

DE LA MECÁNICA NEWTONIANA A LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD: CONSIDERACIONES ONTOLÓGICAS ACERCA DEL ESPACIO Y EL TIEMPO

Cristian López / Universidad de Buenos Aires

I. Introducción

¿Qué es el espacio, qué es el tiempo? ¿Qué estructura tienen? ¿Cuáles son sus naturalezas? Preguntas tales subyacen a una problemática que define un campo de reflexión filosófica: la ontología del espacio y del tiempo. La tesis que sostendremos en el presente trabajo y que intentaremos fundamentar es que los presupuestos ontológicos en torno a *qué* entendemos por espacio y tiempo, *cómo* concebamos su estructura y naturalezas, están a la base de la construcción de nuestras teorías físicas. Pero estos no sólo han actuado como sustrato ontológico para su conformación y desarrollo sino también como obstáculo o límite. Expondremos nuestro punto de vista a lo largo de tres apartados:

1. En el primero desarrollaremos una ontología del espacio y del tiempo de carácter **absoluto** como fundamento de la mecánica newtoniana,
2. El segundo apartado estará dedicado exclusivamente a los orígenes y desarrollo de la Teoría Especial de la Relatividad (De ahora en más: TER), teoría con la cual se opera un cambio fundamental en la física moderna y en la manera clásica de entender el espacio y el tiempo,
3. Destinaremos el tercer apartado a cómo considerar ontológicamente al *continuum* espacio-tiempo relativista y qué función cumple al interior de TER. Además, discutiremos la tesis de Reichenbach que sostiene que TER es una refutación al *absolutismo* (Earman, 1989)

II. Espacio y tiempo newtonianos

Los fundamentos de la mecánica clásica newtoniana se encuentran en su enfoque **absoluto** del espacio y el tiempo. Con este enfoque nos referimos a concebir al espacio y al tiempo como

entidades que subsisten por sí mismas y separadas de los objetos. En esta línea, Alexandre Koyré dice: “*la filosofía natural de Newton se sostiene o se derrumba con los conceptos de tiempo y espacios absolutos*” (Koyré 1999: 153).

En julio de 1687 Newton publica su *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, ofreciendo una sistematización del mundo físico y constituyendo así las bases de la exitosa mecánica clásica. Pero no es sino en el *Scholium* donde Newton expone sus ideas acerca del espacio y el tiempo absoluto, distinguiéndolos de un espacio relativo y un tiempo relativo. Sus palabras en el *Scholium* acerca del espacio nos dicen lo siguiente:

El espacio absoluto, tomado en su naturaleza, sin relación a nada externo, permanece siempre similar e inmóvil. El espacio relativo es alguna dimensión o medida móvil del anterior que nuestros sentidos determinan por su posición con respecto a los cuerpos y que el vulgo confunde con el espacio inmóvil¹

Sobre el tiempo,

El tiempo absoluto, verdadero y matemático, por sí mismo y por su propia naturaleza, fluye uniformemente sin referencia a nada externo, y se dice con otro nombre duración²

Centrémonos en el espacio³. Este es dotado de una existencia separada e independiente de otras entidades: es una suerte de receptáculo homogéneo e infinito en el cual se ubican y se mueven los cuerpos. Como Newton destaca, es una entidad que permanece absolutamente inmóvil e inmaterial. Pero más aún, el espacio es una entidad *verdadera* y *matemática*. Sobre esta base ontológica se construye la mecánica clásica y con ella las leyes que regirán el movimiento de los cuerpos.

Definir el espacio y el tiempo como entidades absolutas no es una hipótesis menor sino que cumplirá un papel esencial para definir las leyes del movimiento de los cuerpos. Análogamente como se considera que existen un espacio y un tiempo verdaderos, existen

¹Newton, I. (1993) *Principios matemáticos de filosofía natural*. Barcelona: Ed. Altaya (Version original de la primera edición 1687), p. 33

²Newton, I. (1993) *Principios matemáticos de filosofía natural*. Barcelona: Ed. Altaya (Version original de la primera edición 1687), p. 32

³Un razonamiento análogo puede utilizarse para considerar al tiempo absoluto. Para no redundar, elegimos uno.

también *movimientos aparentes* (relativos) y *movimientos verdaderos* (absolutos). Y la piedra de toque para distinguirlos es en relación con el espacio absoluto. Newton define al movimiento absoluto como la traslación de un cuerpo de un punto en el espacio absoluto a otro punto del espacio absoluto⁴; naturalmente nosotros sólo percibimos el movimiento relativo, el movimiento absoluto es una inferencia que derivamos a partir de experimentos. Es decir, el espacio absoluto funciona como criterio objetivo y único para describir la realidad en términos de movimientos verdaderos. Pero, más aún, el espacio absoluto es el criterio que nos permite distinguir de manera unívoca sistemas inerciales de sistemas no inerciales. Ahondemos más en esto:

Definimos un sistema inercial -en términos newtonianos- como un sistema de referencia que permanece en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme en relación al espacio absoluto. Ya desde Galileo conocemos el “*principio de relatividad restringido o galileano*” según el cual, si S es un sistema inercial, cualquier otro sistema S' dotado de movimiento rectilíneo y uniforme con respecto a S también es un sistema inercial, y las leyes de la mecánica permanecen invariantes si se expresan en un sistema de referencia inercial cualquiera. El espacio absoluto newtoniano cumple una función fundamental en la primera ley del movimiento de la mecánica clásica (la ley de inercia⁵), ya que nos permite definir y distinguir sistemas inerciales de no inerciales. Estos últimos serán aquellos en los cuales aparecen fuerzas no debidas a interacciones entre objetos que, no obstante, producen una variación en el movimiento del objeto, y que suelen denominarse ‘fuerzas ficticias’. Como vemos, los fundamentos del movimiento y de toda la mecánica clásica se encuentran anclados en una hipótesis ontológica de carácter absoluto en torno al espacio.

Es *en* el espacio y *en* el tiempo donde los eventos ocurren, y para su descripción física utilizamos un *sistema de coordenadas* (coordenadas cartesianas). La representación de cualquier evento (*e*) en un espacio y tiempo newtoniano estará dado por $e = \langle q, t \rangle$, donde *q* corresponde a tres coordenadas espaciales expresadas en \mathbb{R} : $\langle x, y, z \rangle$; y *t* es el tiempo (unidimensional). Es fácil describir la estructura del espacio pues esta se corresponde con el espacio euclídeo tridimensional (E^3) el cual es homogéneo, isótropo, infinito y de curvatura nula. La estructura del tiempo newtoniano es aún más sencilla, pues consiste en una recta real unidimensional (E^1).

⁴Newton, I. (1993) *Principios matemáticos de filosofía natural*. Barcelona: Ed. Altaya (Version original de la primera edición 1687), p. 33

⁵ La primera ley del movimiento dicta que todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas impresas sobre él.

Podemos hablar así de eventos localizables en un espacio-tiempo newtoniano. ¿Pero en qué sentido? Espacio y tiempo son entidades separadas que sólo conceptual y matemáticamente pueden considerarse juntas a la hora de describir físicamente a los eventos: lo que existe *realmente* son un espacio y un tiempo separados objetivamente. Dicho sencillamente: el espacio-tiempo newtoniano, que podemos especificar como el producto escalar de $E^3 \cdot E^1$, es una construcción conceptual y matemática.

Dados dos eventos (e_1 y e_2) y esta estructura espaciotemporal, podemos legítimamente preguntarnos acerca de ellos (Sklar, 1977: 57-58):

- (i) ¿ e_1 y e_2 , son simultáneos? En caso negativo, ¿cuán extenso es el intervalo temporal entre *ambos*?
- (ii) ¿ e_1 y e_2 , ocurren en el mismo lugar? Si no, ¿qué distancia separa a los dos eventos?

Las medidas de distancia entre eventos, o decidir la simultaneidad o no entre ellos, es una cuestión objetivamente dirimible y es la misma para todo sistema inercial. Siempre podemos recurrir al espacio absoluto como sistema de referencia privilegiado o a los sistemas inerciales -definidos por él- y a una métrica (es decir, la función que define las distancias entre dos puntos del espacio) sencilla y bien establecida.

III. Orígenes y desarrollo de la relatividad especial

En 1905, Einstein publica “*Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*”. La fecha no solo marca el inicio de un giro en las investigaciones físicas, sino que además es la extensión del certificado de defunción del espacio y el tiempo absolutos. Pero entre 1687 y 1905 hay más de 200 años de investigación y desarrollo en las ciencias físicas. El éxito científico de la mecánica newtoniana fue tal que durante los siglos XVIII y XIX se la tomó como modelo a seguir, de allí que se adoptaran en términos generales las mismas hipótesis en torno al espacio y el tiempo: eran la piedra angular del colosal edificio llamado *mecánica clásica*. En este contexto se originaron y desarrollaron las teorías ondulatorias de la luz y las teorías del campo electromagnético de Faraday, Maxwell y Lorentz. Los antecedentes de Maxwell y Lorentz para la TER son de capital importancia para formar los pilares de la crisis en la que entrará la física hacia fines del siglo. Daremos aquí dos resultados fundamentales:

1. Por un lado, la luz se concibió como una onda electromagnética que se propagaba a través del éter luminífero. Éter que no sólo era el medio de propagación sino que además se supuso que las ecuaciones de Maxwell lo adoptaban como sistema de referencia en reposo absoluto. Como sostiene B. Greene, *“hay una similitud sorprendente entre el éter luminífero y el espacio absoluto de Newton (...) ambos proporcionan una referencia para definir el movimiento”* (Greene 2006, p. 68).
2. Por el otro □en virtud de numerosos experimentos pero fundamentalmente el de Michelson-Morley en 1887□ la velocidad de la luz parecía propagarse en todas direcciones a la misma velocidad invariante.

A veces se considera que TER es una generalización de la mecánica clásica, sin embargo no estamos de acuerdo con este punto de vista y tendemos a considerar que TER es una salida a una aparente situación paradójica en la que la física de principios del siglo XX se hallaba.

La “aparente” paradoja podría esquematizarse de la siguiente manera:

- (i) Indicios teóricos y experimentales en electromagnetismo daban fuerte apoyo para sostener que la velocidad de la luz se propagaba uniformemente en todas direcciones y permanecía invariante para cualquier observador, independientemente de su velocidad.
- (ii) Por el principio de relatividad, las leyes de la física debían ser iguales en cualquier sistema de referencia inercial.
- (iii) Pero debemos referir la velocidad de la luz a un sistema de referencia (S) que consideraremos en reposo, entonces decimos que la velocidad de la luz con respecto a S es c . Pero ahora tomemos un sistema de referencia S' que se mueve rectilínea y uniformemente con respecto a S a velocidad v en el sentido de la onda de luz, ¿cuál será la velocidad de la luz relativo a S'? Según las ecuaciones de la mecánica clásica la velocidad relativa de la onda de luz respecto de S' (v') estará dada por

$$v' = c - v, \text{ donde } v' < c$$

Pero entonces la velocidad de propagación de la luz *varía* según el sistema de referencia que tomemos, es decir, se viola el principio de relatividad y la ley de propagación de la luz. Cuando queremos utilizar el principio de relatividad a la traslación de los cuerpos respecto de la transformación de Galileo se fracasa al considerar fenómenos electromagnéticos. ¿Dónde está el problema? ¿Qué supuestos hay que desechar de la mecánica clásica? TER es la respuesta a estas preguntas y su solución radicaré justamente en no suponer que el espacio y el

tiempo de S y S' son el mismo, *i.e.*, no suponer que el espacio y el tiempo son invariantes, inmutables, sustanciales.

El razonamiento de Einstein parte de una consideración crítica de los supuestos con los cuales razonamos en mecánica clásica y de cierto enfoque en busca de simplicidad: si los experimentos para rastrear el éter y encontrar variaciones en la velocidad de la luz han resultado negativos, entonces el éter no existe y la constancia de la luz debe tomarse como ley de la naturaleza: la velocidad de la luz es constante y está fijada para *cualquier* sistema de referencia; además no se propaga a través de ningún medio sino en el vacío. Y aquí damos con la clave de por qué “teoría especial de la relatividad”: “relatividad” porque extiende el principio de relatividad clásico-galileano a los fenómenos electromagnéticos, pues las leyes de la mecánica clásica no son tan universales como se creía: se restringen sólo al marco de referencia dado por un sistema de coordenadas galileano y no son aplicables a fenómenos electromagnéticos; y “especial” porque sólo considera sistemas de referencia inerciales.

Si la luz se propaga a una velocidad determinada, digamos c , de manera constante en cualquier dirección, ¿qué dirá un observador acerca de la velocidad de la luz si se mueve en la dirección de la onda de luz a $0.6c$? Según la mecánica clásica deberá ver la onda de luz alejándose de él a $0.4c$, ¡pero según la mecánica relativista el observador en movimiento deberá medir la velocidad de la luz alejándose de él a c ! Y esta medición estará de acuerdo con cualquier otro observador que pueda considerarse un sistema inercial.

Para preservar la constancia de la velocidad de la luz necesitamos cambiar por completo la noción newtoniana de un espacio y un tiempo absolutos. Pero no sólo alterar la idea de que son absolutos, sino también la idea de que nos movemos en *un* espacio a través de *un* tiempo. Para la mecánica relativista, toda medida y precisión que hagamos de localización espacial y temporal dependerá del movimiento relativo de los distintos sistemas de referencia, pero más aún, los objetos no se mueven en un espacio a través de un tiempo sino que se mueven a través del espacio-tiempo. Precisemos esto.

Como dijimos, en la física pre-relativista la descripción mecánica de cualquier evento estaba dada por una localización espacial y temporal que adoptaba la forma de una cuatrupla, donde

$$e = [x, y, z, t]$$

Según esto, un evento sucede en un continuo de cuatro dimensiones pero que es objetivamente escindible en un espacio 3-dimensional y un tiempo lineal. Esto es importante porque sólo

considerando el carácter absoluto y separado del espacio y del tiempo tiene sentido pensar que los movimientos en el espacio son independientes y no alteran en nada el “movimiento” en el tiempo. Ahora con las leyes de la mecánica relativista estos principios se derrumban y sólo tiene sentido hablar de eventos que ocurren y se desarrollan en un continuo 4-dimensional de espacio-tiempo que es inseparable.

Arrojando luz sobre el punto, Greene dice: “La relatividad especial dicta una ley (...) para todo movimiento: la velocidad combinada del movimiento de cualquier objeto a través del espacio y su movimiento *a través del tiempo es siempre exactamente igual a la velocidad de la luz*” (Greene, 2006: 75). Este pasaje define, a nuestro criterio, el punto neurálgico de lo que implica ya no moverse en un espacio y un tiempo sino en un *continuum* espacio-tiempo. Todos los objetos se mueven a través del espacio-tiempo a la velocidad de la luz en lo que podríamos considerar un movimiento combinado: Un objeto que consideramos en reposo se mueve totalmente a través del tiempo pero si ese objeto comienza a moverse de un punto al otro “desvía” parte de su movimiento total a un movimiento en el espacio, ralentizando su movimiento en el tiempo. Que los objetos se muevan combinadamente en el espacio-tiempo a la velocidad de la luz no contradice la idea de que solo la luz puede alcanzar tales velocidades, pues la luz se mueve totalmente a velocidad constante en el espacio, no dejando movimiento para moverse en el tiempo. En otras palabras: un movimiento pleno en el espacio implica un movimiento nulo en el tiempo.

Para representar el espacio-tiempo relativista ya no podemos recurrir a un espacio euclídeo tridimensional y a la coordenada temporal unidimensional; la representación más apropiada estará dada por lo que se ha denominado el espacio-tiempo de Minkowski. Formalmente podemos considerarlo como $\mathcal{M} = (\mathbb{M}^4, g)$, donde \mathbb{M}^4 es una variedad 4-dimensional y g es la función métrica dada por el grupo de ecuaciones de Lorentz. El espacio-tiempo de Minkowski difiere radicalmente en estructura métrica respecto del espacio-tiempo de la mecánica newtoniana (que conservaba una métrica euclídea). Aquí no se atenderá a la distancia entre eventos sino al “intervalo” entre ellos (Sklar, 1977, p. 59) La “distancia” $d^2 = x^2 + y^2 + z^2 + t^2$ es siempre no negativa, pero los intervalos $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - t^2$ pueden ser negativos, positivos o nulos. Por ello se suele decir que el espacio-tiempo de Minkowski es una *variedad pseudo-euclídea*. La representación de intervalos puede ofrecerse mediante el diagrama de Minkowski de los conos de luz, donde se especifican el tipo de “intervalo” según la separación entre eventos sea de tipo espacial (*space-like separation*), temporal (*time-like separation*) o de luz (*light-like separation*).

(IMAGEN 1)

El espacio-tiempo de Minkowski toma la velocidad de la luz como límite natural y esto es lo que establece las separaciones de tipo temporal y espacial. La acción causal de un evento O , estará dada por los sucesos en su cono de luz hacia el *futuro absoluto*; y los sucesos causa de O por su cono de luz hacia el pasado absoluto (*time-like separation*). Fuera de los conos de luz se ubican los sucesos con separación de tipo espacial que no tienen conexión causal con el suceso O . La métrica puede establecer valores negativos (*time-like separation*) porque refiere a los sucesos espacio-temporales causa de O .

Lo que se relativiza en TER es la medición del tiempo en diferentes sistemas de referencia en movimiento: cada observador tiene, v.g, su “tiempo propio”, que se define sencillamente como el tiempo que mide un observador mediante un reloj propio; el punto es que dos “tiempos propios” pueden no ser iguales entre sí. Sin embargo podemos calcular la relación entre los dos tiempos propios. Para transformar un sistema de coordenadas a otro debemos recurrir a las llamadas Transformaciones de Lorentz, desplazando a los cálculos galileanos que permanecían anclados en nociones absolutas y sustancialistas de las magnitudes espaciales y temporales. Las transformaciones de Lorentz son sencillamente un conjunto de relaciones que dan cuenta de cómo se vinculan las medidas de un observador con respecto a otro.

Supongamos un suceso O . Tenemos dos observadores o sistemas de referencia tales como S y S' , donde S' se mueve a una velocidad v_x en la dirección x respecto de S . Desde S describiremos la posición espacio-temporal del suceso O como $\square x, y, z, t \square$ y desde S' tomaremos las coordenadas $\square x', y', z', t' \square$. Dados los valores de las coordenadas desde S , ¿cómo hacemos para obtener los valores para las coordenadas de S' ? En mecánica clásica el razonamiento es muy sencillo:

$$x' = x - v_x t \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = t$$

Las ecuaciones revelan algo más que las relaciones matemáticas entre sistemas de coordenadas. Las ecuaciones de Galileo para las relaciones entre observadores -en mecánica clásica- se construyen bajo la hipótesis ontológica de un espacio y un tiempo absolutos, invariantes: para dos observadores cualesquiera sean sus movimientos relativos el tiempo es el mismo: es la misma sustancia que fluye uniformemente para ambos; tampoco se considera la velocidad de la luz como información relevante. Pero en relatividad especial, el paso de un sistema de coordenadas a otro está dado por las transformaciones de Lorentz:

$$x' = \frac{x - v_x t}{\sqrt{1 - \frac{v_x^2}{c^2}}} \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \frac{t - \frac{v_x}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v_x^2}{c^2}}}$$

El tiempo propio t' del observador S' no es el mismo tiempo que el del observador S. Sencillamente: el tiempo que mide un reloj en un sistema inercial es siempre relativo a ese observador. Las ecuaciones revelan a la vez la importancia de la velocidad de la luz como una constante a tener en cuenta a la hora de pasar de un sistema de coordenadas a otros como también el movimiento de los sistemas de referencia. Este grupo de ecuaciones satisfacen el principio de la velocidad de la luz como constante y velocidad límite de la naturaleza.

Aquí encontramos los puntos más antiintuitivos de la teoría: si dos sistemas de referencia inerciales están en movimiento rectilíneo y uniforme uno respecto a otro, encontrarán que las mediciones que realiza un observador en su propio sistema de referencia frente a las que puede realizar otro observador con respecto a los sucesos que ocurren en aquel se contraen longitudinalmente en un factor determinado $\sqrt{1 - \frac{v_x^2}{c^2}}$ y sus tiempos se dilatan en un factor

$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_x^2}{c^2}}}$. Los fenómenos de contracción y dilatación varían, claramente, según el movimiento: por un lado tienden a grandes diferencias cuando las velocidades relativas tienden a la velocidad de la luz ($v \rightarrow c$) por el otro tienden a 0 cuando las velocidades son significativamente menores a c ($v \ll c$) (Holton, 1987: 761-762).

Toda división, al interior del espacio-tiempo relativista, entre espacio y tiempo dependerá, de ahora en más, de los movimientos de los observadores que realicen la división. De aquí que un conjunto de preguntas significativas de la mecánica clásica pierdan total sentido: preguntar acerca de si dos sucesos son simultáneos -en un sentido absoluto- es una pregunta sin sentido.

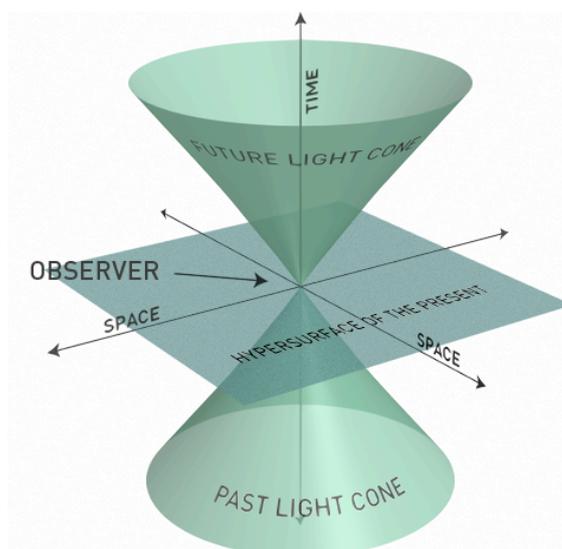
IV. Espacio-tiempo en relatividad especial

La TER insta en el campo de la física un nuevo concepto fundamental: *el espacio-tiempo*. ¿Es acaso, como sostiene Reichenbach, TER una refutación científica a cualquier posición absoluta del espacio y el tiempo (Earman, 1989)? No creemos que así sea pues este continuo espacio-temporal es una entidad nuevamente absoluta que sirve como criterio último para diferenciar el movimiento de sistemas inerciales del movimiento de sistemas no inerciales. El punto crucial es que dos observadores en movimiento siempre coincidirán en determinar si un

objeto dado está acelerando o no, ¿en virtud de qué? En virtud de la forma geométrica que el objeto describa: si el movimiento del objeto es una línea recta se determinará que el objeto no acelera, pero si describe alguna otra trayectoria -v.g. una parábola□ se podrá determinar inequívocamente que se trata de un sistema en movimiento acelerado. En términos globales, el espacio-tiempo es una entidad absoluta dentro de la cual uno puede diferir en especificaciones y magnitudes temporales y espaciales; entidad que, como el espacio y el tiempo de Newton, permanece inalterable por los eventos que en él tienen lugar.

Un punto filosóficamente rescatable al respecto es esta suerte de inversión ontológica que se produce del paso de la mecánica newtoniana a la mecánica relativista: mientras en la primera lo que existía sustancialmente era un espacio y un tiempo absolutos y separados, y que solo mediante una construcción matemática y conceptual podíamos sintetizar en una unidad que podemos llamar el espacio-tiempo newtoniano; en el caso de la relatividad especial el panorama se invierte: lo que realmente tiene entidad absoluta es el continuo espacio-tiempo y que sólo mediante una división analítica podemos separar en espacio y tiempo.

A modo de conclusión, la descripción de un espacio y un tiempo con cualidades ontológicas particulares permiten erigir un sistema de leyes y relaciones matemáticas entre los cuerpos que son regidos por esas leyes. En un espacio y un tiempo absoluto, que los eventos y los diferentes observadores comparten (son el *mismo* tiempo y el *mismo* espacio, homogéneos e invariantes), sólo podrán darse cierto conjunto de leyes que rijan fenómenos y la teoría podrá explicar y predecir sólo una porción de tales fenómenos. Modificar las hipótesis ontológicas en torno al espacio y al tiempo exigen otra teoría física, otra mecánica, otras leyes, otras preguntas: en tales hipótesis las teorías hallan sus cimientos y sus límites.



Bibliografía

- Earman, J. (1989). *World enough and Space-time*. Boston: The MIT Press.
- Einstein, A. (1985). *El significado de la Relatividad*. Barcelona: Editorial Planeta Agostini.
(Versión original 1922)
- Greene, B. (2006). *El tejido del cosmos: Espacio, tiempo y a textura de la realidad*. Barcelona: Drakontos
- Holton, G. (1987). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona: Reverté.
- Huggett, N. and Hofer, C. (2006) *Absolute and Relational Theories of Space and Motion*. Stanford Encyclopedia of Philosophy: <http://plato.stanford.edu/entries/spacetime-theories/>
- Koyré, A (1999). *Del mundo cerrado al universo infinito*. España: Siglo XXI
- Manchak, J. B. (2011). *Global Spacetime Structure*. En el Archivo de filosofía de las ciencias de la Universidad de Pittsburg: <http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/8739>
- Newton, I. (1993). *Principios matemáticos de filosofía natural*. Barcelona: Ed. Altaya (Versión original de la primera edición 1687)
- Rynasiewicz, R. (2004). *Newton's Views on Space, Time, and Motion*. Stanford Encyclopedia of Philosophy: <http://plato.stanford.edu/entries/newton-stm/>
- Sklar, L. (1977). *Space, Time and Spacetime*. California: University of California Press
- van Fraassen, B. C. (1978). *Introducción a la filosofía del tiempo y el espacio*. España: Labor.