

Física del espacio-tiempo

Alan Heiblum

Modo de citar:

Heiblum, Alan. 2017. "Física del espacio-tiempo". En *Diccionario Interdisciplinar Austral*, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck. URL=http://dia.austral.edu.ar/Fisica_del_espacio-tiempo

Las nociones acerca del tiempo han cambiado a lo largo de la historia y en diferentes lugares se han mantenido diversas visiones respecto del espacio. La conceptualización que la física actual hace del espacio-tiempo es heredera de una intensa disputa, central en la filosofía natural desde su nacimiento, respecto a la naturaleza del movimiento, el infinito y el vacío.

Contenidas en la pregunta por la naturaleza del espacio y el tiempo conviven dos preguntas relacionadas pero distintas: si existen en sí y si son reales. La primera hace referencia a si su existencia es con independencia de los objetos físicos o si en última instancia se reduce a relaciones de éstos. La segunda busca entender el sentido en el que el espacio y el tiempo se relacionan con nuestras mentes, en especial si se dan o no con independencia de ellas. A lo largo de la historia se han ofrecido diferentes interpretaciones que les adscriben mayor o menor independencia en ambos sentidos. Así por ejemplo, mientras Newton los pensó como entidades en toda regla cuya existencia es independiente de los cuerpos y las mentes, Leibniz creyó que no eran más que relaciones entre cuerpos. Pero mientras Leibniz pensaba que constituían un fenómeno bien fundado, Kant los entendió como formas puras y condiciones a priori de la sensibilidad.

Más en general, en la visión de Newton la posición, la velocidad y la aceleración se determinan respecto del espacio absoluto y son por ello absolutos también. En la visión de Leibniz el espacio es relacional y también lo es la posición pero la velocidad y la rotación serían absolutos cuando resultan de una fuerza activa. Sklar (1976, 229-232) mostró que entre ambas posturas existe la posibilidad lógica de sostener que el espacio, la posición y la velocidad sean relacionales y sin embargo que la aceleración, tratada como una noción primitiva, sea absoluta; lo cual mantiene las ventajas de la postura relacional sin sucumbir al argumento de las aceleraciones absolutas de Newton. Finalmente, en la visión de Mach todos los elementos de la mecánica serían relacionales.

Sugerida por ciertos autores (e.g. Reichenbach 1959), existe una tendencia a confundir relativo con relacional que lleva a pensar que la teoría de la relatividad de Einstein tendría que ser necesariamente relacionista. Sencillamente esto no es el caso; si la teoría de la relatividad favorece una visión absolutista o una relacionista queda como una cuestión abierta. Más aún, existen fuertes evidencias que muestran que la teoría de la relatividad general es profundamente inhóspita para el relacionismo, entre otras razones porque otorga al espacio-tiempo características propias de una substancia, mismas que son afines a la teoría de campos, la violación de paridad y otros resultados de la física (Earman 1989). Por si fuera poco, la confusión entre relativo y relacional dificulta la distinción entre dos acepciones distintas del espacio absoluto, la de marco de referencia privilegiado y la de una (quasi)substancia. Leibniz argumentó contra la segunda, Einstein contra la primera.

La teoría de la relatividad especial, y luego la general, no sólo cambiaron la manera en que entendemos los conceptos de espacio y tiempo sino también la manera en que los medimos. La medición del espacio y del tiempo no es un asunto de mera importancia práctica y curiosidad filosófica, sino que desde los principios de las civilizaciones ocupa un lugar preponderante en la estratificación de las sociedades y la fundación de sus ciencias. Así, no es poco común encontrar largas cadenas de intereses que hilan los desarrollos científicos en su derredor. En especial durante el siglo XVII y XVIII, las innovaciones en la medición del tiempo -relojes capaces de funcionar correctamente montados en sistemas acelerados no uniformes, que terminarían siendo los relojes de pulsera-, fueron propulsadas por la necesidad de medir correctamente la *Longitud*, una variable fundamental para los sistemas de navegación marítimos. Por supuesto, la existencia de sistemas de navegación y localización precisos, era un requisito en la carrera por la dominación económica y militar de las potencias marítimas. Llegado el siglo XX se pensaba que si resultaba difícil

arribar a un acuerdo internacional respecto del sistema de unidades y medidas, más aún lo sería solventar las querellas y prevenir la guerra entre las naciones. Este fue el contexto social que de buena gana dio la bienvenida a la teoría de la relatividad. Al establecer la velocidad la luz como una constante natural, la teoría de la relatividad también resolvía el problema fundacional del sistema de unidades y medidas (Canales 2015). Hoy día prevalece la convención del sistema internacional de medidas (SI), donde se tiene como magnitud física básica la *longitud* (l, h, r, x) y se establece que la unidad básica *metro* (m) es la longitud que recorre la luz en 1/299.792.458 segundos. A su vez la magnitud física básica *tiempo* (t) tiene como unidad básica el *segundo* (s), definido como la duración de 9.192.631.770 periodos de radiación emanada por la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133 (SI 2016).

Eventos y objetos existen diferenciados. Llamamos espacio a la extensión que les da posición y dirección. Así, el espacio resulta ser, de alguna manera, aquello que previene que todo coexista en un mismo sitio. Curiosamente, espacio viene del latín *spatium*, vocablo utilizado para hablar de la separación temporal entre dos sucesos. Misterio que se ahonda si consideramos que el origen de la etimología del tiempo no está resuelta. Como no podía ser diferente, el término 'espacio' tiene hoy una polisemia irreductible. Espacio exterior es el término con el que se designa la región del universo que excede a la Tierra. Espacio interior puede entenderse como una dimensión psicológica o un término apropiado para atender la intimidad y espiritualidad de los sujetos. Espacio habitual, de interacción y corporal, son tipos de espacio estudiados por la semiótica. A su vez el espacio público es, junto con el espacio abstracto, objeto de la geografía. El espacio físico es una extensión tridimensional y sin fronteras que da lugar a los objetos y eventos presentes. Ahora bien, dentro de la teoría de la relatividad, el espacio es un aspecto de un continuo cuatridimensional.

La presente entrada se centra en los destellos históricos de las nociones de espacio y no en los del tiempo, debido a las siguientes razones. El tiempo constituye un rompecabezas interminable que comienza por la (im)posibilidad de su percepción. Por una parte, históricamente muchos pensadores lidiaron con el problema de la naturaleza del tiempo solamente en analogía con el espacio, lo que tuvo como visible consecuencia que los apartados sobre el tiempo fueran a modo de apéndice. Por otra parte, sobre el tiempo ha caído una tendencia perenne a restarle realidad. Por último, como bien muestran los filósofos que se han centrado en la temporalidad, su carácter sui generis implica una serie de sutilezas cuyo debido tratamiento volvería interminable la presente entrada. Por último, a diferencia del espacio, algunos aspectos y matices están trabajados en otras entradas que el lector puede consultar: [Determinismo e indeterminismo](#), [Experiencia y percepción del tiempo](#), [La flecha del tiempo y la irreversibilidad](#) y [Tiempo](#).

La relación entre espacio e infinito es, por decir lo menos, intrincada. Primero Arquitas, luego Lucrecio y Bruno, ensayaron el argumento de que de haberlo, una vez alcanzado el límite del mundo nada impediría rebasarlo. De la falta de un límite brincaron a la afirmación de la infinitud. Si bien dicho argumento posee una belleza y simplicidad innegables, no convenció a sus opositores. El argumento no es concluyente porque de la ausencia de límites no se sigue la infinitud. En tanto superficie, la superficie de la Tierra carece de límite y sin embargo es finita, por ejemplo. Más en general, los espacio-tiempos de la relatividad son ilimitados pero no necesariamente infinitos, sino cerrados en sí mismos. Montada en la relatividad, la cosmología actual se permite decir que el universo observable es ilimitado y sin embargo tiene una edad aproximada de 13 798 millones de años y un radio aproximado de $1,37 \times 10^{26}$ m. (Planck Collaboration 2013).

Ahora bien, ¿qué debe entenderse exactamente por espacio-tiempo? Por espacio-tiempo debe entenderse primeramente un modelo matemático donde el espacio y el tiempo se funden en un continuo cuatridimensional. Puesto que la cuarta coordenada es el tiempo, los puntos localizados en este sistema de cuatro dimensiones con cuatro números reales (x, y, z, t), son llamados eventos. El conjunto de todos estos puntos configura el espacio-tiempo mismo. El objeto matemático que describe dicho continuo es el de variedad. Una variedad es un espacio topológico globalmente tan complejo como se desee pero que localmente resulta plano. Nuevamente, en tanto superficie, la Tierra es un ejemplo favorito. Para definir los componentes métricos (distancia, ángulos, etc.) es necesario equipar la variedad con un tensor métrico (o 'métrica' sencillamente). La física trabaja con variedades lorentzianas, es decir cuya métrica tiene una signatura con un signo diferente en la primera de sus entradas y no todos iguales, como ocurre en el caso euclidiano. En otras palabras, el espacio-tiempo de la relatividad general tiene como límite local el espacio-tiempo de la relatividad especial, que es plano, pero no es el meramente matemático espacio-tiempo euclidiano R^4 , con signatura $(+, +, +, +)$, sino que se trata del espacio-tiempo de Minkowski, con una signatura $(-, +, +, +)$. Es

importante destacar que el tensor métrico captura la estructura del espacio tiempo y puede pensarse como una generalización del campo gravitacional newtoniano.

No solo en la literatura de divulgación es común encontrar la afirmación de que con el arribo de la teoría de la relatividad el éter habría quedado abolido. La opinión de Einstein en ese punto fue clara y ofrece un matiz importante. Si bien la relatividad sí desechó por superflua la hipótesis del éter luminífero (el supuesto medio homogéneo, ubicuo, perfectamente elástico pero con una densidad nula, en el que la luz ondularía según la física decimonónica), la teoría de la relatividad general, según las propias palabras de Einstein, dota al espacio de propiedades y por lo tanto insta un nuevo éter, que si bien está libre de propiedades mecánicas, permite determinarlas (Einstein 1934, 121-137).

Junto al argumento sobre el infinito de Arquitas, la historia del espacio es también la historia de una serie de curiosos experimentos pensados: el argumento del cubo con agua con que Newton intentó minar la física cartesiana, el argumento de la mano de Kant en contra de una postura relacionista del espacio y la reelaboración del argumento del agujero de Einstein para socavar una postura absolutista del espacio-tiempo. La exposición de estos célebres experimentos da estructura a la presente entrada. Sin pretender ser exhaustiva, la primera sección revisa las nociones de espacio desde los presocráticos hasta Galileo. Esta perspectiva histórica es necesaria para observar ciertos movimientos por los que ha pasado el concepto del espacio (de ser anulado a ser considerado un contenedor distinto del contenido; de finito a infinito, y a finito nuevamente; de ser un mero escenario a ser un actor más de la obra). En la segunda sección se expone el debate entre la visión del espacio como un absoluto y la visión del espacio como una relación. Y por último, mientras que en la tercera sección se ausulta la postura de Kant y en la cuarta la de Mach, dos de los pensadores más sobresalientes en la discusión sobre la naturaleza del espacio y el tiempo, en la quinta sección se revisa la noción de espacio-tiempo en el contexto de la teoría de la relatividad y algunas de sus interpretaciones.

1 El espacio en la antigüedad [↑](#)

1.1 Espacios griegos [↑](#)

En la antigua Grecia, el terreno que constituía la ciudad o *polis* (πόλις) era por una parte la *astu* (ἄστυ), donde se encontraba la ciudad misma, y la periferia llamada *chora* (χώρα). En el *Timeo* Platón (1992, vol IV) utilizó el término *chora* para designar el receptáculo donde el Demiurgo habrá de fraguar la copia del ser. El espacio, que era como los sueños, era de una naturaleza distinta al ser y al devenir. A semejanza del ser no era susceptible de nacimiento, cambio ni muerte, pero a diferencia del ser y devenir no era impenetrable y por ello podía albergar el constante cambio de los objetos sensibles. Si al ser se llegaba por la vía del intelecto y al devenir por medio de la percepción, el espacio sería conocido mediante un razonamiento híbrido –que Duhem (1956, vol I. 37) lee como razonamiento geométrico–. Platón utilizó varias imágenes para dar forma a la idea del espacio, entre ellas la de las sustancias oleosas que si bien inodoras llevan los olores de los perfumes. En última instancia, en este oscuro mito el espacio termina por ser una instancia femenina acorde a la necesidad (Ananke), que existe como el fondo en que las figuras geométricas son trazadas (Zeyl 2014).

Platón habló del universo como de un ser vivo en consonancia con discursos anteriores. Así, para los antiguos pitagóricos cada inhalación del universo otorgaba la distancia que diferenciaba los objetos y les permitía su movimiento. En oposición, Parménides concibió al ser como un pleno y negó el movimiento (Platón tampoco aceptó que pudiera haber vacío dentro del mundo pero sin llegar a negar el movimiento, del cual ofreció una descripción hidrodinámica). El silogismo de Parménides establecía que el vacío posibilita el movimiento, pero el vacío no existe porque el no ser no es; por tanto el movimiento tampoco existe (Kirk et al. 1974). Los atomistas en cambio argumentaron que, puesto que el movimiento sí existe, el vacío también y existe tanto como cualquier objeto. Para Leucipo, por ejemplo, el universo era infinito en extensión y en el número de sus átomos. El espacio, contrario a los cuerpos, era la suma total de los lugares no ocupados por cuerpo alguno. La identificación del espacio con el vacío del atomismo no estaba exenta de dificultades. ¿Significa que no hay espacio en el lugar que ocupa un cuerpo? Si los atomistas pensaban que el espacio era o no co-extensivo con el universo, es decir si se trataba de un continuo conformado tanto por los lugares ocupados por los cuerpos como por los lugares vacíos o se reducía a la suma

discreta de estos últimos, es una cuestión difícil de resolver, que debe examinarse caso por caso y escapa las posibilidades de la presente entrada. Lo que sí puede apuntarse es que fue el posterior encuentro de este espacio vacío con el espacio matemático donde los geómetras sitúan sus figuras, lo que dio origen a la noción del espacio euclidiano: el espacio infinito, vacío, tridimensional y plano, con centro en todo sitio y circunferencia en ninguno, donde las líneas rectas diferentes que alguna vez se cruzaron no se vuelven a tocar jamás (Cornford 1976 [1936]).

En una línea de pensamiento distinta, Aristóteles (1996) rompió con la identificación realizada por Platón del lugar como la posición ocupada por los cuerpos. El lugar de un cuerpo no podía ser en sí mismo sino que debía ser en otro cuerpo. Así, la tierra está en el agua, el agua en el aire, el aire en el fuego y el fuego en el cielo, pero más allá del cielo hay nada y por tanto más allá del cielo no puede haber lugar ni tiempo, ni siquiera vacío. En la visión del Estagirita no había lugar para el universo. Más aún, el movimiento de los elementos hacia sus lugares naturales mostraría que estos últimos eran reales al punto de tener una influencia sobre los objetos (Duhem 1956, vol I, p. 189). A diferencia de la $\chi\omega\rho\alpha$ de Platón o el vacío de los atomistas, el lugar de Aristóteles no era homogéneo e indiferenciado sino que podía distinguir entre posiciones y direcciones y por lo tanto era capaz de ejercer una influencia de manera consistente sobre los objetos al tiempo de permitirles su movimiento.

Mientras que los estoicos volvieron a insistir en la idea de un espacio vacío que rodeaba el mundo, Epicuro cambió el curso en la discusión sobre el vacío. En vez de permitir que se mantuviera en términos de ser y no ser como lo había implantado Parménides, afirmó que el vacío era un objeto peculiar, un objeto intangible. A grandes rasgos, en la visión atomista clásica el universo estaba formado por objetos y vacío. A su vez los objetos estaban constituidos por los ensambles y colisiones de los átomos. Del hecho de que los átomos nunca encontraran un límite en su viaje, se concluía que la extensión del universo era infinita. Si los átomos se encontraban y no quedaban extraviados en este infinito era debido a que estos también eran infinitos en número (Kirk et al. 1974).

1.2 Espacios medievales [↑](#)

Las ideas griegas no iban sino acompañadas de valor. Lo inmóvil era superior a lo móvil. El círculo, una figura más elevada que la recta y, como nuestro lenguaje a todas luces aún manifiesta, aquello situado en las alturas era más perfecto. Como resultado, la herencia griega quedó cifrada en la imagen de un universo ordenado en esferas concéntricas. Más puntualmente, la escuela peripatética a lo largo de sus diferentes instancias intentó conciliar y sistematizar la visión aristotélica de que el lugar de un objeto rodea al objeto y se mantiene en reposo. Durante el medioevo surgió así la idea del Empíreo, como la de un contenedor no contenido, un lugar en absoluto reposo capaz de envolver la última superficie del universo. Aunque el Empíreo tenía una fuerte motivación teológica (fue observado como el lugar donde moran los ángeles o el punto más alto al que Beatriz conduce a Dante, por ejemplo), sirvió desde el punto de vista físico como el sistema de referencia en absoluto reposo desde el cual el movimiento del universo podía ser descrito (Duhem 1956, vol. VII, p. 197).

Nueve siglos después de Crisipo, Juan Filopón (490-566) se separaría de la tradición estoica al negar la realidad del espacio vacío más allá de la superficie última del universo. Este espacio, al que rehúsa llamar vacío, no podría existir más que en calidad de idea; un espacio imaginario (Duhem 1956, vol I, p. 318). Paradójicamente, en el siglo catorce Bradwardine mostraría que este espacio, no obstante imaginario, debía de ser real. Según este teólogo matemático, la omnipotencia de Dios tenía como límite la coherencia matemática. Dios no podía actuar sin estar presente. Por tanto, el espacio en que crearía al universo debía preceder al universo mismo y como ese espacio no podía ser menos que infinito, existía además un espacio infinito más allá del universo (Koyré 1986).

Por otra parte, la noción de espacio había tomado un rumbo fuertemente geométrico desde la obra *Discurso sobre el lugar* (Qawl fi al-Makan) de Alacén en el siglo XI, que critica la defensa aristotélica que hiciera al-Baghdadi (Glick et al. 2014, 239) Los siglos siguientes también conocieron momentos de intenso debate. El siglo XIV vio el florecimiento de la ecléctica escuela así llamada de París. Oresme, el obispo de Licieux, fue un fiel representante que polemizó sobre la rotación de la Tierra, la pluralidad de mundos y una octava esfera ilimitada (Martinez 1997). Oresme desarrolló una serie de críticas al aristotelismo sirviéndose de ciertas concepciones sobre el tiempo de Agustín. Para Agustín los ángeles habrían existido siempre y sin ellos el tiempo no habría podido existir, pues el origen del tiempo se encontraba en el movimiento de las criaturas. Pero no por ello los ángeles serían coeternos de Dios, pues ya que

finalmente fueron creados, existen dentro del tiempo. En otras palabras, los ángeles habitarían una eternidad mutable y Dios una eternidad inmutable. Las almas mismas serían un contraejemplo aún más contundente a la visión aristotélica de que lo inengendrado es incorruptible y viceversa. Siguiendo este hilo Oresme sumó a la infinitud temporal una dimensión que los antiguos no vieron. Habría tres órdenes temporales, el tiempo, el evo y la eternidad. El primero habitado por los seres creados y finitos, el segundo por los seres creados y no finitos y en el tercero Dios, increado e infinito. Una segunda serie de oposiciones al aristotelismo se encuentran en las concepciones espaciales, y es que Oresme pensó la espacialidad en analogía a la temporalidad y no al revés, como es común encontrar en la literatura. Si bien coincidía con Aristóteles en la finitud del mundo, para Oresme era posible que el mundo no fuera único y ofreció tres maneras de pensar en ello. La primera defendía que podrían existir otros mundos después de este. La segunda mantenía que los otros mundos podrían estar contenidos en este. La última, que podría haber otros mundos fuera de este. Así Oresme imaginaba que fuera de este mundo debía haber un espacio vacío, incorpóreo, infinito, indivisible. Este espacio no solo sería la inmensidad de Dios sino que sería Dios mismo (Velázquez 1997).

1.3 Espacios renacentistas [↑](#)

Las nociones de reposo y espacio en tanto absolutas habían estado respaldadas por la existencia de un cuerpo sin movimiento y con una ubicación absoluta. A lo largo del medioevo la Tierra habría realizado dicha función, pero para el siglo XV las cosas habrían de cambiar. El siglo aún no comenzaba y Hasdai Crescas ya había anticipado una crítica al Aristotelismo muy parecida a la que Bruno realizaría más tarde. Notablemente, Nicolás de Cusa adelantó el principio de que no hay lugares privilegiados (pues donde quiera que uno se plante parecerá el centro del universo) y sentenció explícitamente que la Tierra no estaba en reposo ni era el centro del universo. Pero, como Cassirer (1979) mostró adecuadamente, fueron los pensadores italianos del siglo XVI quienes liberaron de manera decisiva al espacio de las nociones del pensamiento aristotélico. Telesio, Patrito, Campanella, por ejemplo, insistieron en que el espacio no debía pensarse dentro del esquema sustancia-atributo y concibieron un espacio homogéneo paralelo a la materia.

Mucho se ha dicho de la Revolución copernicana y aquí no se abundará en ello (ver [El caso Galileo](#)), pero en una discusión que desea resaltar cómo el problema de la naturaleza del espacio y el tiempo no se dio al margen del problema del movimiento, el infinito y el vacío, conviene señalar que el debate copernicano permitió el nacimiento de la noción actual de sistema de referencia, y no por la sustitución de la Tierra en lugar del Sol como sistema de referencia universal, sino al insistir que tanto el uno como el otro eran sistemas desde donde podían realizarse las observaciones y mediciones de los cuerpos en movimiento. Por lo demás, como bien apuntaron Koyré (1986) y otros estudiosos, el universo de Copérnico no presentaba rupturas con la antigüedad en varios aspectos sino que era finito, esférico y esencialmente en reposo (la esfera de las estrellas fijas se encontraba en reposo). En caso de ser necesario buscar un responsable de mayores innovaciones como la idea de un mundo infinito y sin reposo, este sería Giordano Bruno. Para este pensador las estrellas fijas no estaban más fijas que la Tierra en el heliocentrismo y la idea de Aristóteles de que el universo no estaba en lugar alguno no podía ser más que un juego inconcebible de palabras. Ni la razón ni los sentidos podrían encontrar límite para el universo, y sin dicho límite no teníamos derecho a concebir el universo como una totalidad, por ello en lugar de un mundo, Giordano Bruno hablaba de mundos, infinitos mundos (Bruno 1981).

Copérnico había mostrado que tomar el sol como centro y referencia de los objetos celestes producía cierta mejora en las descripciones astronómicas. Quedaba pendiente una versión igualmente sólida de la física en una Tierra en movimiento. Galileo fue el encargado de llevarlo a cabo. La posteriormente llamada relatividad galileana muestra que no existen diferencias experimentales entre un sistema en reposo y uno en movimiento uniforme.

Duhem exageró cuando situó el origen de la ciencia moderna en la famosa condena de los textos aristotélicos de 1277, pero sí existe un consenso en cuanto a que las motivaciones de la ciencia moderna no fueron meramente matemáticas y astronómicas; en especial el problema de la naturaleza del espacio no le resultó ajeno. “Sea como sea en cualquier caso no fue Galileo, ni Bruno, sino Descartes quien, de un modo claro y distinto, formuló los principios de la nueva ciencia” (Koyré 1986, 97).

2 Nociones del Espacio en la Modernidad [↑](#)

2.1 Descartes [↑](#)

Descartes reestructuró la visión del universo como un pleno hidrodinámico. Principalmente en el segundo libro de sus *Principios Filosóficos* de 1644 (2011), se encuentra desarrollada la idea de que la naturaleza del cuerpo es su extensión. El filósofo francés argumenta que todas las cualidades de un cuerpo le pueden ser removidas pero no su extensión. Para negar el vacío se sirvió de la noción de esponja. Un cuerpo poco denso es un cuerpo con intersticios grandes donde muchos otros cuerpos caben, pero no importa cuán baja sea su densidad, nunca deja de ser un cuerpo lleno de otros cuerpos y por lo tanto el vacío simplemente no existe. De la misma manera que no es posible tener montaña sin un valle, un contenedor necesita de su cavidad, pero esta no es sino una extensión que, como se dijo, es una substancia. Así, extraer todo el contenido de un contenedor no trae como resultado la creación de un vacío sino simplemente el colapso de sus paredes. Espacio, lugar y cuerpo no son pues diferentes. El universo de Descartes es un pleno ilimitadamente divisible, ilimitadamente extenso donde el movimiento se da a manera de vórtices (Slowik 2014).

La manera en que Descartes afronta la ausencia de límites amerita un comentario. Si bien en su visión el mundo no es finito, estrictamente Descartes no dice que sea infinito. Descartes utiliza el término indefinido. Más que un término ocioso como lo calificara Henry More en una exquisita polémica, lo que Descartes intentó hacer es separar el infinito propio de la filosofía natural aplicable al universo del infinito de la teología aplicable a Dios (Benitez 2000).

Descartes dejó atrás a neo-platónicos y neo-aristotélicos, el espacio no tendría propiedades particulares ni sería una propiedad de la materia, sino que sería la materia misma. De cierto modo, podemos entender el proyecto de Descartes como una síntesis de ideas atomistas y aristotélicas. Por una parte, Descartes tomó la idea atomista y nada aristotélica de que todo cambio se reduce a la configuración espacial de sus componentes; lo que Descartes intenta mostrar es que toda cualidad y variedad nace de una cantidad. Pero por otra parte, apoyó las ideas aristotélicas y nada atomistas de materia prima y de la inexistencia del vacío. Para Descartes una misma materia configura la tierra y el cielo; por lo tanto, toda la diversidad que se observa es producto del movimiento. El movimiento, propiamente hablando, es la transferencia de las partes o la totalidad de un cuerpo desde la vecindad de los cuerpos inmediatamente próximos hasta la vecindad de otros cuerpos. Es en esa concepción de movimiento en la que Newton posteriormente concentrará su ataque.

2.2 Newton [↑](#)

Henry More acuñó el término cartesianismo y le imputó dos grandes errores, la identificación entre espacio y materia y la negación de la extensión en Dios. Para More todo lo que existe tiene extensión, pero mientras la extensión material se caracteriza por ser impenetrable, las mentes, lo divino y el espacio mismo tienen una extensión inmaterial no impenetrable. Este es el contexto en el que Newton leyó y criticó a Descartes. Para Newton la localización es una condición necesaria para la existencia (Andrew Janiak 2014).

En el esolío que sigue a las definiciones inaugurales de los *Principia* (1972), Newton realiza una triple distinción para el movimiento, el espacio y el tiempo, entre absoluto y relativo, verdadero y aparente, y matemático y común. El espacio y el tiempo absolutos quedan definidos como existencias imperturbables al margen de los objetos exteriores.

La noción del espacio absoluto encierra al menos dos problemas. El primero es que hace de la velocidad un absoluto (el cambio de posición de un cuerpo en el tiempo respecto de un punto fijo en el espacio absoluto), cuando la relatividad galileana (incorporada en la mecánica newtoniana, explícitamente en el corolario V de los *Principia*), hace imposible una determinación experimental de la velocidad absoluta. El segundo problema es respecto de la naturaleza del espacio. El espacio era material para Descartes y mental o ideal para Leibniz. Newton queda en la incómoda posición de hacer del espacio una entidad no material pero tampoco mental. Newton sostuvo que el espacio absoluto sería una pseudo o quasi substancia, esto es, más una substancia que una propiedad pero sin ser una substancia del todo, pues adolece de agencia causal.

Puesto que lo que cambia el estado de movimiento o reposo de un cuerpo es la presencia de una fuerza externa (*vis impressa*), Newton pensó que el movimiento no puede ser reducido a las relaciones espaciales con los objetos circundantes, como opinaba Descartes. Newton propuso en cambio que el movimiento verdadero, en contraposición a aparente y relativo, es entonces respecto del espacio absoluto. Para acallar la posible objeción de que el movimiento absoluto sería indetectable en tanto el espacio absoluto es inobservable, Newton diseñó el famoso experimento pensado del cubo con agua. La idea era mostrar que las rotaciones funcionarían como señales que delatarían la existencia de un movimiento verdadero.

El experimento del cubo tiene tres fases: el cubo de agua cuelga de una cuerda vertical; el cubo de agua rota sobre el eje de la cuerda; después de un tiempo, el agua rota en conjunto. Los cartesianos coincidirían en que la superficie cóncava del agua en la tercera fase es prueba de su movimiento. Sin embargo, siguiendo la idea cartesiana de movimiento como cambio de lugar queda pendiente una interpretación que reconcilie las distintas fases. En la tercera fase el agua está en reposo respecto al cubo y no obstante su superficie está cóncava. Durante la segunda fase el agua no está en reposo respecto de su entorno inmediato pero su superficie es plana igual que en la primera fase cuando está en reposo. De esta manera puede apreciarse que el argumento de Newton del cubo fue dirigido a Descartes (aunque luego fuera empleado también contra Leibniz) y no fue para demostrar la existencia del espacio absoluto sino para mostrar que la visión cartesiana no podía dar cuenta satisfactoriamente de la rotación. Más exactamente, que de las premisas cartesianas no se deduce que la rotación sea de alguna de las clases de movimiento previsto por Descartes.

Pero el del cubo con agua no fue el único experimento pensado con que Newton defendió sus puntos. Otro igualmente importante es el de las dos esferas rotantes. Dos esferas comunicadas con una cuerda rotan. La tensión de la cuerda puede no solo indicar que rotan sino en qué dirección lo hacen. Puesto que estos experimentos permiten detectar rotaciones absolutas, esto es, rotaciones respecto del espacio absoluto, la fundación empírica del planteamiento, Newton pensaba, quedaba asegurada.

En suma, en la visión de Newton toda aceleración denota un movimiento absoluto, y aunque no todo movimiento absoluto es acelerado, siempre es respecto del espacio absoluto. De esta manera el espacio y tiempo absolutos ofrecían un sustento libre de contradicción a la nueva física. Con el tiempo las ideas de Newton fueron ganando terreno frente a las ideas aún prominentes de Descartes pero eso no las eximió de recibir una mordaz crítica por parte de otro crítico de Descartes, Leibniz.

2.3 Leibniz [↑](#)

Leibniz (2011) realizó una de las equiparaciones más consistentes entre verdadero y analítico de la historia del pensamiento. Para este filósofo alemán una proposición era verdadera cuando el predicado estaba contenido en el sujeto. Leibniz fue muy enfático en distinguir el concepto de verdad de su dimensión metodológica y pragmática (la manera que uno obtiene o usa dicha verdad). A la pregunta de cómo se relacionan todos los predicados que pertenecen a un sujeto, Leibniz respondió que por cada predicado hay otros que dan cuenta de él, de manera tal que debe haber una razón suficiente de por qué las cosas son de la manera en que son y no de otra manera, y Leibniz elevó esto a principio. Ahora bien, el así llamado principio de razón suficiente establece que el sujeto es una cuestión suficiente para la ocurrencia de los predicados pero no necesaria. Así mientras cada propiedad está explicada por otra propiedad, el sujeto como tal no tiene una razón necesaria que lo haga ser y es contingente. Así debe haber algo más allá de los sujetos contingentes que dé razón de su existencia. Leibniz llama Dios a este ser necesario. De los mundos posibles no contradictorios, Dios sostiene en la existencia a aquel que es más perfecto. Leibniz piensa la noción de perfección como la mayor cantidad de esencia. En otras palabras, Dios en su perfección elige la mayor variedad y riqueza compatible con el conjunto de leyes más básico. Ahora bien, Leibniz considera que del principio de razón suficiente y del de no contradicción se sigue la igualdad entre los indiscernibles. Este principio sostiene que si dos objetos son los mismos en todas y cada una de sus características entonces no son dos objetos distintos sino uno y el mismo.

Como sus contemporáneos, Leibniz concedía la relatividad galileana. Es decir, dados dos sistemas en movimiento uniforme, no existe un ojo que pueda distinguir cuál de ellos verdaderamente se encuentra en movimiento. Pero

Leibniz era aún más radical y mantenía el principio de la equivalencia de las hipótesis, a saber, que todo movimiento es fundamentalmente equivalente. Sin embargo, Leibniz encontraba absurda la inexistencia de un movimiento verdadero. Así, pensaba que no todo movimiento debía reducirse a un mero cambio de posición sino que ciertos movimientos, los movimientos verdaderos, serían la expresión de una acción o una fuerza, la *vis viva*. (La *vis viva* tiene como forma matemática mv^2 y resulta en más de un sentido una anticipación de la noción de energía cinética). Pero aunque esto da un fundamento metafísico al movimiento verdadero, no ofrece un criterio físico para distinguirlo. Leibniz (sin reparar en la posible violación al principio de identidad de los indiscernibles que la no observabilidad del movimiento absoluto pudiera contraer) sostenía que para fines físicos uno debía aplicar la hipótesis más simple.

Una de las colecciones epistolares más leídas es la que sostuvieron Leibniz y Clarke (Alexander 1956). En ella, la naturaleza del espacio y el tiempo es quizá el tópico más sobresaliente, no obstante que la naturaleza del tiempo fue discutida en analogía al espacio. A lo largo de las cartas dirigidas a Carolina de Brandeburgo-Ansbach, Leibniz arguyó contra la visión del espacio absoluto de Newton y Clarke abogó por el propio Newton. Aunque no todos los autores coinciden, la visión usual es considerar a Clarke como vocero de Newton. Uno de los puntos centrales del debate queda establecido de la siguiente manera. Mientras Clarke afirma que si bien los objetos y eventos no existen con independencia del espacio y el tiempo, el espacio y el tiempo sí existen con independencia de objetos y eventos, Leibniz asegura que espacio y tiempo son meras relaciones de objetos y eventos, el orden de coexistencia y sucesiones.

Para socavar la postura de su adversario Leibniz utilizó el siguiente argumento. Imaginemos, pide Leibniz, que el universo sea movido en el espacio absoluto de manera que el este coincida con lo que antes era el oeste. Puesto que todos los puntos del espacio absoluto son idénticos, dicha operación no traería ninguna diferencia, y por lo tanto arrojaría como resultado dos universos indistinguibles y sin embargo distintos, lo cual viola el principio de identidad de los indiscernibles y restaría a Dios una razón para elegir una opción sobre la otra, lo cual viola el principio de razón suficiente.

Clarke responde que no hay violación alguna del principio de razón suficiente pues la específica localización del universo tiene como razón que Dios así lo haya querido. Leibniz replica que una mera voluntad sin motivo es quimérica y contradictoria. Clarke pudo haberse limitado a contestar que si bien su postura no satisfacía los criterios de Leibniz, no se veía contradicha ni por la lógica ni por la experiencia y por lo tanto no tenía que ser necesariamente abandonada. Desde la actualidad una respuesta aún más fuerte sería que dado que la realidad ontológica yace frecuentemente más allá de nuestras doctrinas epistemológicas, el epistemólogo haría bien en rechazar la tentación de pasar a la historia como el portavoz de otro intento fallido por limitar la realidad ontológica.

Por su parte Leibniz no habría dejado sin contestar el argumento del cubo con agua, pero su respuesta tampoco resultó convincente. El argumento de la cubeta se solucionaba, pensaba Leibniz, si las leyes del universo no fueran las mismas cuando se trata de un caso de movimiento lineal que cuando se trata de un movimiento no lineal. Esto podría parecer muy arbitrario pero para Leibniz no sería más arbitrario que cualquier otra ley del universo.

Leibniz no solo creía como los pensadores medievales que el universo está rodeado de un espacio imaginario, sino que también el espacio dentro del universo era imaginario. Ahora bien, aunque se trataba de entidades ideales, para Leibniz el espacio y el tiempo no eran menos que fenómenos bien fundados. Una vez reconocidos como imaginarios, Leibniz coincidía con su adversario en que espacio y tiempo son continuos y homogéneos. Lo anterior con la salvedad de que Leibniz negaba la existencia del vacío pues este se oponía al principio de plenitud, a saber, que la existencia es conforme con la decisión de Dios de crear el mejor de los mundos posibles. Ya hechas todas las salvedades, Leibniz también aceptaba que el espacio y el tiempo serían divisibles indefinidamente. Leibniz es otro pensador que también trazó para la idea (de origen innato según él) de infinito una distinción según la jerga de la lógica medieval entre categoremático (actual), hipercategoremático (Dios) y sincategoremático (posible). Leibniz negó la existencia de infinitos categoremáticos y aun cuando sí usó el término infinito (sincategoremático), en el fondo coincidía con Descartes en usar la noción de indefinido y no infinito para referirse al universo, que en su visión como carece de límites no es un todo. Por otra parte, contra la idea negativa de infinito (por ejemplo la que defendía Locke en tanto que entraña la idea de una sucesión sin término), Leibniz intentó defender la noción positiva de infinito. Apeló para ello a que el verdadero infinito es absoluto y simple, es decir carece de partes y no es modificación de nada (Sin embargo éstas eran dos discusiones, Locke estaba dejando de un lado el infinito teológico y preguntándose

únicamente por el natural, mientras que Leibniz está intentando, como buen conciliador que fue, hablar de ambos) (Herrera 1997). Lo que es claro es que de ninguna manera Leibniz concedió, como hizo Clarke (y Newton), que espacio y tiempo pudieran ser atributos de Dios (McDonough 2014).

3 Nociones del espacio en el siglo XVIII [↑](#)

Los siglos XVII y XVIII conocieron intensos debates en torno a la naturaleza del espacio, el tiempo y el movimiento, que transitaron de un enfoque meramente teológico a uno propio de la filosofía natural. Una de estas polémicas era la centrada sobre la (in)extensión de Dios. Infinito, indivisible, incorpóreo, invisible, increado, impasible, inmutable y eterno, eran atributos que si bien pertenecían a la divinidad también parecían predicables de un espacio al margen de los cuerpos. Mientras algunos concluyeron de esto que el espacio era parte de Dios o que Dios mismo era el espacio, otros pensadores como Berkeley sostuvieron la infinitud pero inextensión de la divinidad. Berkeley (2013) intentó mostrar que la nada también cumple con la lista de atributos anteriores y que el espacio absoluto era una idea abstracta inexistente. Como un acérrimo crítico de Newton, Berkeley no tenía otra noción de espacio que la idea del espacio relativo: el espacio finito e inerte asociado a los cuerpos perceptibles.

Otra de estas polémicas de época era la de si la materia era infinitamente divisible. Por una parte, la aparición del microscopio de Leeuwenhoek había fomentado la idea de una falta de límite para la relación entre mejores lentes y la observación de porciones cada vez más pequeñas de la materia. Malebranche había ensayado argumentos semejantes y sumado la propuesta de que Dios habría dispuesto la materia divisible al infinito para mostrar su poder ilimitado. Por su parte Berkeley realizó una distinción entre divisibilidad teórica y divisibilidad empírica y aceptó la divisibilidad al infinito teórica pero no la empírica. Para Berkeley los lentes de aumento confirmaban las ideas matemáticas de la divisibilidad, no las empíricas. La distinción entre el objeto matemático y el objeto empírico debía ser tomada en serio, las propiedades semánticas de las expresiones lingüísticas no tenían por qué contar con el correlato de un elemento objetivo en el mundo (Robles 1997). Para Berkeley estos y otros errores en el pensamiento habrían sido polvaredas levantadas por la errónea e injustificada creencia en la materia y por lo tanto su estrategia general estuvo destinada a combatir el escepticismo epistémico: nuestras ideas no ocultan un substrato material incognoscible porque solo existe lo que percibimos.

3.1 Contrapartes incongruentes [↑](#)

La introducción de una intuición no empírica fue una verdadera innovación que Kant brindó a la filosofía. Ante sus ojos, Berkeley no habría realizado una distinción entre sensación e intuición y por eso se habría visto orillado a sostener la postura radical de que nada es independiente de la intuición. La postura de Berkeley fue calificada por Kant como un idealismo dogmático y aún así le fue preferible, de cierta forma, al realismo trascendental de Newton o Leibniz (Janiak 2016). En breve, según Kant, del espacio y del tiempo se tiene una representación no empírica, singular e inmediata. Esto es, se trata de una intuición pura y no empírica como sostendría Berkeley. Y dependen de la intuición y no son meramente conceptuales en contra de la opinión de Leibniz. Ahora bien, antes de adoptar su conocido idealismo trascendental Kant habría formulado un argumento en favor del espacio absoluto de Newton y presuntamente en contra de la posición relacionista de Leibniz. El contexto es el siguiente. Euler había dado una prueba de la imposibilidad de la postura relacionista para dar cuenta de la primera ley de Newton. Para Kant esto no era suficiente. Según sus propias palabras, no quería dejar en manos de ingenieros sino de los geómetras la realidad del espacio con independencia de la materia que lo ocupa, así que formuló un argumento, probablemente dirigido contra Leibniz, que justamente versa sobre manos.

El argumento puede resumirse del modo siguiente. Si la primera cosa en ser creada fuera una mano, ésta tendría que ser diestra o siniestra. Pero las relaciones internas de ambas manos son estrictamente idénticas y dado que el argumento exige que la mano sea creada en ausencia de todo objeto exterior, se sigue que dicha mano cosmogónica debe ser diestra o siniestra en relación el espacio como un todo. En otras palabras, lo que Kant muestra es que querer entender el espacio y el tiempo como meras relaciones entre cuerpos resulta insostenible y por ello (si no se

consideran más opciones) el recuento newtoniano debe ser correcto.

Quizá, la salida más fácil para el relacionista sea la de no aceptar el inicio del argumento y replicar que una mano solitaria no es diestra ni siniestra sino que su orientación depende de la existencia de otros cuerpos. (Otras formas de escapar de este argumento absolutista pueden encontrarse en Earman 1971 y 1989). Es importante observar que la existencia de contrapartes incongruentes requiere que el espacio sea orientable (foliable). En un espacio no orientable después de cierto recorrido sinuoso una mano siniestra (como si fuera dada vuelta en una dimensión extra) sí podría coincidir con su réplica diestra.

Este argumento fue expuesto por Kant en cuatro ocasiones distintas adscribiendo diferentes énfasis sobre el espacio en cada una. En la primera de 1768 (“Del primer fundamento de las regiones del espacio”) para defender la independencia del espacio; en 1770 (“Disertación inaugural”) para mostrar su dimensión intuitiva; en 1783 (“Prolegómenos a toda metafísica futura que pueda presentarse como ciencia”) para resaltar su carácter ideal, y por último en 1786 (“Primeros principios metafísicos de la ciencia de la naturaleza”) para defender que se trata de un trascendental.

Semejante cuestión ha mantenido a los estudiosos lejos del acuerdo. Desde aquellos que ven una unidad fuerte en el planteo kantiano (Allison 1983, Torretti 1967) hasta aquellos que notan contradicciones (Alexander 1984/1985; Earman 1971/1989; Sklar 1974). De semejante situación puede no obstante considerarse la siguiente lectura como aquella que fuerza lo menos los textos originales. En el ensayo de 1768 Kant concluye que el espacio es un concepto fundamental: condición de posibilidad de toda sensación externa. Lo cual es acorde con el precepto de que de lo que es en sí solo se puede tener conceptos. A partir de 1770 Kant, entrado en su giro crítico, ya no aceptará que pueda haber conocimiento de la cosa en sí; acorde a esto afirma en la línea que le es bien conocida que al espacio corresponde una intuición pura constitutiva del apartado subjetivo de nuestras mentes. Esto explica el paso del tono característico del texto de 1768 en el que el espacio se declara real en sí mismo, al tono de las declaraciones de los textos de 1770 y 1781 en las que es comparado con una fábula o con la nada misma. O para decirlo en breve, de afirmar la postura de Newton y negar la de Leibniz, a rechazar ambas.

4 Nociones del espacio en el siglo XIX [↑](#)

4.1 Sistema de referencia inercial [↑](#)

La noción de sistema de referencia que había surgido no del resultado pero sí del debate entre los sistemas de Ptolomeo y Copérnico, terminaba de fraguar con las ideas de Galileo (la equivalencia experimental entre reposo y movimiento uniforme) y Leibniz (“equivalencia de hipótesis”) en el siglo XVII. Sin embargo, el término “sistema de referencia” no fue acuñado con su actual precisión sino dos siglos más tarde.

Un sistema de referencia inercial es cualquier sistema de referencia desde el cual un objeto no sometido a ninguna fuerza se observa en reposo o en movimiento uniforme. Esto implica que cualquier sistema de referencia cuyo movimiento relativo al sistema de referencia inercial sea uniforme es también un sistema de referencia inercial.

En 1885, Ludwig Lange dio la primera definición explícita utilizando los términos “sistema de referencia inercial” (DiSalle 2016). Lange apeló a la primera ley de Newton y afirmó que un sistema de referencia inercial sería aquel donde las partículas libres de fuerza se mueven en línea recta. Esta definición abre dos problemas, la determinación de una trayectoria recta y la existencia de partículas libres. La definición de Lange no cae en el primer problema pues más exactamente formula que el sistema inercial queda formado por tres partículas no planares que avanzan distancias proporcionales en tiempos iguales. Respecto de este sistema cualquier cuarta partícula libre de fuerzas tendrá un movimiento uniforme. En esta definición Lange incluye el punto que ya habían hecho notar Neumann y Euler respecto de que la ley de inercia permite definir intervalos equivalentes de tiempo, con el inconveniente de que no existe una definición independiente de intervalos equivalentes de tiempo (DiSalle 2016).

Un año antes que Lange, Thomson (1984) había dado una noción satisfactoria de sistema de referencia inercial sin

utilizar explícitamente tales términos. Según la versión de Thomson un sistema de referencia inercial es aquel donde se cumple la segunda ley de Newton. Apelar a la segunda ley salva el problema de la (in)existencia de partículas libres. La segunda ventaja respecto la definición de Lange es que hace patente una cuestión que ha sido objeto de equívocos. Nunca se trató de encontrar el sistema de referencia donde se cumplen las leyes de Newton sino que de ser ciertas, las leyes de Newton determinan una clase de sistemas de referencia.

Cabe añadir que el posterior arribo de la relatividad general y su aplicación de geometrías no euclidianas trastocó de lleno la visión sobre la existencia de los sistemas de referencia inerciales. En un universo de curvatura variable es imposible la existencia de un sistema de referencia inercial global. Los únicos sistemas de referencia inerciales disponibles son aproximaciones locales (justo de la misma manera en que la Tierra es plana únicamente desde una aproximación local). Este mismo pensamiento en reversa muestra el problema que subyace a la noción de sistema de referencia inercial, a saber, que proyecta sobre la totalidad del espacio-tiempo una estructura que solo puede existir en regiones pequeñas y confinadas del universo real.

4.2 Mach [↑](#)

En su libro “Materia y movimiento” (1925), Maxwell discutió las nociones de espacio y tiempo. En su opinión Descartes no logró comprender del todo sus palabras, pues en su primera ley de la naturaleza estaba ya contenida una definición satisfactoria de materia como aquello que conserva el estado de movimiento o reposo de un cuerpo y no la identificación de éste con su extensión espacial. De la misma manera Maxwell sentenció que aunque nuestro conocimiento del espacio y tiempo siempre será relativo a los objetos y procesos, necesita de la definición de espacio y tiempo absolutos de Newton como sustento. Sirva el caso de Maxwell para ejemplificar cómo desde la controversia con Leibniz, fue la visión de Newton la que prevaleció. Sin embargo, aunque la postura de Maxwell pareciera estar libre de tensiones, la acción a distancia y el espacio y el tiempo absolutos resultaban instancias “monstruosas” para otros pensadores.

Ernst Mach (1839-1919) quería purgar de metafísica la ciencia y puede decirse que fue el primero en intentar llevar a su culminación el programa de hacer de la posición, velocidad y aceleración cuestiones estrictamente relativas. Para Mach las mediciones se reducían en última instancia a aspectos fisiológicos y psicológicos. En este sentido la ciencia estaba fuertemente anclada en el ser humano y su elucidación tendría que venir por el lado de la biología. Siguiendo esta línea de pensamiento, Mach estableció una división entre el espacio fisiológico y el espacio físico. El primero estaba dado a priori por nuestra estructura cognitiva, era finito, acotado, y no uniforme. El segundo era una construcción intelectual, una abstracción del primero y resultaba infinito, no acotado y uniforme. Ambos eran no absolutos (Pojman 2011).

Sobra decir que Mach no encontró solidez en el argumento del cubo de Newton (Mach 1942). Considerar un universo vacío con un cubo rotando era un sinsentido para Mach pues según él no tenemos la menor idea de cómo sería el universo en el caso de estar constituido únicamente por un balde con agua, o en el caso de que las paredes del cubo se engrosaran a niveles astronómicos, o si las estrellas rotaran mientras el cubo se mantiene quieto. En todo caso, argumentaba, no hay más universo que el que habitamos, y en éste cada vez que realizamos una proposición sobre el movimiento de los cuerpos estamos abreviando que es respecto del resto del universo. Así, en la versión débil de su postura, Mach pensaba que podíamos retener las bondades de la mecánica newtoniana sin necesidad de sufrir sus excesos metafísicos. El espacio absoluto podía ser reemplazado por el marco de las estrellas fijas tal como se lleva a cabo en la práctica astronómica. Desde la posición positivista de Mach la ciencia no podía pretender mucho más que alcanzar descripciones económicas de los fenómenos y por lo tanto no era un problema hacer del marco donde las estrellas están fijas un marco especial donde las leyes de la física toman su forma simple y dejar sin contestar las preguntas relativas a qué pasaría en el caso de que fuera inexistente o se tratara de un universo vacío. En la versión fuerte, la mecánica de Newton debía ser reemplazada por una capaz de dar cuenta de todos los efectos de inercia como relativos. Así, el más tarde bautizado principio de Mach sostiene que la distribución total de la materia en el universo produce la inercia local de cada cuerpo. De los múltiples intentos por hacer una teoría satisfactoria en los términos fuertes de Mach se destaca los dos intentos de Barbour y Bertotti (1977 y 1982) y, por supuesto, la teoría de la relatividad de Einstein que se explora en el siguiente apartado. Pero se puede adelantar que desde el punto de vista

de la teoría de la relatividad general el experimento del cubo con agua de Newton tiene una interpretación muy diferente, pues sus relaciones espacio-temporales se encuentran en constante cambio. Así, un reloj con referencia al centro del cubo con agua, no va a marcar el mismo paso del tiempo que, digamos, otro referido al agua en los costados del cubo.

5 El Espacio-tiempo [↑](#)

5.1 La relatividad especial [↑](#)

Durante el siglo XIX parecía claro que aceptar la mecánica newtoniana implicaba también aceptar que posiciones, reposo, velocidades y aceleraciones eran absolutas si se medían desde un marco privilegiado para hacer física, el espacio absoluto. La necesidad de una referencia absoluta era tan imperiosa que Neumann (1976) se sintió comprometido a suponer la existencia de un objeto rígido, “el cuerpo alfa”, desde el cual el movimiento rectilíneo pudiera ser descrito. Una razón distinta para aceptar la existencia de un marco privilegiado era que al parecer la teoría electromagnética así lo exigía. El éter, una substancia ubicua, sería el sistema en reposo donde se cumplirían las leyes de Maxwell y Lorenz. Así, mientras los teóricos buscaban la forma que adoptarían las ecuaciones de la electrodinámica en los sistemas en movimiento respecto al éter, los experimentales trataban de dar cuenta de los efectos observables de un sistema en movimiento respecto al éter. Este es el contexto que envuelve el famoso resultado negativo del experimento de Michelson y Morley. Más aún, muestra el contundente avance que supuso la teoría de la relatividad especial de Einstein. En lugar de buscar las transformaciones de las ecuaciones electromagnéticas, Einstein supuso que estas debían cumplirse en todo sistema inercial. Si todo observador inercial, sin importar su velocidad, mide la misma velocidad para la luz, el espacio y el tiempo no pueden ser invariantes. Así de un solo trazo, Einstein se deshizo del espacio y el tiempo absolutos de Newton y estableció una teoría basada en la negación de la simultaneidad absoluta. Si bien esta nueva teoría de la relatividad especial salvaba la mayoría de los fenómenos de la mecánica newtoniana, no era capaz de dar cuenta de la gravitación de Newton, pues por una parte, como su nombre lo indica, la teoría está restringida a sistemas donde la aceleración es nula, y por otra parte la gravitación de Newton supone una acción instantánea y a distancia, es decir, presupone la simultaneidad absoluta que justamente la teoría de relatividad especial destituye desde el comienzo mismo. Einstein descartó cualquier esfuerzo de compatibilizar la relatividad especial y la gravitación newtoniana pues, inspirado por Mach, estaba en pos de una teoría más completa que hiciera relativas no solo las velocidades sino las aceleraciones también.

La relatividad especial consta de dos postulados:

La velocidad de la luz es una constante independiente de las velocidades de la fuente que la emite y el observador que la mide.

Las leyes de la física son idénticas en todo sistema inercial.

El primero termina siendo la generalización de un resultado empírico y el segundo un meta-principio pues predica sobre las otras leyes de la física. En la teoría de Newton tanto el tiempo como la aceleración son absolutos e invariantes, es decir, valen lo mismo en todos los sistemas: $t=t'$; $a=a'$. Einstein, en su teoría de la relatividad, no reemplaza estos dos absolutos por dos relativos sino por dos absolutos distintos: la velocidad de la luz y la covarianza de las leyes.

En un lenguaje matemático, lo anterior tiene como consecuencia que, entre sistemas de referencia a velocidad uniforme, las transformaciones que se cumplen son las de Lorenz y no las de Galileo.

Transformaciones de Galileo: $t' = t$, $x' = x - vt$, $y' = y$, $z' = z$.

Transformaciones de Lorenz: $t' = \gamma (t - vx/c^2)$, $x' = \gamma (x - vt)$, $y' = y$, $z' = z$.

Donde c es la velocidad de la luz y $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$.

Tres cuestiones son dignas de realce. La primera, que las transformaciones de Lorentz son simétricas tanto para el espacio como para el tiempo. La segunda, que cuando c tiende a infinito, γ tiende a uno y se recuperan las transformaciones de Galileo, lo cual muestra que la mecánica clásica describía un universo sin cotas en la velocidad. Y tercero, que cuando v es mucho menor que c , γ se aproxima a uno y nuevamente se recuperan las transformaciones de Galileo, lo cual muestra que la mecánica clásica sirve como buena aproximación en el régimen de velocidades bajas respecto de la luz.

Las transformaciones de Lorentz conllevan implicaciones asombrosas con respecto a la medición del espacio y tiempo en la mecánica newtoniana. Conforme la velocidad del sistema primado se acerca a la constante c , desde el sistema original las mediciones del tiempo se dilatan y las del espacio se contraen.

Pero si en la relatividad especial tanto las mediciones del espacio ($dr^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$) como las del tiempo (dt^2) son magnitudes relativas a los sistemas de referencia, la magnitud en cambio que no es relativa a los sistemas de referencia, es decir que se mantiene invariante, es el intervalo espacio-temporal:

$$ds^2 = -dt^2 + dr^2 = -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

Esto significa que para dar cuenta de los fenómenos físicos las nociones de tiempo y espacio no pueden ser independientes sino que deben quedar hilvanadas hasta cierto punto en un espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Ahora bien, la fusión del espacio y del tiempo en una nueva entidad espacio-tiempo no implica mayor cambio en el debate entre absolutistas contra relacionistas en el sentido de que la discusión simplemente se ve trasladada, de manera que ahora refiera al espacio-tiempo.

De todos los aspectos a señalar quizá el más importante es el referente a la estructura temporal. El conjunto de eventos que describe una trayectoria en el espacio-tiempo recibe el nombre de línea de mundo. Las líneas de mundo de la luz corresponden a intervalos nulos, $ds^2=0$ y designan gráficamente un cono. Los eventos que caen dentro del cono de luz ($ds^2<0$) pueden estar causalmente conectados. Los eventos que caen fuera del cono de luz ($ds^2>0$) están necesariamente causalmente desconectados ya que su conexión implicaría velocidades superiores a la de la luz. El vértice del cono define el instante presente, simultáneo a sí mismo y nada más. El pasado y el futuro yacen dentro y sobre el cono de luz. Por fuera del cono queda una región desconectada causalmente, que no es presente, pasado ni futuro.

5.2 El espacio-tiempo de Minkowski [↑](#)

La exposición de la relatividad especial realizada en la sección anterior, difiere en gran medida de su presentación histórica de 1905. Una razón de ello es que los términos 'intervalo tipo nulo', 'línea de mundo', entre otros, son propios de la influyente versión que Minkowski hiciera pública en 1908.

La lectura de 1908 de Minkowski, con su tesis central de que el espacio y el tiempo por separado son insuficientes para una descripción apropiada de los resultados experimentales de la física, fue altamente polémica. Se puede decir que mientras el público matemático la recibió de buen grado, el público físico no tanto. Einstein mismo la miró inicialmente con recelo. Sin embargo esta apreciación negativa habría de cambiar. Luego de un tiempo Einstein la aceptó totalmente, pues le resultó esencial para poder llevar a cabo su teoría general de la relatividad. Cabe decir que al día de hoy, con un mínimo de cambios de notación, el desarrollo de Minkowski conforma las ideas base con las que se enseña la relatividad.

El programa de 1900 de Hilbert fue un parteaguas en la historia. Su sexto punto, sobre la axiomatización de la física, puso de relieve la pregunta sobre la relación entre la física y sus fundamentos geométricos. Por una parte, podría tratarse de instancias divorciadas; por otra parte, la geometría podría en alguna manera estar condicionada por los fenómenos físicos. Este es el contexto donde se sitúa la ponencia de 1908 de Minkowski. Dicho trabajo no hacía explícito el nombre de Poincaré en ningún momento, lo cual resultó al menos curioso para varios de los asistentes, pero era claro que en parte estaba dirigida hacia su persona. Poincaré había conseguido varios de los resultados cruciales de la relatividad, por ejemplo en 1904 demostró que las transformaciones de Lorentz constituyen un grupo de

transformaciones en cuatro dimensiones, pero sin embargo no había dado una envolvente conceptual satisfactoria. En especial Poincaré había dado poca importancia al surgimiento de las geometrías no euclidianas pues para él, en última instancia, dado su convencionalismo, la elección de una geometría resultaba una cuestión de mera conveniencia. Incluso apostaba que la geometría euclidiana sobreviviría para siempre por convención (Petkov 2010).

En las primeras secciones de su artículo Minkowski pretende mostrar cómo a partir de la mecánica establecida se llega por una línea de pensamiento netamente matemática a la visión del espacio-tiempo. Minkowski da el crédito a Lorenz por el hallazgo de sus transformaciones, sin embargo repara en que fue Einstein quien entendió que esto implica un verdadero cambio en nuestro entendimiento del tiempo. Sin embargo, sostiene que ni Lorenz ni Einstein fueron capaces de dar el siguiente paso, que era reconocer las implicaciones sobre el concepto de espacio. De la misma manera en que cada sistema tiene su propio tiempo, cada sistema tiene también su propio espacio. Así habría infinitos espacios de idéntico modo a como hay infinitos planos en tres dimensiones. Aunque Minkowski, con una retórica implacable, cierra con la sentencia de que el espacio geométrico de tres dimensiones es un capítulo de la física de cuatro dimensiones, muchos autores más bien se pronunciarían por la afirmación de que la física de tres dimensiones es un capítulo de la geometría de cuatro dimensiones. Lo cual es una muestra de que si bien hubo un consenso “temprano” respecto del significado matemático del espacio-tiempo de Minkowski, todavía no se cuenta con un consenso respecto de su significado epistemológico (Čapek 1976a, XLV).

El argumento central de Minkowski se puede parafrasear brevemente de la manera siguiente. El postulado de la relatividad debe ser reemplazado por el postulado del mundo absoluto (o del mundo). Esto es, bajo la noción de un espacio-tiempo se sigue que las cuatro coordenadas reciben idéntico trato. De este postulado también se sigue la equivalencia entre todos los observadores inerciales y una explicación geométrica de las transformaciones de Lorenz. Así Minkowski quiere argumentar que no solo el espacio-tiempo es la expresión natural de la relatividad sino que esta expresión no entra en una cuestión de preferencias, sino que la correcta descripción de los fenómenos físicos nos obliga a adquirirla. Si los observadores comparten el mismo espacio de tres dimensiones, pueden por la propia definición de este apelar a una simultaneidad absoluta, lo cual es contrario a lo que la relatividad demuestra. Así aunque queda cierta libertad para hablar de espacio y tiempo como proyecciones de un espacio-tiempo, es este último el que la naturaleza impone.

Son una pléyade los autores que se han adscrito, primero a la tesis de la espacialización del tiempo (que la naturaleza no diferencia entre espacio y tiempo), y en segunda instancia, a la tesis de que la teoría de la relatividad confirma la espacialización del tiempo. En su momento Meyerson (1925, 97-110) dio una buena explicación que muestra que la compulsión a suscribir ambas tesis es propia de la ciencia. El argumento es sencillo. El cambio está necesariamente ligado al tiempo y no así al espacio, sin embargo la mente inquisitiva no está dispuesta a considerar que el cambio sea producto del mero paso del tiempo y por ello busca las causas del cambio dentro del tiempo, desde afuera del tiempo. La relatividad solo presentaría una instancia donde la presión que ejerce este tipo de explicación ha llegado tan lejos que la precipita hacia una asimilación total entre espacio y tiempo que nunca habrá de llegar.

Algunos de los autores que hacen de la relatividad una instancia que confirma la geometrización del tiempo, se sirven para ello de la relativización de la simultaneidad. Afirman que dado que los eventos que un observador ve como simultáneos para otro observador pueden no serlo, el universo no es distinto del pleno sin devenir de Parménides. Pero el argumento expuesto así no puede realizar el trabajo que de él se espera ya que la relatividad no relativiza la simultaneidad sino que la niega. Los únicos eventos conectados causalmente con un evento presente son aquellos que yacen dentro de su cono de luz pasado y eventualmente los que figuren dentro del cono de luz futuro. Más aún, la relatividad obliga el siguiente resultado: si un evento A es previo a B, y A y B están causalmente conectados, entonces A es previo a B en todo sistema de referencia. Siguiendo resultados semejantes, autores afines a la tesis de la realidad del tiempo (que aun si fuera ilusión, el devenir no puede ser descartado), han afirmado que más que una geometrización del tiempo, la relatividad da cabida a una dinamización del espacio. En última instancia, la relatividad no solo no confirmaría la tesis de la irrealidad del tiempo sino que la contravendría (Čapek 1976b).

Hoy día el así llamado enfoque dinámico discute algo distinto. En lugar de sostener que las leyes dinámicas toman su forma dadas las constricciones que impone la estructura del espacio-tiempo, el enfoque dinámico (DA) sostiene que la dirección de la explicación debe llevar el sentido inverso. El espacio-tiempo toma su forma (e.g. que la estructura de la geometría sea minkowskiana) para satisfacer las leyes de movimiento (e.g. las leyes covariantes de Lorenz) (Brown

2005).

5.3 La relatividad general [↑](#)

Einstein tardó varios años en poder formular una teoría de la relatividad no restringida a los sistemas de referencia inerciales. Clave para ello fue reparar en la observación de apariencia trivial del hecho ya establecido por Galileo: todos los objetos caen de la misma manera. Así, el principio de equivalencia declara que los sistemas inerciales y los sistemas en caída libre son indistinguibles. Desde otro punto de vista, el principio de equivalencia hace coincidir la masa inercial con la masa gravitacional, esto es, la cantidad que aparece en la segunda ley de Newton con la cantidad que aparece en la ley de la gravitación universal. De esta manera el principio de equivalencia muestra que la idea de sistema privilegiado de referencia no tiene un fundamento físico, pues todo sistema inercial podría resultar no ser más que un sistema en caída libre y, complementariamente, todo sistema en aceleración uniforme podría ser un sistema en reposo dentro de un campo gravitatorio uniforme.

Si la relatividad especial suponía el espacio tiempo plano de Minkowski, la relatividad general debía dar cabida a espacio-tiempos no-euclidianos con una métrica general: $ds^2 = g_{\mu\nu} x^\mu x^\nu$, donde $g_{\mu\nu}$ es el tensor métrico que expresa la curvatura del espacio-tiempo en cada uno de sus puntos. Si el principio de relatividad especial hacía equivalentes a todos los sistemas inerciales, el principio de relatividad general debía hacer equivalentes a todos los sistemas, inerciales y no inerciales. Fue entonces que Einstein, con ayuda del matemático Grossman, escribió sus nuevas ecuaciones en el lenguaje invariante de los tensores, pues estos objetos matemáticos no cambian de forma bajo cambios de coordenadas. Einstein estableció como postulado de la relatividad no restringida el principio general de covariancia que, salvando los aspectos técnicos, establece que la estructura geométrica del espacio-tiempo no depende del conjunto de coordenadas que se haya elegido. Esto trae la inmediata ventaja de que el estatus de estado de movimiento de un cuerpo nunca resultará ser un mero artificio provocado por la elección arbitraria de cierto sistema de referencia para describirlo.

En lenguaje matemático las ideas anteriores se expresan mediante las ecuaciones de campo de Einstein:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G c^{-4} T_{\mu\nu}.$$

A grandes rasgos, mientras el lado izquierdo incluye al tensor métrico y contiene la información sobre la geometría del espacio-tiempo, el lado derecho representa la distribución de materia. En las famosas palabras de Wheeler (1990): el espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse, la materia le dice al espacio-tiempo cómo curvarse.

El caso $T_{\mu\nu} = 0$ implica $G_{\mu\nu} = 0$, pero contrario al principio de Mach, esto último no significa ausencia de solución de las ecuaciones, ni tampoco que la solución sea única, ni siquiera implica necesariamente que la solución deba ser una geometría plana. Más aún, da pie a la predicción recién confirmada a un siglo de ser primeramente enunciada, de que el campo gravitacional, en analogía a la luz en el electromagnetismo, se propaga en forma de ondas gravitacionales. Esto significa no solo que aún en ausencia de fuentes materiales el campo gravitacional no se anula, sino que además la gravedad es fuente de más gravedad y por ello que la noción de un vacío absoluto es imposible.

5.4 El argumento del hoyo [↑](#)

Como se mencionó en la sección anterior, tras su teoría de la relatividad de 1905, Einstein salió en pos de una teoría no restringida a los sistemas de referencia inerciales. Sin embargo, tuvo serios problemas para dar a las leyes de su teoría una forma que resultara invariante bajo cualquier transformación diferenciable de coordenadas, por arbitraria que esta fuera. Sin recurrir a tecnicismos basta con agregar que esto recibe el nombre de covariancia general y nace del convencimiento de que las coordenadas son meras etiquetas sin ninguna realidad física. La idea que está detrás es que las propiedades del sistema que varían bajo cambios de coordenadas resultan espurias físicamente hablando. Las propiedades del sistema que no varían bajo un cambio de coordenadas, en cambio, pueden tener una realidad física. Así, todos los observables, las propiedades físicas de un sistema que pueden ser determinadas, se pueden reducir a

los invariantes del sistema.

No obstante, para 1913 Einstein se convenció de que ninguna teoría podría ser escrita bajo la forma de la covariancia general y quiso dar un argumento general de ello. El argumento recibió el nombre de “argumento del agujero”, que, sin reparar en los detalles técnicos, puede ser parafraseado de la siguiente forma. Cierta distribución de materia llena un espacio-tiempo salvo una región que se mantiene vacía, el agujero. Dadas estas condiciones es factible encontrar una primera solución de la geometría del espacio-tiempo. Ahora bien, si se realiza un difeomorfismo (un mapeo suave e invertible) tal que fuera del agujero y en el borde todo se mantenga igual pero dentro cambie, se obtiene una nueva solución. En consecuencia la distribución de materia no basta para determinar la geometría dentro del agujero. Como la teoría no ofrece soluciones únicas queda indeterminada.

Dos años tuvieron que pasar hasta que Einstein se convenciera de que el argumento del hoyo no representaba una afrenta insuperable a la covariancia general. La solución reposaba en considerar que las múltiples soluciones posibles debían ser físicamente equivalentes, es decir, descripciones diferentes de lo mismo. La forma de la maniobra es propia de Leibniz. Se trata de una aplicación del principio de identidad de los indiscernibles.

Muchos comentaristas (Einstein incluido) dieron la impresión de que el argumento del agujero no conllevaba mayor trasfondo. Sin embargo sería un error minimizar la cuestión y suponer que se trataba de un simple problema de coordenadas. Lo que estaba en juego era la realidad misma del espacio-tiempo con independencia de su métrica, esto es, lo que se denomina variedad. Justo por ello el argumento ha sido retomado y puesto al servicio del relacionismo, como se verá a continuación.

El argumento contra la creencia de que el espacio-tiempo existe en sí mismo (Earman 1989, Norton 2016) toma la forma de los argumentos empleados por Leibniz en su polémica con Clarke. Según Leibniz, un universo antes y después de ser girado 180 grados o reflejado especularmente de manera que sus ‘ocazos’ sean ahora sus ‘auroras’, es indistinguible y por lo tanto es el mismo. De la misma manera, en la moderna controversia, antes y después de una transformación suave, la distribución del campo métrico es indiscernible y por lo tanto es la misma.

Puesto que la transformación preserva los invariantes, resistir la equivalencia de las transformaciones implica aseverar que existe una diferencia aun cuando es de hecho inobservable. Más aún, implica aseverar que la relatividad general (y cualquier otra teoría con covariancia general) no es determinista. Que una teoría resulte indeterminista no es mayor argumento para desecharla; el problema en este caso es que el indeterminismo es producto de una interpretación particular y por lo tanto la interpretación que da realidad a la variedad debe quedar en entredicho. Al momento que desechemos la suposición de que los puntos del espacio-tiempo tienen una existencia propia, se acepta la equivalencia entre las transformaciones, por lo que la teoría instantáneamente deja de ser necesariamente indeterminista y el estatus de su determinismo vuelve a ser como el de toda teoría susceptible de investigación caso por caso.

La conclusión parece ser entonces que se debe dejar atrás la creencia en la existencia en sí misma de los puntos del espacio-tiempo, esto es, la creencia en que la variedad de eventos tiene existencia independientemente de los objetos y procesos que la pueblan.

La afirmación anterior luce bastante concluyente y sin embargo es posible hacerla mermar. Lo que le resta contundencia es que, por el propio formalismo implicado, todo espacio-tiempo debe contar con una métrica. Así, por principio estábamos imposibilitados de pensar la variedad en sí misma. Una argumentación más interesante sería la que lograra cuestionar la existencia de la variedad estructurada con el tensor métrico. Lo fascinante del tensor métrico es que no es una entidad que puede ser pensada puramente como espacio-tiempo ni tampoco meramente como un objeto material. Por una parte, el tensor métrico representa la geometría del espacio-tiempo; por otra parte, representa el campo gravitatorio y por lo tanto conlleva energía. No es difícil sugerir que este estado híbrido evoca, como un eco lejano, los espacios más sustanciosos o absolutos del pasado.

A manera de conclusión. El descubrimiento del principio de equivalencia en 1907 y el principio de Mach hicieron pensar a Einstein que la teoría de la relatividad general terminaría de interpretar todo movimiento como relativo. Las aceleraciones uniformes dejarían de ser absolutas y devendrían equivalentes al reposo en presencia de un campo gravitatorio constante y uniforme. Asimismo, las rotaciones y aceleraciones no uniformes serían equivalentes al

reposo en un campo gravitatorio variable. Pero la relatividad general no fue exitosa del todo en esta empresa. La estructura del espacio-tiempo no desaparece si el universo se vacía, más aún es posible colocar en dicho universo vacío un objeto y distinguir si rota o no. Pero la existencia de soluciones no triviales de vacío tampoco presenta un triunfo para la visión del espacio y tiempo como absolutos, pues la estructura espacio-temporal que subyace no es fija ni independiente del contenido material del universo. En otras palabras, la relatividad general muestra que la distribución de materia del resto del universo influye sobre los efectos de inercia local en un cuerpo y por lo tanto recompensa los esfuerzos por entender el espacio, el tiempo y el movimiento como meras relaciones. Pero por otra parte, la teoría general de la relatividad da al espacio-tiempo mayor presencia, o si se quiere, mayor agencia, y por lo tanto pareciera encomiar el espíritu absolutista presente en los esfuerzos por entender el espacio-tiempo más allá de las relaciones de los cuerpos materiales. En breve, defraudando las esperanzas de más de uno, la relatividad general no significó el fin del debate entre absolutistas y relacionistas sino que significó la apertura de un nuevo capítulo (ver Hugget y Hofer 2016).

6 Bibliografía [↑](#)

Alexander, H. G. ed. 1984. *The Leibniz-Clarke Correspondence*. New York: Barnes and Noble.

Alexander, P. 1984/1985. "Incongruent Counterparts and Absolute Space". *Proceedings of the Aristotelian Society* 85: 1-21.

Allison, H. 1983. *Kant's Transcendental Idealism*. New Haven: Yale University Press.

Aristóteles. 1996. *Acerca del cielo; Meteorológicas*. Biblioteca Clásica Gredos. Traducido por Miguel Candel. Madrid: Gredos.

Barbour, J. 1977. "Gravity and Inertia in a Machian Framework". *Nuovo Cimento* 38B: 1-27.

Barbour, J, y B. Bertotti. 1982. "Mach's Principle and the Structure of Dynamical Theories". *Proceedings of the Royal Society (London)* 382: 295-306.

Barbour, J. y H. Pfister, eds. 1995. *Mach's Principle. From Newton's Bucket to Quantum Gravity*. Basilea: Birkhäuser.

Benítez, L. 2000. *Espacio e infinito desde la perspectiva de la modernidad*. México, D.F.: Ediciones Cruz.

Berkeley, G. 2013. *Obra completa*. Biblioteca de Grandes Pensadores. Editado por Carlos Mellizo. Madrid: Editorial Gredos.

Brown, H. R. 2005. *Physical Relativity: Space-Time Structure from a Dynamical Perspective*. Oxford: Oxford University Press.

Canales, J. 2015. *The physicist and the philosopher: Einstein, Bergson, and the debate that changed our understanding of time*. Princeton: Princeton University Press.

Čapek, M. 1976a. "Introduction". En *The Concepts of Space and Time. Their Structure and Their Development*, editado por Milič Čapek. Netherlands: Springer.

Čapek, M. 1976b. "The inclusion of becoming in the physical world". En *The Concepts of Space and Time. Their Structure and Their Development*, editado por Milič Čapek, 501-522. Netherlands: Springer.

Cassirer, E., 1979. *El problema del conocimiento en la filosofía y en la ciencia modernas*. México: FCE, 4 vols.

Cornford, F. M. 1976 [1936]. "The invention of space". En *The Concepts of Space and Time. Their Structure and Their Development*, editado por Milič Čapek, 3-16. Netherlands: Springer.

- Descartes, R. 2011. *Obra completa*. Editado por Cirilo Flórez Miguel. Biblioteca de Grandes Pensadores. Madrid: Editorial Gredos.
- DiSalle, Robert. 2016. "Space and Time: Inertial Frames", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2016 Edition), Edward N. Zalta (ed.), forthcoming URL = <http://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/spacetime-iframes/>.
- Duhem, P. 1956. *Le système du monde*. Paris: Hermann, 10 vols.
- Einstein, A. 1905. "On the Electrodynamics of Moving Bodies". Reprinted in English translation in Perrett and Jeffrey 1952.
- Einstein, A. 1916. "The Foundation of the General Theory of Relativity". Reimpreso en version inglesa en Perrett y Jeffrey 1952.
- Einstein, A. 1920. "Ether and the Theory of Relativity". In *Sidelights on Relativity*. New York: Dover, 1983.
- Einstein, A. 1934. *The World as I see It*. New York: Covici, Friede.
- Einstein, A. 1955. *The Meaning of Relativity*. 5ta ed. Princeton: Princeton University Press.
- Einstein, A. 1961. *Relativity: The Special and the General Theory*. New York: Bonanza Books.
- Earman, J. 1989. *World Enough and Spacetime: Absolute and Relational Theories of Motion*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Earman, J. 1970. "Who's Afraid of Absolute Space?". *Australasian Journal of Philosophy* 48: 287-319.
- Glick, T. F., Livesey, S., y Wallis, F. 2014. *Medieval Science, Technology, and Medicine: An Encyclopedia*, pp.232-240. New York: Routledge.
- Herrera, A. 1997. "El infinito en Leibniz: Nuevos ensayos II, 17". En *El Problema del Infinito: Filosofía y Matemáticas*, compilado por Laura Benitez y Jose Antonio Robles. Universidad Nacional Autónoma De México.
- Huggett, Nick y Hofer, Carl. 2016. "Absolute and Relational Theories of Space and Motion". En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2016 Edition), editado por Edward N. Zalta, forthcoming URL = <http://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/spacetime-theories/>.
- Janiak, Andrew. 2016. "Kant's Views on Space and Time". En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2016 Edition), editado por Edward N. Zalta, forthcoming URL = <http://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/kant-spacetime/>.
- Kant, I. 1768. "Concerning the Ultimate Foundation of the Differentiation of Regions in Space". En *Kant: Selected Pre-Critical Writings*, editado y traducido al inglés por G. B. Kerferd y D. E. Walford. New York: Barnes and Noble, 1968.
- Kant, I. 1770. "On the Form and Principles of the Sensible and Intelligible World". En *Kant's Inaugural Dissertation and Early Writings on Space*, traducido al inglés por J. Handyside. Westport, Conn.: Hyperion Press, 1979.
- Kant, I. 1781. *Critique of Pure Reason*. Traducido al inglés por N. Kemp Smith. New York: St. Martin's Press, 1965.
- Kant, I. 1783. *Prolegomena to Any Future Metaphysics*. Traducido al inglés por J. W. Ellington. Indianapolis: Hackett, 1977.
- Kant, I. 1786. *Metaphysical Foundations of Natural Science*. Traducido al inglés por L. Ellington. Indianapolis: Bobbs Merrill, 1970.
- Kirk, G. S. y Raven, J. E. 1974. *Los filósofos presocráticos, Historia crítica con selección de textos* (1ª edición). Madrid: Editorial Gredos.

- Koyré, A. 1986. *Del mundo cerrado al universo infinito*. Siglo XXI, México.
- Leibniz, W. G., 2011. *Obra completa*. Biblioteca de Grandes Pensadores. Editado por Javier Echeverría. Madrid: Editorial Gredos.
- Mach, Ernst. 1942. *Science of Mechanics*, pp. 280-288. Chicago: The Open Court.
- Martínez, J. R., 1997. "El infinito y la geometría del movimiento según Oresme". En *El Problema del Infinito: Filosofía y Matemáticas*, compilado por Laura Benitez y Jose Antonio Robles. Universidad Nacional Autónoma De México.
- Maxwell, Clerk. 1879. *From Matter and Motion*. Dover, New York, n.d., 1925.
- McDonough, Jeffrey K. 2014. "Leibniz's Philosophy of Physics". En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2014 Edition), editado por Edward N. Zalta. URL = <http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/leibniz-physics/>.
- Meyerson, E. 1925. *La deduction relativiste*. Paris: Payot.
- Minkowski, H. 1908. "Space and time". En *The Principle of Relativity*. Por A. Einstein, H. A. Lorentz, H. Minkowski, y H. Weyl (1952), traducido por W. Perrett y G.B. Jeffery, 75-91. New York: Dover Books.
- Neumann, C. 1976. "On the necessity of the absolute frame of reference". En *The Concepts of Space and Time. Their Structure and Their Development*, editado por Milič Čapek, 125-127. Netherlands: Springer.
- Newton, I., 1726 [1972], *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, third edition, with variant readings (in two volumes)*. Editado por Alexandre Koyré, I. Bernard Cohen, y Anne Whitman. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Petkov, Vesselin, ed. 2010. *Minkowski Spacetime: A Hundred Years Later*. London - New York: Springer.
- Planck, M. 2013. "Overview of products and scientific results". Submitted to *Astronomy & Astrophysics*. arXiv:1303.5062.
- Platón. 1992/2002. *Diálogos. Obra completa. Volumen VI: Filebo. Timeo. Critias*. Traducción, introducción y notas a cargo de M^a Ángeles Durán (Filebo) y Francisco Lisi (Timeo y Critias). Traducción revisada por Mercedes López Salvá (Filebo) y (Timeo) y Carlos García Gual (Critias). Biblioteca Clásica Gredos 160. 1^a edición, 2^a reimpresión. Madrid: Editorial Gredos.
- Pojman, Paul. 2011. "Ernst Mach". En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2011 Edition), editado por Edward N. Zalta. URL = <http://plato.stanford.edu/archives/win2011/entries/ernst-mach/>.
- Reichenbach, H. 1924. *The Theory of Motion according to Newton, Leibniz, and Huyghens*. Reimpreso en *Modern Philosophy of Science*, editado y traducido por M. Reichenbach. London: Routledge and Kegan Paul, 1959.
- Robles, J. A. 1997. "George Berkeley: sobre la inmensidad de Dios y la divisibilidad al infinito". En *El Problema del Infinito: Filosofía y Matemáticas*, compilado por Laura Benitez y Jose Antonio Robles. , Universidad Nacional Autónoma De México.
- Sklar, L. 1974. "Incongruous Counterparts, Intrinsic Features, and the Substantivity of Space". *Journal of Philosophy* 71 :227-290.
- Sklar, L. 1976. *Space, Time, and Space-Time*. Berkeley: University of California Press.
- Slowik, Edward. 2014. "Descartes' Physics". En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2014 Edition), editado por Edward N. Zalta. URL = <http://plato.stanford.edu/archives/sum2014/entries/descartes-physics/>.
- Thomson, J. 1884. "On the law of inertia; the principle of chronometry; and the principle of absolute clinural rest, and of absolute rotation". *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* 12: 568-78.

Torretti, Roberto, 1967. *Manuel Kant. Estudio sobre los fundamentos de la filosofía crítica*. Universidad de Chile.

Velázquez, A. 1997. "Eternidad, duración, infinito y mundo en Nicole de Oresme". En *El Problema del Infinito: Filosofía y Matemáticas*, compilado por Laura Benitez y Jose Antonio Robles. , Universidad Nacional Autónoma De México.

Wheeler, J. A. 1990. *A journey into gravity and spacetime*. Distribuido por W. H. Freeman, NewYork: Scientific American Library.

Zeyl, Donald. 2014. "Plato's Timaeus". En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2014 Edition), editado por Edward N. Zalta. URL = <http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/plato-timaeus/>.

7 Cómo Citar [↑](#)

Heiblum, Alan. 2017. "Física del espacio-tiempo". En *Diccionario Interdisciplinar Austral*, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck. URL=http://dia.austral.edu.ar/Fisica_del_espacio-tiempo

8 Derechos de autor [↑](#)

DERECHOS RESERVADOS Diccionario Interdisciplinar Austral © Instituto de Filosofía - Universidad Austral - Claudia E. Vanney - 2017.

ISSN: 2524-941X