra afirmar que hemos aprendido que el relacionista puede objetar, amparado en consideraciones epistemológicas, la invisibilidad del espacio. Ésta lleva al sustancialista a afirmar la existencia de situaciones físicas ontológicamente diferentes pero físicamente (experimentalmente) indistinguibles. El espacio newtoniano permite este tipo de cosas y, discutiblemente, esto raya en el absurdo metafísico.

Por otra parte, Newton y la tradición sustancialista pudieron desechar esta objeción cargando a los relacionistas con la pesada loza de la inercia. Y esta no es una loza meramente epistémica. El cambio relacional, es decir, el cambio en la configuración relativa entre objetos materiales coexistentes

resultaba insuficiente para proveer una justificación dinámica de los efectos inerciales.

En las postrimerías del siglo XIX, Mach, siguiendo a Leibniz, intentó defender la interpretación relacional del espacio. Esbozó un programa relacional que permitiría soportar la loza de la inercia. Más tarde en 1916, Einstein, acuñando el principio de Mach, afirmó su satisfacción por haber estructurado una teoría relacional machiana con su TGR. Hoy esta afirmación sigue siendo discutible. Y su discusión es anticipada en este escrito.

Para esto empezaré por hacer una presentación breve de los argumentos inaugurales de sus protagonistas antes de entrar en consideraciones más detalladas sobre el color que tomó el proyecto relacional en manos de Mach.

2. Newton

Inmediatamente después de sus definiciones, abriendo el escolio a sus Principia, Newton escribe:

Absolute space in its own nature without relation to anything external, remains always similar and immovable.

Y, seguidamente:

Absolute motion is the translation of a body from one absolute place into another¹.

Se ve que el escolio, para nuestro interés, supone la presentación inaugural de la tesis sustancialista. En el caso de Newton ésta puede sintetizarse así:

- AN) El espacio absoluto (sustancialista) existe como una entidad en toda regla.
- BN) El movimiento absoluto es real.
- CN) El movimiento absoluto es el movimiento con respecto al espacio absoluto.

En la dinámica de Newton, el espacio absoluto está puesto como un asiento indispensable para referir el movimiento real. Pero dada la invisibilidad del espacio absoluto, este tipo de movimientos no pueden detectarse de una manera similar a la empleada para movimientos relativos ordinarios. Esto es, mediante la observación directa del cambio relativo entre las distancias que separan dos -o más- objetos. Además, Newton advierte que las distancias

¹ Newton, [1687] (1934) p. 6-7.

relativas entre objetos materiales no sirven para distinguir si los cuerpos están en un sistema de referencia en reposo absoluto o se mueven en un sistema inercial (un espacio relativo, utilizando su terminología).

Más aún, desde la mecánica newtoniana no existen diferencias dinámicas entre el movimiento uniforme relativo y el movimiento uniforme absoluto. Así que, en parte para justificar su definición del movimiento absoluto, Newton remite la distinción entre movimientos absolutos y relativos a las causas o efectos respectivos. Estas causas y efectos tienen su manifestación dinámica en sistemas no inerciales. En parte por esto, Newton ha ideado su argumento desde los experimentos del vaso en rotación y el de la cuerda tensada por dos esferas en rotación. Antes de explicarlos Newton deja clara la justificación para los mismos:

The effects which distinguish absolute from relative motion are, the forces of receding from the axis of circular motion [centrifugal]. For there are no such forces in a circular motion purely relative, but in a true and absolute circular motion, they are greater or less, according to the quantity of the motion².

El primer experimento, el del vaso de agua, pretende ser un experimento real. En éste suponemos que de una cuerda en rotación pende un vaso lleno de agua. Las paredes del vaso comunican paulatinamente su rotación al agua hasta que ésta alcanza la misma velocidad que aquellas. Sobre la superficie del agua, plana antes de la rotación, se observa un ahuecamiento. Las paredes del vaso y el contenido de agua giran, finalmente, al unísono alcanzando el reposo relativo.

¿Dónde reside la fuente del ahuecamiento?

Este es el núcleo del argumento ofrecido por Newton. El agua del vaso tiende a alejarse del eje produciendo la concavidad en la superficie. Decimos que esto sucede cuando el agua rota. Debido al reposo relativo entre el agua y las paredes del vaso al final, cuando la concavidad es máxima, concluimos que la rotación que produce efectos dinámicos efectivos es la rotación absoluta del vaso en el espacio (absoluto) y no la rotación relativa del agua con respecto a su contenedor inmediato, el vaso.

Aunque en la tradición de autores importantes como Reichenbach (1957, p.213), Nagel (1961, p. 209), y el propio Mach, el experimento del vaso fue leído como si con éste Newton hubiera pretendido mostrar la existencia del espacio absoluto, una lectura más acertada de su estructura argumental indica que Newton tenía en mente la refutación de la concepción cartesiana del movimiento cuando lo escribió. Este es un punto defendido con claridad

² *Ibid.*, p. 9.

por Laymon (1978) y Rynasiewicz (1995). La concepción cartesiana del movimiento pasa por afirmar que el movimiento absoluto y verdadero es el movimiento relativo a los cuerpos de la vecindad inmediata, a los cuerpos contiguos. Al igual que en la mecánica de Newton, en la formulación cartesiana el movimiento verdadero debe producir efectos dinámicos efectivos. Evidentemente, el experimento de Newton sirve mejor para mostrar que su definición del movimiento absoluto es consistente y la cartesiana no lo es tanto ya que el contenedor inmediato del agua -el vaso- no parece generar la curvatura en el agua.

La estructura del argumento del vaso en rotación no pretende mostrar *per se* la sustancialidad del espacio absoluto.

Su lectura ordenada revela, más bien, que si tomamos por sentada la dinámica de Newton, el vaso funciona como un buen ejemplo para distinguir movimientos absolutos de movimientos relativos. Es decir, si partimos *ab initio* de la idea de un espacio absoluto, las definiciones de la dinámica resultan bien sentadas y permiten una clara distinción entre movimientos puramente relativos y movimientos absolutos. El movimiento absoluto está bien definido.

El argumento no muestra, ni pretende mostrar, la imposibilidad de una dinámica relacional ni la imposibilidad de un principio de relatividad generalizado. Entonces, ¿cuál es el problema para el relacionalista?

Simplemente que la interpretación tradicional sustancialista de la dinámica de Newton funciona. Y, se esperaría que a su costado el relacionalista ofreciera, al menos, una dinámica relacional igual de consistente. Las credenciales empíricas de la dinámica de Newton parecen haber puesto esta labor cuesta arriba para Leibniz, Berkeley e incluso para Mach.

El asunto de las credenciales empíricas del movimiento absoluto es tratado en el escolio por Newton en el segundo experimento rotacional. Curiosamente, este es un experimento mental. En éste, dos globos atados por una cuerda, en un universo vacío, giran en torno a su centro de gravedad común generando una tensión en la cuerda. Newton indica cómo determinar la velocidad y el sentido de la rotación de los globos: aplicando fuerzas sobre el par de caras complementarias de los globos se puede aumentar (o disminuir) la tensión de la cuerda. La misma fuerza aplicada sobre el par de caras opuestas disminuye (o aumenta) la tensión. Esto, hipotéticamente, debe poder hacerse en un universo vacío o debe resultar, al menos, cuando no hay ningún cuerpo de referencia exterior al sistema para determinar la rotación. La conclusión newtoniana debería ser que la rotación se realiza con respecto al espacio absoluto.

La razón para entenderlo así, suponiendo que el experimento funciona, es que las distancias relativas entre los dos globos, independientemente del

cambio en la tensión de la cuerda, son constantes. De igual forma las distancias entre todas las partes materiales que componen el sistema permanecen (al menos mientras no se presenten deformaciones) inalteradas. A partir de las relaciones (distancias) entre las partes materiales que componen el sistema no es posible encontrar una justificación dinámica para las variaciones en la tensión de la cuerda. Desde la perspectiva relacional todas las tensiones sucesivas corresponden a la misma configuración material. En este caso no parece existir un criterio dinámico para distinguir el reposo, por ejemplo, de la rotación común de las esferas. Por su parte Newton, cuenta con el espacio absoluto para justificar su distinción dinámica. El espacio absoluto permite a Newton salir de la restricción a las distancias entre partes materiales del sistema. Newton cuenta con las partes del espacio, los puntos del espacio que persisten en el tiempo. Éstos proveen un sistema de referencia que permite hablar incluso de la ubicación de cada punto material en el espacio en instantes distintos sin relación a marcas materiales. Tiene sentido, para Newton, hablar de la distancia entre el punto del espacio que ocupaba un cuerpo en este instante y el punto en el espacio ocupado por el mismo cuerpo poco después sin relación a objetos exteriores.

En todo caso, estas consideraciones resultaron insuficientes para Leibniz, fundador canónico de la tesis relacional. Seguidamente introduzco algunos de sus argumentos más celebrados.

3. Leibniz

Los argumentos más conocidos utilizados por Leibniz para *refutar* la sustancialidad del espacio se encuentran documentados en la correspondencia epistolar que sostuvo con Clarke. No sin razón ésta es considerada como el *Locus Classicus* del debate original. Allí, Leibniz defiende su tesis relacional:

AL) El espacio no es una entidad física real en toda regla (“not a substance, or at least an absolute being”³). Para referirnos a él tenemos el conjunto ordenado de relaciones entre objetos materiales coexistentes.

BL) Todo movimiento es movimiento relativo entre cuerpos materiales. Sin embargo,

CL) Existe el movimiento absoluto, pero este no es un movimiento con respecto al espacio absoluto. Es un movimiento cuya causa es intrínseca al propio cuerpo en movimiento (“When the immediate cause of the change is in the body, that body is truly in motion.”⁴)

³ Alexander [1984], p. 21.

⁴ *Ibíd.*, p.74

Los principales argumentos para AL son conocidos como los desplazamientos de Leibniz (Leibniz shifts). En ellos se cuestiona la sustancialidad del espacio imaginando el mundo situado en otra parte o moviéndose en conjunto. Por otra parte, CL suele ser omitido en las discusiones sobre el relacionismo de Leibniz, pero es importante mencionarlo porque una de las definiciones más conocidas del relacionismo afirma lo siguiente:

R1 All motion is the relative motion of bodies, and consequently, space-time does not have, and cannot have, structures that support absolute quantities of motion⁵.

Aunque Leibniz no deje del todo claro cuáles sean las estructuras que soportan CL (podemos incluir, por ejemplo, la topología, la simultaneidad absoluta, la geometría) se ve que R1 no sintetiza fielmente el relacionismo originario de Leibniz. En todo caso Earman concede que la doctrina de fuerza de Leibniz amenaza la concepción relacional del movimiento.

El estudio de la naturaleza del movimiento y su relación con las estructuras espaciotemporales es seguramente el asunto más importante para la comprensión del debate original y su subsiguiente desarrollo. Sin embargo, su relación es más compleja que la enunciada en R1. Ésta no corresponde a la fidelidad histórica ni al rigor filosófico. En TGR pueden definirse movimientos absolutos en modelos cosmológicos completamente relacionales. También puede hacerse en presentaciones relacionales recientes de la dinámica clásica (Barbour y Bertotti 1977, 1982). Por ahora centramos la atención en los argumentos antisustancialistas originales de Leibniz.

El argumento más famoso contra el sustancialismo se origina en una situación hipotética planteada por Clarke. Fue Clarke quien primero imaginó el mundo desplazado o en movimiento sin que las relaciones espaciotemporales entre los objetos materiales que lo componen resultaran modificadas. Esto debía producir situaciones ontológicamente distintas que sirvieran de apoyo al sustancialismo. Pero Leibniz, amparado en su Principio de Razón Suficiente (PRS) y su Principio de Identidad de los Indiscernibles (PII), revirtió el argumento a su favor. Esto fue lo que escribió en su tercera carta:

I say then that, if space was an absolute being, there would something happen for which it be impossible there should be sufficient reason. Which is against my axiom. And I prove it thus. Space is something absolutely uniform; and, without the things placed in it, one point of space does not differ in any respect whatsoever from another point of space. Now from hence it follows, (supposing space to be

⁵ Earman, [1989], p.12.

something in itself, besides the order of bodies among themselves,) that 'tis impossible there should be a reason why God, preserving the same situations of bodies among themselves, should have placed them in space after one certain particular manner, and not otherwise; why everything was not placed quite the contrary way, for instance, by changing East into West. But if space is nothing else, but that order or relation; and is nothing at all without bodies, but the possibility of placing them; then those two states, the one such as it now is, the other supposed to be quite the contrary way, would not at all differ from one another. Their difference therefore is only to be found in our chimerical supposition of the reality of space itself. But in truth the one would exactly be the same thing as the other, they being absolutely indiscernible; and consequently there is no room to enquire after a reason of the preference of the one to the other⁶.

160

El argumento de Leibniz se apoya en la suposición de que PSR y PII son principios filosóficamente fuertes. Esto puede resultar objetable en la filosofía reciente. El primer principio es un principio de orientación teológica que puede tener una interpretación causal: Como Dios no tiene ninguna razón para producir mundos distintos indistinguibles, a cada diferencia actual observada en el mundo real debe corresponder una diferencia en la disposición original del mundo. Disposiciones distintas del mundo deben producir mundos actuales diferenciables. Por esto se dice que PSR está conectado con PII. Este último afirma que hablar de situaciones del mundo ontológicamente distintas pero indistinguibles no tiene sentido. En todo caso PII tiene algo más de repercusión si el criterio de indistinguibilidad se entiende en términos de indiscernibilidad empírica. En este caso el principio tiene implicaciones físicas y se dice que su aplicación funciona como una especie de cura preventiva para desaciertos metafísicos en nuestras teorías físicas.

Con PII, Leibniz cuestionó la identidad de los puntos del espacio. La persistencia, o identidad, de los puntos del espacio invisible a través del tiempo proporcionó a Newton un sistema de referencia universal que, en principio, permitió una definición sólida del movimiento absoluto. Pero Leibniz advierte que si el mundo estuviera en otra parte esta identidad produciría situaciones ontológicamente redundantes y esto, al parecer, es una carga metafísica innecesaria. La identidad de los puntos del espacio es, pues, un atributo exclusivo de la tesis sustancialista. Su rechazo obedece a un principio cuya motivación es estrictamente relacional, pero que algunas formas de sustancialismo reciente han adoptado. Sobre esto se volverá más adelante.

En la tercera carta a Clarke, PRS y PII son utilizados por Leibniz para refutar el espacio sustancialista imaginando, como Clarke, el mundo material en 'otra parte' o invertido del este hacia el oeste. Este desplazamiento imaginario es acompañado por otro en el que Leibniz, como Clarke, se imagina

⁶ Alexander [1984], p. 26

un mundo material moviéndose en conjunto sin que las relaciones espaciotemporales entre sus partes materiales se vean alteradas. Al respecto Leibniz escribió:

In order to prove that space without bodies, is an absolute reality; the author [Clarke] objected, that a finite material universe might move forward in space. I answered, it does not appear reasonable that the material universe should be finite; and, though we should suppose it to be finite, yet 'tis unreasonable it should have motion in any otherwise, than as its parts change their situation among themselves; because such a motion would produce no change that could be observed, and would be without design⁷.

Sin embargo, dada la relatividad galileana, el argumento funciona contra el espacio sustancialista de Newton-Clarke, si imaginamos que el mundo material se mueve en conjunto con 'otra velocidad absoluta'. Pero en este caso es cierto que Newton era muy consciente de la imposibilidad para proporcionar efectos dinámicos que permitieran distinguir entre diversas velocidades absolutas, al igual que entre diversas posiciones absolutas. Sólo las aceleraciones absolutas generan efectos dinámicos. El asunto es que la relatividad de Galileo permite transformaciones que conectan sistemas inerciales empíricamente indistinguibles, que presumiblemente instancian distintos conjuntos de puntos del espacio absoluto. Así que, como hemos visto, la distinción entre movimientos relativos o aparentes y movimientos verdaderos o absolutos es tratada por Newton pasando de sistemas inerciales a sistemas de referencia no inerciales. En estos últimos se producen efectos inerciales observables, como las fuerzas centrífugas en el agua del vaso en rotación o la tensión en la cuerda que une las dos esferas, sin que se produzcan las correspondientes variaciones espaciotemporales entre las partes materiales esperadas por el relacionalista.

La persistencia de los puntos del espacio a través del tiempo permitió a Newton ampliar el conjunto de relaciones (distancias) entre puntos materiales coexistentes (simultáneos) al conjunto de relaciones entre puntos espaciales en instantes distintos. El rechazo a la identidad de los puntos espaciales deja para el relacionista el problema abierto de la justificación relacional de la inercia.

Tomando por sentada la dinámica de Newton, PII no puede ser extendido arbitrariamente de la identidad entre sistemas de referencia inerciales a la identidad entre sistemas de referencia arbitrarios. Esto porque la dinámica de Newton no comporta un principio de relatividad generalizado (PRG). Leibniz estaba convencido de que en la dinámica PRG sería comprensible,

⁷ *Ibíd.*

pero al no dejar alguna justificación relacional para la inercia, sus ideas se quedaron en una mera declaración de intenciones. Su *equivalencia de las hipótesis* suele ser tomada como el enunciado germinal de PRG. Cierro esta sección con un cita suya al respecto antes de pasar a las consideraciones relacionales de Mach quien, como es sabido, tuvo algo que decir sobre el asunto pendiente de la inercia. Leo a Leibniz de una carta dirigida a Huygens fechada en junio de 1694:

Mr. Newton recognizes the equivalence of hypotheses in the case of rectilinear motions; but in respect of the circular ones, he believes that the effort of circulating bodies to increase their distance from the centre or axis of circulation manifests their absolute motion. But I have reasons that make me believe that nothing breaks the general law of equivalence⁸.

4. Sustancialismo Sofisticado en el Espacio-Tiempo Neo-Newtoniano

En síntesis, del debate original nos quedamos con la enseñanza de que la principal objeción relacional a Newton proviene de la creencia, ya superada, pero comúnmente compartida incluso hasta los días de Poincaré, de que el movimiento absoluto es necesariamente movimiento con respecto al espacio absoluto (CN). Esto llevó a Newton a insistir en la realidad del reposo absoluto y de la velocidad absoluta. En suma, en la realidad de la persistente identidad de los puntos del espacio absoluto a través del tiempo. Pero la relatividad galileana de su propia dinámica, lo dejaba presumiblemente en un lugar incómodo ya que en el caso de movimientos inerciales, Leibniz pudo objetar, vía PII, que dada la equivalencia de las hipótesis este tipo de movimientos no producía efectos observables. La crítica de Leibniz parece casi incontrovertible al nivel cinemático pero Newton tenía todo la fuerza de su dinámica para cargar al relacionalismo clásico con la loza de la inercia.

En todo caso, históricamente, la dinámica newtoniana preservó su interpretación sustancialista. No existen, que yo sepa, figuras importantes que hayan defendido algún tipo de relacionalismo newtoniano sin que esto suponga enredadas maniobras instrumentalistas. El relacionalismo clásico estaba a la espera de una teoría de principios relacionales, fundada desde su propia filosofía. Leibniz entretuvo su propia definición de fuerza y, por tanto, su propia dinámica pero la contundencia de la dinámica newtoniana eclipsó cualquier ontología alternativa.

Dejando a un lado la lealtad histórica al debate original, existe, sin embargo, una alternativa filosóficamente relevante que ha sido publicitada como la

⁸ Huygens [1905], p. 645.

mejor forma de presentar la dinámica de Newton. Se trata de la presentación neo-newtoniana de la dinámica clásica. En ésta se sustituye el espacio absoluto por el espaciotiempo neo-newtoniano. El término es de Sklar (1976). Este espaciotiempo tiene todas las estructuras necesarias para definir la aceleración absoluta sin relación a los puntos del espacio absoluto, es decir, tiene una estructura afín (inercial) a través de todo el espaciotiempo. También absorbe la estructura métrica absoluta newtoniana aunque solamente sobre cada plano de simultaneidad absoluta. Aquí el asunto de interés es que en el espaciotiempo neo-newtoniano existen las aceleraciones absolutas, pero el reposo y la velocidad absoluta son removidas. Así que el sustancialista puede consistentemente escapar de las objeciones planteadas por los mundos desplazados de Leibniz. Las objeciones cinemáticas relacionistas no funcionan en la representación neo-newtoniana.

Para esto, al igual que hiciera inicialmente Leibniz para rebatir a Clarke, ahora el sustancialista neo-newtoniano puede revertir los argumentos relacionales. Lo hace adoptando una nueva forma de sustancialismo: El sustancialismo sofisticado. Esta forma de sustancialismo toma PII como suyo y, al igual que el relacionista leibniziano, rechaza la identidad de los puntos del espacio. En este caso la sustancialidad del espacio ya no está dada por la identidad de los puntos del espacio sino por la existencia de estructuras espaciotemporales que permiten definir el movimiento sin relación a objeto material alguno. Este tipo de estructuras, como la inercia codificada en la conexión afín, al no depender de fuentes materiales, son tomadas como cualidades intrínsecas de un espacio-tiempo real.

La implementación del principio de identidad de los indiscernibles (PII) en el contexto neo-newtoniano simplemente requiere una interpretación pasiva de las transformaciones de Galileo (en general de las transformaciones correspondientes al grupo de simetría de la teoría). Esto es, las transformaciones que permiten el paso de un sistema inercial a otro, deben ser interpretadas como representaciones distintas de una misma situación física. Las transformaciones no generan mundos desplazados en el espacio, sólo descripciones distintas de un mismo mundo. La identidad de los puntos del espacio es suprimida y, consecuentemente, la redundancia ontológica es reemplazada por una multiplicidad de representaciones posibles de una misma situación física.

Como consecuencia de lo anterior, el sustancialismo sofisticado en el espaciotiempo neo-newtoniano puede sintetizarse así:

- An) El espacio es una entidad física en toda regla (sustancialismo).
- Bn) El movimiento absoluto está bien definido y es real.

Cn) El movimiento absoluto no es movimiento con respecto al espacio absoluto (negación de identidad de los puntos del espacio), sino que está definido con respecto a la familia de sistemas inerciales o conexión afín (\wp).

Si el espacio newtoniano resultaba hostil para el relacionista, a pesar de las objeciones cinemáticas, el espaciotiempo neo-newtoniano resulta aún más. Los mundos desplazados de Leibniz se congelan en el espacio neo-newtoniano.

En todo caso el salto de la perspectiva espacial tridimensional a la perspectiva tetradimensional espaciotemporal permite al relacionista pasar de una ontología de partículas a una ontología de eventos (coincidencias espaciotemporales) pero en este caso una definición presumiblemente aceptable de la inercia pasa nuevamente por elaborar complicadas maniobras instrumentalistas que, en general, suponen cierto tipo de inmersión en el espaciotiempo sustancialista. Un camino difícil que casi nadie está dispuesto a tomar en este contexto.

Seguidamente, continuamos con las ideas relacionales de Mach. Éstas tienen implicaciones ontológicas importantes.

164

5. Mach

Cuando Mach escribió su *Science of Mechanics* (1883), pretendió en parte curar la mecánica de lagunas metafísicas. Se detuvo en el problema del espacio, el tiempo y el movimiento. Para Mach, dada la invisibilidad del espacio (y el tiempo), éste no aparece en nuestra experiencia. Por consiguiente, cualquier referencia al mismo es, presumiblemente, una concesión metafísica innecesaria. En breve, el movimiento no debe referirse al espacio (absoluto).

En todo caso, existe una cierta ambigüedad en la lectura de la conocida crítica de Mach a las nociones de espacio, tiempo y movimiento absolutos de Newton. Ésta proviene de la tensión entre sus objeciones epistemológicas y las implicaciones ontológicas de su celebrada solución relacional al problema de la inercia.

La epistemología de Mach define a la ciencia como un sistema económico de relaciones que permiten describir la experiencia. La mejor ciencia es, pues, la más económica. Desde esta perspectiva pareciera que la ciencia debiera conformarse con *salvar económicamente las apariencias*. Al entrar en consideraciones ontológicas se correría el riesgo de permitir nociones metafísicas en nuestras teorías científicas.

Tal vez a Newton le hubiera bastado con no referirse al espacio (y el tiempo) como una entidad física real en toda regla. Al fin y al cabo su dinámica parecía salvar las apariencias. Este tipo de interpretación fenomenológica

de tinte instrumentalista fue recogido por algunos filósofos positivistas que vieron en Mach a su discutible precursor.

En esta línea argumental, podemos leer a Mach cuestionando el movimiento inercial:

When we say a body preserves unchanged its direction and velocity in space, our assertion is nothing more or less than an abbreviated reference to the entire universe⁹.

Mach estaba reclamando una lectura inteligible del movimiento inercial. La primera ley, la ley de la inercia, permite pensar un cuerpo único abandonado a sí mismo, moviéndose rectilíneamente en un espacio vacío y sin relación a nada (material). En este contexto, la ley de la inercia salva económicamente las apariencias. Pero pasar de ahí a asegurar la sustancialidad (existencia) del espacio es según él, un atavismo medieval. Pura metafísica ociosa. En su lugar, parece bastar con que la referencia al espacio sea sustituida por la referencia al universo material. En suma, con referir las familias de sistemas inerciales empíricos al conjunto de la materia estelar. Este fue un camino seguido por algunos pre-relativistas de finales del siglo XIX.

De cualquier forma esto no es del todo ajustado porque si bien la ley de la inercia - y en general la estructura inercial de la dinámica newtoniana- se antoja como una buena descripción económica y aunque su propia epistemología se incline hacia este tipo de fenomenología del mundo físico, Mach no parece conforme con la forma en que la inercia newtoniana salva las apariencias. Esta es la fuente de la tensión entre su epistemología y su intento por hacer inteligible una ontología relacional de la dinámica clásica.

Por esto, para proveer una explicación de la inercia, Mach no se limitó a reclamar que el fondo espacial fuera sustituido por un conjunto apropiado de estrellas fijas, de materia estelar distante, o de puntos materiales para referir apropiadamente la inercia. En este caso los puntos materiales simplemente servirían para sustituir a los puntos del espacio en su función como marcas o rótulos (coordenadas) para referir el movimiento. La dinámica newtoniana quedaría prácticamente inalterada, bien podían las estrellas fijas estar amarradas al espacio absoluto, pero nos ahorraríamos el malestar de hablar del espacio como si fuera una entidad real. En su lugar Mach, en su pertinente discusión del experimento del vaso de Newton, reclamó una función dinámica para la materia en el estudio de la inercia. Su argumento es popular y constituye el primer intento -instrumentalismo aparte- de remover, con una interpretación relacional, la pesada loza de la inercia puesta por la

⁹ Mach, [1883] 1960, p. 279

interpretación convencional sustancialista newtoniana (o neo-newtoniana) en la dinámica clásica.

Sobre este asunto Mach ya anticipaba alguna pista en 1872, en su *History and Root of the Principle of the Conservation of Energy*, cuando refiriéndose a la ley de la inercia se preguntó:

Now what share has every mass in the determination of direction and velocity of the law of inertia?¹⁰

Esto para la ley de la inercia, pero su ‘solución’ general al problema de los efectos inerciales, al problema idéntico de la inercia de un cuerpo cuando éste se acelera, fue conocida años más tarde en su *History of Mechanics* (1883). En un pasaje bien conocido, refiriéndose al experimento del vaso de Newton, escribió lo siguiente:

Newton’s experiment with the rotating vessel of water simply informs us, that the relative rotation of the water with respect to the sides of the vessel produces no noticeable centrifugal forces, but that such forces are produced by its relative rotation with respect to the mass of the earth and the other celestial bodies. No one is competent to say how the experiment would turn out if the sides of the vessel increased in thickness and mass till they were ultimately several leagues thick. The one experiment only lies before us, and our business is, to bring it into accord with other facts known to us, and not with the arbitrary fictions of our imagination.¹¹

Mach había leído el experimento del vaso de Newton en el ambiente vacío de las esferas atadas por una cuerda. Aún así, su crítica funciona. La tradición newtoniana se había servido del espacio para sentar la inercia y definir el movimiento absoluto. La idea de Mach era que, al igual que las demás fuerzas, las fuerzas inerciales debían originarse en algún tipo de interacción entre cuerpos materiales. En este caso de la interacción de la materia inmediata con el conjunto de la materia estelar. De esta forma se podía romper el aparente vínculo causal que amarraba la inercia a la sustancialidad del espacio.

Para Mach, se ha dicho, no bastaba con utilizar la tierra y las estrellas distantes como marcas para referir el movimiento inercial y, por tanto, definir los sistemas inerciales en los cuales las fuerzas inerciales -como la fuerza centrífuga- no aparecen. Toda esta materia estelar debería, además, originar las fuerzas inerciales. En este sentido la idea de Mach es que podemos

¹⁰ Mach [1872], p. 63.

¹¹ Mach, [1883] 1960, p. 284.

explicar los efectos dinámicos de la aceleración absoluta en términos de aceleraciones relativas con respecto a la distribución total de materia.

La concavidad del agua en el vaso de Newton debe aparecer indistintamente si rotamos el universo alrededor del vaso o si rotamos el vaso, al fin y al cabo el universo nos ha sido dado una vez y para siempre con el conjunto de relaciones entre sus partes materiales. Uno y otro caso son dos formas de bautizar el mismo movimiento relativo. Esto da algo que pensar. Uno puede intentar imaginarse el universo rotando y preguntar: ¿Surgirán fuerzas centrífugas? ¿Puede, entonces, funcionar un argumento similar al de los mundos desplazados de Leibniz pero si, en su lugar, imaginamos un par de universos materiales, con el conjunto de relaciones (distancias) idénticas entre sus partes, uno en rotación y el otro no?

¿Se producirían en este caso situaciones ontológicamente distintas pero físicamente indistinguibles? Y, en el espíritu relacional, ¿tienen sentido este tipo de preguntas? Si el universo rota, ¿rota con respecto a qué?

Newton tenía un asiento dinámico en el espacio absoluto para distinguir las rotaciones relativas de las rotaciones absolutas y en general para distinguir movimientos aparentes de movimientos reales. Tenía las fuerzas centrífugas -y en general el conjunto de fuerzas inerciales-, pero Mach conjetura lo siguiente (Mach [1883] 1989, p. 284):

The principles of mechanics can, indeed be so conceived, that even for relative rotations centrifugal forces arise¹².

La dinámica newtoniana no predice este tipo de efectos inerciales (fuerza centrífuga) para movimientos puramente relativos. En realidad Mach estaba legando un desafío importante a sus seguidores: la edificación de una nueva dinámica levantada sobre principios relacionales. Este reto fue en parte asumido por Einstein. Este asunto será objeto de un estudio complementario. Aquí, para cerrar, resultará conveniente sintetizar el relacionismo de Mach de la siguiente manera:

AM) El espacio (absoluto) no es una entidad en toda regla, es una abstracción a partir de las relaciones entre todas las cosas.

BM) Todo movimiento es movimiento entre en cuerpos materiales. Incluso el movimiento no inercial.

CM) El conjunto de la materia estelar, no el espacio absoluto, determina la estructura inercial (sistemas inerciales+fuerzas inerciales).

¹² *Ibid.*

6. Conclusión

El debate **R-S**, está conectado al problema de la inteligibilidad del movimiento. A diferencia de Leibniz, Mach había reconocido que la estructura inercial de la dinámica permitía una lectura inteligible del movimiento local de un cuerpo. ¿Puede Concebirse el movimiento de un cuerpo en relación única con el espacio (CN)? O, por el contrario, ¿Una interpretación del movimiento de un cuerpo sólo resulta acertada en relación a otros cuerpos materiales (BM)?

Respondiendo a esta cuestión, Newton no había podido escoger los puntos del espacio que servían para dibujar las trayectorias verdaderas de los cuerpos en movimiento. En su lugar tenía toda una familia de sistemas inerciales equivalentes que permitían distinguir movimientos verdaderos de aparentes. Por su parte, Mach no conocía la interpretación neo-newtoniana de la dinámica clásica, pero acertadamente había trasladado la disputa sobre la sustancialidad del espacio de la vieja cuestión por la identidad de las partes (puntos) del espacio, a la cuestión por el origen de la estructura inercial. Otras estructuras espaciotemporales no fueron puestas en discusión. En todo caso, histórica e intuitivamente, queda la impresión de que la mejor forma de sustancialismo debería ser la que afirma la identidad de las partes del espacio, pero en vista de que el problema hermano de la inteligibilidad del movimiento puede prescindir de ella, con Mach quedaba claro que la existencia del espacio estaba signada por su estructura inercial. La vía de escape a este tipo de sustancialismo no era otra que una formulación relacional de la inercia (CM). La idea fue recogida por Einstein.

Fue tal su impresión hacia la idea original de Ernst Mach de atar la estructura inercial a la materia estelar que a esta conexión causal entre inercia y materia terminó por bautizarla, en el contexto de la Teoría General de la Relatividad, como el **Principio de Mach** (1918). Y es que Einstein, al concebir su pretendida extensión del principio restringido de la relatividad para cubrir cualquier tipo de movimientos, daba por sentado que ésto suponía la incorporación natural de las ideas de Mach sobre el origen de la inercia en su nueva teoría de gravitación (TGR). No obstante, entre lo propuesto por Mach y lo hecho, finalmente, por Einstein hay diferencias importantes.

El consenso más generalizado afirma que Einstein fracasó en su intento por instalar el principio de Mach en su teoría general de la relatividad. La interpretación de TGR sigue siendo discutida, pero aún así la interpretación más consensuada toma esta teoría por una teoría sustancialista sobre el espaciotiempo. Mi opinión es contraria a lo anterior. Pero un tratamiento razonable del tema obliga a repasar el propio calvario de Einstein en su intento de concebir una teoría de gravitación relacional machiana. Esto último se propone para un estudio ulterior.

Referencias Bibliográficas

- Alexander, H.G.(ed) [1956]: *The Leibniz Clarke-Correspondance* (1717). Manchester University Press. Manchester.
- Barbour, J.B., y Bertotti, B. [1977]: "Gravity and Inertia in a Machian Framework". *Il Nuovo Cimento B.*, **38**, pp. 1-27.
- _____ [1982]: "Mach's principle and the Structure of Dynamical Theories". *Proceedings of the Royal Society.* **38**, pp. 295-306.
- Earman, J. [1989]: *World Enough and Space-Time*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts.
- Einstein, A.[1918]: "Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie". *Annalen der Physik.***55**, pp. 241-244.
- Laymon, R.[1978]: "Newton's Bucket Experiment", *Journal of the History of Philosophy*, **16**, pp 399-413.
- Mach, E. [1872]: *History and Root of the Principle of the Conservaton of Energy*. Trad. de E.B. Jordain. Open Court. Chicago, Illinois. 1911.
- _____ [1883]: *The Science of Mechanics*. Trad. de T.J Mc Cormack. Open Court. La Salle, Illinois. 1960.
- Nagel, E. [1961]: *The Structure of Science*. Harcourt, Brace and World. New York.
- Newton, I. [1686] *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Trad. de A. Motte(1729). University of California Press. Berkeley. 1934.
- Reichembach, H. [1957]: *Space and Time*. Dover. New York.
- Rynasiewicz, R. [1995]: "By their properties, causes and effects: Newton's Scholium on time, space, place, and motion I: The Text" *Studies in History and Pilosophy of Science*, **26**. pp. 133-153.
- Sklar, L. [1976]: *Space, Time, and Space-Time*. University of California Press. Berkeley.