



**MIGUEL KATZ**

**¿QUÉ ES ESA COSA QUE  
LLAMAMOS TIEMPO?**



**ASOCIACIÓN QUÍMICA ARGENTINA**



**¿QUE ESA COSA QUE LLAMAMOS TIEMPO?**





**MIGUEL KATZ**

**¿QUE ESA COSA QUE LLAMAMOS TIEMPO?**



**ASOCIACIÓN QUÍMICA ARGENTINA**

**BUENOS AIRES**

**2018**

Katz, Miguel

¿Qué es esa cosa que llamamos tiempo?

1a ed. - Buenos Aires : Asociación Química Argentina, 2018.

Avda. Santa Fe 1145 C1059ABR

Ciudad Autónoma de Buenos Aires. República Argentina.

Tel-Fax (14 11) 4814 5942

Libro digital, PDF/A

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-46579-6-1

CDD 530

1. Física. I. Título.

Libro de edición electrónica

Hecho en la República Argentina

Hecho el depósito de la Ley 11.723

Derechos reservados





*A Hernán*





***Agradecimientos:***  
*A la Asociación Química Argentina en las personas de  
su Presidente, Dr. Eduardo Castro,  
su Vicepresidente Dr. Carlos Cañellas y de  
su Responsable de la División de Educación, Dra. Lydia Galagovsky*



## PRÓLOGO

Una de las ideas que nos caracterizan como humanos es la noción de que existe un tiempo que transcurre y que tiene sus efectos en nosotros. La conciencia sobre el paso del tiempo y la llegada de muerte para cada individuo, – propia del ser humano y aparentemente de ningún otro animal, – ha llevado a la especie humana a reflexionar sobre qué es el tiempo.

Sin dudas, pareciera que sabemos que hay un tiempo personal, un tiempo colectivo, un tiempo histórico, un tiempo geológico, un tiempo universal, un tiempo que se percibe, un tiempo que fluye, un tiempo que transcurre lineal o se repite circularmente. Sin embargo, no sabemos qué es, por qué es, para qué es, desde cuándo es, si tiene un comienzo o tendrá un final, o si es eterno... y qué significa esto.

Es decir, el tiempo es una noción sobre la que los seres humanos nos cuestionamos desde que tomamos conciencia de su existencia, y lo hacemos desde nuestra más inocente y sencilla capacidad de reflexión filosófica...

A diferencia de la noción de “Dios” que también acompaña al hombre desde los albores de la civilización, no necesitamos creer que existe, sabemos que existe; no necesitamos temerle ni hacerle ofrendas, no lo imbuimos de intención hacia nosotros y, sin embargo, es implacable, poderoso, avasallador, demoledor... y toda la vida inanimada y animada que existe – o, al menos, que creemos que existe- está sometida a su devenir.

El tiempo, en su conjunto de significados y matices, es omnipresente y organiza nuestras vidas... Los humanos, desde siempre, hemos querido aprehenderlo, pero sólo hemos logrado inventar algunas formas ingeniosas de medir su transcurso.

En este hermoso libro, el Dr. Miguel Katz nos ubica en una “flecha del tiempo” y nos desplaza por las principales ideas filosóficas y científicas sobre el concepto de tiempo que, sin llegar a soluciones definitivas, constituyen evidencias sobre cómo la ciencia y la filosofía son pasiones humanas a partir de las cuales se promueve la observación y del desarrollo tecnológico.

La División Educación de la Asociación Química Argentina se siente honrada de poder acercar a sus lectores esta nueva obra.

Dra. Lydia Galagovsky

## PREFACIO

Desde las épocas más remotas, el ser humano tuvo la noción de un ordenamiento de los sucesos, tanto de los que le ocurrían – por ejemplo: "ya he comido", "¿qué podré comer?", etc., – como los que ocurrían a su alrededor, – la salida del Sol, la llegada de la noche, el cese de la lluvia, etc. Algunos grabados sobre piedras en forma de pictogramas, registran tácitamente un ordenamiento temporal de eventos. Logogramas, como los jeroglíficos egipcios, que datan del cuarto milenio anterior a nuestra era, suelen mostrar secuencias temporales de ciertos eventos. Alrededor del 3500 a.C. los sumerios se establecieron en la Mesopotamia y dejaron de ser nómadas para convertirse en una comunidad sedentaria. Ese cambio hizo que las comunidades comenzaran a interesarse por el movimiento solar y por los movimientos planetarios. De esas observaciones surgió el calendario lunar, que implica conocer la evolución en el tiempo de los cuerpos celestes. Esa cronología basada sobre la periodicidad de eventos astronómicos facilitó su desarrollo cultural y económico\*. "La Ilíada" narra la cronología de una parte de la vida de Aquiles, durante 51 días de la guerra de Troya, muestra que en el siglo VIII a.C., el transcurso temporal, si bien no era un concepto que tuviera definición filosófica, era entendido, aceptado y compartido por los habitantes del sudeste europeo.

Algunos filósofos griegos, analizaron lo que hoy llamamos "concepto de tiempo" y es, a partir de esa época, que desarrollamos ese concepto en este breve trabajo. Así reseñamos las primeras teorías, acerca de las características que definen al tiempo, propuestas por Platón y Aristóteles. Luego reseñamos las diversas concepciones imperantes desde la Antigüedad, pasando por las que desarrollaron Leibniz y Kant y, en particular, la de Newton que tuvo una gran influencia en el desarrollo de la física clásica. También analizamos la relación entre el tiempo y la mente para establecer la distinción entre *tiempo psicológico* y *tiempo cronológico*.

El tiempo es una variable de enorme importancia en el desarrollo de la Física y la contribución de Einstein con su *Teoría de la relatividad*, tanto con la *especial* como con la *general*, logró solucionar muchos problemas que la concepción de Newton no podía.

La Teoría de la relatividad general (o generalizada) es, fundamentalmente, una teoría matemática y es por eso que a Einstein no le dieron el Premio Nobel por ella, sino por un trabajo menor, el llamado *Efecto fotoeléctrico*. Para evitar que el lector abandone el texto ante la complejidad de los desarrollos matemático, restringiremos al máximo posible los dispositivos matemáticos. Sólo daremos una introducción acerca de los sistemas inerciales, las nociones generales sobre el concepto de tiempo en la teoría de la relatividad, tanto en la relatividad especial como en la teoría de la relatividad general y la interrelación entre tiempo y espacio emergente de esa teoría.

---

\* Así por ejemplo, los sumerios encontraron, empíricamente, que el mejor momento para sembrar el trigo era el día del solsticio de invierno, 20 al 23 de diciembre.

También, haremos referencia a la métrica moderna del tiempo, su sentido unidireccional, la llamada “flecha del tiempo” y su vinculación con la Cosmología.

Miguel Katz  
Junio de 2018



## CONTENIDOS

	<i>Página</i>
<i>Introducción</i>	1
1. <i>El tiempo cronológico</i>	1
2. <i>El tiempo y la mente</i>	9
3. <i>Los sistemas de referencia inerciales</i>	11
4. <i>¿Qué es lo que la ciencia requiere del tiempo?</i>	15
5. <i>El espacio tetradimensional de Minkowski</i>	20
6. <i>Los diagramas de Minkowski</i>	20
7. <i>La controversia entre la teoría relacional de tiempo y la teoría del tiempo absoluto</i>	23
8. <i>¿Qué son la relatividad y el convencionalismo de la simultaneidad?</i>	24
9. <i>La dilatación del tiempo y la paradoja de los gemelos</i>	25
10. <i>¿En qué consiste la teoría de la relatividad generalizada?</i>	26
11. <i>La métrica del espaciotiempo</i>	33
12. <i>La flecha del tiempo</i>	35
13. <i>La cosmología y el origen del tiempo</i>	36
14. <i>Viajar en el tiempo</i>	38
15. <i>La teoría causal del tiempo</i>	41
16. <i>A modo de conclusión</i>	44
<i>Lecturas recomendadas</i>	45



## ***Introducción.***

*A lo largo de la historia de la humanidad, el hombre ha incluido al tiempo al reflexionar sobre los hechos de su vida cotidiana. Así, el hombre primitivo podría haberse preguntado ¿Cuánto falta para que salga el Sol? o ¿Cuánto hace que no llueve? Preguntas que llevan implícitas el concepto de tiempo. Textos clásicos como "La ilíada", al hacer una cronología de los acontecimientos ocurridos durante 51 días de la guerra de Troya, o el Génesis, del siglo VI a.C., utilizan implícitamente el concepto de tiempo.*

*En el presente trabajo se trata de dar una reseña general sobre las diferentes concepciones imperantes acerca del tiempo, desde el sentido intuitivo, imperante en la Antigüedad, de una cronología basada en fenómenos periódicos, pasando por las primeras teorías acerca de las características que definen al tiempo propuestas por Platón y Aristóteles diversas concepciones imperantes a lo largo de la historia. Se discuten brevemente las concepciones de Leibniz y Kant, así como la de Newton y su influencia en la física clásica.*

*También se analiza la relación entre el tiempo y la mente para establecer la distinción entre tiempo psicológico y tiempo cronológico.*

*Luego de una introducción acerca de los sistemas inerciales se dan las nociones generales sobre el concepto de tiempo en la teoría de la relatividad, tanto en la relatividad especial como en la teoría de la relatividad general, y la interrelación entre tiempo y espacio emergente de esa teoría.*

*Se incluye un análisis somero de las diferencias entre la teoría relacional del tiempo y el tiempo absoluto y se explica por qué el concepto de simultaneidad de los sucesos es convencional. También, se hace una referencia a la métrica moderna del tiempo, su sentido unidireccional, la llamada "flecha del tiempo" y su vinculación con la Cosmología.*

*La dilatación en el tiempo, resultante de la teoría de la relatividad, permite hacer un análisis sobre la posibilidad de viajar en el tiempo. Finalmente se dan las nociones básicas sobre la teoría causal del tiempo.*

### ***1. El tiempo cronológico***

El concepto de tiempo ha sido intuido por el hombre desde la etapa más temprana de su evolución y su duración ha sido cuantificada por las civilizaciones antiguas. En distintas partes del mundo, fenómenos naturales periódicos — como las fases lunares o las crecidas de los ríos — han sido

tomados como referencia para establecer intervalos temporales que sirvieran a las comunidades primitivas en sus tareas cotidianas. Prueba de ello nos quedan, entre otros, los calendarios lunares de Oriente o el Códice de Dresde que, mediante puntos y barras, describe el calendario maya destacando no solo el período aparente de revolución del Sol sino también la duración de la trayectoria de Venus<sup>1</sup> (vista desde la Tierra), los intervalos que median entre las respectivas fases que este planeta atraviesa, así como los intervalos entre los sucesivos eclipses lunares.

Las unidades grandes de medición del tiempo, el año y el día, fueron siempre proporcionadas por la misma Naturaleza. Pero la hora, el minuto y el segundo, son inventos del hombre. La división actual del día proviene de tiempos muy remotos. Según Hommel<sup>2</sup> “A Babilonia le debemos la semana de siete días con los nombres de los planetas para los días y la división en horas y meses”. Allí no se empleaba el sistema decimal, sino el sexagesimal<sup>3</sup>. Sesenta es divisible por doce; de aquí que en Babilonia dividieran el día en doce partes iguales que se marcaban en primitivos relojes solares. Posteriormente, las violentas crecidas del Nilo obligaron a los habitantes del Egipto antiguo a dividir el día en 24 horas. Más tarde aparecieron los minutos y los segundos. De modo que el hecho de que actualmente la hora tenga 60 minutos y el minuto 60 segundos, se debe al sistema sexagesimal de Babilonia.

Fue en la Grecia antigua que se intentó dar una interpretación filosófica al concepto de tiempo procurando dar una respuesta a la pregunta ¿Qué es el tiempo? Una respuesta a este interrogante puede ser tan concisa que la torne vacía de contenido, a menos que esté apoyada sobre un tratamiento más elaborado y sistemático del tiempo ya que por sí solas, las definiciones son o triviales (el tiempo es una colección de instantes) o demasiado imprecisas (el tiempo es la dimensión de la causalidad) o circulares (el tiempo es lo que evita que todo suceda simultáneamente) o, simplemente, crípticas (El tiempo es el flujo de eventos que pasan ante un observador estacionario).

Cuando los filósofos preguntan ¿Qué es el tiempo? normalmente están inquiriendo por una teoría filosófica diseñada para responder muchas de las cuestiones sobre el tiempo, tales como si la distinción entre pasado, presente y futuro es objetiva, o cómo podríamos entender el llamado “flujo del tiempo”, o qué relación existe entre el tiempo y la mente, etc. En este sentido es que hemos dicho que una definición sucinta de tiempo sólo sería adecuada en tanto esté sustentada por una teoría más elaborada.

---

<sup>1</sup> Los mayas llegaron a establecer el período aparente de Venus que superaba en apenas 0,013% el valor aceptado hoy en día (583,923 días)

<sup>2</sup> **Fritz Hommel**, *Geschichte Babylonians und Assyriens*, Berlin, 1885.

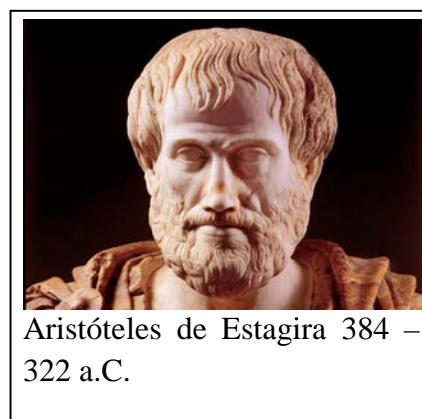
<sup>3</sup> Si bien tomaban el movimiento aparente del Sol, para establecer la duración del día, los astrónomos caldeos y babilonios le daban más importancia a la rotación de la Luna alrededor de la Tierra, de modo que dividían el año en doce meses lunares de 30 días, intercalando periódicamente los meses de Elul y Adar, para que coincidiera con el movimiento aparente del Sol. Los 360 días del año lunar, llevaron naturalmente a la adopción del sistema sexagesimal.

---

Elaborar una teoría filosófica, del tiempo o de cualquier otro tema, implica una tarea intelectual muy ardua y una expresión de dicha teoría realizada mediante un lenguaje claro que no dé lugar a interpretaciones contrapuestas. Así y todo, la tarea del filósofo enfrenta la crítica de los epistemólogos quienes con el mejor de los ánimos se encargan de buscar cualquier grieta que afecte la solidez de la teoría, cualquier contradicción en su puesta a prueba que demuestre su falseabilidad (en el sentido popperiano). De manera que inexorablemente se cumplirá el viejo adagio según el cual toda teoría nace provisoria e irremediamente “morirá” a manos de otra teoría, que explica lo que la anterior no podía explicar y que tenga mayor poder predictivo, teoría que también nacerá provisoria, etc.

Afortunadamente, en la época de Platón y Aristóteles no existían epistemólogos tan duchos en el ejercicio de refutar teorías filosóficas, de modo que sus concepciones sobre el tiempo, y otros temas filosóficos, duraron bastante más de lo que durarían en la época actual.

¿Qué pensaba Platón sobre el tiempo? Según la interpretación de Aristóteles, Platón identificaba el tiempo con el movimiento, y en especial, con la rotación de las esferas celestes, rotación que consideraba perfecta por ser uniforme y perpetua. En su concepción, el tiempo es una imagen móvil de la eternidad, imita la eternidad y se desarrolla en círculo (concepción cíclica del tiempo)



En el libro IV de su Física, Aristóteles sostuvo que el tiempo no es movimiento sino una medida del movimiento. Un movimiento implica un cambio de ubicación en el espacio, rasgo que el tiempo carece. Por otra parte, un movimiento ocurre con mayor o menor rapidez. Si bien es parte del lenguaje común hablar del “transcurso del tiempo” podríamos preguntarnos ¿con que velocidad transcurre el tiempo? Las simples respuestas “A un segundo por segundo” o “A una hora por hora” nos ponen en evidencia que el tiempo carece de velocidad. “El paso del tiempo” o “el tiempo pasa” son meras expresiones metafóricas que implican la ocurrencia de acontecimientos, de eventos a los que le asignamos un orden temporal.

Aristóteles abordó el concepto de tiempo desde un enfoque fenomenológico:

Pues esto, en efecto es el tiempo: el número del movimiento según lo anterior y lo posterior. El tiempo no es, pues, movimiento, sino su aspecto numerable. Y la prueba [es que así como] el número nos permite distinguir “lo más” y “lo menos”, así el tiempo nos permite distinguir “lo más” y “lo menos” del movimiento.<sup>4</sup>

No podemos percibir el tiempo en sí mismo sino que caemos en la cuenta del “paso del tiempo” sólo porque percibimos el cambio o movimiento. Pero si bien el tiempo no es idéntico al movimien-

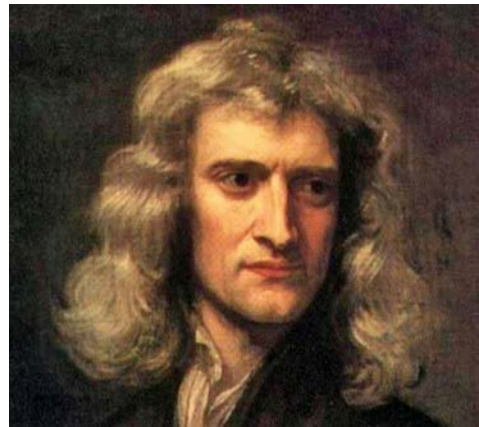
---

<sup>4</sup> **Aristóteles**, *Física*, Libro IV 219b, 1 – 5.

to, no es totalmente independiente de él, de modo que la tarea del filósofo es establecer la relación entre ambos.

Con ligeras variantes o interpretaciones, la concepción del tiempo de Aristóteles perduró durante siglos, en buena parte por su autoridad intelectual pero también por su “conversión” al cristianismo llevada a cabo quince siglos después de su muerte por Santo Tomás de Aquino<sup>5</sup>.

En el siglo XVII, el físico inglés Isaac Barrow rechazó la vinculación aristotélica entre tiempo y movimiento, afirmando que el tiempo es algo que existe independientemente del movimiento y habría existido aún antes de que Dios crease el Universo. En sus *Lectio- nes Geometriæ* afirmaba:



I. Newton (1643 – 1727)

Pero el tiempo, ¿no supone el movimiento? Respondo: de ninguna manera, por lo que respecta a su naturaleza absoluta, intrínseca; no más que el reposo; la cualidad tiempo no depende esencialmente de ninguno de los dos; tanto si las cosas se mueven como si están quietas, tanto si dormimos como si estamos despiertos, el tiempo fluye a su ritmo regular. Imaginemos que todas las estrellas han estado quietas desde su nacimiento: para el tiempo nada se habría perdido; esta quietud habría durado tanto como ha durado el flujo de este movimiento<sup>6</sup>

Isaac Newton, discípulo de Barrow, estuvo de acuerdo con él, argumentando que el tiempo y el espacio constituyen un enorme contenedor para todos los eventos y que el contenedor existe con o sin los eventos. Newton fue más allá que Barrow. En el famoso *Scholium* de su *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* afirma:

El tiempo absoluto, verdadero y matemático en sí y por su misma naturaleza fluye regularmente sin relación alguna a nada externo, y se le llama, con otro nombre, duración... Pues los tiempos y los espacios son, por decirlo así, lugares tanto de ellos mismos como de todas las otras cosas. Todas las cosas están colocadas en el tiempo en cuanto al orden de sucesión, y en el espacio en cuanto al orden de ubicación.<sup>7</sup>

---

<sup>5</sup> Aristóteles no sólo se convirtió en el filósofo oficial de la Iglesia sino que la influencia de Urbano VIII logró que en 1624 el Parlamento de París sancione un decreto estableciendo que todo aquel que sostuviera o enseñara públicamente posiciones opuestas a Aristóteles era pasible de la pena de muerte.

<sup>6</sup> Barrow, I.: *Geometrical Lectures* Open Court. La Salle III. (1916) pp. 35 – 37.

<sup>7</sup> Newton, I.: *Philosophiæ Naturalis Principia mathematica*, 2 vols. editados por A. Koyré e I. B. Cohen con la ayuda de A. Whittnan, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1972, pp. 6, 18 – 20; 8, 13 – 15. (Traducción inglesa editada por Cajori, F., University of California Press, Berkeley, 1960.)

---

Si el tiempo es absoluto y sin relación con acontecimientos externos debería ser considerado como un continuum sin comienzo y sin final<sup>8</sup>. Esta interpretación hizo que sus ideas fueran consideradas como “concepciones materialistas y ateas”<sup>9</sup>, lo que motivó que en la segunda edición del *Scholium Generale*, Newton agregase “Dios es eterno e infinito, existiendo siempre y en todo lugar, Él constituye la duración y el espacio”.

El tema de la existencia del tiempo con independencia de los eventos dio lugar a una de las múltiples controversias entre Newton y Leibniz.

Gottfried Wilhelm Leibniz<sup>10</sup> objetó el concepto de que el tiempo existe aún en ausencia de eventos. Sostuvo que Aristóteles y Newton habían exagerado la vinculación entre tiempo y duración y habían subestimado el hecho que, en última instancia, el tiempo involucra también orden. El tiempo es un ordenamiento de cambios, el ordenamiento completo y total de todos los eventos no simultáneos. Es por ello que el tiempo requiere de eventos. Al respecto escribió:

... Si hubiera un vacío en el tiempo, es decir, una duración sin cambios, sería imposible determinar su duración. De donde resulta que... no se podría refutar a quien sostuviera que dos mundos, de los que uno sucede al otro, están en contacto en cuanto a la duración, de tal forma que uno empieza necesariamente cuando el otro acaba, sin posibilidad de un intervalo.<sup>11</sup>

El ordenamiento de eventos en el tiempo implica establecer una correspondencia entre la sucesión de determinados acontecimientos y la sucesión de los números reales, pero no siempre se aceptó la idea del tiempo “lineal”. Si bien el concepto de tiempo lineal está implícito en la descripción que hace el Génesis sobre la Creación del Universo y su evolución histórica, muchos filósofos griegos y romanos creían que el tiempo, en última instancia, era cíclico. Aristóteles dio razones psicológicas del porqué el círculo es un modelo apropiado. Razonaba que es imposible concebir un tiempo inicial ya que para cada instante siempre podemos concebir un tiempo anterior a él, de modo que la única manera en que el tiempo no requiera de un comienzo es que su “transcurso” sea cíclico. De esta manera, en su concepción el tiempo es eterno, sin principio ni fin y como corolario Aristóteles expresó:

---

<sup>8</sup> Considerar que el tiempo está formado por un continuum lineal de instantes, cada uno de los cuales tiende a cero segundos da lugar a una cuestión adicional: El ser un continuum implica que entre cada dos instantes hay otro instante. No existe método de medición del tiempo tan preciso que pueda detectar si, para instantes extremadamente próximos en el tiempo, esto es verdadero o falso. Por lo tanto, ¿sobre qué bases científicas se afirma que el tiempo es un continuum?

<sup>9</sup> Cf. Burt, E. A.: *The Metaphysical Foundation of Modern Science*. Anchor Books. New York (1932) Cap. VII sec. 4C. citando el libro *Principles of Human Knowledge* (1710) del obispo George Berkeley.

<sup>10</sup> **Leibniz, G.W.** *Nuevo tratado sobre el entendimiento humano*. Traducción E. Ovejero y Mauri. Prólogo de L. Rensoli Laliga. Ed. De Ciencias Sociales. La Habana (1988).

<sup>11</sup> *Ibidem* Capítulo XV. De la duración y la expansión consideradas a la vez.

---

Podemos además hacer aquí la pregunta: ¿cómo puede haber tiempo, si no hay movimiento? Si, el tiempo es el número del movimiento..., entonces, si el tiempo es siempre, es necesario que el movimiento sea eterno también...<sup>12</sup>

Ni Aristóteles ni Platón previeron que esa “ciclicidad” tendría como consecuencia la repetición periódica de ciertos eventos, como podría ser que cada tanto tiempo Sócrates volviese a nacer (aunque algunos filósofos estoicos adoptaron esta posición). Durante la Edad Media los teólogos islámicos y cristianos rechazaron la circularidad del tiempo y adoptaron la noción judía de que el tiempo es lineal, con el Universo creado en un momento definido del pasado. San Agustín objetó explícitamente la creencia aristotélica de que el tiempo es circular insistiendo en que la experiencia humana es una travesía unidireccional desde el Génesis hasta el Juicio Final a pesar de que se puedan observar algunos patrones recurrentes o cíclicos en la naturaleza. Menudo problema se le planteó a Santo Tomás al tratar de congeniar las ideas de Aristóteles con la reli-



I. Kant (1724 – 1804)

gión cristiana: Si el Universo ha sido creado por Dios, la Creación dio inicio al movimiento. Y no sólo el movimiento tiene un comienzo sino que no se concibe un tiempo anterior a la Creación. Aceptó el argumento de Aristóteles de la imposibilidad de concebir un instante sin pensar inmediatamente en el tiempo anterior pero, argumentó que *esto no implica que haya un tiempo real* antes de la Creación sino que es lícito imaginar *que puede haber un tiempo anterior*.<sup>13</sup> Es decir, Santo Tomás resuelve el problema haciendo una distinción entre tiempo real y tiempo imaginario. Podemos pensar en una estructura del tiempo (imaginario) carente de principio y fin pero la estructura del tiempo real depende de la historia del Universo

Si bien Santo Tomás de Aquino estuvo de acuerdo con San Agustín, no fue hasta 1602 que el concepto de tiempo lineal fue formulado clara y explícitamente por el filósofo inglés Francis Bacon (1561 – 1626) en su *De Argumentum Scientiarum*<sup>14</sup>.

El tiempo lineal fue utilizado por Immanuel Kant para desarrollar el concepto de las “analogías de la experiencia” según las cuales la experiencia objetiva “es posible sólo mediante la representación de un enlace necesario de las percepciones”. Percibimos eventos que ocurren en el espacio y

---

<sup>12</sup> Aristóteles; *Física* Libro IV. 251b.

<sup>13</sup> Santo Tomás de Aquino: *Commentarium in octo libros physlicorum Aristotelis, Opera Omnia*, T. II, Roma, 1884, Libro IV.

<sup>14</sup> Cf. Craik, G. L. *Bacon and His Writings and Philosophy*, 2 vols, London, 1846. Vol. II., p. 121 – 130.

---



que están ordenados en el tiempo. No percibimos el tiempo mismo sino que nuestra razón emplea ciertas reglas mediante las cuales apreciamos la secuencia temporal. Esas reglas son las llamadas *analogías*. Para Kant el tiempo tiene tres modos principales: permanencia (duración), sucesión y simultaneidad (coexistencia)<sup>15</sup>. Estos son los modos temporales requeridos para entender el mundo físico: la permanencia con la materia, la sucesión con la causalidad y la simultaneidad con la interacción. La primera analogía de la experiencia nos dice que todo cambio consiste en una modificación de las propiedades de la materia que, aunque cambiante, no se crea ni destruye. La segunda analogía establece que todo cambio es efecto de una causa y la relación causa – efecto se da según una regla. De esta manera se vincula la sucesión de eventos con la causalidad. La tercera analogía se refiere a la simultaneidad: “Todas las sustancias, en cuanto pueden ser percibidas en el espacio como simultáneas, están en universal acción recíproca” En la concepción de Kant, para que la multiplicidad de sustancias formen un universo y coexistan en el mismo tiempo se requiere que interactúen de alguna manera. En caso contrario un grupo de sustancias formarían una serie temporal y otro grupo, que no interactúa de ninguna manera con el primero, formaría otra serie temporal y no habría manera de relacionar ambas series.

Georges Lechalas (1851 – 1919) utilizó las analogías de Kant para elaborar una definición de orden temporal sobre la base del determinismo inserto en la Física clásica. Todo estado de un sistema mecánico obedece a una causa y a su vez es la causa de otro estado<sup>16</sup>. De modo que la sucesión temporal de los estados de un sistema mecánico se encuentra implícita en los Principios de la Mecánica. Si los estados de un sistema *A* están ordenados temporalmente según las leyes de movimiento de la Mecánica y los estados de otro sistema *B* se encuentran temporalmente ordenados según las mismas leyes, las secuencias temporales de ambos sistemas pueden relacionarse entre sí y establecer su simultaneidad empleando la acción recíproca a que alude la tercera analogía de Kant. En este caso, la acción recíproca estará dada por la atracción gravitatoria entre ambos sistemas, de modo que la ley de la gravitación universal es el correlato físico de la simultaneidad: La atracción del sistema *A* (que está experimentando cambios de su estado obedeciendo a las leyes de la Mecánica) por un sistema *B* y la atracción del sistema *B* (que experimenta otros cambios en su estado cumpliendo con las leyes de la Mecánica) por el sistema *A*, son eventos simultáneos.

Lechalas fue el primero en bautizar a su teoría como “teoría causal del tiempo”, aunque Leibniz había trabajado sobre el tema mucho antes. Sostuvo que

"En el mundo de los cuerpos materiales, el principio del determinismo mecánico enuncia que el estado de un sistema material de puntos en un instante dado está determinado por sus estados anteriores y determina sus estados posteriores. Para nosotros esta ley equivale a la afirmación de que los estados de un sistema se determinan unos a otros, y que los estados determinantes se llaman, *por*

---

<sup>15</sup> **Kant, I.**; *Crítica de la razón pura*, trad. de M. García Morente. V. Suarez. Madrid. 1928. T II.

<sup>16</sup> **Lechalas, G.**; "Le nombre et le temps dans les rapports avec l'espace", *Ann. De Phil. Chrét.* N.S. Vol. 22, 1890, pp 516 – 540.

---

*definición*, anteriores a los estados determinados; siendo cada estado, por tanto, a la vez determinante y determinado, según se le considere en relación a uno u otro de los varios estados"<sup>17</sup>

Por lo que todo estado de un sistema mecánico está determinado o causado por otros estados de ese sistema; y el estado en un instante dado, determina también a otros estados. Esta relación de determinación es tal que los estados que ocurren antes de un estado dado son precisamente aquellos que lo determinan, y aquellos que dicho estado determina son precisamente los que vienen tras él. Además, esta determinación está descrita por las leyes de la Mecánica. Por tanto, la sucesión temporal de los estados de un sistema mecánico está (implícitamente) descrita por esas leyes.

Su teoría fue objeto de múltiples críticas. Fundamentalmente se le objetó que en las leyes de la Mecánica está implícito el concepto de tiempo. Aún cuando se diga que la velocidad “mide la tasa de cambio del vector posición” se alude implícitamente a la tasa de cambio respecto del tiempo. El tiempo aparece explícita o implícitamente en la definición de casi todas las magnitudes mecánicas (aceleración, fuerza, energía cinética, impulso, cantidad de movimiento, etc.). Pero quizás el argumento más importante contra la teoría de Lechallas está en su vinculación entre interacción gravitatoria y simultaneidad ya que si se tienen más de dos cuerpos o más de dos sistemas que interactúan es imposible establecer simultáneamente sus posiciones y sus velocidades. De modo que las leyes del movimiento no pueden definir la sucesión temporal, y la atracción gravitatoria no puede definir la simultaneidad.

A lo largo de los siglos XIX y XX muchos filósofos y científicos se han ocupado de establecer concepciones novedosas sobre el tiempo, vale la pena mencionar la teoría de Einstein sobre la relatividad del tiempo o la teoría causal del tiempo de Hans Reichenbach (de ambas nos ocuparemos más adelante).

## ***2. El tiempo y la mente***

Si estamos viajando en autobús tratando de llegar puntualmente a una cita y “se nos está haciendo tarde”, nos parece que el movimiento del autobús ocurre más lentamente, aunque se desplace a la misma velocidad que de costumbre. Nuestra percepción del intervalo de tiempo en que transcurre un acontecimiento suele diferir de la percepción que tienen otras personas que observan dicho acontecimiento. Es evidente que la percepción del tiempo, a la que podríamos llamar “tiempo psicológico” es diferente de lo que marca un reloj, que podríamos llamar “tiempo físico”. Esto nos lleva a relacionar el tiempo con la mente humana.

---

<sup>17</sup> **Lechallas, G., (1896):** *Etude sur l'espace et le temps*, Felix Alcan, Paris, p. 175.

Ya San Agustín de Hipona (354 – 430) en sus *Confesiones* decía que el tiempo no es nada en la realidad sino que existe en la aprehensión mental de la realidad. El *Doctor Solemnis* Hendericus de Gandavo (conocido como Henry de Gent, 1217? – 1293)<sup>18</sup> y Giles de Roma, (1260? – 1316)<sup>19</sup> dijeron que el tiempo existe en la realidad como un continuum independiente de la mente pero que sólo por la mente puede distinguirse en partes anteriores y posteriores.

En el siglo XI, el filósofo persa Abu Ali al-Husayn Ibn Sina (conocido como Avicena, 980 – 1036) dudaba de la existencia del tiempo físico argumentando que ese tiempo sólo existe en la mente debido a la memoria y a la expectativa. En el siglo XIII, John Duns Scotus (1266 – 1308) reconoció y separó el concepto del tiempo físico de su noción psicológica sosteniendo que “en cuanto el tiempo es un aspecto del movimiento es independiente de la mente, ya que el movimiento es; en cuanto es una medida, su existencia depende de la existencia de un ser capaz de medir”<sup>20</sup>

Kant creía que nuestro sentido del tiempo es una condición necesaria de nuestra experiencia<sup>21</sup>. Ernst Mach (1838 – 1916), en cambio, consideraba que todo conocimiento auténtico descansa sobre la experiencia sensorial, de modo que nuestra sensación del tiempo es sólo eso; una simple sensación<sup>22</sup>. Hoy en día, la mayoría de los filósofos rechazarían ambas posiciones y afirmarían que nuestro sentido del tiempo está indirectamente relacionado con nuestra capacidad de percibir todo tipo de cambios, nuestro sentido del tiempo es una construcción intelectual que nos ayuda a sacar provecho de nuestra experiencia.

¿Existe objetivamente este tiempo que sentimos? Puede ser muy difícil distinguir un genuino aspecto objetivo de la realidad de una apariencia de la realidad o de una perspectiva particular desde la cual observamos la realidad. Esta dificultad surge cuando preguntamos: ¿Si el conocimiento estuviera ausente, también estaría ausente el tiempo? Probablemente, el conocimiento requiera de un sentido del tiempo basado en una actividad cerebral pero ¿el tiempo requiere de conocimiento?

Esta cuestión metafísica ha sido discutida desde la antigüedad. Aristóteles planteó la cuestión:

“Si el alma (la mente) no existiera, el tiempo existiría o no, es una pregunta que puede formularse justificadamente, ya que si no existiera alguno para tomarlo en cuenta no habría nada que pudiese ser tomado en cuenta...”<sup>23</sup>

---

<sup>18</sup> **de Gent, H.** *Disputationes Quodlibetales (Quodlibeta) (1260?)* Editados en Paris 1518 y Venecia 1608, 1613.

<sup>19</sup> **Giles de Roma.** *Theoremata de esse et essentia.* Ed. H. Heceidiz. Louvain, (1930).

<sup>20</sup> Cf. **Landry, B.:** *La philosophie de Duns Scot*, Firmin-Didot, París, 1922, pp, 126 – 127.

<sup>21</sup> Cf. **Martin, G.** *Kant's Metaphysics and Theory of Science.* Manchester University Press, Manchester, 1961, Capítulo III.

<sup>22</sup> **Mach, E., (1886):** *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen.*, Gustav Fischer ed., Jena, p. 72.

<sup>23</sup> **Aristóteles.:** *Física* 223 a.

---

Aristóteles no respondió a esta pregunta porque, según dijo más profundamente, depende si el tiempo es la numeración conciente del movimiento o, en cambio, es la capacidad de movimiento que es numerada donde el conocimiento existe. La distinción aristotélica presagió la distinción moderna entre tiempo psicológico y tiempo físico.

Alguien ha dicho, con razón: “El tiempo físico es tiempo público. El tiempo psicológico es tiempo privado”. Cuando un físico define velocidad como la magnitud vectorial cuyo módulo resulta de relacionar el cambio de la posición con el intervalo de tiempo en que ese cambio se produce, el término “tiempo” se refiere al tiempo físico. El tiempo psicológico existió en la mente del hombre primitivo mucho antes de que inventara algún “reloj” rudimentario para medir el tiempo físico y se entiende mejor como conciente que el tiempo físico. Pero el tiempo físico es más fundamental para ayudarnos a entender nuestras experiencias compartidas en el mundo y, por supuesto, para hacer ciencia es mucho más útil que el tiempo psicológico.

Kant sugirió que existe una relación sutil entre tiempo y mente, llegando a afirmar que nuestra mente estructura nuestras percepciones como si supiéramos a priori que el tiempo es como una línea matemática. En su teoría, el tiempo es una forma de experiencia conciente<sup>24</sup>. El tiempo y el espacio son formas en que la mente proyecta a los objetos externos hacia sí. Kant sostuvo que nuestra mente estructura nuestras percepciones de modo que el espacio tiene siempre una geometría euclidiana y el tiempo tiene una estructura de una línea matemática infinita. La idea de Kant de que el tiempo es una *forma* de aprehender los fenómenos se puede tomar mejor como una sugerencia de que no tenemos una percepción directa del tiempo sin la capacidad de experimentar cosas y eventos *en* el tiempo. Algunos historiadores distinguen el espacio perceptual del espacio físico y dicen que Kant tenía razón al referirse al espacio perceptual. Sin embargo, es difícil tener una idea clara del concepto de espacio perceptual. Si el espacio físico y el espacio perceptual son la misma cosa, entonces lo que Kant afirmaba era que conocemos *a priori* que el espacio físico es euclidiano.<sup>25</sup>

El tema filosófico referido al “flujo del tiempo”, analiza si este flujo es una característica objetiva de la realidad o, en cambio, si es solamente un rasgo de la percepción humana.

---

<sup>24</sup> En metafísica, la controversia entre idealismo y realismo radica en que para el idealista nada existe independientemente de la mente. Si esta controversia se resolviera a favor del idealismo, entonces también el tiempo, tanto físico como psicológico, tendría un carácter subjetivo.

<sup>25</sup> En la década de 1820, cuando Gauss, Bolyai y Lobachevsky desarrollan en forma independiente las geometrías no euclidianas y, además, se plantean crecientes dudas acerca de la confiabilidad del método de la prueba trascendental de Kant, la proposición de que las verdades sobre el espacio y el tiempo son verdades *a priori* comenzó a perder adhesión.

---

### **3. Los sistemas de referencia inerciales**

Más allá de las distintas concepciones referidas a las relaciones entre el tiempo y la mente que acabamos de comentar, no podemos dejar de resaltar la importancia que tiene el tiempo en el desarrollo de las ciencias, particularmente en el de las ciencias naturales. Desde la antigüedad, las ciencias naturales han usado al tiempo como forma de ordenar la detección de eventos. Esto es particularmente notorio en la Astronomía. A partir de la Edad Moderna surge la necesidad de considerar al tiempo como una de las variables principales de la “Filosofía natural”, nombre que en ese entonces se le daba a la Física. La Física estudia la manera en que se producen los eventos en el espacio lo que incluye la variación temporal de las posiciones de los cuerpos que participan en dichos eventos. Esto ha forzado a los físicos a establecer lo que hoy en día llamamos “sistemas de referencia”.

Si estamos viajando en un tren y observamos los asientos del vagón concluimos que están en reposo. En cambio, para una persona que desde el exterior observe el desplazamiento del tren, le parecerá que tanto los pasajeros del vagón como los asientos están en movimiento. De modo que mientras para nosotros, pasajeros del tren, los asientos están en reposo para otros observadores dichos asientos están en movimiento. Es decir, las descripciones que se efectúan sobre un mismo hecho dependen de la opinión de los observadores y, aunque contrapuestas, pueden ser perfectamente válidas. De modo que para describir los procesos que se producen en la naturaleza hay que especificar lo que se llama “un sistema de referencia”.

Tal como lo estamos presentando, un sistema de referencia es un punto de vista estándar o una perspectiva para hacer observaciones y emitir juicios. Para darle un carácter cuantitativo a un sistema de referencia, se suele elegir un objeto y postular que el sistema de referencia está fijo al objeto, por ejemplo, al centro de masa de dicho objeto. Por supuesto, el objeto a elegir deberá ser sólido y no debe cambiar su volumen ni su forma de manera perceptible. Podríamos elegir un sistema de referencia fijado al mojón del kilómetro 0 ubicado en el Congreso de la Nación. Cualquier otro objeto se dice que está en reposo en el sistema de referencia si permanece a una distancia constante en una dirección fija del cuerpo de referencia usado para definir el sistema. Por ejemplo, nuestra casa se encuentra en reposo en un sistema de referencia fijado al mojón del kilómetro 0.

Para definir la posición de cualquier objeto en el espacio tridimensional del sistema de referencia que hemos elegido, necesitamos aplicar un sistema de coordenadas al sistema. De acuerdo con las ecuaciones que rigen las relaciones entre esos ejes, tendremos diferentes tipos de sistemas de coordenadas (esféricas polares, cilíndricas, elípticas confocales, etc.). Uno de los sistemas de coordenadas más familiares es de las cartesianas ortogonales en los cuales los tres ejes son mutuamente perpendiculares y sus direcciones, son las direcciones familiares  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Si en un sistema de coorde-

nadas se puede representar la posición de un objeto mediante un punto<sup>26</sup> diremos que se trata de un “punto objeto”. Dos puntos objeto se encuentran en el mismo lugar si tienen los mismos valores de sus coordenadas  $x$ ,  $y$  y  $z$ .

La elección de un sistema de referencia es enteramente arbitraria y suele estar dada por cuestiones prácticas más que por cuestiones teóricas. Un sistema de referencia fijo en el Sol puede ser apropiado para estudiar el movimiento de los planetas. Pero para analizar el movimiento de un automóvil que se desplaza en línea recta a lo largo de una autopista es más conveniente elegir un sistema de referencia fijo en algún lugar de la autopista.

En los distintos sistemas de referencia las leyes naturales, incluidas las del movimiento tienen, en general, formas diversas. Si se toma un sistema de referencia cualquiera puede ocurrir que hasta las leyes de los fenómenos más simples tomen en él formas complicadas. Por eso se plantea el problema de elegir un sistema de referencia en el cual las leyes naturales tomen su forma más simple.

La forma más sencilla de movimiento es la del cuerpo libre, es decir, del cuerpo que no experimenta ninguna acción exterior. Según Lev Landau: “Existen sistemas de referencia en los cuales el *movimiento libre* se realiza con velocidad constante en magnitud y dirección. Estos sistemas de referencia se llaman *inerciales* y la afirmación de su existencia constituye la esencia de la *ley de la inercia*”<sup>27</sup>. El lector estará familiarizado con esta ley, también llamada “Primera ley de Newton”. Esa ley<sup>28</sup> establece que si sobre un cuerpo en reposo no actúa ninguna fuerza (o si la suma vectorial de todas las fuerzas actuantes sobre un cuerpo es cero) el sistema permanece en reposo, y si el cuerpo estaba en movimiento continúa con movimiento rectilíneo y uniforme.

En muchos casos al aplicar una fuerza constante sobre un cuerpo en reposo, este inicia un movimiento. En ese caso, el cuerpo además de moverse se acelera. En estos casos, a partir de la “Se-

---

<sup>26</sup> En algunos casos conviene representar la posición de un cuerpo de dimensiones finitas mediante la posición de su centro de masa, o la posición de un cuerpo cargado electrostáticamente y en equilibrio mediante un punto que representa su centro de concentración de carga eléctrica.

<sup>27</sup> Landau, L., – Lifschitz E.; *Curso abreviado de Física Teórica*. Libro 1. Ed. Mir. Moscú (1971) Capítulo 1. p. 19.

<sup>28</sup> Estrictamente debería llamarse “Principio de inercia”, ya que es indemostrable de por sí sino que mantiene su vigencia por sus consecuencias observacionales. Además, no es de Newton sino de Descartes quien en sus *Principia philosophiae* (1644) estableció que un corpúsculo en reposo dentro del vacío sigue en dicho estado eternamente, mientras que un corpúsculo en movimiento sigue moviéndose con idéntica velocidad y en línea recta, a menos que sea desviado por otro corpúsculo. Newton lo incluyó dentro de los principios de la Mecánica en 1687.

gunda ley del movimiento”<sup>29</sup> de Newton se puede establecer la relación entre la fuerza neta  $\vec{F}$  actuante sobre el cuerpo en movimiento y la aceleración  $\vec{a}$  que adquiere. Esto se sintetiza en una expresión sencilla  $\vec{F} = m\vec{a}$  en la que  $m$  es la masa del cuerpo y el vector aceleración tiene la misma dirección, sentido y recta de acción que el vector fuerza.

Como los cuerpos se atraen por acción de fuerzas gravitatorias que, en la Mecánica clásica, operan a distancia<sup>30</sup>, la presencia de la gravitación destruye generalmente la posibilidad de encontrar un sistema de referencia que sea absolutamente inercial. De modo que, en la práctica, cuando se trata de definir un sistema inercial para estudiar la producción de ciertos eventos que en él ocurren se lo elige, no por ser absolutamente “no acelerado” sino porque su aceleración respecto de algún promedio (definido en forma apropiada) de toda la materia del Universo es despreciable. Un sistema de referencia cuyo origen se ubique en ciertas estrellas a las que se consideran en reposo y a la distancia en que se encuentran los cuerpos que intervienen en los eventos a estudiar la interacción gravitatoria del resto del Universo puede considerarse nula constituye aproximadamente un sistema de referencia inercial y a menudo es adecuado para muchos propósitos<sup>31</sup>.

Un sistema es inercial respecto de otro si se mueve respecto de este último con movimiento rectilíneo y uniforme.<sup>32</sup>

En los sistemas inerciales se cumple el *principio de la relatividad* según el cual, las leyes de la naturaleza deben tener la misma forma para todos los sistemas inerciales de referencia. Las ecuaciones que las expresan son, por lo tanto, invariantes respecto de las transformaciones de las coordenadas y del tiempo al pasar de un sistema inercial a otro.

Junto al principio de la relatividad, en la base misma de la *Mecánica Clásica newtoniana*, se halla la hipótesis de que el tiempo transcurre de la misma manera en todos los sistemas inerciales de

---

<sup>29</sup> Las tres ediciones de los *Principia* revisadas por Newton, fueron escritas en latín. La traducción al español de la segunda ley (o axioma) del movimiento, en términos modernos, dice: *La variación en la cantidad de movimiento que experimenta un cuerpo, debida a un impulso, es proporcional a dicho impulso y tiene su misma dirección y sentido*. Un caso particular ocurre cuando la fuerza que provoca el impulso es *constante* y *altera el estado de reposo o movimiento del cuerpo que la recibe*. En este caso, (y sólo en este caso) el cuerpo experimenta una aceleración proporcional a dicha fuerza. En símbolos  $\vec{F} = m\vec{a}$ .

<sup>30</sup> La última teoría de la Física, llamada *teoría del campo cuántico*, niega la posibilidad de la existencia de *interacción a distancia*. Toda interacción entre dos cuerpos que no están en contacto, es mediada por algún ente, un fotón, o un electrón, o un gravitón, etc.

<sup>31</sup> Es el llamado “sistema inercial de las estrellas fijas”.

<sup>32</sup> Si está experimentado un movimiento de giro respecto del sistema inercial está sufriendo una aceleración angular (debida a la acción de cierta fuerza) y, por consiguiente, no es sistema inercial.

---

referencia<sup>33</sup>. La unificación de esta hipótesis con el principio de la relatividad se conoce con el nombre de *principio de la relatividad de Galileo*.

Supongamos que un punto objeto tiene coordenadas  $r$  y  $r'$  en dos sistemas inerciales de referencia distintos  $K$  y  $K'$ , de los cuales el segundo se mueve respecto del primero con una cierta velocidad  $V$ . Al cabo de un intervalo de tiempo  $\Delta\tau'$  el desplazamiento de  $K'$  respecto de  $K$  viene dado por la conocida fórmula del movimiento rectilíneo y uniforme: desplazamiento = velocidad  $\times$  intervalo de tiempo. De modo que para un observador ubicado en  $K'$  la coordenada  $r$  estará vinculada con  $r'$  mediante la relación

$$r = r' + V\Delta\tau' \quad (1)$$

Sobre la base de la hipótesis mencionada más arriba, el tiempo “transcurre” de la misma manera para el sistema en reposo  $K$  que el para el sistema en movimiento  $K'$  lo que nos permite escribir

$$\Delta\tau' = \Delta\tau \quad (2)$$

Dividiendo ambos miembros de la (1) por el intervalo de tiempo se obtiene la *ley de la suma de las velocidades*<sup>34</sup>

$$v = v' + V \quad (3)$$

Las ecuaciones (2) y (3) se conocen como la *transformación de Galileo*. El principio de la relatividad de Galileo requiere la invariancia de las leyes de la naturaleza respecto a esta transformación.

Además, la completa equivalencia física de todos los sistemas inerciales de referencia demuestra que no existe ningún sistema “*absoluto*” que pueda preferirse a los demás. No debemos de confundir “sistema de referencia absoluto” con “espacio absoluto”. Como hemos mencionado antes, el sentido que se le da a “espacio absoluto” — especialmente a partir de Newton y sus discípulos — es el de considerar al espacio tridimensional como un enorme contenedor donde ocurren los eventos y que ese contenedor existe aún si en él no ocurriesen eventos o no existiesen cuerpos. En cambio, un

---

<sup>33</sup> Los físicos suelen llamar a esta hipótesis “hipótesis del tiempo absoluto” pero no debe confundirse con la hipótesis de que el tiempo existe con independencia de los eventos. Más adelante veremos que Albert Einstein, mediante su teoría de la relatividad restringida, rechazó la noción que da el sentido común sobre el carácter absoluto del tiempo. En su teoría afirmó que el intervalo de tiempo (y de distancia) entre dos eventos depende del sistema de referencia del observador.

<sup>34</sup> La división se hace debido a que la velocidad  $V$  es constante. Si  $V$  fuese variable habría que derivar ambos miembros respecto del tiempo.

---



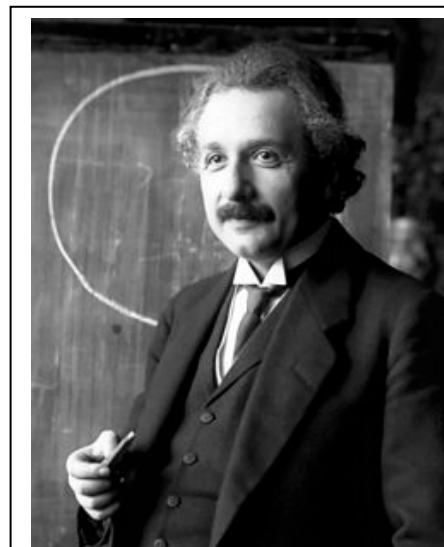
sistema de referencia absoluto sería aquel cuyo origen coincidiría con el centro del Universo<sup>35</sup> si éste centro existiese y pudiese determinarse.

#### 4. ¿Qué es lo que la ciencia requiere del tiempo?

Entre las teorías más fundamentales de la Física se encuentran la teoría de la relatividad general de Albert Einstein y la teoría cuántica. En 1905, Einstein desarrolló una teoría aplicable a los sistemas de referencia inerciales sobre la base de considerar que en *ese tipo de sistemas* no sólo las leyes de la Naturaleza tienen la misma forma aunque estén en movimiento relativo unos respecto de otros (algo entrevisto por Galileo) sino que también la velocidad de la luz debe tener el mismo valor independientemente de que los sistemas inerciales estén en reposo o en movimiento relativo entre sí. Esto es, en los sistemas inerciales la velocidad de la luz es constante e independiente de si la fuente que la emite está en reposo o en movimiento respecto del sistema de referencia. Como esta teoría está restringida a sistemas inerciales se conoce como “teoría de la relatividad restringida” o “teoría de la relatividad especial”.

Un desarrollo formal de la teoría de la relatividad tendría el doble efecto de extender enormemente estas notas y desviar la atención del lector hacia razonamientos matemáticos. Una exposición clara y sucinta puede obtenerse de los escritos de Einstein<sup>36</sup>. Nos limitaremos aquí a dar las ecuaciones matemáticas que cuantifican las variaciones de algunas magnitudes físicas con el desplazamiento de un cuerpo en un sistema de referencia inercial.

Imaginemos dos sistemas de referencia inerciales  $A$  y  $B$  y supongamos que  $A$  se encuentra en reposo y que  $B$  está en movimiento relativo rectilíneo y uniforme con velocidad  $v$  respecto de  $A$ . En un determinado instante un observador situado en el sistema inercial  $A$  detecta la masa de un cuerpo situado en  $B$  que se mueve con esa velocidad  $v$  y registra su valor como “ $m$ ”. Para un observador que se encuentre en  $B$  el cuerpo en cuestión estará en reposo y utilizando una balanza idéntica a la del observador de  $A$  (y sincronizada con la balanza de  $A$ ) determina la masa del cuerpo y registra un valor  $m_0$ . La teoría de la relatividad especial establece que la relación entre la masa en



A. Einstein 1879 – 1955.

---

<sup>35</sup> En el modelo cosmológico geocéntrico de Claudio Ptolomeo, el Alejandrino, el centro de la Tierra es el centro del Universo lo que hacía “natural” un sistema de referencia absoluto.

<sup>36</sup> **Einstein, A.**; *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Editorial Debate S.A. Madrid. 1998.

movimiento,  $m$ , que se registra en el primer sistema inercial y la masa en reposo  $m_0$  que se registraría en el segundo sistema inercial está dada por

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

expresión en la que  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío (299.792.458 metros por segundo). Dejamos al lector que, calculadora en mano, estime la masa en movimiento de un cuerpo cuya masa en reposo es 1 kg y se desplaza en ese sistema inercial a 1000 kilómetros por hora. Comprobará que la diferencia entre  $m$  y  $m_0$  es indetectable mediante los instrumentos disponibles. En cambio, si el cuerpo en movimiento se desplaza a 30.000 kilómetros por segundo, su masa en movimiento es 0,5% mayor que su masa en reposo. Esta diferencia es tanto más notoria cuanto mayor es la velocidad del cuerpo. Así, a 250.000 kilómetros por hora, su masa en movimiento es 81,2% mayor que su masa en reposo. El límite de velocidad estará dado cuando  $v = c$ . En este caso  $v^2/c^2 = 1$  y el denominador de la (4) se hace cero. Recordemos que la división por cero está excluida de la aritmética, de modo que lo único que podemos afirmar es que cuando  $v$  tiende a  $c$  la masa en movimiento tiende a infinito.

Durante más de dos siglos la Mecánica newtoniana sostuvo que la masa de un cuerpo es constante. De la ecuación atribuida a Newton,  $\vec{F} = m\vec{a}$ <sup>37</sup>, se consideraba que la *masa es la constante de proporcionalidad* entre la fuerza aplicada a un cuerpo y la aceleración que este adquiere. Los ejemplos numéricos que acabamos de dar explican porqué la Mecánica newtoniana consideraba que la masa de un cuerpo es constante: A las velocidades que usualmente se desplazan los cuerpos, no hay forma de detectar variaciones de la masa debidas al movimiento.

Las ecuaciones matemáticas que cuantifican el aumento de la masa de un cuerpo con la velocidad, llevan a la conclusión que cuando el cuerpo en movimiento en el vacío adquiere la velocidad de la luz en el vacío, su masa se torna infinita. Debemos hacer notar que la velocidad de la luz en un determinado medio homogéneo e isótropo en equilibrio físico, químico y termodinámico, es menor que en el vacío<sup>38</sup>.

---

<sup>37</sup> Esta ecuación no figura en ninguna parte del texto de sus *Principia*.

<sup>38</sup> Hacemos hincapié en referirnos al medio en el cual la luz se propaga ya que su velocidad depende de la naturaleza del medio. La Óptica permite establecer que la velocidad de la luz en un medio dado es inversamente proporcional al índice de refracción de ese medio relativo al vacío. El índice de refracción relativo al vacío del agua en condiciones ambientales y en tanto no ocurra ningún otro cambio físico, químico o termodinámico, es 1,333. Por consiguiente, la velocidad de la luz en el agua líquida, en las condiciones mencionadas, es del orden de los 300.000/1,333  $\cong$  225.056 km/s. Un medio es isótropo para la propagación de la luz si su velocidad tiene el mismo valor cualquiera sea la dirección de propagación. En algunos materiales como el

Otra consecuencia que deriva de la teoría de la relatividad es que cuando un cuerpo se mueve en una dirección dada su longitud en esa dirección se contrae. Si un cuerpo cuya longitud en reposo respecto de un sistema inercial — medida en una cierta dirección  $x$  — es  $L_0$ , y respecto de otro sistema inercial se desplaza en la dirección  $x$  con una velocidad constante  $v$ , su longitud en movimiento  $L$  está dada por la ecuación

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (5)$$

Mediante razonamientos análogos a los empleados para analizar la variación de la masa con la velocidad en los sistemas inerciales, encontramos que para las velocidades con las que usualmente se desplazan los cuerpos, la contracción de la longitud  $L - L_0$  en la dirección del movimiento es indetectable mediante los instrumentos disponibles, pero para velocidades próximas a la de la luz  $1 - v^2/c^2$  es menor que 1 con lo que  $L$  es menor que  $L_0$ . Nuevamente, el caso límite se daría cuando  $v = c$  con lo que  $L = 0$ . Esto marca otra de las imposibilidades para que un cuerpo se desplace en el vacío a la velocidad de la luz o a velocidades superiores.

Supongamos ahora que en un determinado instante dos observadores  $A$  y  $B$  sincronizan sus relojes para cronometrar determinados eventos. Si ambos observadores están en reposo respecto del sistema de referencia al cabo de un cierto intervalo, sus lecturas del tiempo transcurrido coincidirán perfectamente. Pero si  $A$  se encuentra en movimiento relativo con velocidad  $v$  respecto del sistema inercial mientras que  $B$  permanece en reposo, la duración de un evento será mayor para  $A$  que para  $B$ . Sea  $t$  la duración del evento para  $A$  que se mueve con velocidad constante  $v$  respecto del sistema inercial y  $t_0$  la duración del mismo evento para  $B$ , que está en reposo. La teoría especial de la relatividad especial establece que

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (6)$$

Al igual que en los ejemplos anteriores, encontraremos que para velocidades pequeñas respecto de la velocidad de la luz la dilatación del tiempo es experimentalmente indetectable pero se torna importante para velocidades próximas a la de la luz tendiendo a infinito cuando  $v$  tiende a  $c$ .

Una consecuencia inmediata es que ningún cuerpo en movimiento puede alcanzar la velocidad de la luz en el vacío, ya que en ese caso  $v^2/c^2$  sería igual a 1, de modo que la cantidad debajo del signo radical sería cero y la división por cero está excluida de la aritmética por su indefinición. Un móvil, tampoco podría superar la velocidad de la luz en el vacío, ya que en ese caso  $v^2/c^2$  sería mayor que 1 y la cantidad bajo el signo radical sería un número negativo. Esto muestra que, en la teoría

---

cuarzo, la calcita, o ciertas soluciones, la velocidad de la luz toma valores distintos según ciertas direcciones de propagación. Tales materiales se dicen *anisótropos* para la propagación de la luz.

---

de la relatividad, la velocidad de la luz en el vacío es el límite máximo e inalcanzable para todo móvil.<sup>39</sup>

Pero quizás sea más conocido para el lector el resultado de aplicar la teoría de la relatividad especial a la energía de un cuerpo en movimiento. Esta teoría prevé que la energía  $E$  de un cuerpo, cuya masa en reposo es  $m_0$ , que se mueve en un sistema inercial con velocidad constante  $v$  es

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (7)$$

Esta importantísima ecuación demuestra, en particular, que en la mecánica relativista la energía de una partícula o de un cuerpo en un sistema inercial no se anula cuando  $v = 0$  sino que sigue siendo una cantidad finita

$$E = m_0 c^2 \quad (8)$$

que recibe el nombre de *energía en reposo* de la partícula o el cuerpo considerado. De modo que si un cuerpo en reposo intercambia cierta energía  $\Delta E$  con su entorno, experimentará una variación en su masa  $\Delta m_0$  dada por  $\Delta E = c^2 \Delta m_0$ . Esta es, quizás, la ecuación de Einstein más conocida.

---

<sup>39</sup> Para corroborar una teoría física se requieren múltiples contrastaciones de sus consecuencias con los experimentos. Pero para refutar una teoría sólo basta un contraejemplo. En los enunciados de toda teoría aparecen los llamados "cuantificadores universales". Estos cuantificadores se suelen expresar de distinta manera: "Siempre que...", "Cada vez que...", "En ningún caso ...", "Todos los ...", "Nunca se observa ...", etc. Para refutar un enunciado del tipo "Todos los  $A$  son  $B$ ", basta en encontrar un  $A$  que no es  $B$ , por lo que se invalida el uso del cuantificador universal "Todos". Desde que Einstein propuso su Teoría de la Relatividad y, especialmente cuando se comenzaron a comprobar experimentalmente sus consecuencias, la comunidad científica aceptó que "Ningún ente puede alcanzar la velocidad de la luz en el vacío". En septiembre de 2011, se realizó un experimento en el Consejo Europeo de Investigación Nuclear (CERN) consistente en acelerar neutrinos (una clase de partículas subatómicas) mediante campos eléctricos y magnéticos y enviar esos neutrinos desde el laboratorio subterráneo, ubicado cerca de la frontera entre Francia y Suiza, hasta el Gran Sasso, en Italia, situado a 730  $km$ . El tiempo que registraron los instrumentos fue de  $-60$  nanosegundos. Es decir, los neutrinos llegaron al Gran Sasso, 60 nanosegundos antes de haber partido. Esto implicaba que habían viajado a una velocidad mayor que la de la luz en el vacío, lo que constituía un contraejemplo que invalidaba uno de los principios de la teoría de la relatividad. Durante varios meses, este resultado fue tema de discusión en todos los centros de investigación sobre Mecánica relativista y muchos científicos comenzaron a dar por tierra con la teoría de Einstein. Recién en junio de 2012, el CERN informó que los registros estaban afectados de error y que la repetición de los ensayos mostraban que, en sus movimientos, los neutrinos cumplían con tener como límite máximo la velocidad de la luz en el vacío.

---

Una teoría es “física” si existe alguna consecuencia de ella que pueda contrastarse con la realidad. A fines del siglo XIX comenzaron a hacerse experimentos para estudiar el comportamiento de gases enrarecidos (gases a presiones muy bajas) en campos eléctricos y magnéticos. Si se encierra un gas a presión muy reducida en un tubo de vidrio resistente, provisto en su interior de dos electrodos conectados a un generador de corriente continua que suministra una diferencia de potencial del orden de varios miles de volts, se observa la producción de una descarga luminosa. Por provenir del electrodo negativo, llamado cátodo, la descarga recibió el nombre de “rayos catódicos”. Distintos experimentos demostraron que los constituyentes de esos rayos catódicos son partículas con carga eléctrica negativa llamados *electrones*. Esas partículas se encuentran en todos los átomos y son indistinguibles entre sí. La velocidad con que se desplazan los electrones aumenta con la intensidad del campo eléctrico. Cuando se interpone un campo magnético perpendicular al campo eléctrico que impulsa a los electrones, estos se desvían recorriendo una trayectoria curvilínea. La trayectoria depende de las



H. Minkowski (1864 - 1909)

intensidades de los campos eléctrico y magnético y de la masa del electrón. Bajo la acción de campos eléctricos muy intensos, los electrones adquieren velocidades importantes respecto de la velocidad de la luz y la trayectoria de los rayos catódicos se desvía de las predicciones de la Mecánica Clásica. Hendryk Antoon Lorentz<sup>40</sup> comprobó que aplicando una ecuación análoga a la (4) se podían justificar los resultados experimentales. Pero postular que la masa del electrón aumenta con su velocidad implicaba erosionar la construcción teórica elaborada por la Mecánica Clásica sobre la base de la constancia de la masa de los cuerpos.



H. A. Lorentz (1853 - 1928)

Los movimientos de los electrones bajo la acción de campos eléctricos y magnéticos son movimientos acelerados y el sistema de referencia para estudiar dichos movimientos no es inercial. De modo que los experimentos de Lorentz no corroboraban la teoría de la relatividad especial. No obstante dieron motivos para que los científicos siguie-

---

<sup>40</sup> Precisamente, las ecuaciones (4), (5) fueron propuestas por Lorentz, de allí que esas ecuaciones y la (6) y (7) se conozcan como *transformadas de Lorentz*. Lorentz fue galardonado con el Premio Nobel de Física 1902.

ran insistiendo en la búsqueda de consecuencias observacionales de la teoría de la relatividad. Teoría que, además, tenía el mérito de demostrar que la luz no requiere de ningún medio material para propagarse, algo que había preocupado a los científicos durante mucho tiempo.

### **5. *El espacio tetradimensional de Minkowski***

En 1907, Hermann Minkowski presentó una idea original en metafísica, relativa al espacio y el tiempo. Se dio cuenta que el espaciotiempo es más fundamental que el tiempo o el espacio. Y lo destacó diciendo: “En lo sucesivo el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo están condenados a reducirse a meras sombras, y sólo una clase de unión de los dos preservará una realidad independiente”. Esta afirmación iba en contra de lo que Newton había sostenido dos siglos antes: que cada observador puede, en principio, determinar intervalos de tiempo que de ninguna manera dependen de su propio sistema de referencia.

Los dichos de Minkowski se apoyaban en la afirmación de Einstein: de que cada sistema de referencia tiene su propio tiempo particular. A menos que se explicita el sistema de referencia respecto del cual se hace una determinación del tiempo, carece de sentido asignarle un tiempo a la producción de un evento. Las leyes de la Naturaleza que satisfacen los requisitos de la teoría de la relatividad especial adquieren formas matemáticas en las que la coordenada temporal se vincula con las coordenadas espaciales.

En la teoría de la relatividad especial la coordenada temporal se corresponde, desde el punto de vista formal, con las tres coordenadas espaciales de la geometría euclidiana.

### **6. *Los diagramas de Minkowski***

En la teoría de la relatividad especial, la velocidad de la luz es la misma cualquiera sea la velocidad de la fuente que la emite, siempre que se propague en un medio homogéneo e isótropo. Supongamos que un instante  $t_0$  se emite un destello luminoso en un punto del espaciotiempo. Como la luz de ese destello se propaga en todas direcciones con una misma velocidad de — aproximadamente — 300 millones de metros por segundo, al cabo de un millonésimo de segundo la luz emitida intersecta un plano que se encuentre a 300 metros en una dirección dada formando un círculo tal como lo muestra la Figura 1

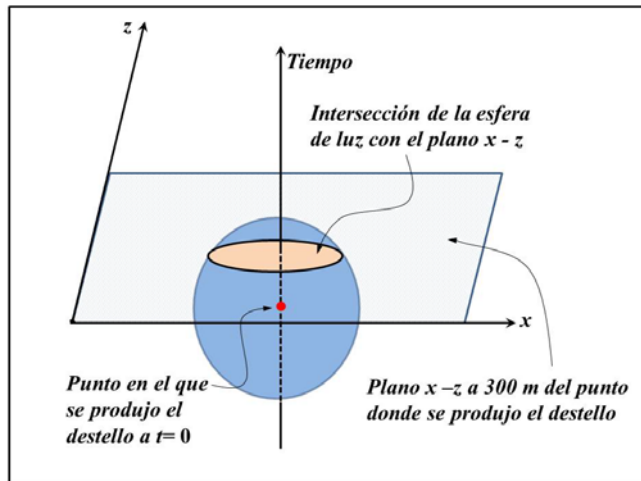


Figura 1

Al cabo de 2 millonésimos de segundos, la esfera luminosa se habrá expandido e intersectará otro plano situado a 600 metros del punto del destello formando un círculo de mayor diámetro (Figura 2)

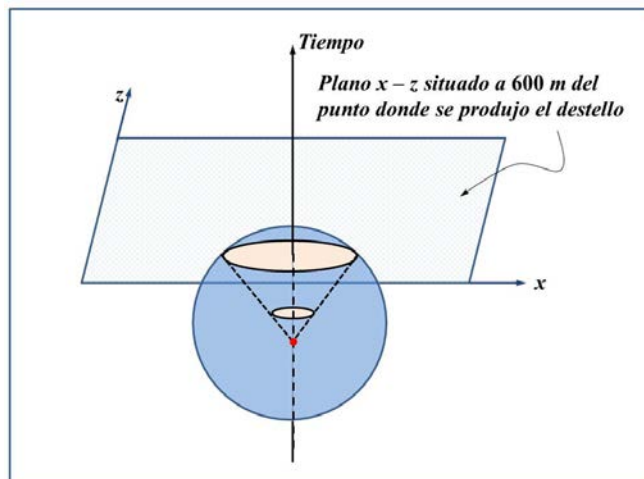


Figura 2

Observamos que a medida que transcurre el tiempo la intersección de la luz con los sucesivos planos (en las direcciones arbitrarias  $x - z$ ) van formando un cono de luz tridimensional en un espacio-tiempo tetradimensional. Este cono se llama “cono de luz futuro” del evento. De manera similar podríamos construir otro cono llamado “cono de luz del pasado” que está dado por el conjunto de eventos a partir de los cuales se puede producir el destello luminoso. (Figura 3)

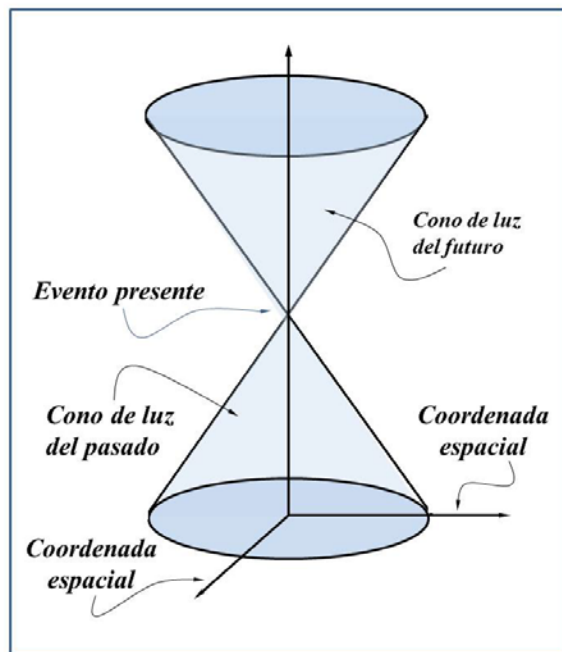


Figura 3

Notemos, entonces, que los diagramas de Minkowski representan regiones del espaciotiempo en las que ocurren eventos usando un sistema de coordenadas rectangulares en el que el eje de tiempo vertical es el producto del tiempo y la velocidad de la luz.

Los diagramas de Minkowski se aplican a un observador particular que experimenta el evento que ocurre en el punto indicado por el origen del diagrama.

En un diagrama de Minkowski, una partícula aún infinitamente pequeña no se representa como ocupando un punto del espaciotiempo sino como ocupando una línea que contiene todos los puntos en los cuales ella existe a través del tiempo. Esta línea se llama la *línea de universo* de la partícula. Si dos líneas de universo correspondientes a dos partículas se intersectan, significa que ambas partículas colisionaron en esa intersección. Una línea de universo de una persona está compuesta por todas las líneas de universo de sus partes.

Las líneas de universo de los rayos de luz que parten del origen forman un ángulo de 45 grados con cada uno de los ejes espaciales. La teoría de la relatividad demuestra que el movimiento inercial corresponde a líneas de universo rectas y el movimiento acelerado corresponde a líneas de universo curvas.



### 7. La controversia entre la teoría relacional de tiempo y la teoría del tiempo absoluto

Ya hemos mencionado la controversia entre las concepciones absolutas y relativas del espacio. Ahora, haremos una breve mención sobre las concepciones absolutas y relativas del tiempo.

Si programamos nuestra computadora para que ejecute un determinado programa a las 23.00, ¿podríamos afirmar que es la hora 23.00 la que hace ejecutar el programa? Si bien el programa no se ejecutará antes de la hora 23.00 la afirmación de que el tiempo es la *causa* de que el programa se efectúe no resiste el menor análisis. El tiempo no es causa de nada.

Otra pregunta que podríamos formular respecto del ejemplo anterior es si la hora 23.00 existe independientemente de lo que suceda. En este caso encontraríamos dos respuestas categóricas: *si* y *no*. La respuesta afirmativa proviene de las llamadas *teorías absolutas* mientras que la negativa está dada por las *teorías relativas del espaciotiempo*, también llamadas *teorías relacionales del tiempo*.

Las teorías absolutas establecen que el tiempo existe independientemente de las relaciones espaciotemporales que exhiben los eventos físicos. Las teorías relacionales dicen que no. De manera similar a lo que comentamos respecto del espacio absoluto, algunas teorías absolutas describen al espaciotiempo como un contenedor de eventos. El contenedor existe con o sin eventos en su interior.

En este contexto, el término absoluto no significa independiente del observador sino independiente de los eventos. Las teorías absolutas afirman que el espaciotiempo podría existir aún si no hubiera objetos físicos y eventos en el Universo, mientras que las teorías relacionales implican que el espaciotiempo es nada más que objetos, sus eventos y las relaciones espaciotemporales entre ellos, de modo que depende mucho si el espaciotiempo también involucra eventos *posibles* además de los eventos reales. Todos sabemos que no se puede *medir* el tiempo sin que haya objetos y cambios, pero la cuestión que nos ocupa no es si se puede medir sino si puede *existir* sin objetos y cambios.

La relatividad del tiempo ya había sido aceptada por Aristóteles al remarcar que “no existe tiempo sin un cambio”<sup>41</sup> y fue sostenida por Leibniz en su famosa controversia con Samuel Clarke (es decir, con Newton<sup>42</sup>). Si bien muchos seguidores de Newton apoyaban la teoría del tiempo absoluto otros científicos, como Christiaan Huygens, George Berkeley y Ernst Mach tomaron partido por Leibniz. En el siglo XX, el desarrollo de la teoría de la relatividad generalizada y la aceptación de la opinión de Minkowski acerca de la vinculación indisoluble del espacio y el tiempo en el espaciotiempo, inclinaron algo la balanza a favor de las teorías relacionales. Más adelante veremos que la teoría de la relatividad generalizada prevé que el espaciotiempo se curva en presencia de cuerpos debido a la masa de estos últimos. Si la curvatura del espacio es afectada por la distribución de ma-

---

<sup>41</sup> **Aristóteles;** *Física* 218.b

<sup>42</sup> Clarke era discípulo de Newton, y hoy reconocen casi todos que contó con la ayuda del maestro para redactar las réplicas a Leibniz.

---

teria, no es plausible para un absolutista afirmar que el “contenedor” es independiente de lo que contiene. No obstante esto, subsisten teorías absolutistas llamadas *sustanciales*, no porque consideren que el espaciotiempo sea de naturaleza material sin porque lo consideran como un suerte de sustrato no sólo para los eventos reales sino para la producción de los eventos *posibles*.

### 8. *¿Qué son la relatividad y el convencionalismo de la simultaneidad?*

Si el Universo obedeciera a la Física newtoniana, dos eventos deberían ser considerados simultáneos cualquiera sea el sistema de referencia en el cual se haga la apreciación de dicha simultaneidad y con independencia si los sistemas de referencia están en reposo o en movimiento relativo. En cambio, si el Universo obedece a la Física relativista, entonces los eventos que ocurren simultáneamente según un sistema de referencia podrían no ocurrir simultáneamente respecto de otro sistema de referencia que se mueve respecto del primero. La “relatividad de la simultaneidad” es una característica del tiempo que es diferente de la llamada “convencionalidad de la simultaneidad”. Si dos eventos suceden esencialmente en el mismo lugar, los físicos suponen que pueden decidir mediante la observación directa si los eventos han ocurrido simultáneamente. Si no se detecta que uno sucedió primero entonces sostienen que ambos ocurrieron simultáneamente, y les asignan a ambos la misma coordenada en el tiempo. La determinación de la simultaneidad es más difícil si ambos eventos ocurren en lugares distintos. Einstein propuso una definición operacional de simultaneidad a distancia, postulando que dos eventos son simultáneos en un sistema de referencia (juzgados en tal sistema de referencia) si señales luminosas (no obstruidas) provenientes de ambos eventos nos alcanzan simultáneamente cuando estamos a mitad de camino entre ambos lugares donde los eventos ocurren. El método de la mitad de camino recorrido por dos señales luminosas conectadas causalmente con nosotros, empleado para la definición operacional de la simultaneidad en un sistema de referencia, tiene un presupuesto significativo: *que los rayos luminosos viajan a la misma velocidad independientemente de la dirección*. Einstein, Reichenbach y Grunbaum llamaron a esto “una razonable convención” debido a que cualquier intento de confirmar esto experimentalmente presupone que sabemos cómo determinar simultaneidad a distancia. Esto es la llamada *convencionalidad, de la simultaneidad*.

El método de la mitad de camino, no es la única forma de definir simultaneidad. Consideremos un segundo método, el método de la reflexión en el espejo. Elijamos un sistema de referencia basado en la Tierra y enviemos una señal luminosa desde la Tierra hacia Marte donde impacta sobre un espejo y se refleja hacia la fuente emisora. Supongamos que el destello ocurre a las 12.00 y su reflexión arriba a la Tierra 20 minutos después. La luz ha viajado el mismo recorrido, vacío e impenetrable, tanto a la ida como a la vuelta. ¿A qué hora impactó el haz luminoso sobre el espejo? La respuesta involucra la llamada convencionalidad de la simultaneidad. La respuesta que daría un físico es que el evento de reflexión en el espejo ocurrió a las 12.10. Ahora bien, ¿esa respuesta surge de alguna comprobación experimental o es una convención? Einstein apuntó que no habría inconsis-

tencia al afirmar que la luz alcanzó el espejo a las 12.17, siempre que presupongamos que la luz se movió de manera relativamente lenta para alcanzar el espejo pero viajó a una velocidad mayor al regresar a la Tierra. Si escogemos que el instante del impacto sea las 12.05 estamos suponiendo que la luz viajó más lentamente al regreso. Hay una base física para no escoger que el instante del impacto fue anterior al mediodía o posterior a las 12.20, porque al hacerlo así estaría violando el principio físico de que las causas preceden a sus efectos. Un requisito que establecemos en la simultaneidad es que los eventos distantes que son simultáneos *no pueden estar causalmente conectados entre sí*. Podemos satisfacer este requisito para la elección de cualquier instante del impacto entre las 12.00 y las 12.20.

### **9. La dilatación del tiempo y la paradoja de los gemelos**

La convencionalidad de la simultaneidad se aplica para establecer el carácter de simultáneos o no a dos eventos que ocurren a distancia. Para dos eventos que ocurren prácticamente en el mismo lugar el establecimiento de la simultaneidad requiere únicamente una buena sincronización de los relojes que los midan en forma independiente.

Hemos comentado que la teoría de la relatividad prevé la dilatación en el tiempo en que se produce un evento cuando el observador está en movimiento relativo respecto del sistema de referencia en el que se produce dicho evento. Esta dilatación da lugar a la *paradoja de los gemelos*, — también llamada paradoja del reloj, o paradoja de los mellizos — y es un argumento sobre la dilatación del tiempo que usa la teoría de la relatividad para producir una contradicción. El argumento describe la actividad de dos mellizos quienes, estando en reposo, sincronizan sus relojes. Uno de ellos aborda una nave espacial y viaja al espacio exterior a velocidad constante. Una vez alcanzado cierto punto muy lejano, regresa a la misma velocidad constante. Cuando se vuelvan a encontrar ¿tendrán ambos la misma edad? La respuesta que deriva de aplicar la teoría de la relatividad es: no. Debido a que el tiempo transcurre más lentamente, al regresar de su viaje espacial el mellizo será más joven que el que se quedó en casa. Sin embargo, todo es relativo, ¿no es cierto? Esto es, podríamos haber considerado que la nave espacial estaba detenida y lo que se alejaba era el planeta Tierra de modo que el mellizo que estaba “en casa” primero se aleja de la nave espacial a velocidad constante y luego regresa a la misma velocidad con lo que él sería más joven que el que quedó en la nave espacial. Si esto es así tenemos una contradicción: cuando los mellizos se vuelvan a encontrar cada uno será más joven que el otro.

En realidad, esto no es una verdadera paradoja, sino simplemente un acertijo complejo que se resuelve adecuadamente dentro de la teoría especial de la relatividad. Notemos que el argumento tiene dos partes. La primera mitad describe al mellizo en la nave alejándose y luego volviendo hacia el que se quedó en tierra, quien permanece fijo en un sistema de referencia. La segunda mitad describe al que se quedó en tierra alejándose de la nave espacial y luego regresando mientras que la nave espacial permanece fija en otro sistema de referencia. La producción de la paradoja depende de la suposición de que las dos mitades del análisis trabajan con descripciones equivalentes del mismo proceso. Tal suposición se basa sobre un principio heurístico según el cual la descripción del mundo

es igualmente válida desde el punto de vista de cualquier observador. Sin embargo, ese principio heurístico falla en la situación de los mellizos. Las descripciones no son equivalentes. Si la nave estaba en reposo y adquiere una velocidad  $v$ , esto implica que se ha acelerado al partir, habrá frenado en algún punto lejano y, para regresar a la Tierra, ha invertido el vector velocidad. Para modificar las velocidades la nave tuvo que ser acelerada y, por consiguiente sobre ella actuaron fuerzas. En cambio el mellizo que se encuentra en tierra no experimenta fuerza adicional alguna. La teoría de la relatividad presupone la invariancia de las leyes del movimiento respecto de los sistemas de referencia. Esto implica una simetría tal que para describir desde un sistema un evento producido en otro basta aplicar las ecuaciones (4), (5) y (6). De modo que la descripción del mellizo en la nave en movimiento en un sistema de referencia centrado en la Tierra es correcta mientras que el mellizo en tierra moviéndose en un sistema de referencia centrado en la nave en reposo es incorrecta, pues al no experimentar fuerza alguna su descripción no es simétrica con la otra.

#### 10. *¿En qué consiste la teoría de la relatividad generalizada?*

En la teoría de la relatividad especial se consideran los movimientos que efectúan los cuerpos en los sistemas inerciales. Referidos a esos sistemas, cualquier ley de la Naturaleza debería tener la misma forma para todos los sistemas inerciales con independencia de estado de reposo o movimiento relativos que los sistemas podrían tener. Además, la velocidad de la luz toma el mismo valor sin importar que el cuerpo que la emite se encuentre en reposo o se mueva con velocidad constante respecto de un sistema inercial.

La teoría de la relatividad general también postula que las leyes de la Naturaleza deben ser equivalentes para todos los sistemas de referencia sean inerciales o no, pero la forma en que se presentan dichas leyes es bastante más abstracta.

Si viajamos en un medio de locomoción que se desplaza en línea recta a velocidad constante, tenemos la sensación de permanecer inmóviles respecto del vehículo. Pero si el medio que nos transporta frena abruptamente sentimos un tirón hacia delante. Eso nos hace pensar que las leyes que gobiernan el movimiento de nuestro cuerpo no son las mismas si el vehículo en que viajamos se mueve uniformemente en línea recta o si se mueve de manera no uniforme.

Para poder interpretar estos fenómenos debemos recurrir al concepto de “*campo gravitatorio*” Es sumamente familiar el hecho que si soltamos un cuerpo que se encuentra retenido a cierta altura, ese cuerpo cae hacia el suelo. La Tierra y el objeto que cae experimentan una atracción recíproca.

La ley que rige las fuerzas gravitacionales fue formulada por Isaac Newton en 1687. Según esa ley dos cuerpos  $A$  y  $B$  (cada uno de ellos de material homogéneo) cuyas posiciones de los respecti-

vos centros de masa en un determinado sistema de referencia sea  $\vec{r}_A$  y  $\vec{r}_B$  se atraen con una fuerza  $\vec{F}$  dada por

$$\vec{F} = G \frac{m_A m_B}{|\vec{r}_A - \vec{r}_B|^3} (\vec{r}_A - \vec{r}_B) \quad (9)$$

En esta ecuación,  $m_A$  y  $m_B$  son las llamadas *masas gravitatorias* de los cuerpos  $A$  y  $B$  y  $G$  es una constante llamada *constante de gravitación universal* cuyo valor es  $6,670 \times 10^{-11} \text{ N m}^2\text{kg}^{-2}$ .

Durante los siglos XVIII y XIX, muchos físicos creyeron que la fuerza gravitacional era un cierto tipo de *atracción a distancia* en la que el espacio circundante a los cuerpos no cumplía ningún papel. Pero, de manera algo parecida a un imán que origina un campo magnético a su alrededor capaz de atraer un trozo de hierro, todo cuerpo origina un campo gravitatorio capaz de atraer otros cuerpos. Lo que diferencia a un campo gravitatorio de un campo magnético es que la atracción es independiente de la naturaleza del material que es atraído y sólo depende de las masas de los cuerpos que interactúan. Si no fuera por el rozamiento con el aire, un trozo de hierro y un trozo de yeso caerían exactamente de la misma manera si los dejamos caer desde la misma altura y bajo el mismo estado de reposo o movimiento inicial.

Ya hemos hecho referencia al llamado *principio de masa* según el cual la fuerza ejercida sobre un cuerpo *capaz de modificar* su estado de reposo o movimiento está dada por  $\vec{F} = m\vec{a}$ . En esta expresión la masa caracteriza las propiedades de inercia de los cuerpos, es decir, la resistencia intrínseca de los cuerpos a modificar su estado de reposo o movimiento. Es por ello que a la masa de esta ecuación se la llama *masa inercial*. En cambio en la ley de la gravitación (9) las *masas gravitatorias* caracterizan la capacidad de los cuerpos de crear campos gravitatorios y de estar sometidos a la acción de esos campos.

Podríamos preguntarnos si la masa gravitatoria de un cuerpo tiene la misma entidad que su masa inercial o son dos magnitudes diferentes que están relacionadas de algún modo. En 1894, Loránd von Eötvös realizó los primeros experimentos para distinguir las encontrando que son proporcionales. Desde entonces hasta la fecha se han hecho mediciones cada vez más precisas de ambas magnitudes encontrándose que la diferencia entre ambas es menor a  $10^{-11} \%$ . Esta diferencia es tan escasa que, por convención, se considera que la masa inercial de un cuerpo y su masa gravitatoria tienen el mismo valor numérico.

Los resultados experimentales conducen a aceptar que la masa inercial es equivalente a la masa gravitatoria y que un campo gravitatorio le comunica a todos los cuerpos que están a distancias equivalentes la misma aceleración. Esto último había sido postulado por Galileo a fines del siglo XVI quien intentó probarlo con su famoso experimento de arrojar cuerpos de distinto peso desde la torre de Pisa para demostrar que caían con la misma aceleración, experimento que fracasó debido al rozamiento de los cuerpos contra el aire.

El campo gravitatorio influye en el movimiento de los cuerpos y, en muchos casos, hace que ese movimiento no sea rectilíneo sino curvado. Sirva como ejemplo el arrojar una piedra desde cierta altura con una dirección inicial paralela a la superficie terrestre para notar que la trayectoria es curva (si la piedra no se friccionase con el aire su trayectoria sería una parábola).

Cuando dimos el ejemplo del vehículo que frena y nos impulsa hacia delante, estábamos, de alguna manera, considerando el movimiento de nuestro cuerpo respecto de dos sistemas de referencia. Respecto de un sistema de referencia *ubicado en la calle*, nuestro cuerpo se movía con movimiento rectilíneo y uniforme, aún luego de la frenada. Pero respecto de un sistema de referencia centrado en el vehículo nuestro cuerpo efectuó un movimiento acelerado. Por supuesto, este último sistema de referencia es no inercial y nuestro comportamiento en él es equivalente al movimiento en un campo gravitatorio.

Hagamos ahora consideraciones equivalentes para un rayo de luz que se mueve de manera rectilínea y uniforme respecto de cierto sistema inercial  $K$ . Respecto de otro sistema de referencia no inercial, ese mismo rayo de luz tendrá un movimiento no uniforme y su trayectoria será, en general, curvilínea. De aquí se infiere que en el seno de un campo gravitatorio la luz se propaga, en general, según líneas curvas.

En este punto, el lector tiene el derecho de desconfiar del razonamiento mediante el cual a partir de una frenada de un vehículo extrapolamos que la trayectoria de un rayo luminoso se curva en un campo gravitatorio. En realidad, el razonamiento de Einstein fue un poco más elaborado pero la conclusión fue la misma.

Para ser considerada científica, toda teoría debe poder ponerse a prueba. Una de las primeras pruebas a la que fue sometida la teoría de la relatividad general permitió explicar las presuntas “anomalías” en la órbita de Mercurio. Si bien las órbitas de los planetas predichas por la teoría de la relatividad general son casi idénticas a las que predice la Mecánica Clásica, Mercurio — al ser el planeta más próximo al Sol — está sometido a un efecto gravitatorio muy intenso y su traslación no coincide con las ecuaciones de movimiento de Newton ya que el perihelio de este planeta se desvía de los valores calculados en una cantidad equivalente a unos 43 segundos de arco por cada siglo. Esta anomalía, descubierta por Urbain LeVerrier en 1845, fue adjudicada a un pequeño e ignoto planeta — bautizado Vulcano — que orbitaría al Sol interfiriendo gravitacionalmente con la órbita de Mercurio. Vulcano nunca existió. Cuando se aplicó la teoría de la relatividad general sus resultados coincidieron perfectamente con los valores observados.

Otra comprobación contundente de la teoría de la relatividad general tuvo lugar en 1919. Según la teoría, un rayo de luz proveniente de una estrella debería curvarse al rozar la superficie del Sol a causa del campo gravitatorio que genera la masa solar. Debido a ese efecto, debería observarse una desviación angular en la posición de las estrella (ver Figura 4). Einstein predijo que la deflexión

$\Delta\phi$  de un rayo de luz que pase a una distancia mínima  $r_0$  al centro del Sol debería cumplir con la ecuación

$$\Delta\phi = \frac{4GM_0}{r_0c^2} \quad (10)$$

en la que  $M_0$  es la masa del Sol,  $G$  la constante de gravitación universal y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío. Los cálculos establecían que la desviación tendría que ser de 1,75 grados, de modo que la estrella debería observarse en una posición distinta a la que le correspondería si en la trayectoria de su luz no estuviera próximo el Sol.

Durante el día, es casi imposible observar una estrella cuya luz pase por las proximidades del Sol, a menos que se produzca un eclipse solar. La *British Royal Astronomical Society* organizó dos expediciones bajo la dirección de Sir Arthur Stanley Eddington para comprobar si la predicción teórica se cumplía. Las experiencias tuvieron lugar el 30 de mayo de 1919 en la que el eclipse de sol fue total y se realizaron, una en la Isla del Príncipe, una pequeña posesión portuguesa frente a la costa de África Occidental y la otra en Sobral, al Norte de Brasil.

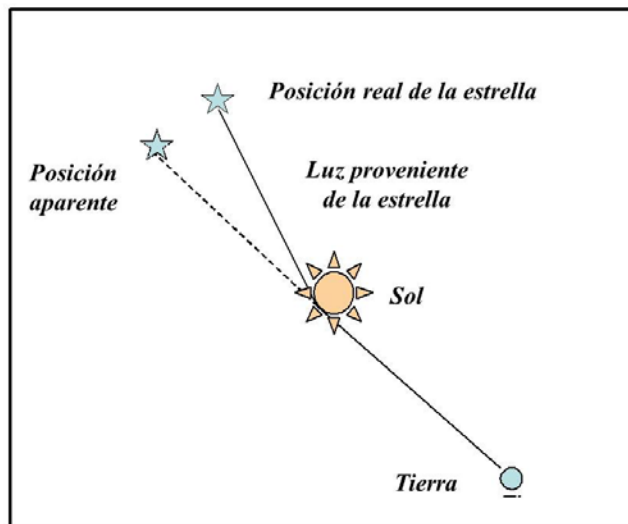


Figura 4.

A través de los telescopios, se tomaron fotografías de ciertas estrellas que brillaban en la noche y, fotografías de esas estrellas durante el eclipse, cuando aparecían en una dirección que bordeaba la corona solar. Eddington calculó que la desviación observada en la Isla del Príncipe era  $1,64 \pm 0,12$  grados de arco, lo que constituyó una corroboración resonante de la teoría de la relatividad general.

Tomando como referencia al espaciotiempo, podemos decir que la luz se curva debido a los campos gravitatorios generados por la masa de los cuerpos. Pero es perfectamente válido hacer la interpretación simétrica consistente en considerar que la luz se propaga en línea recta y que lo que se curva es el espaciotiempo debido a la masa de los cuerpos que generan el campo gravitatorio.

---

(Figura 5). Además de la consideración de propagación rectilínea de la luz, esta última interpretación tiene la ventaja de que el módulo de su velocidad es constante.

La distribución y movimientos de las masas en el espaciotiempo determinan el valor de su curvatura en cada lugar e instante, es decir, en cada evento que allí ocurra. De ellos surgen rayos de luz que siguen una trayectoria lo más rectilínea que les sea posible. En Matemática, estas reciben un nombre especial: se llaman “geodésicas” del espacio. De manera análoga se dice que la luz sigue trayectorias geodésicas en el espaciotiempo. Debido a la presencia de un cuerpo másico, el espaciotiempo está curvado y esta curvatura es tanto mayor cuanto mayor es la masa del cuerpo en cuestión.

Hoy en día, se cuenta con medios alternativos mucho más precisos para medir la desviación lumínica que produce el Sol u otro cuerpo celeste sin la necesidad de esperar eclipse alguno. Uno de los procedimientos es la utilización de una radiofuente, en vez de una fuente luminosa. El mejor ejemplo es el cuasar 3C279, que es ocultado por el Sol cada 8 de octubre. Gracias a la interferometría de larga base, pueden hacerse mediciones de la posición de la radiofuente con una sensibilidad de  $3 \times 10^{-4}$  segundos de arco. Con este método se ha podido ratificar la predicción de Einstein con una precisión de 1 parte en 10.000.

¿A qué se debe nuestra concepción intuitiva de que la luz se propaga en forma rectilínea? Ella se debe a que nuestra capacidad de percepción de los fenómenos está limitada al espacio tridimensional en el que ocurren y si bien asociamos la componente temporal de su producción no la *integramos* para construir mentalmente un espacio tetradimensional. Si viajamos en nuestro vehículo por una carretera percibimos que nos movemos en línea recta sobre el plano que incluye a la carretera. Pero si hiciéramos la abstracción mental de que estamos en una nave espacial observando nuestro propio movimiento *percibiríamos* que, como la superficie terrestre es curva, nuestra trayectoria es curvilínea.

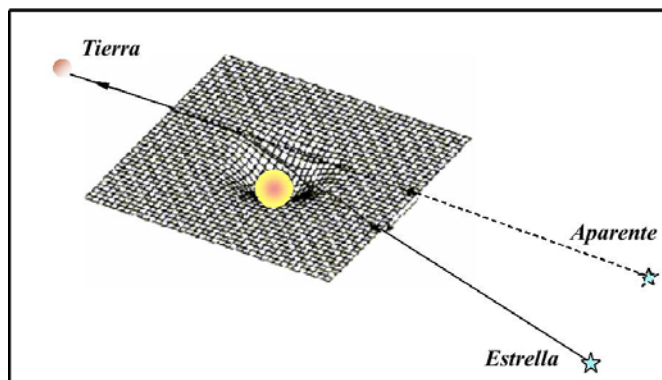
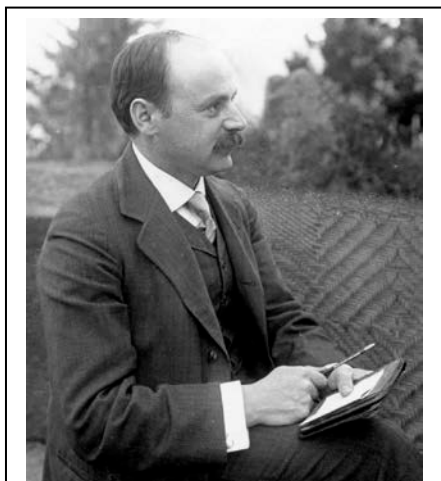


Figura 5



Hoy en día entendemos al espaciotiempo como un *continuum* en el cual podemos definir puntos y líneas rectas. Sin embargo, cuando se encuentra presente materia, esos puntos y líneas no satisfacen los principios de la geometría euclidiana. Einstein demostró que la presencia de materia afecta la geometría arqueando el espacio y el tiempo. La ecuación principal de la teoría de la relatividad general de Einstein implica que la curvatura del espaciotiempo es directamente proporcional a la densidad de la materia que en él se encuentra. La ecuación puede interpretarse como implicando que la curvatura en la geometría del espaciotiempo es materia o viceversa. En este sentido, Einstein ha geometrizado la realidad.



K. Schwarzschild (1873 – 1916)

Un mes después de la publicación de la teoría general de la relatividad de Einstein, el físico alemán Karl Schwarzschild descubrió que las ecuaciones de Einstein conducían a una predicción asombrosa: una región del espaciotiempo puede distorsionarse debido a la masa de tal manera que podría quedar aislada del universo exterior. Los objetos podrían entrar a su interior pero no podrían salir debido a que para escapar a la atracción gravitatoria deberían tener velocidades iguales o superiores a la de la luz. En ese lugar del espaciotiempo la densidad de la materia es lo suficientemente grande como para que el campo gravitatorio que produce no sólo atraiga a los cuerpos sino que desvíen los rayos de luz provenientes de algún cuerpo celeste de tal manera que esa luz no llegue a ningún observador que se encuentre en su trayectoria rectilínea original. Esas regiones se conocen como *agujeros negros*.

Un agujero negro es un volumen en el cual el campo gravitatorio es altísimo. También podríamos decir que es un lugar en el continuum del espaciotiempo de curvatura severa. Los astrofísicos creen que los agujeros negros se forman generalmente por un colapso de una estrella de gran masa. El centro de un agujero negro esférico es infinitamente denso. Está rodeado por un *horizonte de eventos*, una esfera concéntrica que marca el punto de no retorno.

En 1916, Schwarzschild estableció la ecuación que da el tamaño de este horizonte de eventos para cualquier cuerpo celeste, una magnitud conocida desde entonces como el radio de Schwarzschild:

$$R_{Sch} = \frac{2GM}{c^2} \tag{11}$$

donde  $M$  es la masa del agujero negro,  $G$  es la constante de gravitacional universal, y  $c^2$  es la velocidad de la luz. Así, el radio de Schwarzschild para el Sol es de tres kilómetros, mientras el de la Tierra es de apenas un centímetro: si un cuerpo con la masa de la Tierra se comprimiera hasta el extremo de convertirse en un cuerpo de dimensión puntual, (una singularidad, como dicen los físicos),

la esfera (también podría tener otra forma) formada por su horizonte de eventos tendría el modesto tamaño de una de las bolitas que usan los niños en sus juegos.

Los acontecimientos que ocurren fuera del horizonte de eventos de un agujero negro, tienen un comportamiento como cualquier otro objeto cósmico de acuerdo a la masa que presente, por ejemplo, si el Sol se transformara en un agujero negro la Tierra seguiría con los mismos patrones orbitales actuales.

Cualquier cosa que alcance ese horizonte no podrá escapar al empuje hacia el interior aún cuando tenga una fuente ilimitada de combustible y se mueva a velocidades próximas a la de la luz en el vacío. De acuerdo con la relatividad general cualquier cosa que cruce el horizonte de eventos desde el exterior impactará rápidamente en el centro del agujero negro y se reducirá a un punto de densidad incalculable. El nombre de agujero negro fue propuesto por John Wheeler debido que ni siquiera la luz puede escapar del interior de tal lugar.<sup>43</sup>

Cuando la materia cae hacia el agujero negro, desarrolla energía cinética que al calentarse por las fuerzas de mareas gravitatorias ioniza los átomos que están siendo atrapados y estos, cuando alcanzan algunos cuantos millones de grados Kelvin, emiten radiación X, conocida como "radiación de Hawking". Estos rayos X son reemitidos hacia el espacio exterior a medida que la materia traspasa la frontera del horizonte de eventos y es engullida por el agujero negro. La detección de las emisiones de "radiación de Hawking" es uno de los medios para rastrear el cosmos tras la caza de un agujero negro.

Una de las maneras en que se forma un agujero negro, comienza con la extinción de una estrella del tipo "Gigante roja". Estas estrellas tienen masas que van desde diez veces hasta veinticinco veces la masa del Sol. Con el transcurso del tiempo su masa no sólo ejerce atracción sobre la materia vecina sino que la masa interior atrae a sus propias capas superiores comprimiéndolas. A medida que la atracción progresa, la distancia entre las masas interactuantes y, por lo tanto, entre las partículas que las forman, se va reduciendo lo que aumenta la fuerza de interacción entre ellas. De esta manera, al cabo de un tiempo la estrella se convierte en una "enana blanca" que concentra toda su masa en un pequeño volumen que tiene una fuerza de atracción enorme. A nivel atómico, la compresión fuerza a los electrones a moverse cada vez más próximos al núcleo y terminan cayendo en él, donde la interacción con los protones termina formando neutrones y liberando neutrinos. El resultado es una "estrella de neutrones". De acuerdo con el tamaño de esta estrella, los neutrones inician una reacción en cadena, irreversible, en la que implosionan y forman un agujero negro que captura hasta las radiaciones electromagnéticas que cruzan su horizonte de eventos.

---

<sup>43</sup> Las características de los agujeros negros pueden consultarse en el libro de divulgación escrito por Stephen Hawking "*Historia del tiempo. Del Big bang hasta los agujeros negros*" Editorial Crítica (2014) ISBN: 9789879317679.

---

Hay agujeros negros supermasivos que, generalmente, se encuentran en el centro de las galaxias, cuyas masas son millones de veces mayores que la de nuestro Sol, y otros llamados "de masa estelar" cuyas masas son de 24 a 33 veces la masa del Sol. El mayor de estos, descubiertos hasta el presente, fue bautizado IC 10X-1. Ubicado en una galaxia enana IC 10 que se encuentra en la constelación de Casiopea, dista 1,8 millones de años luz de nuestro planeta. Fue detectado en el 2007 y se supone de una masa entre 25 y 30 veces la de nuestro Sol.

La dilatación del tiempo que hemos comentado para los sistemas inerciales es un efecto que también se da en los sistemas no inerciales. Mientras que en la teoría de la relatividad especial, la dilatación del tiempo involucra la velocidad  $v$ , en la teoría general de la relatividad, la dilatación del tiempo involucra la aceleración y los campos gravitatorios. Dos relojes idealmente sincronizados inicialmente, no lo estarán si sufren diferentes aceleraciones o diferentes fuerzas gravitacionales. Este efecto sería especialmente notorio si uno de los dos relojes cayese en un agujero negro. Cuando un reloj cae hacia un agujero negro, en tiempo observado se vuelve cada vez más lento a medida que el reloj se aproxima al horizonte de eventos y — respecto del tiempo que marca un reloj que reposa sobre la Tierra — se detiene completamente al llegar al horizonte y no “transcurre” durante la caída del cuerpo hacia el centro del agujero negro.

### 11. La métrica del espaciotiempo

Lo primero que interesa para establecer relaciones cuantitativas entre los eventos es la métrica del espaciotiempo. La métrica del subconjunto *espacio* no ofrece mayores dificultades, por lo que sólo haremos un breve comentario sobre la métrica del tiempo. Concebimos el tiempo como si fuera una corriente *uniforme*, independiente de la velocidad subjetiva con que observamos que, a su vez, depende de la atención emocional que prestamos al contenido de nuestra experiencia. Uniformidad implica la existencia de una métrica, es decir, de una medida de igualdad. Comparamos intervalos consecutivos de tiempo y tenemos medios para decir cuándo son de la misma longitud. ¿Cuáles son estos medios?

Controlamos nuestros relojes de acuerdo con los relojes oficiales, los que, durante muchos años fueron controlados por los astrónomos. Los astrónomos controlaban sus relojes refiriéndose a las estrellas. Como el movimiento de las estrellas es la imagen reflejada de la rotación de la Tierra, esa rotación constituía nuestro reloj básico. Pero ¿la Tierra en rotación es un reloj seguro, es decir, un reloj que registra un tiempo estrictamente uniforme? Sabemos que el tiempo solar no es exactamente uniforme porque la revolución de la Tierra alrededor del Sol sigue una órbita elíptica. Para evitar el error resultante, los astrónomos medían la rotación de la Tierra respecto de alguna estrella fija en periodos definidos. Esta clase de tiempo, llamado *tiempo sideral*, si bien está libre de las irregularidades causadas por la revolución de la Tierra, alrededor del Sol, no es exactamente uniforme, porque el eje de rotación de la Tierra no permanece orientado en una dirección, sino que efectúa un movimiento de precesión, es decir, sigue un movimiento pendular ligero, en cierto modo parecido al movimiento oscilante de un trompo. La precesión de la Tierra es muy lenta; ya que nuestro planeta necesita 25 mil años para completar un giro de precesión. Todo esto hace que la uniformidad

del tiempo no sea algo directamente observable; sino que debe calcularse mediante ecuaciones matemáticas. El tiempo uniforme es, entonces, una magnitud que el astrónomo proyecta en datos observados por medio de ecuaciones matemáticas que incluyen correcciones a esos datos.

La pregunta que surge es ¿Cómo sabe el astrónomo que sus ecuaciones determinan un tiempo estrictamente uniforme? El astrónomo puede contestar que sus ecuaciones expresan leyes mecánicas y que son válidas porque se derivan de la observación de la naturaleza. Pero para poder probar estas leyes de la observación debemos poseer un tiempo de referencia, es decir, un tiempo uniforme por medio del cual podamos saber si un cierto movimiento es uniforme o no, ya que no hay otro modo de saber si las leyes de la mecánica son verdaderas. De este modo caemos en un razonamiento circular. Para conocer el tiempo uniforme tenemos que conocer las leyes de la mecánica, y para conocer estas leyes tenemos que conocer el tiempo uniforme. La única manera de librarse de este círculo es considerar el problema del tiempo uniforme no como una cuestión de conocimiento, sino de definición. No debemos preguntarnos si es verdad que el tiempo del astrónomo es uniforme; debemos decir que el tiempo astronómico define al tiempo uniforme

Hay procesos físicos que ocurren con más regularidad, o que son más uniformes, que el movimiento de nuestro planeta respecto de las estrellas fijas corregido por ecuaciones matemáticas. Entre ellos, podemos mencionar las oscilaciones de los electrones de los átomos de una variedad de átomos de cesio llamada cesio 133 cuando son irradiados, bajo condiciones estandarizadas, con luz de una determinada frecuencia. Esos procesos físicos nos permiten construir un *reloj estándar*.

Por convención, el reloj estándar es el reloj que convenimos en usar para definir el segundo estándar. El segundo estándar se define como la duración de 9.192.631.770 períodos (ciclos, oscilaciones, vibraciones) de una cierta clase de radiación de microondas en el reloj estándar. Más específicamente, el segundo estándar se define como la duración de 9.192.631.770 períodos de la radiación de microondas requerida para producir la transición de un electrón de cesio 133 entre dos niveles de energía — los que se corresponden con dos líneas de la estructura hiperfina del espectro de ese isótopo — estando los átomos bajo condiciones estandarizadas.

El reloj fuente atómica del National Institute of Standards and Technology F-1, (NIST F-1) que fue adoptado a fines de 1999 como estándar primario para el tiempo en los Estados Unidos, es tan preciso que difiere en menos de un segundo cada 20 millones de años.

El reloj estándar se usa para establecer las unidades de longitud. O sea que el metro depende del segundo. Esto no implica que el tiempo sea más fundamental que el espacio. Simplemente se establece así porque la ciencia es capaz de medir el tiempo con mucha más precisión que el espacio. El metro se define como la distancia que recorre la luz en el vacío durante 0,000000003335640952 segundos o  $1/299,792,458$  segundos. Este número se elige de modo que la distancia sea lo más próxima posible al metro que se definía anteriormente como la distancia entre dos marcas en una barra de platino e iridio que se encuentra en el Observatorio de París.

---

En la teoría de la relatividad, el tiempo que marca un reloj cuya trayectoria es una línea de universo se llama *tiempo propio*. El tiempo propio no es lo mismo que la coordenada temporal (el tiempo que se mediría para los mismos eventos a lo largo de la línea de universo mediante un reloj ideal cuya hora cero está en el origen del sistema de coordenadas). Aunque también se exprese en segundos, el tiempo propio es independiente de la coordenada temporal. Si se sincronizan dos relojes estándar como el NIST F-1 y ambos se encuentran en reposo en el mismo sistema de referencia seguirán sincronizados al cabo de milenios. Pero si uno se mueve respecto del otro, ya sea con movimiento uniforme o con movimiento acelerado comenzará a atrasar. Obviamente, para que ese atraso respecto del otro sea perceptible la velocidad del movimiento debe ser elevada o deberán transcurrir muchísimos años.

La ciencia le asigna números al tiempo debido a que en cualquier sistema de referencia la relación de orden entre los eventos se refleja fielmente en una relación de orden menor: la de los números (fechas) que les asignamos a los eventos. En las teorías fundamentales tales como la de la relatividad los valores que toma la variable tiempo  $t$  son números reales, donde cada número designa a un instante de tiempo. El tiempo es un continuum lineal de instantes similar a un segmento de línea matemática. Por lo tanto, si esas teorías fundamentales son correctas, el tiempo físico es unidimensional y continuo en vez de discreto. De esto, uno no puede asegurar que el tiempo sea lineal y no circular debido a que un segmento de circunferencia es también un continuum lineal, en consecuencia, Cervantes puede haber escrito “El Quijote” en el futuro. Esta circularidad es una posibilidad ya sugerida por los antiguos filósofos estoicos y por Aristóteles. La lógica del término “tiempo” no excluye una estructura no lineal pero no hay razón para creer que ello ocurra.

## **12. La flecha del tiempo**

La unidireccionalidad de los procesos naturales nos da la idea intuitiva de que el tiempo tiene cierta dirección (en rigor tendríamos que decir “sentido”). Si observamos dos fotografías de una misma persona en una de las cuales es un bebé y en la otra es un adulto, no tenemos dudas en afirmar que la foto en la que aparece como bebé es anterior a la otra. Esa dirección ha sido bautizada por Arthur S. Eddington como “flecha del tiempo”. Si bien los procesos naturales nos parecen temporalmente asimétricos, la mayoría de las leyes de la Física, que tratan de describir el comportamiento de la naturaleza, son simétricas respecto del tiempo. Esta aparente contradicción suele ser explicada diciendo que el desarrollo de la Física es limitado y que solo puede establecer las ecuaciones que rigen ciertos procesos considerados “reversibles” en los cuales, al menos en teoría, se puede revertir el sentido de la variable tiempo sin que eso afecte a las leyes que rigen dichos procesos. A mediados del siglo XIX comenzó a desarrollarse una disciplina llamada Termodinámica que estudia los intercambios de energía entre un sistema — encerrado por una superficie geométrica real o ideal, pero perfectamente delimitada — con el medio que lo rodea. La Termodinámica define una propiedad de esos sistemas llamada “entropía” cuya característica es que no puede disminuir en sis-

temas aislados en los que sólo ocurran procesos físicos<sup>44</sup>. Un sistema aislado es aquel que no puede intercambiar ni materia ni energía con el medio que lo rodea. Producida una transformación física en un sistema aislado, si existe otra transformación que lleve a ese sistema a su estado inicial se dice que el proceso es reversible. Podríamos poner como ejemplo de transformación reversible un péndulo oscilando armónicamente en un sistema aislado en el que se ha hecho el vacío. Existen otras transformaciones que una vez producidas no pueden volver espontáneamente a su estado inicial, sino que requieren de algún tipo de trabajo u otra forma de energía. Tales transformaciones se dicen “irreversibles”. La Termodinámica establece que en los procesos físicos reversibles que ocurren en un sistema aislado, la entropía permanece constante mientras que esa propiedad aumenta en los procesos físicos irreversibles.

Esta característica ha hecho que se asocie a la entropía con la flecha del tiempo, aunque hoy en día merece reparos ya que usamos la sucesión de eventos irreversibles que ocurren en el Universo para establecer el orden temporal, pero el Universo no puede considerarse un sistema aislado ya que carece de límites definidos, condición *sine qua non* para que un sistema se considere termodinámico y pueda hablarse con propiedad de “entropía del sistema”.

La llamada flecha del tiempo nos hace “sentir” que el momento presente “se mueve” hacia el pasado. Los eventos presentes parecen fluir retrocediendo cada vez más lejos hacia el pasado. Pero esta noción ¿es una propiedad del tiempo o, por el contrario, una característica de la percepción humana? Tenemos conciencia que el presente es real, pero ¿el futuro lo es? Siempre es plausible pensar que si el futuro fuese real estaría ahora fijo y no tendríamos la libertad de afectar tal futuro. Ese determinismo inevitable se da tanto en algunas concepciones religiosas como concepciones filosóficas. Por supuesto, también existen concepciones religiosas que postulan el libre albedrío así como teorías filosóficas que consideran que el futuro no es real. También existen filósofos que tienen dudas sobre el presente, el rasgo al que nos referimos con el indicativo “ahora”. Si el presente es real ¿Por qué no hay para él un término bien definido en las leyes de la ciencia?

### **13. La cosmología y el origen del tiempo**

En 1922, el físico ruso Alexander Friedmann predijo, a partir de la teoría general de la relatividad, que el Universo debería expandirse. En 1929, el astrónomo norteamericano Edwin Hubble, realizó cuidadosas observaciones de los racimos de galaxias y confirmó que el Universo está experimentando una expansión universal. Cada racimo de galaxia se aleja de los otros<sup>45</sup>. De modo que

---

<sup>44</sup> Caracterizado por la constancia de su composición y de las masas de todas las sustancias presentes.

<sup>45</sup> Según la teoría del Big bang a medida que el Universo se expande, los racimos de galaxias se van separando entre sí, pero sus velocidades van decreciendo a medida se alejan del lugar donde el Big bang se produjo. Los que sostienen esta teoría consideran que en alguna etapa, la expansión se detendrá y, debido a

en algún momento más temprano el Universo debió ser más compacto. Proyectando hacia tiempos anteriores y suponiendo que la gravitación es la principal fuerza que actúa, los astrónomos concluyeron que hace 13,7 mil millones de años ( $\pm 1\%$ ) el Universo se encontraba en estado de tamaño cero y densidad infinita. Debido a que todo sistema que no intercambia calor con su entorno se enfría cuando se expande, los científicos creen que el Universo mismo se estaría enfriando desde hace 13,7 mil millones de años. En consecuencia, en algún momento el Universo estuvo en un estado muy pequeño y de máxima temperatura. Alfred Hoyle bautizó a ese instante del proceso como el “Big bang”. Según la opinión de la mayoría de los científicos, el Universo fue creado en el Big bang y el tiempo mismo comenzó a existir “en ese instante”.

A menudo, las descripciones del Big bang suponen que el primer evento fue también el primer instante del tiempo y que el espaciotiempo no existió fuera del Big bang. Esta vinculación entre el primer evento con el primer tiempo es una posición filosófica y no algo requerido por la ciencia. Ni siquiera está claro si es correcto llamar “evento” al Big bang. El evento Big bang es una singularidad sin coordenadas en el espaciotiempo pero, normalmente, los eventos deben tener coordenadas espaciales. Una respuesta a este problema es alterar la definición de “evento” para permitir que el Big bang sea un evento. Otra respuesta dada por James Hartle y Stephen Hawking es considerar al intervalo de tiempo del pasado cósmico como abierto (en el sentido matemático) al tiempo  $t = 0$  en lugar de considerarlo cerrado y limitado a  $t = 0$ . De modo que buscar la ubicación del Big bang en el tiempo es como recorrer la recta de los números reales positivos hacia números cada vez más pequeños sin alcanzar nunca el número positivo más pequeño. Si Hartle y Hawking tienen razón en que el tiempo es realmente así, entonces el Universo no tuvo un evento inicial sino que tuvo una cantidad finita de tiempo pasado y el término Big bang no se refiere a un evento singular. Pero, en adelante, a fin de simplificar la discusión este artículo se hablará de “el” evento Big bang como si fuera un evento singular.

Hay serias dificultades en defender las implicaciones de la teoría del Big bang sobre el comienzo del Universo. Ellas se basan sobre la suposición de que la expansión universal de los racimos de

---

las interacciones gravitatorias, el Universo comenzará a contraerse, cada vez con mayor intensidad, hasta que, en una suerte de implosión, alcance un estado en el que toda la materia del Universo se concentrará en una singularidad espacio temporal, estado al que llaman Big crunch. A fines de la década de 1990, se reunieron los representantes de los más importantes observatorios astronómicos de todo el mundo para discutir un fenómeno empírico detectado: las galaxias situadas entre siete millones y diez millones de años luz, no sólo se están separando sino que sus movimientos son acelerados. Tres científicos estadounidenses — Saul Perlmutter, del Lawrence Berkeley National Laboratory, Brian Paul Schmidt, de la National University of Australia y Adam Guy Riess, de la Universidad Johns Hopkins, — compartieron el Premio Nobel de Física 2011 por haber establecido que las galaxias están en expansión acelerada. Este hecho, atenta directamente contra la teoría del Big crunch y, por ende, contra la del Big bang. Se ha intentado explicar esa aceleración, suponiendo que además de la atracción gravitatoria hay una fuerza simétrica, la repulsión gravitatoria, cuya constante tiene un valor tan bajo que la repulsión sólo es detectable cuando los cuerpos se encuentran separados a distancias inmensas, como en el caso de estas galaxias. Otras hipótesis vinculan la aceleración con la presencia de *materia oscura*.

---

galaxias puede proyectarse hacia atrás de acuerdo con una cierta ecuación. Aún aceptando como plausible esa proyección, las teorías sobre la gravedad cuántica imponen una restricción muy seria en los  $5,389 \times 10^{-44}$  segundos anteriores al Big bang, llamado *tiempo de Planck*<sup>46</sup>. Los físicos concuerdan que la proyección debe fallar en ese intervalo. En este modelo cosmológico no se puede hablar con seguridad sobre la naturaleza del tiempo en el tiempo de Planck, así como tampoco si el tiempo existió antes de esa era. Si se confirmase una teoría sobre la gravedad cuántica, esta debería suministrar información sobre la era de Planck, lo que le permitiría a los físicos responder a la pregunta ¿Qué provocó el Big bang? Sin embargo, hasta el presente quizás la mejor respuesta sea “Nada, sólo sucedió”. La respuesta teológica “Dios provocó el Big bang, pero Él mismo no existía en el tiempo” es críptica debido a que no está basada sobre una teoría bien detallada y justificada acerca de quien es Dios, cómo provocó el Big bang y cómo puede existir pero no estar “en el tiempo”. Esto hace que sea difícil de entender desde el punto de vista filosófico el comentario de San Agustín que “el tiempo fue creado por Dios”.

#### 14. Viajar en el tiempo

Recordar un evento anterior de nuestra vida puede ser una suerte de viaje en el tiempo mental, si bien hay una diferencia entre experimentar un evento y recordarlo. Debido a que, a lo sumo, es sólo un viaje en el tiempo psicológico, no tiene demasiado interés desde el punto de vista filosófico. Si viajamos en avión desde el Este hacia el Oeste, cada vez que cruzamos una zona horaria, instantáneamente retrocedemos una hora. Lo que realmente ocurre es que cambiamos el sistema de referencia, de modo que esta es una forma trivial de viajar en el tiempo. Si nuestro cuerpo fuera congelado en el año 2018 y descongelado en el 3008, habríamos viajado 90 años en el reloj cronológico, pero sólo unos pocos segundos según nuestro reloj biológico. Este es un caso de viaje biológico en el tiempo y no un caso de viaje en el tiempo físico, de modo que carece de interés para los filósofos. Un cambio en la dirección de la “flecha del tiempo”, por ejemplo, el retroceso del movimiento de un péndulo en el vacío, tampoco se considera un caso de viaje en el tiempo.

Ante la trivialidad de los ejemplos dados en el párrafo anterior el lector estaría tentado a afirmar que es imposible viajar en el tiempo. Sin embargo consideremos algunos casos que nos posibilitan, por ejemplo, viajar hacia el futuro de otra persona. En la paradoja de los mellizos, dada anteriormente, una persona que viaja hacia el espacio exterior alejándose a gran velocidad de su mellizo que queda en la Tierra, cuando regresa ha entrado en el futuro de su mellizo.

---

<sup>46</sup> El *tiempo de Planck* surge de la Mecánica Cuántica aplicada a la Cosmología y es el intervalo de tiempo dado por  $[hG/(2\pi c^5)]^{1/2}$ ; donde  $h$  es la constante de Planck,  $G$  es la constante de gravitación universal y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío. También se lo llama *cronón*. Su valor es  $5,39106(32) \times 10^{-44} s$  y es el intervalo de tiempo más pequeño que puede ser medido.

---



Si Ud. tiene una nave espacial lo suficientemente veloz, puede viajar hacia el año 3018 de nuestra era y ver el futuro de la Tierra. Y no sólo verlo sino también afectarlo. Esta es una consecuencia directa de la dilatación del tiempo descrita en la teoría de la relatividad. Ud. puede viajar hacia el futuro de cualquier persona, aunque Ud. está siempre en su presente. Desafortunadamente, una vez que haya ido hacia el año 3018 (considerado en un sistema de referencia en el cual la Tierra se considera estacionaria) quedará anclado en el futuro de la Tierra. No puede revertir el curso del tiempo en su nave espacial y regresar al siglo XXI de la Tierra. Deberá vivir en el futuro con la consecuencia de que todos sus familiares y amigos han muerto siglos atrás. Las visitas al futuro son permanentes, no temporarias.

En este viaje hacia el año 3018, ¿cuánto tiempo habría transcurrido en su propio reloj? La respuesta depende de la velocidad con que se mueve su nave espacial, la aceleración que pueda adquirir y si sobre Ud. y su nave actúan fuerzas gravitacionales. Cuanto más rápido viaje su nave tanto menos será el tiempo que le llevará llegar — realmente le tomará y no que le parecerá que transcurre. Cuando la velocidad de aproxime infinitesimalmente a la velocidad de la luz el viaje al año 3018 no le llevará prácticamente nada de tiempo. Esto es desde su propia perspectiva. Desde la perspectiva de los observadores que permanecieron estacionarios sobre la tierra vuestro viaje habrá durado mil años.

Claro, Ud. me dirá que no tiene tal nave y que hoy en día es imposible construirla. Por lo tanto, le presento otro ejemplo. Ud. y su familia viven en el décimo piso de un edificio de esta ciudad y su cónyuge le pide que vaya hasta la esquina a comprar el diario. En la calle, el campo gravitacional terrestre es más intenso que en el décimo piso. De acuerdo con la teoría general de la relatividad, si Ud. se dirige a un campo gravitacional más intenso al dejar su departamento y bajar a la calle a comprar el diario, cuando regrese habrá entrado en el futuro de los miembros de su familia que han permanecido en el departamento. Cuando alguien entra en un campo gravitacional relativamente más intenso, su tiempo se retrasa respecto del tiempo de quien no haya entrado en dicho campo. Esto fue probado con el llamado “experimento de la Bahía de Chesapeake”. En 1975, se sincronizaron dos relojes atómicos muy precisos uno de los cuales se embarcó en un avión que sobrevoló la Bahía de Chesapeake durante dos horas mientras que el otro permaneció en tierra. Cuando el avión aterrizó y se controlaron los registros, se comprobó que el reloj que había permanecido en tierra había atrasado respecto del que permaneció en altura. Los cálculos demostraron que el campo gravitatorio terrestre — que para una determinada latitud disminuye con la altitud — retrasa el tiempo alrededor de  $10^{-9}$  segundos por hora<sup>47</sup>.

En cuanto a la posibilidad de viajar al pasado suele ser descartada mediante la suposición metafísica según la cual el mundo nunca contraviene a la lógica. Este es el núcleo de la “paradoja del abuelo”. De acuerdo con esta paradoja, una persona se sube a la máquina del tiempo, viaja hacia el pasado y mata a su abuelo antes de que conozca a su abuela. De modo que previene su propio nacimiento. Por lo tanto, en el momento que partió hacia el pasado en la máquina del tiempo la persona

---

<sup>47</sup> Los detalles del experimento se encuentran en **Calder, N.**, *Einstein's Universe*, Pelican Books, ISBN 0140224076, (1979).

---

existe y no existe. Este resultado viola el principio de no contradicción, de modo que no podemos suponer que existe la posibilidad de este tipo de viaje en el tiempo. Si el viaje en el tiempo ha de existir, no debería permitir cambio alguno en lo que se conoce que ha sucedido. Esta condición es considerada necesaria para aquellos que admiten que pueden existir curvas temporales cerradas en el espaciotiempo. Caso contrario podría ocurrir que alguien mate a Cervantes en la batalla de Lepanto.

Kurt Gödel fue la primera persona, después de Einstein en darse cuenta que la teoría general de la relatividad le permite a un objeto físico, que viajando a una velocidad menor que la de la luz, arribar a su propio pasado<sup>48</sup>. Este viaje requiere curvar el propio espaciotiempo inclinando el cono de luz del objeto en movimiento. La línea del tiempo se curva de manera tal que toca el pasado y puede formar una curva cerrada en el espaciotiempo. Desde el trabajo inicial de Gödel en 1949, matemáticos y físicos teóricos describieron otras máquinas del tiempo<sup>49</sup> o, al menos, universos conteniendo viajes hacia atrás en el tiempo que son consistentes con las ecuaciones de Einstein de la teoría general de la relatividad. Sin embargo otros científicos — como Stephen Hawking — creen que todas esas máquinas del tiempo están excluidas de la teoría general de la relatividad. La teoría general de la relatividad es tan compleja que no siempre está claro, aún para los expertos, lo que esta teoría permite o prohíbe. Otros físicos aceptan que las ecuaciones de Einstein permiten el viaje en el tiempo pero no la toman en consideración porque su concreción es físicamente imposible.



K. Gödel (1906 – 1978)

Las teorías filosóficas sobre el tiempo suelen hacer una distinción entre el pasado y el pasado absoluto. Los eventos en el pasado absoluto de una persona son aquellos que podían haberla afectado directa o indirectamente como observador en un instante dado. Esos son los eventos que están dentro o sobre el cono de luz del pasado (Figura 3). Un evento que sea un punto del pasado absoluto es una característica del espaciotiempo que es independiente del sistema de referencia. Si el evento es de vuestro pasado absoluto, cualquier observador en el Universo estará de acuerdo con que el evento sucedió en vuestro pasado. Cualquier observador de vuestra graduación universitaria estará de acuerdo con que vuestro egreso de la secundaria pertenece a vuestro pasado absoluto. No ocurrirá lo mismo para eventos que están en vuestro pasado pero no en vuestro pasado absoluto.

---

<sup>48</sup> **Gödel, K.**; "An Example of a New Type of Cosmological Solutions of Einstein's Field Equations of Gravitation", *Reviews of Modern Physics* vol: 21 July 1949, pp: 447 – 450.

<sup>49</sup> Véase, por ejemplo, **Frank Tipler** "Rotating cylinders and the possibility of global causality violation", *Physical Review D* vol.9 pp.2203 – 6: 1974.

---

Los eventos del pasado que no están en nuestro pasado absoluto son lo que Eddington llamó “*absolute elsewhere*”. Esta es la región del espaciotiempo conteniendo eventos que no están conectados causalmente con nuestro “aquí y ahora”. Por ejemplo, la estrella más cercana al Sol, Próxima Centauro se encuentra a cuatro años luz de distancia. Cualquier evento que allí suceda *ahora* se encuentra en nuestro *absolute elsewhere* y no puede afectarnos. Una explosión de esta estrella que haya ocurrida cuatro años atrás (o antes) puede afectarnos ahora, pero ningún evento que haya ocurrido allá en los últimos cuatro años puede afectarnos ahora. Nuestro *absolute elsewhere* contiene todos los eventos presentes [los eventos simultáneos con nuestro “aquí y ahora”] y también todos los eventos futuros que no están en nuestro futuro absoluto. Atendiendo a la figura 3, el *absolute elsewhere* es la región del espaciotiempo que no está ni en el cono de luz anterior ni en el posterior al evento presente.

La Teoría de la Relatividad no excluye la posibilidad de enviar información al pasado siempre que quien la envíe logre superar la velocidad de la luz en el vacío (algo hasta ahora no logrado). No obstante ello, las fértiles mentes de algunos físicos teóricos han propuesto una teoría para ese fin, que pueda lograr llegar al pasado sin necesidad de superar la velocidad de la luz. Para ello imaginan a un gusano que para ir de un punto de la superficie de una manzana a otro, no puede desarrollar una velocidad superior a la de la luz. Entonces horada un agujero en el interior de la manzana, en una línea recta que une ambos puntos y puede alcanzar su objetivo aunque su velocidad sea menor que la de la luz.

Estas propuestas suelen amenizar las revistas científicas, pero nosotros compartimos la opinión de Stephen Hawking: "El hecho que no recibamos turistas del futuro, es la prueba contundente de que el viaje al pasado es imposible."

### 15. La teoría causal del tiempo

Se admite que fue Leibniz el primero que construyó una teoría causal del tiempo y que G. Lechallas fue el primero en emplear esa denominación. Sin embargo, la primera formulación especialmente estructurada sobre la base de la relación entre causalidad y tiempo fue hecha en 1924 por Hans Reichenbach<sup>50</sup>. Para definir el orden temporal de los acontecimientos, Reichenbach introdujo varias relaciones básicas entre los eventos. La primera es la de *genidentidad*: *E es genidéntico con E' si envuelven ambos al mismo objeto*. La segunda es la de conexión causal. Por ejemplo, una señal luminosa es una cadena causal, ya que en la terminología de Reichenbach la emisión de tal señal es una de las causas de sus eventuales reflexiones y de su absorción final; cada reflexión es también una de las causas de las reflexiones posteriores y de la absorción final.

Para establecer el orden temporal, Reichenbach postuló:

---

<sup>50</sup> **Reichenbach, H.:** *Axiomatik der relätivischen Raum-Zeit-Lehre*, Vieweg, Braunschweig, 1924.

---

Si  $E_2$  es el efecto de  $E_1$ , entonces se dice que  $E_2$  es posterior a  $E_1$ . Ésta es la definición coordinadora topológica de orden temporal<sup>51</sup>

Obviamente, esta definición solo es aplicable únicamente a pares de eventos que estén conectados causalmente.

En su libro *The Philosophy of Space and Time* Reichenbach, esboza una concepción más general:

1)  $E_2$  es posterior a  $E_1$  si y sólo si es físicamente posible que haya una cadena  $s_1, s_2, \dots, s_k$  tal que para todo  $i$ , desde 1 a  $k - 1$ ,  $s_i$  es una causa de  $s_{i+1}$ ; y tal que  $E_1$  coincide con  $s_1$  y  $E_2$  con  $s_k$ .<sup>52</sup>

El empleo de “físicamente posible” se debe a que la velocidad de la luz es limitante para la conexión de ciertos eventos. Algunos pares de acontecimientos pertenecientes a líneas de universo diferentes no se pueden relacionar por una cadena causal, porque tal conexión equivaldría a decir que hay una señal más rápida que la luz.

2)  $E_1$  y  $E_2$  son *indeterminados en cuanto al orden temporal* si y sólo si ninguno de los dos es posterior al otro.

3) Una asignación  $t$  de números reales a acontecimientos es una asignación de coordenadas topológicamente admisible si y sólo si

- a) si  $E_1$  y  $E_2$  coinciden,  $t(E_1) = t(E_2)$ ;
- b) si  $E_2$  es posterior a  $E_1$ ,  $t(E_1) < t(E_2)$ .

Reichenbach propuso que si  $E_1$  y  $E_2$  son genidénticos, (es decir, involucran al mismo objeto) entonces o bien coinciden o bien son causalmente enlazables. En esta suposición está implícita la idea que el tiempo es topológicamente abierto, es decir, que no hay cadenas causales cerradas. Además, para diferenciar causa de efecto, utilizó el “método de la marca”: Si  $E_1$  es la causa de  $E_2$ , entonces una pequeña variación (una marca) en  $E_1$  se asocia con una pequeña variación en  $E_2$ , mientras que pequeñas variaciones en  $E_2$  no se asocian con variaciones en  $E_1$ . Este método fue bastante criticado porque la referencia a la relación causa efecto que quiso em-



H. Reichenbach (1891 – 1953)

---

<sup>51</sup> Reichenbach, H: *The Philosophy of Space and Time*, Dover, New York, 1958, p. 136.

<sup>52</sup> Reichenbach, H: *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*, Walter de Gruyter, Berlin (trad. ingl. de Maria Reichenbach).

---

plear para establecer una sucesión temporal, lleva implícita de alguna manera, la idea de orden temporal.

La propuesta de Reichenbach fue ampliada por Adolf Grünbaum<sup>53</sup> quien trató de establecer el orden temporal entre eventos no genidéticos. En las formulaciones de la teoría del orden temporal de Reichenbach y Grünbaum se trata de explicar primero el orden temporal de los acontecimientos en una única línea de universo y en explicar después el orden temporal de todos los acontecimientos por la correlación de las líneas de universo (por medio de la relación de conexión causal). Un discípulo de Grünbaum, Bas C. van Fraassen<sup>54</sup> hizo un desarrollo axiomático de la teoría causal del tiempo basado en seis postulados y siete definiciones sin que la relación causal presuponga una sucesión temporal, aunque su teoría no excluye la posibilidad de un tiempo cerrado. También le hizo un agregado a la teoría causal del tiempo, el de *conectabilidad causal* que, según él, es equivalente a cierta relación espacio-temporal entre acontecimientos y lo expresó: *X es causalmente conectable con Y si y sólo si X e Y o bien coinciden espaciotemporalmente o bien están temporalmente separados*. Según este autor, todas las relaciones espacio-temporales se pueden definir en términos de relaciones físicas. El significado que le da lo sintetiza "X e Y son causalmente conectables, significa que es físicamente posible que exista una conexión causal entre X e Y".<sup>55</sup> Consideró que la expresión "causalmente conectado" tiene un uso muy restringido. Su uso no implica ninguna noción general de causalidad, sino que la expresión "X está causalmente conectado con Y" se usa como equivalente a "O X e Y pertenecen a la historia de un mismo objeto o pertenecen a la historia de una misma señal, o coinciden con un par de acontecimientos que tienen esa conexión". Esta concepción la emplea para aclarar que "conectado causalmente", y por tanto, "conectable causalmente" tienen un significado que no es específicamente espacio-temporal.

La definición causal de orden temporal conduce a una indeterminación con respecto a la comparación temporal de hechos ocurridos en puntos distantes. Y esto sucede así debido al carácter limitativo de la velocidad de la luz. El tiempo absoluto, es decir, la simultaneidad no ambigua, existiría en un mundo en el que no hubiera límite superior para la velocidad de las señales. Pero debido a que en nuestro mundo la velocidad de transmisión causal es limitada, no existe absoluta simultaneidad. *La teoría causal del tiempo* explica el significado de la sucesión y la simultaneidad temporales de tal forma que la explicación es aplicable tanto al mundo de la física clásica como a nuestro mundo, en el que la velocidad de la transmisión causal se halla sujeta a un límite superior y la simultaneidad no es definida sin ambigüedad.

---

<sup>53</sup> **Grünbaum A.:** *Philosophical Problems Of Space and Time*, Knopf, New York, 1963. pp, 197 – 203.

<sup>54</sup> **Van Fraassen, B.C. :** *Foundations of the Causal Theory of Time* (tesis doctoral en filosofía, Universidad de Pittsburgh, 1966, cap. I, sec. H2)

<sup>55</sup> **van Fraassen, B.C., (1985):** *An Introduction to the Philosophy of Time and Space*, Columbia University Press, New York, pp. 212 – 218

---

## **16. A modo de conclusión**

Para concluir digamos que el tiempo, como el espacio, no es una entidad ideal de existencia platónica que se percibe por medio de un acto de visión, ni una forma subjetiva de orden impuesta al mundo por el observador humano, como creía Kant. La mente humana es capaz de concebir diferentes sistemas de orden temporal, entre los cuales el tiempo clásico es un sistema y el tiempo de Einstein, con su limitación de la velocidad de transmisión causal, es otro. En esta pluralidad de sistemas posibles, la selección del orden temporal válido para nuestro mundo es una cuestión empírica. El orden temporal formula una propiedad general del universo en que vivimos; el tiempo es real en el sentido en que el espacio es real; y nuestro conocimiento del tiempo no es a priori, sino resultado de la observación. La determinación de la real estructura del tiempo es un capítulo de la Física. A través de las conclusiones de la Física podremos establecer si el tiempo es infinito o si comenzó con el Big bang; si el tiempo es un continuum o si es discreto, si el orden temporal es lineal o cíclico, si tienen validez y factibilidad los modelos de “máquinas del tiempo” propuestos, si el tiempo imaginario resultante de la Mecánica cuántica relativista tiene traducción en nuestro Universo real. Estos y otros problemas del tiempo constituyen los mojones de la ruta del conocimiento a recorrer. La tarea es ardua, el camino es largo y se requerirá mucha dedicación y, sobre todo ... tiempo.

## LECTURAS RECOMENDADAS

**Einstein, A.; (1998)** *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Ed. Debate. Madrid. Una reimpresión de las notas de Einstein de 1916 donde expone de manera bastante simplificada la teoría del título.

**Greene, B.; (2004)** *The Fabric of the Cosmos. Space, Time and the texture of reality*. Alfred A. Knopf. Inc. New York. Aquí se comentan las concepciones modernas sobre teoría cuántica y cosmología y su vinculación con el espaciotiempo.

**Hawking, S.; (2002)** *Historia del tiempo. Del Big bang a los agujeros negros*. Planeta Publishing Corporation. Madrid. El Capítulo 2 está dedicado a las concepciones del espacio y del tiempo, el Capítulo 9 a la flecha del tiempo y el Capítulo 10 a la posibilidad o no de viajar en el tiempo.

**Michio Kaku;** (1994) *Hyperspace*, OUP, Oxford. ISBN 0192861891 El capítulo 11 de este libro muy ameno está dedicado a las máquinas del tiempo.

**Reichenbach, H.; (1967)** *La Filosofía Científica*. Fondo de Cultura Económica. México. El capítulo IX está dedicado al análisis del tiempo.

**Van Fraassen, B. C.; (1968)** *Introducción a la filosofía del espacio y del tiempo*. Ed. Labor. Bs. Aires. Basado en curso dictado por el autor para alumnos de ciencia y de filosofía, su capítulo VI expone con bastante detalle la Teoría causal del tiempo y del espaciotiempo.

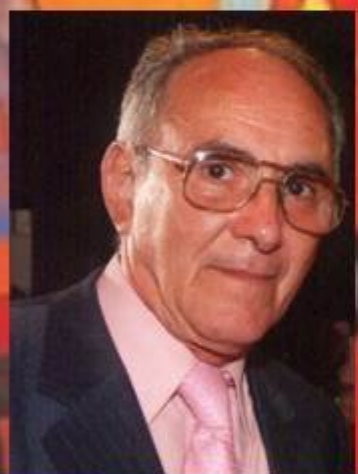








En esta obra el autor vuelca su experiencia docente de casi medio siglo, para presentar un trabajo, dedicado al público en general, sobre el concepto de tiempo en Ciencia y en Filosofía. Con un lenguaje sencillo relata las distintas interpretaciones dadas sobre el tiempo desde la Antigüedad hasta nuestra época, incluyendo la concepción relativista, casi sin desarrollos matemáticos.



Miguel Katz, además de ser Profesor en Química y Licenciado en Enseñanza de la Química, es Doctor en Epistemología e Historia de la Ciencia. Ha sido docente en varias universidades e Institutos terciarios. Ha sido Consultor para el Pro-

grama de las Naciones Unidas para el Desarrollo y fue galardonado con el Premio “Educación en Química” de la AQA

ISBN 978-987-46579-6-1



9 789874 657961