



Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia  
Universidad El Bosque  
filciencia@unbosque.edu.co  
ISSN (Versión impresa): 0124-4620  
COLOMBIA

2001  
Virgilio Niño  
EL TIEMPO EN LA MECÁNICA DE NEWTON, LA RELATIVIDAD ESPECIAL Y LA  
MECÁNICA CUÁNTICA  
*Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, año/vol. 2,  
número 4-5  
Universidad El Bosque  
Bogotá, Colombia  
pp. 25-34



# El tiempo en la mecánica de Newton, la relatividad especial y la mecánica cuántica

---

*El tiempo a todos consuela sólo mi  
mal acibara pues si estoy triste se  
para y si soy dichoso vuela*  
Ramón de Campoamor

Virgilio Niño\*

## Introducción

En este trabajo presentamos una discusión acerca del concepto del tiempo en el marco de la mecánica newtoniana, la teoría de la relatividad especial y la mecánica cuántica. No pretendemos ser exhaustivos pues existen diversas interpretaciones en cada uno de estos ámbitos, de tal manera que presentamos únicamente algunos de los conceptos básicos que consideramos útiles para estudiantes de física y en general para aquellos interesados en aspectos filosóficos de la física. Existe una numerosa bibliografía alrededor del concepto del tiempo, desde el punto de vista de la física, de la filosofía y de otras disciplinas, de tal manera que hacer un análisis global se sale completamente del alcance de este artículo. En las referencias se señalan esencialmente libros que seguramente pueden ser de interés del lector.

---

\* Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia.

## **El tiempo en la mecánica de Newton y flechas del tiempo**

El tiempo y el espacio son dimensiones de nuestra experiencia, es decir, hay una gran cantidad de sucesos de nuestra vida cotidiana que hacen referencia a su existencia o al menos a la conveniencia de introducir esos conceptos. Hechos tales como la irreversibilidad de cambios biológicos, la organización de sucesos según un antes, un ahora y un después, las regularidades de la naturaleza que percibimos entre otros, ponen de manifiesto tanto la temporalidad del universo como la nuestra propia.

Si bien en este trabajo nos referimos esencialmente al concepto del tiempo, en ocasiones tenemos que hacer referencia al concepto de espacio pues nuestra experiencia es esencialmente espacio – temporal. La dimensión espacial de nuestra existencia y experiencia se pone de manifiesto, por ejemplo, ante la necesidad de coordinar los movimientos de nuestro cuerpo.

Esta constitución espacio - temporal de nuestra experiencia va más allá de una cultura particular, pues aparece manifestada de diversas formas y a través de diferentes mitos, religiones, a través del arte, etc. Además diferentes disciplinas involucran una concepción espacio – temporal.

Desde el siglo XVII el tiempo y el espacio hacen parte formal del núcleo de la física. Los rangos espacio – temporales con que se trabaja en la física son: el rango espacial desde unos  $10^{-14}$  m hasta unos  $10^{26}$  m (10.000 millones de años luz) y el rango temporal es desde 0 s (desde el big bang) hasta hoy en día, o sea unos (15.000 millones de años).

Algunos autores, por ejemplo Jeans toman el tiempo según cuatro dimensiones:

Tiempo conceptual: del que trata la dinámica, teórica el que se usa abstractamente para estudiar del movimiento, el cual es una abstracción mental.

- Tiempo perceptual: el que está relacionado con la conciencia individual.
- Tiempo físico: el que se usa en física y astronomía, es un tiempo público, los eventos se pueden ordenar en el tiempo y existen diferentes formas para medirlo.
- Tiempo absoluto: el que fluye uniformemente independientemente de cualquier cosa que ocurra en la naturaleza.

Eddington introdujo el concepto de flecha del tiempo para significar un proceso físico o un fenómeno que tiene o parece tener una dirección definida en el tiempo, es decir en aquellos casos en el que el proceso inverso en el tiempo no ocurre o no parece ocurrir.

Penrose introduce siete flechas del tiempo asociadas con las siguientes situaciones:

- El decaimiento de mesones neutrales  $K^0$ , proceso que está gobernado por una ley asimétrica en el tiempo.
- El proceso en la medida de la mecánica cuántica, junto con el “colapso de la función de onda”.
- La segunda ley de la termodinámica.
- Los procesos de radiación por fuentes localizadas.
- El tiempo psicológico.
- La expansión del universo: flecha cosmológica (flecha termodinámica).
- Teoría general de la relatividad: procesos asociados con la formación de huecos negros.

Es interesante señalar que las leyes básicas de la física son simétricas bajo inversión temporal, lo que causa que sea difícil entender la existencia de estas flechas temporales. Si bien en los últimos años se han realizado numerosos esfuerzos en este sentido, en este artículo sólo haremos una aproximación a la segunda de la anterior lista.

El tiempo en la mecánica newtoniana tiene un carácter absoluto, explícitamente en sus Principia Mathematica se lee: “el tiempo

absoluto, verdadero y matemático, en sí mismo y por su propia naturaleza fluye uniformemente sin relación a nada externo y se dice con otro nombre duración. El tiempo relativo, aparente y vulgar es alguna medida sensible y exterior (precisa o desigual) de la duración mediante el movimiento, usada por el vulgo en lugar del verdadero tiempo; hora, día, mes y año son medidas semejantes...”.

Antes de discutir algunos puntos de la anterior concepción es útil señalar que el espacio para Newton tiene las siguientes propiedades: es infinito e inmóvil, homogéneo, isotrópico, euclidiano, posee unidad y es inseparable. No está condicionado por nada externo y sus propiedades dependen de su misma naturaleza, es decir, es absoluto.

El tiempo para Newton es absoluto en el sentido de que su fluir es continuo, regular, (fluye uniformemente) real e incondicionado como el espacio absoluto. Así como el espacio es condición necesaria para que los cuerpos puedan existir, el tiempo absoluto es condición necesaria para que los cuerpos puedan cambiar. Esto último querría decir que si existiese materia pero no el tiempo, la materia sería inerte, no cambiaría o sea que sería inmutable.

Estas cantidades espacio y tiempo, de Newton son absolutas, verdaderas, matemáticas, reales, pero no son objeto de la experiencia pues no tienen relación con nada externo. Las cantidades relativas vulgares de Newton se usan para nuestras experiencias sensibles. Para Mach estas son cantidades completamente metafísicas. De hecho para Newton el espacio es esencialmente el sensorio de Dios pues tiene una cualidad de la deidad en el sentido de la omnipresencia.

A pesar de que los conceptos de espacio y tiempo tienen en la teoría de Newton un carácter metafísico, son desde un punto de vista teórico fundamentales; ellos representan una base ontológica de la realidad física. Como conceptos tienen un fundamento lógico pues sin ellos las leyes del movimiento dejan de tener sentido. En particular, la denominada primera Ley de Newton que dice que todos los cuerpos perseveran en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta salvo que se vean forzados a cambiar ese

estado por fuerzas impresas, sólo es válida cuando el estado de reposo o de movimiento se mide desde un sistema de referencia que se encuentre en un estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme respecto al espacio absoluto. En otras palabras, la Primera Ley de Newton plantea la existencia de observadores para los que las demás leyes son válidas: estos observadores están en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme respecto al espacio absoluto. En física se le suele llamar a éstos, observadores inerciales. Uno podría entonces decir que en esencia la llamada primera ley de Newton postula la existencia de al menos un observador inercial. Nótese que las leyes son válidas en el espacio y tiempo absolutos, pero éstos no caen bajo el dominio de las experiencias sensibles.

Antes del surgimiento de la teoría de la relatividad especial aparecieron muchas ideas relativistas planteadas por Leibniz, Berkeley, Huygens, etc. En estas teorías se planteaba esencialmente en contraposición con la concepción de la materia y el espacio-tiempo de Newton que tanto el espacio como el tiempo no poseen una realidad objetiva exterior al sujeto, sino que más bien son conceptos contruidos por el hombre y que en cierta medida están condicionados por la materia. Comparemos estos puntos de vista.

En la concepción newtoniana tenemos que:

- El tiempo absoluto es una realidad objetiva.
- El tiempo es en consecuencia anterior a cualquier cambio material. Aún más su existencia es condición necesaria para que los cambios ocurran.
- Las propiedades del tiempo, es decir, su flujo uniforme y su dirección que es señalada por el pasado, el presente y el futuro, es independiente de la materia y de los cambios de la materia.
- El movimiento de los cuerpos puede ser uniforme per-se y esto ocurre cuando el cuerpo recorre espacios absolutos iguales en tiempos absolutos iguales.

En la concepción relativista por el contrario tenemos que:

- El tiempo es un concepto contruido para dar cuenta del cambio.
- A la idea del tiempo se llega mediante la comparación de movimientos, es decir a partir de los cambios materiales se elabora la idea de tiempo.

- El tiempo es una idea que ayuda a pensar el orden de los cambios, es decir, plantear que el tiempo fluye en una dirección permite decir que los acontecimientos naturales ocurren en un orden determinado.
- Se plantea que el movimiento puede ser considerado uniforme cuando se le compara respecto a otro movimiento. En particular, no tiene sentido hablar de movimiento en sí mismo.

Otras propiedades del tiempo en la mecánica de Newton tienen que ver con el hecho de que matemáticamente es una cantidad unidimensional, escalar y que es continua. Esto permite formalmente definir el concepto de velocidad como derivada de la posición, respecto al tiempo. Esta definición exige además que el espacio sea también continuo.

## **El tiempo en la teoría de la relatividad especial**

En 1905 Einstein publica su famoso artículo en el cual se plantean las bases de la teoría la relatividad especial, también llamada teoría de la relatividad restringida. Einstein está interesado principalmente en el problema electrodinámico; de hecho su trabajo se titula sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento.

En este trabajo Einstein resuelve dos problemáticas fundamentales. Por una parte responde a las críticas formuladas a las bases conceptuales de la teoría de Newton, en particular las manifestadas por Mach respecto a la concepción metafísica del espacio y del tiempo y por otra responde a las crisis en que se encontraban las teorías acerca del éter.

Respecto a las críticas planteadas a la teoría de Newton, Einstein construye nuevos conceptos de espacio-tiempo abandonando la perspectiva metafísica de Newton; para éllo parte de la medición de intervalos temporales y de distancias entre eventos por observadores con distintos estados de movimiento. Adicionalmente Einstein abandona la idea del éter mediante la interpretación de diversos experimentos. Mediante un nuevo postulado explica los resultados negativos en relación con la determinación del éter;

este postulado plantea que la velocidad de la luz en el vacío siempre tiene el mismo valor independientemente del movimiento de la fuente o del observador, lo que clásicamente es inconcebible. Un segundo postulado de la relatividad especial recoge y amplía el postulado de la relatividad de Galileo.

En consecuencia el tiempo no puede tratarse como una entidad que existe objetivamente y que deba caracterizarse sino que aparece como un concepto que hay que construir. Einstein enumera los pasos necesarios para su determinación cuantitativa, el tiempo se mide mediante un movimiento periódico, o sea un reloj. Medir el tiempo significa por tanto comparar movimientos.

En conclusión en la teoría de la relatividad se abandona la idea de que el tiempo y el espacio existen por sí mismos sin relación a nada externo, desvinculados de la experiencia sensible y en contraposición se construyen conceptos de intervalo temporal y de longitud.

En la teoría de Newton los intervalos temporales y espaciales entre eventos son absolutos, es decir no dependen del observador ; por el contrario en la teoría de la relatividad los intervalos dependen explícitamente del observador. Adicionalmente en la teoría de Newton el tiempo y el espacio son inconexos mientras que en la relatividad especial están relacionados íntimamente. En concreto, al comparar intervalos de tiempo o separaciones espaciales de eventos entre dos observadores se encuentra que la separación tanto espacial como temporal para uno de ellos depende tanto de la separación espacial como temporal para el otro. Se define un intervalo que permanece invariante:  $(Ds)^2 = (Dr)^2 - c^2 (Dt)^2$  siendo  $Dr$  un intervalo espacial y  $Dt$  un intervalo temporal. La relación que existe entre las medidas de un evento por parte de dos observadores es  $x' = K(x - vt)$ ;  $t' = K(t - xv/c^2)$  con  $K = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  en donde  $x$  es la posición, en que ocurre el evento para un observador en el instante  $t$  ;  $x'$ ,  $t'$  se presentan lo mismo para otro observador que se mueve con velocidad  $v$  a lo largo del eje  $x$  del primer observador. Se ve entonces una interrelación directa entre la coordenada espacial y temporal.



## El tiempo en la mecánica cuántica

En la mecánica cuántica el tiempo aparece en lo que usualmente se llama dinámica de la teoría y en lo que se refiere a interpretación de la misma. Es importante señalar que una teoría física opera elevando o promoviendo ciertas características del mundo físico al status de fundamentales las que a su vez son modeladas mediante estructuras matemáticas. La teoría efectúa explicaciones y predicciones en términos de estas estructuras que se toman invariantes en el tiempo. En cada instante de tiempo hay un conjunto de variables dinámicas fundamentales que son las cantidades básicas en término de las cuales describimos la naturaleza del mundo.

En la mecánica clásica mediante el conocimiento de la posición y la velocidad o el momentum de un sistema en cualquier instante de tiempo conocemos lo relevante del sistema desde el punto de vista mecánico, es decir toda variable dinámica de interés puede expresarse en términos de posición y momentum. Posición y velocidad o posición y momentum definen clásicamente el estado del sistema. A través del conocimiento del estado del sistema puede en consecuencia obtener toda la información sobre el sistema.

En el caso de la mecánica cuántica uno puede persistir en una descripción espacio-temporal para los sistemas. Sin embargo, debido a las relaciones de incertidumbre o mejor de indeterminación de Heisenberg es imposible conocer el estado clásico del sistema. De tal manera que si uno insiste en una descripción espacio-temporal se tiene que convivir con una indeterminación en el sentido de las relaciones que hemos anotado. Es posible trabajar sin esta indeterminación pero en un espacio abstracto que es el espacio de Hilbert. Este espacio es un espacio vectorial complejo cuyos elementos son vectores y sobre ellos pueden actuar operadores, es decir entidades que al actuar sobre un vector lo transforman de alguna manera. Nos interesa en particular aquellos operadores que al ser aplicados sobre un vector dan como resultado el mismo vector multiplicado por un número real, es decir lo alarga o acorta. El número real se llama valor propio del operador.

Para poder avanzar en la comprensión del papel del tiempo en la mecánica cuántica, es necesario recordar rápidamente los postulados sobre los cuales la teoría está edificada. Estos son:

- El estado de un sistema es un ket o vector del espacio de Hilbert.
- Toda cantidad física (un observable) está descrita mediante un operador que actúa en un espacio de Hilbert.
- El resultado de una medición de una cantidad física determinada es alguno de los valores propios del operador que representa a la cantidad física en cuestión. Si bien no podemos saber de antemano qué valor propio vamos a obtener, un postulado adicional nos dice que podemos saber la probabilidad de obtener cualquier valor propio.
- Inmediatamente después de efectuar una medición de una cantidad física el sistema queda en un estado que es el que corresponde al valor propio obtenido independientemente del estado inicial (colapso de la función de onda).
- La evolución del estado del sistema está dada por la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo.

En la mecánica clásica una vez que se conocen las interacciones sobre un sistema y su estado inicial es posible predecir el estado del sistema en cualquier instante. Aún más, dadas dos situaciones idénticas (causas) los resultados (efectos) son los mismos. En la mecánica cuántica por el contrario a partir de causas idénticas se pueden tener efectos diferentes. Estos efectos diferentes son justamente los valores propios de los operadores a que nos hemos referido en los postulados anteriormente mencionados. En un instante de tiempo el sistema puede tomar sólo valor entre los posibles.

Es importante señalar que en la mecánica clásica todos los observables son función del estado del sistema. En mecánica cuántica los observables, como ya hemos dicho, están representados por operadores y estos no dependen del estado el cual es un vector del espacio de Hilbert. La ecuación de evolución de Schrödinger es para el estado y a partir de él es posible, según los postulados calcular el valor del observable en un instante. Otra posibilidad es pasar a una representación en la que los observables dependen del tiempo, pero los estados no.

Adicionalmente es muy importante señalar que como al medir un observable el sistema queda inmediatamente después de la medida en un estado propio del operador en cuestión correspondiente al valor propio encontrado, se crea una asimetría temporal causada directamente por el proceso de medición. En la mecánica clásica por el contrario esa asimetría es eliminable, en principio. Algunos autores atribuyen al menos parcialmente a lo anterior las asimetrías que se encuentran en el mundo macroscópico.

Finalmente es importante señalar que si bien en mecánica cuántica todos los observables están representados por operadores, el tiempo en si mismo no está representado por un operador luego no es un observable en el anterior sentido sino que pasa a ocupar el papel de un parámetro.

---

## **REFERENCIAS**

- D. MITTELSTAEDT. Problemas filosóficos de la física moderna. Alhambra. (1969).
- El Tiempo imperfecto. En busca del destino y significado del cosmos. P. Halpern. Mc. Graw Hill. (1992).
- R. MILLS. Space Time and Quanta. An Introduction to Contemporary Physics. W. H. Freeman (1994).
- R. PENROSE. La nueva mente del emperador. Grijalbo Mondudori. (1991).
- J. JEANS. Physics and Philosophy. Dover (1981).
- T. BRODY. The Philosophy Behind Physics. Springer (1993).
- P. DAVIES. Sobre el tiempo. Crítica. (1996).
- J.J.C. SMART. Entre Ciencia y Filosofía. Tecnos. (1968).
- M. CAPEK. The Philosophical Impact of Contemporary Physics. D. Van Nostrand (1961).
- I. NEWTON. Principios Matemáticos de la Filosofía Natural y su Sistema del Mundo. Ed. Nacional (edición de 1982).
- L. PEARCE WILLIAMS. Relativity Theory. Its Origin and Impact on Modern Thought. John Wiley and Sons. (1968).
- J. BARBOUR. The End of Time. Oxford. (1999).
- R.B. LINDSAY, H. MARGENEAU. Fundamentos de la Física. Ed. de la U. De Chile. (1969).
- S.F. SAVITT (ed). Time's Arrows Today. Recent physical and philosophical work on the direction of time. Cambridge University Press. (1995).