



Imagen de <http://www.acatos.es/diferencia-entre-infinito-y-eterno/>

## El espacio y el tiempo en el tiempo.

Ricardo Pérez

“El tiempo es nuestro problema”

Jorge Luis Borges

### **¿Qué es ese tic tac del reloj?**

El registro del tiempo comenzó con el registro de los ciclos del Sol y la Luna, a partir de los cuales se determinaron los días, los meses y los años. La contabilización de estos periodos tuvo aplicaciones prácticas en la agricultura y se utilizó en actividades religiosas. A partir del conocimiento que se derivó de las observaciones celestes fue posible llevar una cuenta del tiempo y elaborar calendarios.

Se han hecho catálogos de las estrellas y constelaciones observadas en el cielo y se elaboraron teorías para tratar de explicar los movimientos de los astros. Para ello fue necesario contar con un sistema de referencia que utilizaba al ecuador

-línea imaginaria que divide a la Tierra en hemisferio norte y sur- y la eclíptica -la trayectoria del Sol en el cielo. La intersección entre ambas trayectorias, conocidas como equinoccios, se tomaron como puntos de partida para realizar mediciones para ubicar los cuerpos celestes (ver [“Coordenadas celestes”](#) en *Cienciorama*). Hay dos equinoccios al año y suceden cuando el Sol se ubica sobre el ecuador terrestre.

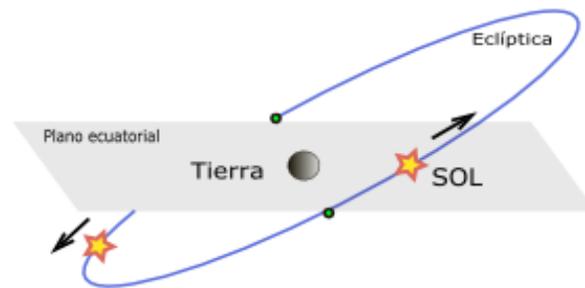


Figura 1. Equinoccios.

La ubicación de las estrellas fue de gran importancia para la navegación, entre las herramientas usadas por los marineros se encuentra el astrolabio que se piensa apareció entre los siglos II y III a.C.; con él se puede medir la posición de los astros y determinar la latitud del observador, o la hora del día o de la noche en un punto terrestre dado. Con el tiempo surgieron otros tipos de relojes, el más emblemático fue sin duda el péndulo, que se desarrolló en un periodo de 68 años desde su descubrimiento por Galileo en 1588, hasta la construcción exitosa de relojes de péndulo en 1656, cuyo diseño se atribuye a Christiaan Huygens y su construcción al relojero Salomon Coster. Este reloj tenía un retraso de 10 segundos por día. La precisión de este tipo de relojes fue mejorando y los que se construyeron para determinar distancias en la navegación marítima fueron un gran avance. En 1714 en Gran Bretaña se ofreció un premio de 20,000 libras a quien desarrollara un método que ayudara a medir distancias en el mar con una precisión mayor a medio grado de latitud y longitud. En 1759 John Harrison ideó una forma de hacerlo basada en el uso de un reloj que podía llevarse a bordo de los barcos y que tenía un retraso

menor a 5 segundos en 81 días; al medir el tiempo y la velocidad de la embarcación se podían determinar distancias en el mar ( $d = vt$ ). Con el paso del tiempo se mejoró el tic tac de los relojes, es decir, se midió el tiempo de forma cada vez más precisa, pero esto no responde la pregunta por lo que debemos sumergirnos más profundo en este río.

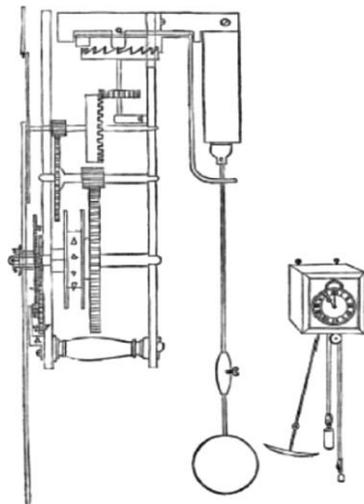


Figura 2. Diagrama del reloj de péndulo de Huygens. La idea central del dispositivo es que en cada oscilación de la masa suspendida del péndulo, la energía cinética producida se convierte en el movimiento del sistema de engranes que posee un alambre conectado a las manecillas del reloj.

## Es la hora del té

Newton en los *Philosophiae naturalis principia mathematica* publicados en 1687, tomó una postura acerca del tiempo y el espacio: “El espacio *absoluto*, en su propia naturaleza, sin relación con algo externo, permanece siempre igual e inamovible”, y el “tiempo *absoluto*, verdadero y matemático, por sí mismo, y por su propia naturaleza, fluye de forma constante sin relación a nada externo”.

Además Newton consideró de forma implícita que el espacio, y en general el mundo en que vivimos, se podía describir con la geometría euclidiana, en la que se manejan objetos abstractos sin dimensión como puntos o líneas, planos y volúmenes de una, dos y tres dimensiones. En este espacio euclidiano podemos representar la

trayectoria de los cuerpos con una línea continua, o sea que no hay espacios donde se rompa o dé saltos, y que puede ser rectilínea en ausencia de fuerzas o curva si el cuerpo está bajo la influencia de alguna fuerza, lo cual contempla la primera ley de Newton. En este espacio euclidiano es posible determinar distancias entre dos puntos, y en nuestra vida cotidiana es lo que hacemos por ejemplo al medir con un metro la longitud de un terreno. Por otro lado, Newton consideraba la estructura geométrica del tiempo como una línea recta con una dirección definida, que permite diferenciar el pasado del futuro. Lo más importante de todo es que Newton daba al espacio y al tiempo el estatus de entidades reales, existentes por sí mismas independientemente de si hubiera objetos en ellos o no, que es el caso del vacío.

Para profundizar acerca del espacio y el tiempo debemos introducir una nueva idea que nos permitirá ir más lejos en la búsqueda de la respuesta a nuestra pregunta inicial: “los sistemas de referencia”. Para comprender lo que son pensemos que existen dos observadores, Salvador que se asoma por una ventana y Juana que camina por la calle; ambos presencian un mismo fenómeno, la caída de una piedra que arrojó alguien más. Cada uno observará el hecho de forma distinta debido a que Salvador está en reposo y Juana está en movimiento; ambos tendrán un sistema de referencia distinto para observar la posición y velocidad de la piedra. Sin embargo existe una forma de explicar lo que ambos ven a partir de las mismas leyes físicas, independientemente de los sistemas de referencia de cada quien. A esto se le conoce como principio de relatividad. La mecánica newtoniana mantiene esta condición y las maneras en que se expresan las mediciones a partir de los distintos marcos de referencia se conocen como las transformaciones de Galileo.

Por mucho tiempo estas transformaciones funcionaron a la perfección debido a que sólo se conocían fenómenos relacionados con la mecánica clásica, pero cuando se conocieron los fenómenos que engloba la teoría electromagnética, los cuales están descritos por las ecuaciones de Maxwell, las observaciones entraban en contradicción con lo predicho por Galileo. Se comprobó experimentalmente que la velocidad de la luz en el vacío tiene el mismo valor finito para todos los sistemas de referencia ( $c=3 \times 10^8$  m/s) (ver [“La luz: ¿onda o partícula?”](#) en *Cienciorama*). Esto

se convirtió en una piedra en el zapato para la física de la época porque por un lado esta medición establecía como errónea la mecánica de Newton y también la teoría electromagnética desde la óptica de la mecánica newtoniana. La solución a este problema fue proponer otro tipo de transformaciones para remplazar las de Galileo y así entraron a escena las de Lorentz para que las predicciones de la teoría de la mecánica clásica y de la teoría del electromagnetismo fueran igualmente correctas. La persona que destacó en todo este proceso fue Einstein, quien emprendió la tarea de reinterpretar la idea que se tenía del espacio y del tiempo.

### **Mejor una cerveza por favor**

Einstein en su artículo de 1905 enuncia dos postulados básicos para la teoría de la relatividad especial: el principio de la relatividad que establece que las leyes de la física son iguales en todos los sistemas de referencia en movimiento uniforme y que la velocidad de la luz en el vacío tiene el mismo valor ( $c$ ) para todos los sistemas de referencia sin importar el movimiento de la fuente de luz (ver [“1905 y el rompimiento einsteniano: relatividad”](#), en *Cienciorama*).

En la mecánica newtoniana se consideraba la transmisión de la luz como algo instantáneo, lo cual implicaría que esto se lleva a cabo a una velocidad infinita. Se proponía entonces sincronizar relojes colocados en distintos sistemas de referencia para que emitieran una señal instantánea que indicara de forma simultánea a ambos relojes el momento de comenzar a medir el tiempo. Así los observadores situados en distintos sistemas podrían medir el mismo tiempo o el tiempo absoluto. Lo anterior no es posible pues en la relatividad especial se considera que nada puede viajar más rápido que la luz, la cual tiene una velocidad finita ( $c=3 \times 10^8$  m/s). Fue así como el concepto del tiempo absoluto dejó de tener sentido.

Einstein en su artículo de 1905 propuso algo distinto para entender el tiempo basándose en que la luz viaja a la misma velocidad para todos los observadores: en dos puntos del espacio diferentes (A y B) se ubican dos relojes iguales, que registran el avance del tiempo de forma independiente. Dada la imposibilidad de sincronizar los relojes como lo propone la mecánica clásica, Einstein define esta

sincronización con base en el tiempo que le toma a la luz viajar del punto (A) al punto (B) y de regreso de B a A, y con esto introduce la idea de realizar mediciones de un modo más apegado a la realidad.

Una de las diferencias entre la mecánica clásica y la teoría de la relatividad especial es que en el primer caso la medición se define suponiendo instrumentos idealizados; mientras que en el segundo caso se comenzó a pensar que las mediciones tendrían que realizarse con instrumentos reales, por lo que se ha acordado que la forma más adecuada de medir es utilizar la luz tal como lo propuso Einstein.

### **Espacio, tiempo y geometría**

La teoría de la relatividad especial no fue aceptada con rapidez; pero gracias al trabajo del matemático alemán Hermann Minkowski pudo librar muchos obstáculos. A finales de 1907 le escribió a Einstein para pedirle una copia de su primer artículo de la relatividad publicado en 1905, y un mes después, el 5 de noviembre de 1907, presentó un trabajo a la Sociedad Matemática de Göttingen titulado “Sobre el principio de la relatividad en electrodinámica: una nueva forma de las ecuaciones de la electrodinámica”. En este trabajo Minkowski proponía reformular las leyes de la física en cuatro dimensiones y no en tres como se hacía clásicamente. A partir de su propuesta fue que se comenzó a concebir que espacio y tiempo están unidos de alguna forma, y hoy en día se habla de espacio-tiempo como algo que no puede estar disociado.

Una de las pistas para la propuesta de Minkowski fue el hecho de que la cantidad  $c^2 t^2 - x^2 + y^2 + z^2$  mantenía la misma forma aun cuando se le aplicaran las transformaciones de Lorentz (que sustituyeron a las de Galileo), es decir que se mantenía invariante. En dicha expresión  $x$ ,  $y$ ,  $z$  son las coordenadas espaciales,  $t$  es el tiempo y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío.

Minkowski emprendió la tarea de interpretar la cantidad  $c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2$ . y se dio cuenta de que con esta expresión era posible visualizar gráficamente las consecuencias de la relatividad especial. En primer lugar si suponemos que se emite un rayo de luz, éste recorrerá una distancia en tres dimensiones determinada por

$d^2 = x^2 + y^2 + z^2$ , que es igual a la velocidad de la luz por el tiempo de recorrido,  $c^2 t^2$ . Pero como dichas cantidades son iguales, su resta se anulará, es decir que  $c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0$ . Para facilitar la comprensión geométrica de lo anterior se pueden eliminar dos coordenadas,  $y$  y  $z$ , por lo que la trayectoria de un rayo de luz en la dirección  $x$  está determinada por la expresión  $c^2 t^2 - x^2 = 0$ , que podemos graficar en el plano  $(x, ct)$ . En dicho plano la trayectoria de los rayos de luz está representada por dos líneas a  $45^\circ$ , una con pendiente positiva para los rayos que se propagan en la dirección de  $x$  positiva y la línea con pendiente negativa que representa los rayos de luz que viajan en la dirección de  $x$  negativa.

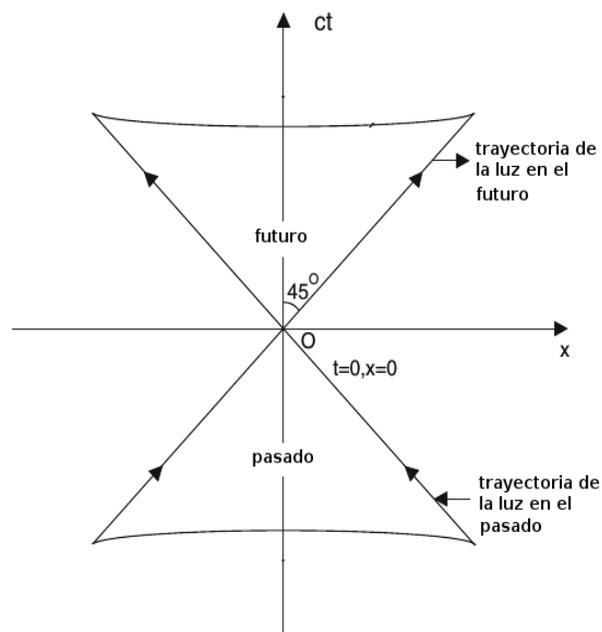


Figura 3. Diagrama del espacio tiempo de Minkowsky donde sólo se considera una coordenada espacial y la coordenada temporal  $ct$ .

En la figura es posible ver que las líneas que representan a los rayos de luz dividen al plano en tres regiones diferentes que tienen una interpretación física. En primer lugar cada punto del plano  $(x, ct)$  representa un evento. Por ejemplo, si una partícula es disparada con velocidad constante, dicho evento se podrá ubicar en una posición inicial  $x_0$  y en un tiempo inicial  $t_0$ ; posteriormente la partícula evolucionará y en el plano describirá una línea recta con una inclinación menor a

45° con respecto al eje  $ct$ , y permanecerá dentro del cono (conocido como cono de luz), ya que la velocidad de la partícula nunca puede exceder el valor  $c$ , y las líneas marcadas a 45° representan las trayectorias que seguirían todos los rayos de luz.

Por otro lado si la partícula está acelerada la línea será curva, y también permanecerá dentro del cono. Además podemos notar que el cono se divide en dos partes: la inferior representa el pasado, definido como todos los posibles eventos que pudieron afectar un evento en el presente, y la superior representa el futuro, que se define como todos los posibles eventos que pueden ser afectados por el presente.

Debe señalarse que las regiones fuera del cono de luz no pueden ser afectadas por ningún evento dentro del cono, pues para unir un punto del interior con uno del exterior se necesitaría trazar una línea con una inclinación mayor que las de los rayos de luz y eso implicaría que algo estaría viajando más rápido que la luz, lo cual no es posible.

Minkowski describió estos diagramas como herramientas útiles para ilustrar consecuencias de las transformaciones de Lorentz como la llamada contracción de las longitudes y la dilatación del tiempo (ver "[1905 y el rompimiento einsteniano: relatividad](#)", en *Cienciorama*), y además para ilustrar el hecho de que no se puede hablar de forma absoluta de simultaneidad de eventos, es decir que, si para un observador hay dos eventos en sitios diferentes que ocurren al mismo tiempo, otro observador los podrá detectar en distintos momentos, por lo cual se dice que la simultaneidad es relativa. Gracias a la propuesta de Minkowski, varios físicos teóricos aceptaron con mayor facilidad la teoría de la relatividad especial.

Por último, Minkowski propuso que de forma similar a la geometría euclidiana, en el espacio-tiempo es posible determinar la separación entre dos eventos. Recordemos que según la geometría euclidiana la distancia de un punto  $(x,y,z)$  con respecto al origen de coordenadas es  $d^2=x^2 + y^2 + z^2$ , y por otro lado que en el espacio-tiempo la separación entre dos eventos se determina mediante la expresión  $\eta = ct^2 - x^2 - y^2 - z^2$ , la cual como ya vimos tiene una interpretación física. Esta diferencia hace posible ver que de entrada el espacio-tiempo de la relatividad especial ya no se puede considerar euclidiano como se hacía en la mecánica

clásica, y entonces surge la necesidad de comprender a fondo lo que es el espacio y el tiempo, cuestión que para Einstein era de fundamental importancia.

### ¿Y entonces?

Hasta éste punto se revisaron las ideas del tiempo y del espacio y de un modo u otro se fueron cruzando los caminos de ambos conceptos. La respuesta no está completa sólo con revisar la teoría de la relatividad especial; hace falta revisar algo más, la teoría de la relatividad general, con la que se podría dar una respuesta más completa a la pregunta de lo que es el tiempo. Aunque sabemos que la respuesta en algún momento puede cambiar si algún descubrimiento hace necesario revisar nuevamente los conceptos que tengamos del espacio y el tiempo.

### Bibliografía

1. Mittelstaedt, P., *Philosophical problems of modern physics*, D. Reidel Publishing, Holanda, 1976.
2. Borges, J., L., *Borges oral*, Alianza, Barcelona, 1998.
3. McCarthy, D., y Seidelmann, P, *Time, from earth rotation to atomic physics*, WILEY-VCH, Alemania, 2009.
4. Petkov, V., *Minkowsky spacetime: a hundred years later*, Springer, Países Bajos, 2010.
5. Maudlin, T., *Philosophy of physics space and time*, Princeton University Press, Nueva Jersey, 2012.
6. Ashtekar, A., Petkov, V. (eds), *Handbook of spacetime*, Springer, Berlín, 2014.