

LO QUE EINSTEIN LE HUBIERA DICHO A ARISTÓTELES A PROPÓSITO DE LA DINÁMICA Y LA COSMOLOGÍA

What Einstein Would Have Said to Aristotle Regarding Dynamics and Cosmology

FAVIO ERNESTO CALA VITERY*

Universidad Jorge Tadeo Lozano - Colombia

RESUMEN

A manera de estudio comparativo, en este artículo se propone un paralelo formal entre la física de Aristóteles y la física de Einstein. La finalidad no es la del rigor histórico. Se trata más bien de un ejercicio de análisis conceptual. En este sentido, se discute la posible similitud entre la forma del mundo según Aristóteles y la forma (geometría global) del universo según Einstein. Se estudia también la relación entre cinemática, dinámica y gravitación en sus respectivas teorías de movimiento. Finalmente se compara la ontología del espacio aristotélico con la ontología del espacio-tiempo relativista.

Palabras clave: Aristóteles, Einstein, dinámica, cosmología, gravitación.

ABSTRACT

This paper proposes a parallel in the forms of Aristotle's and Einstein's physics. It's an exercise on conceptual analysis rather than history. The possible similarity between Aristotle's world and the form (global geometry) of Einstein's universe is discussed. The correlation between kinematics, dynamics and gravity in their respective theories is also studied. Finally, Aristotle's ontology of space is compared to the relativistic ontology spacetime.

Key words: Aristotle, Einstein, dynamics, cosmology, gravitation.

1. Introducción

No tengo conocimiento de que exista alguna referencia explícita sobre el trabajo y la cosmología aristotélica en la obra científica o divulgativa de Albert Einstein. Pasando ya a la documentación epistolar, en la correspondencia con su amigo Michel Besso (Spezialli 1994), sólo se registran tres entradas, todas ellas muy marginales y fechadas

Artículo recibido: 21 de abril de 2009; aceptado: 5 de junio de 2009.

* favio.cala@utadeo.edu.co

después de 1945, cuando Einstein ya era un sexagenario. Es de suponer que leyó al Estagirita tardíamente. La intención de este escrito es proponer un paralelo formal entre sus respectivas cosmologías. Con todo el riesgo que implica un ejercicio de anacronismo de tal magnitud, la intención pasa principalmente por subrayar las posibles similitudes entre el mundo según Aristóteles y el universo según Einstein. Las principales diferencias serán, premeditadamente, apenas tocadas de manera lateral. Para esto empezaré, antes de poner en perspectiva la cosmología einsteiniana, por ofrecer una reconstrucción sucinta de la cosmología y de la teoría aristotélica del movimiento, así como de su argumentación. Mi atención se centrará en la respuesta dada por Aristóteles y Einstein –mencionaré brevemente a Newton– a las siguientes cuestiones:

- a. ¿Cuál es la forma geométrica del mundo?
- b. ¿Puede considerarse el espacio (tiempo) como una entidad física real en toda regla, con independencia de la existencia de cuerpos materiales o de la ocurrencia de eventos materiales?
- c. ¿La gravedad dirige a los cuerpos en sus movimientos naturales o, al contrario, los desvía de estos?¹

2. Aristóteles y la cosmología

Aunque es bien conocida, referiré brevemente la cosmología aristotélica. En ella el universo es una esfera finita. En el centro geométrico del cosmos, en reposo, descansa el planeta Tierra (*Acerca del Cielo* Lb. II. Caps. 4 y 13-14). Su forma es también esférica, y se compone mayoritariamente del elemento tierra, pero a su vez se encuentra rodeado sucesivamente de capas de los elementos agua, aire y fuego. La Tierra, el teatro de lo corruptible, está rodeada o contenida por la región de las estrellas y los planetas. Esta región, el teatro de lo incorruptible, está compuesta por el quinto elemento: el éter.

En un universo ideal, no corrompido aún por el cambio y los movimientos violentos, la tierra (como elemento) formaría una esfera perfecta en reposo en el centro de todo, rodeada por cascarones estáticos sucesivos de agua, aire y fuego, alrededor de los cuales girarían

1 Hace un par de décadas que Tim Maudlin (1990) publicó su prestigioso artículo, *Substances and Space-Time: What Aristotle Would Have Said to Einstein*. En este proponía un ejercicio de anacronismo conceptual semejante al que yo planteo. Y aunque quizá en algo su escrito sirva de inspiración al mío, allí lo que Maudlin propuso fue una respuesta en código aristotélico a la versión de Earman y Norton (1987), según la cual la Teoría general de la relatividad, en su interpretación convencional, debería entenderse como una teoría indeterminista. En definitiva, que si al trasladar la explicación de las propiedades esenciales del espacio aristotélico a la representación actual del espacio-tiempo relativista, la aparente contradicción planteada por Earman y Norton podía ser resuelta evaporando el indeterminismo.

cascarones concéntricos de éter, arrastrando en su lomo a los cuerpos celestes conocidos. El cascarón exterior –el Cielo– comprende la región que va desde la órbita de la luna hasta el borde del universo. Más allá de este no hay nada. En un amplio sentido puede decirse que el universo es un todo material que prescinde de un soporte espacial independiente.

En el mundo real se rompe esta estructura ideal, y cualquier cuerpo que no se halle en su lugar (natural) tenderá, por principio físico de la naturaleza, a moverse hacia este. De este modo, el agua lluvia cae, el vapor sube y la llama de la hoguera tiende a alcanzar cierta elevación. De cualquier forma, siempre es posible violentar los cuerpos obligándolos, mediante la aplicación de una fuerza permanente, a seguir movimientos no naturales. Pero lo de subrayar es que los cuerpos, en forma natural, se mueven hacia el *lugar* que les corresponde. Según Aristóteles, el movimiento es de algún modo equivalente al cambio, es decir, a la actualización de una potencialidad. Y el cambio de lugar –el movimiento local– es el objeto propio de la física.

2.1. *El lugar: el espacio aristotélico*

Para argumentar sus teorías, Aristóteles solía proceder mediante el uso de un cierto tipo de método dialéctico. Esta metodología consistía en la discusión recíproca de una posible teoría, entre personas reputadas para tal asunto. Lo que Aristóteles hace en el *libro IV* –y en muchas partes más– es intentar establecer los principios seguros de su ciencia, empezando por enumerar una serie de opiniones prestigiosas o creencias bien establecidas sobre el asunto en cuestión, y luego procede a usar estas opiniones para contrastar las posibles teorías al respecto. El capítulo 4 del libro *IV* de *la Física* es un buen ejemplo de este procedimiento. Para investigar lo que es el lugar, Aristóteles enumera las “propiedades que parecen pertenecerle por sí mismo” (210b 34), y seguidamente rechaza las teorías que no resultan compatibles con estas propiedades. Aristóteles evalúa, de esta forma, cuatro posibles teorías sobre la noción de lugar. Nos dice que el lugar podría ser “una de estas cuatro cosas: o [1] forma, o [2] materia, o [3] una suerte de extensión que está entre los extremos, o [4] los extremos. Pero es evidente que tres de estas son inadmisibles” (208b 7-10).

Resumo su procedimiento. Quizá la propiedad menos conflictiva, dentro de las que Aristóteles toma por buenas para investigar lo que el lugar es, sea aquella que afirma que el lugar es separable de los cuerpos que lo ocupan (208b 6-12). Según el Estagirita, los cuerpos no son separables de su forma [1] ni de su materia [2], lo que inhabilita [a] estas dos opciones como definiciones adecuadas para el lugar.

Para descartar la tercera [3] posible definición o teoría, siguiendo a Zenón, Aristóteles concuerda con que los lugares no contienen lu-

gares, ya que ello produciría el tipo de regresiones infinitas implícitas en las paradojas del Eleata (209a 24). Y en vista de que en general es posible modificar –expandir o comprimir, por ejemplo– los extremos de un cuerpo, si afirmáramos que el lugar es una suerte de extensión que está entre los extremos [3], siempre podríamos encontrar lugares sucesivos para un cuerpo, contenidos dentro de los lugares respectivamente precedentes. El argumento es algo resbaladizo.

Pero poniendo todo este asunto en forma compacta, y con la venia del análisis retrospectivo, podría decirse que si llegamos a pensar el espacio como una especie de contenedor Euclidiano independiente –cosa que Aristóteles quiere rechazar–, tendríamos que conceder que cualquier región finita del espacio está contenida en otra región finita del espacio, de modo que todo lugar tendría su lugar, y así generaríamos el tipo de regresiones infinitas que las paradojas de Zenón revelan como absurdas. No sobra decir que en la matemática moderna esta regresión no resulta contradictoria. El infinito y el continuo son bien tratados, y no habría cabida para el argumento aristotélico.

Habiendo descartado las tres primeras posibles teorías, Aristóteles adopta la cuarta posible teoría sobre la naturaleza del lugar. El lugar es pues “el límite del cuerpo continente que está en contacto con el cuerpo contenido” (212a 6). Aquí es bueno señalar que, dado que Aristóteles rechaza la existencia del vacío, el lugar estará directamente en contacto con el cuerpo contenido, con lo cual la superficie del contenedor –los extremos– y la forma del cuerpo contenido, coinciden. Se puede adivinar cierta tensión, ya que, como Aristóteles admite, es normal concebir el espacio como una especie de recipiente o contenedor de los objetos materiales. Sin embargo, debe quedar claro, por su definición, que el lugar aristotélico no puede concebirse en forma independiente de la materia del cuerpo contenido. La cuestión sobre si el espacio es una especie de contenedor independiente de los objetos materiales o si depende explícitamente de estos será un tópico recurrente en la filosofía natural, y viene a ser crucial en la formulación de cualquier teoría dinámica. Pasemos, pues, al asunto de la dinámica aristotélica.

2.2. *El movimiento: la dinámica aristotélica*

¿Cuál es, según Aristóteles, la función dinámica del espacio? La respuesta está mejor documentada en *Del Cielo*, Libro 1, Cap. 2. Una interpretación difundida de sus palabras podría bosquejarse como sigue: los elementos o los cuerpos simples se mueven en forma natural hacia ciertos lugares del universo que les corresponden, y si concedemos que el espacio es la suma de los lugares, se podría decir que el espacio es la fuente causal de los movimientos naturales. Este genera, entonces, la caída de los graves y la elevación de los leves (Penrose 1968; Earman 1989). Sin

embargo, esta versión de la dinámica aristotélica no es del todo precisa. Aunque los movimientos naturales puedan parecer dictaminados por la estructura global del espacio, Aristóteles advierte, más bien, que en la propia naturaleza intrínseca de los elementos que componen los objetos está implícita la tendencia a buscar sus lugares naturales. La dinámica aristotélica es teleológica. En la forma está incluida la finalidad.

Cada cosa tiene su forma natural que, en un decurso ideal –no violentado– de los fenómenos, habría de consumarse. El ejemplo canónico es el de la forma de un árbol implícita desde la semilla. La forma es algo así como un código interno, y no depende de las condiciones exteriores en que se desarrolla la planta. Las condiciones externas pueden impedir, violentando la progresión natural de las cosas, la posibilidad de que la semilla, por ejemplo, alcance su forma natural-final-ideal. Similarmente, la forma ideal de un cuerpo también fija el lugar natural que este debe ocupar. Así, parte de la forma del elemento tierra dictamina que este debe ocupar su lugar natural –que es el centro del universo–, de modo que cualquier porción de tierra fuera del centro tenderá a moverse hacia este. El fuego, por su forma, tiende a estar justo bajo los cielos; y el agua, sobre la tierra, hacia el centro.

El papel causal del espacio en la dinámica aristotélica está mediado por la “forma” que dictamina los lugares que deben tender a ocupar los cuerpos. Y como consecuencia de ello, arriba y abajo son posiciones absolutas, diferenciables claramente en el universo esférico, jerarquizado, de Aristóteles. Abajo es el centro absoluto global de todas las cosas: el lugar y dirección privilegiada de los elementos graves. Así tenemos un modelo inteligible para la Gravedad, aquí, en el teatro corruptible sublunar, en la física de Aristóteles.

Pero ¿y el movimiento de los cuerpos celestes más allá de la esfera lunar?

Allí los astros no se mueven por sí mismos. Estos son, más bien, impulsados por las esferas a las cuales están fijos, y estas, a su vez, son impulsadas por la esfera más externa de todas, motor de toda la cosmología. Los astros avanzan amarrados al lomo de las esferas transparentes. Pero cabe preguntar: ¿al moverse en círculos no estarían rompiendo la estructura natural de los movimientos hacia el centro o alejándose de este, que es lo [que] caracteriza a los cuerpos graves y leves?

Aristóteles resuelve esta posible inconsistencia incorporando el movimiento circular de la escala cosmológica al conjunto de movimientos naturales, ya que “el cuerpo que se desplaza en círculo es imposible que posea gravedad o levedad: pues ni por naturaleza, ni de manera antina-

tural le cabe moverse hacia el centro (gravedad) o alejándose del centro (levedad)” (269b 30).

De este modo se ve que en la esfera incorruptible de la cosmología supralunar los cuerpos celestes siguen sus trayectorias ideales (naturales) circulares, y al parecer no hay cabida para los movimientos violentos que estructuran la dinámica compleja de los fenómenos observados en la Tierra.

2.3. *Un par de asuntos importantes: cinemática y dinámica*

Como la intención es comparar, de algún modo, la cosmología y la dinámica aristotélica con la cosmología relativista en la forma considerada por Einstein, es preciso, en este punto, señalar algunos de los aspectos relevantes que serán tratados más adelante en este escrito, y que fueron tratados después de Aristóteles en forma recurrente por filósofos de la naturaleza de distintas épocas.

Una distinción importante es la que separa a la *cinemática* de la *dinámica*. Permitiéndome el anacronismo, la primera se refiere al estudio de los movimientos naturales, y la segunda, al estudio de los movimientos violentos. La cinemática estudia el movimiento de los cuerpos en ausencia de fuerzas, en ausencia de violencia, en el lenguaje aristotélico. La dinámica dedica, en cambio, su atención al estudio del movimiento de los cuerpos sometidos a la acción de fuerzas. Las fuerzas, se sabe, desvían a los cuerpos de su trayectoria natural. Esta idea está implícita en la mecánica aristotélica, y es bien perpetuada en la mecánica newtoniana, en la mecánica relativista y en la mecánica cuántica.

A estas alturas debe quedar claro que en la física de Aristóteles, los cuerpos celestes, aquellos objetos distantes a los que dedica su atención la cosmología moderna, describen trayectorias (círculos) signadas por su movimiento natural. En este sentido se diría que la teoría aristotélica del movimiento, al nivel de la escala cosmológica, es una teoría enteramente *cinemática*. Por otra parte, a escala local, terrestre, los movimientos de los cuerpos pueden ser violentos o naturales; en general, son la suma compuesta de ambos tipos de movimiento. Pero debe quedar claro que la caída de los graves es producto de la tendencia de los cuerpos a ocupar su lugar natural y, por lo tanto, la gravedad aristotélica, para efectos de la comparación aquí propuesta, estaría circunscrita al dominio exegético de la cinemática, esto es, a la rama de los movimientos naturales.

Por otra parte, una distinción ontológica moderna, originada en su forma más eficiente por Leibniz y Clarke –portavoz de Newton– en su célebre discusión epistolar (Alexander 1984), es aquella que intenta distinguir si el espacio (y el tiempo) existe –o no– como una entidad física real en toda regla, y con independencia de la ocurrencia de

fenómenos materiales. A los filósofos que han respondido afirmativamente a esta cuestión se les ha denominado “substantivalistas”, y a los contradictores de estos se les ha puesto el mote de “relacionalistas” (véase Earman 1989)². La física del Estagirita, al concebir el universo como un todo esférico material, sin soporte espacial independiente, suscribiría entonces la hipótesis relacional. Volveré sobre esto.

2.4. Algo de historia

Quizá no sobre mencionar que, aunque la filosofía aristotélica dominó el pensamiento occidental hasta bien entrada la época de Descartes, esto no quiere decir que sus numerosos seguidores tomarán su sistema a rajatabla. En general fue visto como un buen edificio filosófico en construcción, que había que desarrollar y pulir en muchos aspectos.

Pero como aquí lo que interesa es proyectar rápidamente toda esta historia hasta la época de Einstein, sólo quiero mencionar dos críticas importantes a la física aristotélica que en la edad media ya presagiaban, de algún modo, aspectos relevantes de la posterior dinámica newtoniana.

Se cuenta entre los primeros grandes críticos de la cosmología y la dinámica aristotélica a Juan Filopón, llamado también Juan el Gramático, quien rechazó la idea aristotélica del lugar inmóvil, por encontrarla contradictoria con el movimiento de las esferas de éter. Filopón suscribió la tercera [3] hipótesis de Aristóteles, aquella según la cual el lugar es “una suerte de extensión que está entre los extremos”. El espacio, la suma de los lugares, sería una especie de contenedor independiente. Podemos imaginarlo como una especie de vacío continuo real, cuya existencia persiste aun cuando todos los objetos materiales hayan sido eliminados (Sorabji 1987). La idea fue mejor desarrollada ya en el s. xv por Hasdai Crescas, y anticipa, de algún modo, la concepción newtoniana del espacio absoluto.

Por otra parte, es bien sabido que a mediados del siglo xiv, Juan Buridán se erigió como un crítico severo de la dinámica de Aristóteles. En particular, encontró contradictoria la idea de que todo cuerpo se desplaza hacia su lugar natural cuando sobre este no actúa continuamente una fuerza. La noción, aunque aplicable a un conjunto

2 A pesar de que ya en castellano se ha utilizado el vocablo *substantivista* como traducción de *substantialist* en el contexto de la ontología del espacio-tiempo (Ibarra 1997), su uso ya extendido se da principalmente en el contexto del debate formalista/substantivista de la antropología económica. Así que, para preservar la distinción del uso que en inglés se hace de *substantialist* como opuesto a *relationalist* (ontología del espacio-tiempo), y de *substantivist* como opuesto a *formalist* (antropología económica), he preferido utilizar “substantivalista” como traducción de *substantialist*.

apreciable de fenómenos, chocaba al intentar usarla para explicar el movimiento de proyectiles. Ya que toda vez que la flecha abandona el arco, la fuerza impresa cesa, y la flecha debería caer verticalmente al suelo. Aristóteles había previsto este problema, argumentando que, o bien la cuerda del arco seguía empujando al aire tras la flecha, o bien la punta de la flecha empujaba una columna de aire que generaba cierto tipo de bucle que la autoimpulsaba (Física Lb. iv Cap. 8). Buridán encontró estas explicaciones absurdas, y en lugar de los empujes del aire y los bucles de propulsión, postuló una teoría del “ímpetu” para explicar la proyección de los cuerpos. El “ímpetu” era una tendencia natural de los cuerpos a preservar su movimiento, y en cierta medida anticipaba la noción moderna de *inercia*, heredera conceptual y formal del movimiento como tendencia natural (Thijssen y Zupko 2001). El conjunto de procesos y transformaciones conceptuales ocurrido durante los siglos xvi y xvii, conocido hoy como “la revolución científica”, terminará adoptando las ideas de Juan Filopón y Juan Buridán.

3. Newton: las respuestas de la dinámica clásica

Suele decirse que con los *Principia* finaliza esta primera revolución. Allí –en los *Principia*– Newton cristalizaba la desintegración definitiva de la cosmología helenística.

En la versión de Koyré (1957), el aspecto más significativo de esta revolución consistió en la matematización del mundo. Y lleva razón. Por lo menos en lo que respecta a la dinámica y a la cosmología. Sin embargo, yo quiero enfatizar otros aspectos no menos importantes que sellan esta ruptura con la tradición helenística, y que responden a las tres cuestiones planteadas aquí desde el principio. Estos son:

N1. En la física de Newton, el espacio es concebido como el contenedor físico de todos los cuerpos materiales, y como el soporte universal de todos los fenómenos. El espacio newtoniano es real, y su existencia es independiente de la presencia de objetos materiales o de la ocurrencia de fenómenos materiales. Eliminada la materia, este conserva toda su riqueza estructural (Stein 1970). Se trata –contra Aristóteles– de un espacio substantivalista³.

3 En el escolio a los *Principia*, Newton introduce el célebre argumento mental del vaso de agua en rotación. Este le permite mostrar –contra la concepción cartesiana del movimiento– que el espacio físico, y no los elementos o cuerpos directamente en contacto con el vaso o el agua, producen los efectos inerciales que allí se evidencian (Laymon 1978; Rynaciewicz 1995). Por otra parte, contrario a la opinión difundida, la evidencia sobre la existencia física del espacio no puede imputarse atacando su invisibilidad (*i. e.* la imposibilidad para identificar los puntos del espacio). Piénsese en todos los efectos inerciales observables que tienen como fuente dinámica la estructura inercial del espacio newtoniano (Cala 2006 155-159).

N2. Este es homogéneo, isotrópico, geoméricamente euclidiano y –contra Aristóteles– abierto infinito.

N3. En la física de Newton, el único movimiento natural es el movimiento inercial. La gravedad –contra Aristóteles– desvía cualquier cuerpo de su movimiento natural: la trayectoria inercial. Los cuerpos son “violentados” por la acción de la gravedad. Y lo más interesante: la gravedad y la inercia “rompen” definitivamente las esferas de la cosmología helenística, ya que ahora, en la dinámica newtoniana, la física del cielo (movimiento de los cuerpos celestes) y la física del suelo (caída de graves y lanzamiento de proyectiles), son dominadas por las mismas leyes de movimiento, y la misma fuerza de gravitación universal.

Con esto en mente, voy a permitirme hacer un salto abrupto para pasar directamente a hablar de Einstein, de su dinámica, su cosmología, y de la posible respuesta dada a las cuestiones que han orientado hasta ahora esta discusión. En cualquier caso, a pesar de las notables contribuciones al desarrollo de la dinámica clásica, como las de Hamilton y Lagrange, por citar algunas, puede decirse, sin faltar a la veracidad, que aunque ellas supusieron un avance significativo del refinamiento y alcance del formalismo matemático, no implicaron una ruptura esencial en la forma de concebir el mundo legada por Newton. A finales del siglo XIX, se esperaba todavía que las desviaciones del modelo newtoniano, introducidas en la física por la electrodinámica de Maxwell, resultaran finalmente compatibles con la imagen del mundo heredada de la tradición newtoniana.

4. El joven Einstein: lo que afirma la Teoría especial de la relatividad

En 1905 –su año milagroso–, Einstein inauguraba la era relativista, reconciliando la electrodinámica de Maxwell con el principio de relatividad. Inicialmente, las modificaciones introducidas por Einstein hacían pensar que su novel Teoría especial de la relatividad (TER) había entrado en la escena científica y había dejado como resultado poco más que una concepción más aguda de lo que significa que dos eventos sean simultáneos. La teoría obligaba a replantearse la medida de longitudes de objetos y la duración de eventos, en función de los sistemas de referencia escogidos para tal efecto. Pero, un par de años después, fue Hermann Minkowski quien puso a la teoría en lenguaje tetradimensional, estimulado por la evidencia de que los invariantes físicos de la teoría eran preservados cuando se extendía su aplicación a cuatro dimensiones, situación esta que no sucedía conservando la métrica usual tridimensional. Por ejemplo, la distancia entre dos puntos del espacio, según la Teoría especial de la relatividad, se altera dependiendo del estado de movimiento del sistema de referencia desde el cual se realiza la medición. En cambio, al calcular la longitud espacio-temporal de un

evento, esto es, la distancia entre dos puntos del espacio-tiempo, el valor de esta medida permanecerá inalterado con independencia del sistema de referencia utilizado para tal efecto. La idea de Minkowski –bastante aceptada en la física de hoy– es que hay que creer en la realidad física de los invariantes de las teorías físicas (Friedman 1983; Brading y Castellani 2003).⁴ Los invariantes en este caso son espacio-temporales, esto es, tetradimensionales. Esto llevó a Minkowski a fundir el espacio y el tiempo en una nueva entidad, el espacio-tiempo.

La Teoría especial de la relatividad obliga a trasladar la discusión, hasta ahora aquí planteada, de la ontología del espacio a la ontología del espacio-tiempo. Preguntamos ahora por la forma, la cosmología y la naturaleza espacio-temporal del universo. Esta es la gran novedad conceptual introducida por la Teoría especial de la relatividad. Sin embargo, en lo que respecta a la discusión aquí trazada sobre la existencia independiente del espacio-tiempo, su forma geométrica y la naturaleza de la gravedad, puede decirse muy bien que la teoría prolonga, sin muchas modificaciones, la tradición newtoniana. Pueden calcarse –sustituyendo poco más que el vocablo espacio por el de espacio-tiempo– las respuestas que la física de Newton daría a estas tres cuestiones; así:

TER 1. En la Teoría especial de la relatividad, el espacio-tiempo es concebido como el contenedor físico de todos los cuerpos materiales y como el soporte universal de todos los fenómenos. El espacio-tiempo de Minkowski es real, y su existencia es independiente de la presencia de objetos materiales o de la ocurrencia de fenómenos materiales. Eliminada la materia, este conserva toda su riqueza estructural. Se trata –contra Aristóteles– de un espacio-tiempo substantivalista.

TER 2. Este es homogéneo, isotrópico, geoméricamente plano y –contra Aristóteles– abierto infinito.

TER 3. En la Teoría especial de la relatividad, el único movimiento natural es el movimiento inercial. El espacio-tiempo “le[s] dice a los cuerpos qué caminos naturales deben seguir”. La gravedad –contra Aristóteles– desvía cualquier cuerpo de su trayectoria natural inercial. Los cuerpos son “violentados” por la acción de la gravedad.

Formalmente, al igual que en la dinámica de Newton, el espacio-tiempo “pre-existe”, antes de escribir algún tipo de ecuaciones de campo, para determinar las fuerzas que rigen la dinámica de los sistemas de partículas y campos físicos.

4 Una invariante es una cantidad que, desde el punto de vista formal, resulta inalterada ante ciertos tipos de transformaciones. Pueden pensarse como ejemplo aquellas cantidades que registran la misma lectura (medición) en cualquier sistema de referencia.

Dicho de otro modo, el espacio-tiempo actúa sobre la materia tendiendo, por así decirlo, las líneas geométricas que dirigen los movimientos de los cuerpos, mientras que la materia no produce ningún tipo de influencia sobre la estructura del espacio-tiempo. Esta ruptura de simetría molestó profundamente a Einstein y, en parte, le llevó a considerar la posibilidad de que, de algún modo, la materia tuviera algo que decir sobre la estructura geométrica y topológica del espacio-tiempo. La solución a esta incomodidad metafísica tiene nombre propio: Teoría general de la relatividad (TGR).

5. Einstein un poco mayor: las respuestas según la Teoría general de la relatividad

Poco después de haber concebido la Teoría especial de la relatividad, y con mayor insistencia a partir de la primera formulación del principio de equivalencia, “el pensamiento más feliz de su vida”, según sus propias palabras, Einstein expresó en reiteradas ocasiones su inconformidad por la forma definitiva de su Teoría especial de la relatividad. Según él, la Teoría especial de la relatividad participaba del mismo defecto epistemológico que Mach –su inspirador– había criticado años atrás en la dinámica de Newton (Mach 284-286). Se trataba de la posibilidad de distinguir entre sistemas de referencia privilegiados (inerciales) y sistemas de referencia no inerciales. Dicho de otro modo, a Einstein le molestaba que la teoría permitiera distinguir movimientos absolutos de movimientos puramente relativos. En el fondo de la cuestión, Einstein estaba intentando también suprimir la existencia física del espacio-tiempo como una entidad independiente. Sus esfuerzos por aquella época ya estaban encaminados, como puede adivinarse, hacia la formulación de una Teoría general de la relatividad (TGR) del movimiento (Hofer 1994; Cala, Gómez y Ramos 2007). Teoría esta que logró formular en noviembre de 1915.

En todo caso, a pesar del flamante nombre con que Einstein bautizó su nueva teoría de gravitación, hoy sigue sin ser tan claro que esta meta cruzada de formular una teoría genuinamente relacional (*i. e.* sin espacio-tiempo independiente de fondo) y genuinamente relativista (*i. e.* sin movimientos absolutos) haya sido alcanzada en el contexto de la Teoría general de la relatividad (Barbour y Pfister 1995).

A partir de este momento, voy a intentar dibujar las respuestas dadas por Einstein, en concordancia con su Teoría general de la relatividad, a las tres cuestiones aquí planteadas sobre: 1) la forma geométrica del mundo, 2) la existencia independiente –o no– del espacio-tiempo como una entidad real, y 3) la relación entre cinemática, dinámica y gravitación.

Para empezar, hay que decir que la Teoría general de la relatividad es una teoría de gravitación, movimiento y cosmología. Esta teoría está regida por las ecuaciones de campo de Einstein, cuya solución permite describir el campo gravitacional, y la estructura global y local del espacio-tiempo. Contrario a lo que sucedía en las teorías precedentes, donde en forma independiente se escriben las ecuaciones de movimiento (como las tres leyes de Newton) y las ecuaciones del campo gravitacional (o la ley de gravitación universal), aquí se trata de una teoría que integra simultáneamente estas dos funciones en un mismo conjunto de ecuaciones de campo. Las ecuaciones de campo de la TGR pueden escribirse en forma compacta y abstracta (excesivamente compacta y abstracta) así:

$$G = T$$

Donde al lado izquierdo de la ecuación (G) se le conoce como el tensor de Einstein, y es función de g (la métrica del espacio-tiempo), y el lado derecho (T) es conocido como el tensor de energía-momento. Al lado izquierdo tenemos geometría, gravedad y espacio-tiempo, y al lado derecho la distribución global de materia-energía del universo.

Ahora bien, globalmente cualquier solución a las ecuaciones de campo representa un universo posible. A estas soluciones se las llama modelos, y cualquier modelo de la TGR (*i. e.* una solución a las ecuaciones de campo) es usualmente representado por la tripleta (M , g , T). Aquí, M –que no aparece explícitamente en las ecuaciones de campo– es una variedad diferenciable con una cierta estructura topológica. Esta puede pensarse como una colección de puntos requerida para distribuir campos y sistemas de coordenadas. T es el tensor de energía-momento que representa la distribución de materia-energía del universo posible, y g es el tensor métrico que codifica gravedad, estructura inercial y geometría.

La estructura inercial y la geometría dictaminan, en la física de Newton, los caminos naturales que deben seguir los cuerpos cuando son abandonados a sí mismos. A estos caminos naturales se les conoce como líneas geodésicas. Así, las geodésicas o trayectorias inerciales de la física newtoniana son líneas rectas. En la TGR, las geodésicas integran también los efectos de la gravedad. De este modo, por ejemplo, una galaxia en la vecindad de un agujero negro no es desviada de su trayectoria natural. Su movimiento ocurre a lo largo de una línea geodésica en un espacio-tiempo curvado por la presencia del agujero. De igual manera, la caída de los cuerpos, el movimiento de los planetas y en general, todas las trayectorias que siguen los cuerpos sometidos a la acción de la gravedad se entienden como movimientos naturales. La TGR, al integrar la gravitación a la geometría del universo en la estructura del tensor g , nos recuerda la física de Aristóteles, ya que

ahora –como antes–, tanto la caída de los graves como los movimientos celestes son entendidos como movimientos naturales.

En lo que respecta a la discusión ontológica sobre la existencia independiente del espacio-tiempo, han existido distintas formas de interpretar los modelos de la TGR. La discusión sigue abierta.

5.1. *Sobre la posible existencia independiente del espacio-tiempo*

Una interpretación de estos modelos fue la considerada por Einstein cuando buscaba sus ecuaciones de campo definitivas. Esta interpretación alcanzó gran popularidad durante los años setenta y ochenta del siglo pasado, cuando el realismo científico y la confianza generalizada en el poder explicativo de la TGR alcanzaron su mayor popularidad. Veamos de qué se trata.

En su lectura más inocente, el realismo científico interpreta las estructuras y objetos de nuestras mejores teorías literalmente. Los modelos de la TGR –insisto– consisten en una variedad (*manifold*) y unos campos distribuidos sobre los puntos (eventos) de la variedad espacio-temporal. Desde esta perspectiva, parece natural interpretar la variedad espacio-temporal como un espacio-tiempo substantivalista que aloja campos físicos. Esta interpretación fue adoptada por Einstein entre 1913 y 1915, y tuvo un buen número de seguidores al renacer la cosmología relativista. La variedad se interpretó como una entidad estructurada, cuya existencia es independiente de la presencia de campos materiales. Esta se había convertido en el sucedáneo del contenedor absoluto espacial de la física de Newton (Earman 1970; Stein 1970; Friedman 1983). La variedad es parte integral de nuestras mejores teorías, y las ecuaciones de campo hacían ver a los campos como propiedades de los puntos –las partes– de la variedad espacio-temporal.

Sin embargo, la popularidad de esta interpretación cayó cuando la filosofía del espacio-tiempo redescubrió un viejo argumento –el argumento del agujero– de Einstein (1913) hacia finales de los años ochenta (Earman y Norton 1987). El argumento conllevaba la conclusión de que los puntos de la variedad no tienen identidad primitiva, y no pueden, por lo tanto, ser elevados a la categoría de eventos espacio-temporales, sin la presencia de campos (métricos o materiales) bien definidos. Para precisar, a continuación resumo el argumento del agujero; pero el lector bien puede saltar directamente al siguiente apartado (5.1.2.).

5.1.1. *El argumento del agujero*

Debido a la covarianza general de la teoría, es posible generar modelos mediante la acción de ciertas transformaciones conocidas como difeomorfismos activos Φ , así:

Sea $U = (M, g, T)$ un modelo de la TGR. Por definición, es posible escoger cualquier difeomorfismo Φ para generar un nuevo modelo $U^* = (M, \Phi^*g, \Phi^*T)$ de la TGR.

Einstein (1913) se había dado cuenta de que las ecuaciones de campo no pueden escoger entre diferentes evoluciones de los campos y materia, sobre los puntos del espacio-tiempo. En otras palabras, no pueden seleccionar a $U = (M, g, T)$ sobre $U^* = (M, \Phi^*g, \Phi^*T)$ para determinar si, por ejemplo, el asteroide pasará por el punto q de M , o por el punto r de M . Pero el asunto importante es que los modelos U y U^* de la TGR son empíricamente indistinguibles. Comparten la misma variedad espacio-temporal de puntos subyacentes, pero discrepan sobre la forma en que los campos y la materia son distribuidos, sin que esto suponga ningún tipo de diferencia físicamente detectable.

Todos los invariantes de la teoría son preservados ante el tipo de transformaciones que generan el indeterminismo. Y en estas circunstancias, una lectura substantivalista ingenua, que es, además, una lectura literal de la variedad como una entidad física real, cuyos puntos existen objetivamente y forman el tejido del espacio-tiempo, enfrenta la siguiente dificultad interpretativa: si la variedad M es considerada como un espacio físico real en toda regla, esto es, como una entidad capaz de existencia concreta con independencia de la ocurrencia de procesos materiales, entonces el substantivalista debe considerar a U y U^* como modelos físicamente, ontológicamente distintos, aunque estos sean empíricamente equivalentes. Esto claramente recuerda el argumento de los mundos desplazados de Leibniz, donde un universo probable U_1 resultaba empíricamente indistinguible de un universo probable U_2 , al conservar el conjunto de relaciones entre objetos materiales coexistentes; pero difería de este por su ubicación en el espacio absoluto invisible. Es decir, no se podría distinguir si el mundo material estaba aquí o allá, y uno esperaría que aquí y allá correspondieran a situaciones espaciales distinguibles. El newtoniano estaba obligado a conceder, dada la identidad presupuesta para los puntos del espacio, que los dos casos correspondían a situaciones ontológicamente diferentes, aunque indiscernibles. Y esto al parecer raya en la redundancia metafísica. En su lugar, Leibniz apelaba al principio de la identidad de los indiscernibles (PII) para concluir que se trataba de dos representaciones de un mismo universo.

5. 1. 2. *La discusión actual y la posición de Einstein*

La conclusión de Einstein, en su momento, y de los cosmólogos y filósofos del espacio-tiempo, después, fue rechazar el estatus de la variedad como espacio-tiempo real independiente, debido a que los puntos de la variedad no tienen significado ontológico indepen-

diente. Otra razón importante para hacerlo, quizá más significativa, proviene de la evidencia de que la variedad por sí sola no permite ni siquiera definir distancias espaciales ni temporales, no contiene la estructura inercial, y tampoco permite distinguir pasado de futuro. Es decir, no codifica las estructuras espacio-temporales paradigmáticas. Resultaría muy paradójico, entonces, considerarla como un espacio-tiempo independiente, carente de propiedades espacio-temporales. O, parafraseando a Aristóteles, resultaría incomprendible definirla como un espacio-tiempo físico, carente de las propiedades que debieran pertenecerle por sí mismo.

En su lugar, la atención se desplazó hacia la interpretación del tensor métrico g . La pregunta bien planteada sería entonces: ¿debe interpretarse el tensor métrico como un espacio-tiempo independiente substantialista *a la* Newton, o más bien como una suerte de objeto material continuo relacional al estilo cartesiano?

La respuesta no es directa. Por una parte, el campo métrico g cumple un rol explicativo semejante al desempeñado por el espacio newtoniano en la dinámica clásica. Esto es, permite definir distancias, codifica la geometría del mundo y, además, integra la estructura inercial.

Sin embargo, el campo métrico también define la estructura del campo gravitacional, y es portador de energía. En el contexto de la TGR, todos los demás campos de fuerzas (electromagnéticos, Yang-Mills, fluidos de polvo, etc.) son interpretados como campos físicos materiales, como una suerte de objetos materiales continuos. Entonces, ¿por qué no hacer lo mismo con el campo métrico gravitacional g ? Más aún, el campo métrico de la TGR tiene energía y momento. Resulta más natural pensar que la energía y el momento son cargados por campos físicos materiales. ¿Por qué elevar entonces la métrica a la categoría de espacio-tiempo real independiente sin más? ¿Dónde ponemos el campo gravitacional? ¿En la materia, como todos los demás campos físicos, o en las propiedades del espacio? ¿Qué pasa con las ondas gravitacionales y la energía contenida en campos gravitacionales sin fuentes?

La tensión es latente. Para resumirla, cito a Rovelli, quien se expresa así en todo este asunto:

La identificación hecha por Einstein entre el campo gravitacional y la geometría puede leerse de dos formas alternativas:

- i. [C]omo el descubrimiento de que el campo gravitacional no es otra cosa que la distorsión local de la geometría; o
- ii. [C]omo el descubrimiento de que la geometría del espacio-tiempo no es una cosa distinta a la manifestación de un campo particular, el campo gravitacional. (193)⁵

5 Traducción mía (F. C.).

Es evidente que mi intención aquí no es aclarar esta cuestión, que dista de estar zanjada, a juzgar por la fuerte tensión entre contradictores recientes. En cualquier caso, mientras algunos se inclinan por la tesis relacional que suscribe la hipótesis ii de Rovelli (Stachel 1993; Rovelli 1997; Saunders 2002; Cala 2008), la mayoría defiende la tesis substantivista que implica la hipótesis i del mismo autor (Mundy 1992; Maudlin 1993; Di Salle 1994; Hofer 1996; Belot 1996; Bartels 1996; Pooley y Brown 2001). El asunto es tan sutil que el propio Einstein titubeó al intentar responderlo. Pero aquí nos quedamos con su conclusión definitiva. Al respecto, en 1954, un año antes de su muerte, Einstein incluyó un apéndice bastante conocido en la xv edición de *Relativity: The special and the General Theory*. Allí escribió:

Estamos ahora en posición de ver en qué medida la transición hacia la Teoría general de la relatividad modifica el concepto de espacio. De acuerdo con la mecánica clásica y también con la relatividad especial, el espacio (espacio-tiempo) tiene una existencia independiente de la materia o los campos [...] Sobre la base de la Teoría general de la relatividad, por otra parte, el espacio como opuesto a “aquello que llena el espacio” y que depende de las coordenadas, no tiene existencia separada [...] No existe cosa tal como un espacio vacío, *i. e.* un espacio sin un campo. El espacio en sí mismo no proclama ningún tipo de existencia independiente, tan sólo como una cualidad estructural del campo. (155)⁶

Vemos pues que, en su versión definitiva, Einstein concluye, de acuerdo con la TGR, que todo es campo y materia. En definitiva –excusando el anacronismo y las distancias–, el universo material no está dentro de ningún contenedor espacial independiente; contenedor que sería algo así como un todo material, muy al estilo imaginado por Aristóteles. La existencia del espacio-tiempo es subsidiaria de la existencia del campo gravitacional. La conclusión madura de Einstein fue, por tanto, que, de acuerdo con la TGR, era necesario suscribir la tesis relacional. Suprimida la materia, bien sea en su forma ordinaria (partículas) o en la forma de los objetos continuos llamados campos, no tiene sentido hablar de la existencia física del espacio-tiempo, ya que este no es otra cosa que una propiedad estructural de los campos (gravitacionales).

5.2. ¿Y la forma del universo?

Pues bien, ya sabemos que según Einstein el universo debe concebirse como un todo material que no está dentro de nada; pero ¿cuál sería su forma? Al fin y al cabo las ecuaciones de campo admiten muchas soluciones, y todas estas, en principio, son candidatas a representar la geometría, la cosmología y la forma global del universo.

6 Traducción mía (F. C.).

La cosmología reciente acostumbra modelar el universo real, utilizando las métricas inflacionarias del tipo Friedman-Robertson-Walker (FRW). Estas soluciones describen bien el *Big-Bang* y el universo en expansión, del que todo el mundo ha oído hablar. La cosmología relativista se desarrolló para concebir la actual cosmología inflacionaria, a partir de la sexta década del siglo pasado. Einstein no vivió para ser testigo de toda la fuerza de su legado. Siempre contempló una forma distinta para el universo físico.

Veamos la forma del universo que Einstein tenía en mente.

Poco más de un año después de encontrar las ecuaciones de campo de la TGR, Einstein empezó a trabajar en el problema de la inercia en relación con la cosmología. Su intención era amarrar –siguiendo las ideas de Mach– la estructura métrica e inercial del universo a la distribución de materia. Inicialmente, Einstein vislumbró un universo abierto infinito espacialmente, pero las repetidas frustraciones al intentar reconciliar las condiciones de frontera con el Principio de Mach y con las velocidades medias de un conjunto de estrellas, según cuenta, lo llevaron a cambiar de parecer y a optar por curar la enfermedad de raíz, esto es, a suprimir las condiciones de frontera (Cala, Gómez y Ramos 2007). O lo que es igual, a suprimir las fronteras físicas del universo que imaginaba; a cerrar el universo. En 1917 (1952) escribió:

Nuestros cálculos me han convencido de que tales condiciones de degeneración para la métrica en el infinito espacial no pueden ser postuladas. [...] Si fuere posible considerar al universo como un continuo que es *finito (cerrado) con respecto a sus dimensiones espaciales*, no tendríamos necesidad alguna de tales condiciones de frontera. (182)⁷

Esta singular aserción daba origen al modelo cosmológico de Einstein. Más de tres siglos atrás, las observaciones de Tycho Brahe habían empezado a fragmentar las esferas tolemaicas, hijas de la cosmología aristotélica. Einstein sentaba las bases para cerrar (al menos espacialmente) de nuevo el cosmos.

Al universo de Einstein se le conoce como el universo cilíndrico. Esto porque su elemento de línea puede inducirse como el de la superficie de una esfera tridimensional inmersa en un espacio pseudo-riemanniano tetradimensional. En todo caso, es un universo espacialmente esférico finito, cuya evolución temporal se origina en el infinito en el pasado y muere en el infinito en el futuro. En otras palabras, ha existido siempre, y siempre existirá como una esfera de diámetro finito estable⁸. Resumiendo, se trata de un universo esférico

7 Traducción mía (F. C.).

8 Hay que aclarar que, para garantizar la estabilidad de su modelo, Einstein introdujo un término adicional a sus ecuaciones de campo –la constante cosmológica–, que

cerrado espacialmente que, salvando el brutal anacronismo, se parece en su geometría global al de Aristóteles.

6. Conclusión

Acaso sea conveniente cerrar imaginando la siguiente situación hipotética: supongamos que de alguna manera las líneas de universo de Einstein y Aristóteles se cruzan, y como consecuencia de ello los dos gigantes coinciden en el Ágora ateniense o, alternativamente, en algún Congreso Solvay, donde se discuten las tres cuestiones aquí planteadas sobre la forma del mundo, la existencia física de su soporte espacial y la concepción natural o violenta de la gravedad. Si tales fueran las circunstancias, no sobraría improvisar diciendo que, en conclusión, según lo argüido, Einstein le hubiera dicho a Aristóteles algo así como:

“Usted tiene razón, el universo físico es esférico, espacialmente cerrado; también es un todo material que prescinde de un soporte espacial independiente y, efectivamente, tanto la caída de los graves como el movimiento de los cuerpos celestes se entienden bien como movimientos naturales. ¿Cómo pudo presagiarlo?”.

Bibliografía

- Alexander, H. G. *The Leibniz Clarke-Correspondence (1717)*. Nueva York: Barnes and Noble, 1984.
- Aristóteles. *Física*. Madrid: Gredos, 1995.
- Aristóteles. *Acerca del cielo*. Madrid: Gredos, 1996.
- Barbour, J. B. y Pfister, H. *Einstein's Studies, vol. 6: Mach's Principle: From Newton's Bucket to Quantum Gravity*. Boston: Birkhäuser, 1995.
- Bartels, A. “Modern Essentialism and the Problem of Individuation of Spacetime Points”, *Erkenntnis* 45 (1996): 25-43.
- Brading, K. y Castellani, E. *Symmetries in Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- Belot, G. “Why General Relativity Does Need an Interpretation”, *Philosophy of Science (Proceedings)* 63 (1996): 80-88.
- Cala, F. “La identidad de las partes del espacio y el problema de la inercia”, *Praxis Filosófica* 22 (2006): 153-169.

introducía una presión repulsiva que debía bastar para balancear los efectos atractivos del campo gravitacional. Pero a mediados de los años veinte del siglo pasado, Eddington probó que la constante cosmológica no es ninguna garantía de estabilidad para cualquier modelo cosmológico que no sea perfectamente homogéneo. Dicho de otro modo, el universo que Einstein tenía en mente –salvo que se garantice la condición extrema de perfecta homogeneidad– puede entenderse como una esfera espacial cuyo diámetro cambia a cada instante.

- Cala, Favio, Adrián Gómez y Javier Ramos. “De la relatividad de la inercia al universo cerrado”, *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias exactas Físicas y Naturales* 108 (2007): 97-108.
- Cala, F. “Sobre la dinámica relacional del espacio-tiempo y la conservación de la energía en la Teoría general de la relatividad”, *THEORIA, revista de teoría, historia y fundamentos de la ciencia* 62 (2008): 175-193.
- Di Salle, R. “On Dynamics, Indiscernibility, and Spacetime Ontology”, *British Journal for the Philosophy of Science* 45 (1994): 265-287.
- Earman, J. “Who’s Afraid of Absolute Space”, *Australasian Journal of Philosophy* 48 (1970): 287-317.
- Earman, J., y Norton, J. “What Price Space-Time Substantivalism? The Hole Story”, *British Journal for the Philosophy of Science* 38 (1987): 515-525.
- Earman, J. *World Enough and Space-Time*. Cambridge: MIT Press, 1989.
- Einstein, A. “Physikalische Grundlagen einer Gravitationstheorie”, *Naturforschende Gesellschaft Vierteljahrsschrift* 58 (1913): 284-290.
- Einstein, A. “Cosmological Considerations on the General Theory of Relativity 1917”. *The Principle of Relativity*. Nueva York: Dover, 1952. 177-188.
- Einstein, A. “Relativity and the Problem of Space, Appendix 5”. *Relativity: The Special and General Theory*. 15th edition. London: Methuen, 1954.
- Friedman, M. *Foundations of Space-Time Theories*. Princeton: Princeton University Press, 1983.
- Hofer, C. “Einstein’s Struggle for a Machian Gravitation Theory”, *Studies for the History and Philosophy of Science* 25-3 (1994): 287-335.
- Hofer, C. “The Metaphysics of Space-Time Substantivalism”, *The Journal of Philosophy* 93 (1996): 5-27.
- Ibarra, A. “Sustantivismo vs. Relacionismo Espacial: Una reorientación dinámica contextualizada”. *Actas del II Congreso de la Sociedad de Lógica, Metodología y Filosofía de la Ciencia en España*. A Estany y D. Quesada, (eds.). Bellaterra: Sociedad de Lógica, Metodología y Filosofía de la Ciencia en España, 1997. 239-244.
- Koyré, A. *From the Closed World to the Infinite Universe*. Baltimore, Md.: The Johns Hopkins Press, 1957.
- Laymon, R. “Newton’s Bucket Experiment”, *Journal of the History of Philosophy* 16 (1978): 399-413.

- Mach, E. *The Science of Mechanics*. (1883). La Salle: Open Court, 1960.
- Maudlin, T. "Substances and Space-time: What Aristotle Would Have Said to Einstein", *Studies in History and Philosophy of Science* 21-4 (1990): 531-561.
- Maudlin, T. "Buckets of Water and Waves of Space: Why Spacetime is Probably a Substance", *Philosophy of Science* 60 (1993): 183-203.
- Mundy, R. "Space-Time and Isomorphism", *Philosophy of Science Association* 1 (1992): 515-527.
- Penrose, R. "Structure of Space-Time". *Batelle Rencontres*. C. M. De Witt y J. A. Wheeler (eds.). Nueva York: W. A. Benjamin, 1968. 121-129.
- Pooley, O. y Brown, H. R. "Relationism Rehabilitated? I: Classic Mechanics", *British Journal for the Philosophy of Science* 53 (2001): 183-204.
- Rovelli, C. "Halfway Through the Woods: Contemporary Research on Space and Time", *The Cosmos of Science: Essays of Exploration*. J. Earman y J. Norton (eds.). Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1997. 180-223.
- Rynasiewicz, R. "By Their Properties, Causes and Effects: Newton's Scholium on Time, Space, Place, and Motion I: The Text", *Studies in History and Philosophy of Science* 26 (1995): 133-153.
- Saunders, S. "Indiscernibles, General Covariance, and Other Symmetries". *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics: Festschrift in Honour of John Stachel*. A. Ashtekar, D. Howard, J. Renn, S. Sarkar, y A. Shimony (eds.). Dordrecht: Kluwer, 2002. 151-173.
- Sorabji, R. R. K. *Philoponus and the Rejection of Aristotelian Science*. London: Duckworth, 1987.
- Speziali, P. *Albert Einstein, Michel Besso: Correspondance 1903-1955*. Paris: Hermann, 1994.
- Stachel, J. "The Meaning of General Covariance", *Philosophical Problems of the Internal and External Worlds: Essays on the Philosophy of Adolf Grünbaum*. J. Earman, A. Janis, G. Massey, y N. Rescher (eds.). Pittsburgh: Pittsburgh University Press, 1993. 129-160.
- Stein, H. "Newtonian Space-time". *The Annus Mirabilis of Sir Isaac Newton 1666-1966*. Cambridge: The MIT Press, 1970. 258-284.
- Thijssen, J. M., y Zupko, J. *The Metaphysics and Natural Philosophy of John Buridan*. Leiden-Boston-Köln: Brill, 2001.